

## Abschlussbericht

für das Verbundprojekt LuFo V-2 OptiHyL

„**Optimierte Hybrid Laminarität am Seitenleitwerk –  
Optimised Hybrid Laminarity on VTP**“

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2016 bis 30.09.2019

Zuwendungsempfänger:	Airbus Defence and Space GmbH,
Förderkennzeichen:	20A1501B
Berichtszeitraum:	01.01.2016 bis 30.09.2019

Erstellt von: Dr. Elmar Bonaccorso & Dr.-Ing. Christian Herrles

Freigabe: Dr.-Ing. Christian Weimer

Datum: 15.01.2020

---

## Inhaltsverzeichnis:

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>13</b>
1.1	Zusammenfassung der relevanten technischen Ergebnisse	13
1.2	Erreichung der Ziele des Vorhabens	15
<b>2</b>	<b>Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>Planung und Ablauf des Vorhabens</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Technik zu Projektbeginn</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenarbeit mit anderen Stellen</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Relevante Ergebnisse Dritter</b>	<b>20</b>
6.1	AP 3100 – Interface Konzept (Titan-Deckleiste)	20
6.2	AP 3200 – Feuchte / Vereisungsproblematik der Mikroperforation	20
6.3	AP 3300 – Anti-Kontamination / Degradation der Mikroperforation	20
<b>7</b>	<b>Änderungen in der Zielsetzung</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Technischer Bericht</b>	<b>21</b>
<b>8.1</b>	<b>Interface Konzept (Titan-Deckleiste)</b>	<b>21</b>
8.1.1	Applikation von Abdeckleisten	23
8.1.1.1	Methode A: Spritzguss der Dichtmasse mit einem festen Anguss	24
8.1.1.2	Methode B: Spritzguss der Dichtmassen mit einem beweglichen Anguss	26
8.1.1.3	Methode C: Abrollen der Abdeckleiste und Unterspritzen mit Dichtmasse	27
8.1.1.4	Methode D: Seitliches Anbringen der Abdeckleiste	28
8.1.2	Re-Applikation von Abdeckleisten	30
8.1.2.1	TGA-Messung	31
8.1.2.2	Stirnabzugsversuche	33
8.1.2.3	Schälversuche	41
8.1.2.4	Zusammenfassung	48
8.1.3	Thermomechanische Untersuchungen von Fügeübergängen	49
8.1.3.1	Chemisch bedingter Schrumpf	52
8.1.3.2	Thermisch bedingter Schrumpf	57
8.1.3.3	Thermisch bedingte Expansion	62
8.1.3.4	Zusammenfassung	68
<b>8.2</b>	<b>Ver-/Enteisung der Mikroperforation</b>	<b>69</b>
8.2.1	Analyse zur Feuchteaufnahme und Konzept zur Feuchtevermeidung	69
8.2.2	Vereisungsversuche im iCORE Windkanal	71
8.2.2.1	Probenherstellung und Versuchsaufbau	71
8.2.2.2	Vereisungsversuche	74
<b>8.3</b>	<b>Anti-Kontamination &amp; Degradation der Mikroperforation</b>	<b>78</b>
8.3.1	Kontaminations- und Reinigungsverhalten von Mikroperforationen	78
8.3.1.1	Mikroperforation, Oberflächenmodifizierung u. Lochverblockung	78
8.3.1.2	Untersuchung der Kontamination von mikroperforierten Titanblechen	83
8.3.1.3	Wasserdurchlässigkeit und operationelle Reinigung	95
8.3.1.4	Zusammenfassung	106
8.3.2	Degradation von oberflächenmodifiziertem Titan Grad 2	107
8.3.2.1	Sanderosion	107

8.3.2.2	Regenerosion	111
<b>9</b>	<b>Aufwendungen und deren Angemessenheit</b>	<b>114</b>
<b>10</b>	<b>Ergebnisverwertung / Fortschreibung des Verwertungsplans</b>	<b>114</b>
<b>11</b>	<b>Planung der nächsten Schritte</b>	<b>114</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur</b>	<b>115</b>
<b>13</b>	<b>Veröffentlichungen und Vorträge</b>	<b>117</b>
<b>14</b>	<b>Liste der erstellten Dokumentation</b>	<b>118</b>

## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1:	HAP3-Strukturplan „HLFC Operationeller Betrieb“.....	15
Abbildung 2:	HAP3 – HLFC operationeller Betrieb Balkenplan mit Meilensteinen.....	16
Abbildung 3:	Airbus A320 HLFC Seitenleitwerk mit hybrid-laminarer Absaugnase im Flugversuch und Details zum aktiven Pumpensystem. [1].....	17
Abbildung 4:	Schematische Darstellung eines Übergangsbereichs zwischen Absaugnase und VTP-Box zur Aufrechterhaltung der hybrid-laminaren Strömung.....	21
Abbildung 5:	Getestete Methoden um komplex geformte Fügeübergänge mit Dichtmasse zu füllen und mit einer Abdeckleiste abzudecken. ....	23
Abbildung 6:	Nutgeometrie sowie Breite und Position der Abdeckleiste (32 mm). ....	24
Abbildung 7:	Vorgehensweise beim Spritzguss der Dichtmasse mit festem Anguss.....	25
Abbildung 8:	Spritzguss der Dichtmasse mit beweglichen Anguss; (a): Technische Zeichnung der getesteten Nutprobe mit Abdeckleiste; (b): Nutprobe (360 mm lang) vor der Dichtmassenapplikation; (c): Nutprobe nach der Härtung der Dichtmasse. ....	26
Abbildung 9:	Abrollen der Abdeckleiste und Unterspritzen mit Dichtmasse. ....	27
Abbildung 10:	Nutgeometrie (360 mm lang) sowie Breite und Position der Abdeckleiste. ....	28
Abbildung 11:	Vorgehensweise Methode D: Dichtmassenapplikation und seitliches Anbringen der Abdeckleiste; a: Maskieren; b: Abdeckleiste mit Klebeband und mit Niederhalter fixieren; c: Dichtmasse applizieren; d und e: Abdeckleiste auf benötigte Position bringen; f: zu viel applizierte Dichtmasse abstreifen; g: Nutprobe nach der Härtung der Dichtmasse. ....	29
Abbildung 12:	Schematische Darstellung eines möglichen laminaren Fügeübergangs am Seitenleitwerk unter Verwendung einer Abdeckleiste (blau).....	30
Abbildung 13:	TGA-Messung von ausgehärteten Dichtmassenproben (Durchmesser: 4 mm, Dicke: 1 mm) nach einer Härtung bei Raumtemperatur für zwei Wochen; (a): Polysulfidbasierte Dichtmasse-A mit einer Anfangsmasse von 15,718 mg; (b): Polythiotherbasierte Dichtmasse-B mit einer Anfangsmasse von 21,179 mg.....	32
Abbildung 14:	Stirnabzugsproben; (a): Verwendeter Stempel; (b): Fertige Stirnabzugsprobe in der Vorrichtung, bestehend aus zwei Stempeln, die mit Dichtmasse auf eine Aluminiumplatte verklebt sind. ....	34
Abbildung 15:	Vorgehensweise für die Probenherstellung der Stirnabzugsversuche: (a): PTFE Vorrichtung mit eingesetzten Stempeln; (b): Dichtmassenapplikation auf Stempel; (c): Aufsetzen der Aluminiumplatte auf Stempel mit Dichtmasse. ....	35



Abbildung 16:	Stirnabzugsversuchsprobe; (a): Aufbau einer Stirnabzugsprobe mit Heizfolie und Isolation; (b): Isolation aus gehärteter Dichtmasse auf einer Aluminiumplatte; (c): Heizfolie mit Thermoelement; (1): Stempel mit Dichtmassenschicht (grau) auf Aluminiumplatte (schwarz); (2): Thermoelemente; (3): Heizfolie; (4): Dichtmassenschicht als Isolator; (5): Aluminiumplatte.....	36
Abbildung 17:	Versuchsaufbau für die Stirnabzugsversuche; (a): Versuche bei 20 °C; (b): Versuche mit Heizfolie und Isolation.....	37
Abbildung 18:	Exemplarische Darstellung der Stirnabzugsversuche mit der Dichtmasse-B bei einer Prüftemperatur von 120 °C; (a): Temperaturverlauf des Thermoelements unterhalb des ersten Stempels (orange Linie) und des Thermoelements unterhalb des zweiten Stempels (blaue Linie); (b): Verlauf der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit beim Abziehen des ersten und zweiten Stempels.....	39
Abbildung 19:	Verlauf der maximalen Zugfestigkeiten bei den Stirnabzugsversuchen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur.....	40
Abbildung 20:	Herstellung einer Schälversuchsprobe; (a): Verwendete Nutprobe mit einer Breite von 36 mm, einer Tiefe im tiefen Nutbereich von 3,5 mm und einer Tiefe im flachen Nutbereich von 1 mm [18]; (b): Fixierte und maskierte Nutprobe mit applizierter Dichtmasse; (c): Aufgesetzte Abdeckleiste; (d): Spannvorrichtung; (e): Fertige Schälversuchsprobe nach der Härtung.....	42
Abbildung 21:	Versuchsaufbau für die Schälversuche: (a): Versuchsaufbau für die Versuche bei einer Prüftemperatur von 20 °C; (b): Schälversuchsprobe in Vorrichtung mit Heizfolie (rote Kabel) und Thermoelement (grünes Kabel) für die Versuche bei Prüftemperaturen von 40 °C, 60 °C, 120 °C und 170 °C.....	43
Abbildung 22:	Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Schälversuche am Beispiel der Versuche bei einer Prüftemperatur von 60 °C; (a): Nutprobe mit Dichtmassenrückstände; (b): Abdeckleiste; (c): Verlauf des Schälwiderstandes in Abhängigkeit von der Zeit; Die vier unterschiedlich farbigen Linien stehen für die vier getesteten Proben.....	45
Abbildung 23:	Exemplarische Darstellung der Bestimmung des maximalen und konstanten Schälwiderstands am Beispiel des Schälversuches bei einer Prüftemperatur von 20 °C.....	47
Abbildung 24:	Ermittelter Schälwiderstand der Schälversuche in Abhängigkeit von der Temperatur; Volllinie mit Quadrat: konstanter Schälwiderstand; Strichlinie mit Raute: maximaler Schälwiderstand.....	47

Abbildung 25: Probenvorbereitung; (a): Abmaß der getesteten Nutgeometrie; (b): 3D Modell einer mit Dichtmasse gefüllten und mit einer Abdeckleiste applizierten Probe; (c) Position der Abdeckleiste auf einem Klebeband; (d) Positionierung des Klebebands mit Abdeckleiste auf einer Nutprobe. ....	49
Abbildung 26: Probenherstellung; (a): Fixierung der Nutprobe mit Abdeckleiste in der Spritzgussvorrichtung; (b): mit Dichtmasse gefüllte Probe nach der Härtung; (c): Probe nach der Entfernung des Klebebands. ....	50
Abbildung 27: Nutproben mit polysulfidbasierter Dichtmasse-A und Abdeckstreifen; Dicke der Abdeckstreifen: 0,05 mm (a), 0,10 mm (b), 0,15 mm (c) und 0,20 mm (d). ....	51
Abbildung 28: Taktiles Messgerät Dektak XT mit eingelegter Probe (gehärtete Dichtmasse mit Abdeckleiste darauf). ....	52
Abbildung 29: Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h. ....	53
Abbildung 30: Probe mit einem 0,10 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h. ....	54
Abbildung 31: Probe mit einem 0,15 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h. ....	55
Abbildung 32: Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h. ....	56
Abbildung 33: Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberflächen bei 22 °C, 10 °C, 0 °C, -10 °C, -30 °C, -40 °C und -50 °C; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung bei 22 °C. ....	58
Abbildung 34: Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberflächen bei 22 °C, 10 °C, 0 °C, -10 °C, -30 °C, -40 °C und -50 °C; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung bei 22 °C. ....	59
Abbildung 35: Maximaler thermisch bedingter Schrumpf im tiefen Nutbereich (Rauten) und im flachen Nutbereich (Kreise) in Abhängigkeit von der Dichtmassentemperatur; (a): Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (b): Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen. ....	60

Abbildung 36:	Oberfläche der Proben bei 22 °C vor den Tieftemperaturversuchen (Tag 1; dunkelrote Linien) und danach (Tag 2; hellrote Linien); (a): Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (b): Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen. ....	61
Abbildung 37:	Klima während der Auslagerung der Proben bei erhöhter Temperatur; (a): Temperatur während der Untersuchung; (b): Relative Luftfeuchtigkeit während der Untersuchung; (c): Konditionen während einer Lagerung in der Klimakammer. ....	63
Abbildung 38:	Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.....	64
Abbildung 39:	Probe mit einem 0,10 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.....	65
Abbildung 40:	Probe mit einem 0,15 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.....	66
Abbildung 41:	Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.....	67
Abbildung 42:	Oberflächenstrukturiertes Titan; (a): REM Aufnahme von Titanoxid Nanoröhrchen [19]; (b): REM Aufnahme von einer mit einem Pikosekundenlaser strukturierten Titanoberfläche [20]. ....	69
Abbildung 43:	Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit der Mikroperforation; (a): Darstellung des Wassersäulenprüfstandes; (b): Beispiel einer mikroperforierten Ronde; (c): Wassersäule in Abhängigkeit von der Zeit der unterschiedlichen Oberflächenmodifizierten Titanronden. ....	70
Abbildung 44:	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Vereisung von mikroperforierten Proben im Vereisungswindkanal iCORE (Airbus Materials X, Taufkirchen). ....	71

Abbildung 45:	Herstellung einer mikroperforierten Versuchsprobe für die Vereisungsversuche im iCORE Windkanal; (a): Biegevorrichtung; (b): Vorgebogenes mikroperforiertes Titanblech (Dicke: 0,8 mm); (c): Seitenteile der Versuchsprobe aus Acrylglas; (d): Mittels Verschraubung gefügte Versuchsprobe; (e): In den Vereisungswindkanal iCORE installierte Versuchsprobe; (f): Anschluss für Drucksensor; (g): Absaugvorrichtung mit Drehschieberpumpe Hena 101 (1), Regelventil (2), Massendurchflussmesser F-113AC (3) und Kondensatabscheider (4).....	73
Abbildung 46:	Titanoberfläche nach der Strukturierung mit TiO <sub>2</sub> Nanotubes [24].	74
Abbildung 47:	Windgeschwindigkeit $v$ [m/s] und Totaltemperatur $T_t$ [°C] im iCORE.....	75
Abbildung 48:	Vereisungsversuche unter der Testkondition Raueis (SAT = 20 °C; TAS = 50 m/s; LWC = 0,3 g/m <sup>3</sup> ) mit der mikroperforierten NACA 0024 ähnlichen Versuchsprobe ohne Oberflächenmodifizierung (links) und mit TiO <sub>2</sub> Nanotubes und hydrophoben Sealing MecaSurf (rechts).....	76
Abbildung 49:	Vereisungsversuche unter der Testkondition Klareis (SAT = -5 °C; TAS = 80 m/s; LWC = 1,0 g/m <sup>3</sup> ) mit der mikroperforierten NACA 0024 ähnlichen Versuchsprobe ohne Oberflächenmodifizierung (links) und mit TiO <sub>2</sub> Nanotubes und hydrophoben Sealing MecaSurf (rechts).....	77
Abbildung 50:	Mikroperforierte Titanprobe; (a): Makroskopisches Bild der Probe; (b): REM-Aufnahme eines Lochs (Probenrückseite).....	78
Abbildung 51:	Lochabstand und -durchmesser der untersuchten mikroperforierten Proben; (a): Lochabstand der Proben xx-600 und xx-900 in horizontaler (x) und vertikaler (y) Richtung; (b): Lochdurchmesser der Proben mit einem Lochabstand von 600 µm und 900 µm von der Vorder- und Rückseite.....	79
Abbildung 52:	Titanoberfläche nach Strukturierung; (a): TiO <sub>2</sub> -Nanotubes [26]; (b): Mittels N4-Prozess erzeugte Strukturierung [25].	81
Abbildung 53:	Bestimmung der Verblockung von mikroperforierten Proben mittels hochauflösendem Scanner; (a): Probenscan unter Verwendung einer Flächenleuchte; (b): Eingescannte Probe vor der Insektenkontamination; (c): Eingescannte Probe nach der Insektenkontamination; (d): Mit der Software „ImageJ 1.50i“ markierte offene Löcher.....	82
Abbildung 54:	Abbildung 8: Goldfliege <i>Lucilia sericata</i> .....	83

Abbildung 55:	Prüfstand zur Untersuchung der Auswirkung von Insektenkontamination auf die Mikroperforation bzw. die Absaugfunktion; (a): Kontaminationsprüfstand; (b): Mikroperforierte Probe und Kontaminationsvorrichtung; (c): Adapter für Laubbläser mit integriertem Druckluftanschluss; (1): Unterdruckkammer; (2): Vakuumpumpe; (3): Mikroperforierte Probe; (4): Modifizierter Laubbläser; (5): Druckluftanschluss; (6): Massendurchflusssensor; (7): Regelventil; (8): Wasserabscheider; (9): Hochgeschwindigkeitskamera.	84
Abbildung 56:	Durchflussmessung vor der Oberflächenmodifizierung (Anlieferungszustand) der in Tabelle 6 (siehe Seite 85) aufgeführten Proben mit der in Abbildung 55 dargestellten Absaugvorrichtung; Volllinien: Mikroperforierte Proben mit einem Lochabstand von 600 µm; Strichlinien: Mikroperforierte Proben mit einem Lochabstand von 900 µm; Linien mit Rauten: Mikroperforierte Proben ohne Oberflächenmodifizierung; Linien mit Quadrate: Mikroperforierte Proben mit Nanotube Strukturierung; Linien mit Dreiecken: Mikroperforierte Proben mit N4-Prozess Strukturierung.	85
Abbildung 57:	Durchflussmessung vor der Oberflächenmodifizierung (Linien mit Rauten), nach der Strukturierung (Linien mit Quadrate) und nach der Funktionalisierung (Linien mit Dreiecken) von den Proben mit einem Lochabstand von 600 µm (Volllinien) und 900 µm (Strichlinien); (a): Mikroperforierte Proben mit Nanotube Strukturierung; (b): Mikroperforierte Proben mit N4-Prozess Strukturierung.	86
Abbildung 58:	Messung der Lochgröße in Abhängigkeit von der Strukturierung und Funktionalisierung; (a): Vorderseite; (b): Rückseite.	87
Abbildung 59:	Änderung des Durchflusses der Proben Ti-600 und Ti-900 vor und nach einer Reinigung mit VE-Wasser und ProCare (Spülmaschinenreiniger) im Ultraschallbad; Volllinien: Durchflussmessung vor der Reinigung; Strichlinien: Durchflussmessung nach der Reinigung; Linien mit Rauten: Proben mit einem Lochabstand von 600 µm; Linien mit Quadraten: Proben mit einem Lochabstand von 900 µm.	88
Abbildung 60:	Messung des Kontaktwinkels von VE-Wassertropfen auf den mikroperforierten Titanproben im unbehandelten (Balken mit Quadrat), strukturierten (Balken mit Dreieck) und funktionalisierten (Balken mit Kreis) Zustand.	89
Abbildung 61:	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Insektenkontamination; (1): Modifizierter Laubbläser; (2): Hochgeschwindigkeitskamera; (3): Mikroperforierte Probe; (4): Absaugkammer; (5): Drucksensoren; (6): Wasserabscheider; (7): Massendurchflussmesser; (8): Regelventil; (9): Vakuumpumpe.	90
Abbildung 62:	Insektenrückstände nach einer Kontamination mit 20 Insekten; (a): Ti-600; (b): Na-600; (c): Ti-900; (d): Na-900.	91



Abbildung 63:	Verblockungsgrad der Mikroperforation nach einer Kontamination mit 20 Insekten. ....	91
Abbildung 64:	Fluggeschwindigkeit der Insekten vor dem Aufprall; Kontamination I bis Kontamination IV: die Proben wurden in jeder Kontaminationsphase mit fünf Insekten kontaminiert. ....	92
Abbildung 65:	Kontaminationsversuche von mikroperforierten Titanproben unter Verwendung der in Abbildung 55 dargestellten Absaugvorrichtung; (a): Relativdruck in Abhängigkeit von der Anzahl kontaminierter Insekten; (b): Massendurchfluss in Abhängigkeit von der Anzahl kontaminierter Insekten. ....	93
Abbildung 66:	Änderung des Relativdruckes und des Verblockungsgrades in Abhängigkeit von der Anzahl kontaminierter Insekten. ....	94
Abbildung 67:	Versuchsaufbau zur Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit und des Konzeptes zur operationellen Reinigung; (a): Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus: (1): Modifizierter Laubbläser, (2): Wasserdüse, (3): Mikroperforierte Probe, (4): Absaugkammer, (5): Drucksensoren; (6): Wasserabscheider, (7): Massendurchflussmesser, (8): Regelventil, (9): Vakuumpumpe, (10): Videokamera, (11): Lichtquelle; (b): Modifizierter Labbläser mit montierter Wasserdüse; (c): Beregnung einer mikroperforierten Probe. ....	95
Abbildung 68:	Unterdruck- und Durchflussmessungen während der Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit am Beispiel der Probe Ti-600; $p_i$ : Mittelwert des Referenzdruckes; $p_{III}$ : Mittelwert während dem Besprenkeln mit Wasser; $p_{IV}$ : Mittelwert nach dem Besprenkeln. ....	96
Abbildung 69:	Druckänderung durch Wasseraufnahme der Proben mit einem Lochabstand von 600 $\mu\text{m}$ (a, c und e) und der Proben mit einem Lochabstand von 900 $\mu\text{m}$ (b, d und f) nach der in Abbildung 68 dargestellten Vorgehensweise bei unterschiedlichen Soll-Relativunterdrücken: -10 hPa (a und b), -20 hPa (c), -40 hPa (d und e) und -100 hPa (f). ....	97
Abbildung 70:	Durchflussänderung durch Wasseraufnahme der Proben mit einem Lochabstand von 600 $\mu\text{m}$ (a, c und e) und der Proben mit einem Lochabstand von 900 $\mu\text{m}$ (b, d und f) nach der in Abbildung 68 dargestellten Vorgehensweise bei unterschiedlichen Soll-Relativunterdrücken: -10 hPa (a und b), -20 hPa (c), -40 hPa (d und e) und -100 hPa (f). ....	98
Abbildung 71:	Bilder der Probenrückseite während der Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit von mikroperforierten Proben in Phase II (vgl. Abbildung 68); (a): Ti-600; (b): Ti-900; (c): Na-600; (d): Na-900; (e): N4-600; (f): N4-900. ....	101

Abbildung 72:	Unterdruck- und Durchflussmessungen während der Reinigungsversuche am Beispiel der Probe Ti-600; $p_I$ : Mittelwert des Referenzdruckes; $p_{II}$ : Mittelwert während dem Besprenkeln mit Wasser; $p_{III}$ : Mittelwert nach der Reinigung.....	103
Abbildung 73:	Ermittelte Druckunterschiede bei den Reinigungsversuchen von kontaminierten mikroperforierten Proben (mit 20 Insekten); Balken mit Quadrat: Unterdruck der kontaminierten Proben vor der Reinigung ( $p_I$ ); Balken mit Dreieck: Unterdruck während dem Besprenkeln mit Wasser ( $p_{II}$ ); Balken mit Kreis: Unterdruck nach dem Besprenkeln mit Wasser ( $p_{III}$ ). .....	103
Abbildung 74:	Ermittelte Massendurchflüsse bei den Reinigungsversuchen von kontaminierten mikroperforierten Proben (mit 20 Insekten); Balken mit Quadrat: Durchfluss der kontaminierten Proben vor der Reinigung ( $m_I$ ); Balken mit Dreieck: Durchfluss während dem Besprenkeln mit Wasser ( $m_{II}$ ); Balken mit Kreis: Durchfluss nach dem Besprenkeln mit Wasser ( $m_{III}$ ). .....	104
Abbildung 75:	Verblockte Löcher der Probe Ti-600 nach der Kontamination mit 20 Insekten (a) und nach dem Besprenkeln mit Wasser (b). .....	105
Abbildung 76:	Ermittelter Verblockungsgrad bei den Reinigungsversuchen von kontaminierten mikroperforierten Proben; Balken mit Quadrat: Verblockungsgrad nach der Kontamination mit 20 Insekten; Balken mit Dreieck: Verblockungsgrad nach dem Besprenkeln mit Wasser. ....	105
Abbildung 77:	Untersuchung der Sanderosion; (a): Sanderosionsprüfstand; (b): Geschwindigkeitsverteilung der Sandpartikel während der Erosionsversuche; (c) - h): Beispielhafte Darstellung einer Probe nach unterschiedlichen Erosionsschritten. ....	108
Abbildung 78:	Vergleich der Kontaktwinkelverläufe nach unterschiedlich applizierten Sandmassen.....	109
Abbildung 79:	Vergleich der Rollwinkelverläufe nach unterschiedlich applizierten Sandmassen.....	110
Abbildung 80:	Vergleich der Rauheit nach unterschiedlich applizierten Sandmassen.....	111
Abbildung 81:	Untersuchung der Regenerosion; (a): Schematische Darstellung des Regenerosionsprüfstands; (b): Beispiel eines Erosionsprogrammes; (c): Beispiel einer erodierten Aluminiumprobe.....	112
Abbildung 82:	Untersuchung der Regenerosion; (a): Titanoberfläche mit Nanotubes und superhydrophober Beschichtung nach Regenerosion; (b): Titanoberfläche mit Laserstrukturierung und superhydrophober Beschichtung nach Regenerosion.....	113

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1:</i>	<i>Massenabnahme der Dichtmassenproben bei der TGA-Messung. ....</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 2:</i>	<i>Probenmatrix für die Stirnabzugsversuche mit Dichtmasse-A und Dichtmasse-B. ....</i>	<i>33</i>
<i>Tabelle 3:</i>	<i>Bruchbilder der Stirnabzugsproben. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabelle 4:</i>	<i>Probenmatrix für die Schälversuche mit Dichtmasse-A. ....</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 5:</i>	<i>Oberfläche der Schälversuchsproben bei unterschiedlichen Prüftemperaturen. ....</i>	<i>46</i>
<i>Tabelle 6:</i>	<i>Verwendete Proben. ....</i>	<i>80</i>
<i>Tabelle 7:</i>	<i>Testmatrix der Kontaminationsversuche mit den Proben Ti-600 und Na-600 (Lochabstand von 600 µm) und Ti-900 und Na-900 (Lochabstand von 900 µm). ....</i>	<i>90</i>



## 1 Aufgabenstellung

### 1.1 Zusammenfassung der relevanten technischen Ergebnisse

#### Abstract

In the frame of the national funded LuFo V-2 project OptiHyL, Airbus Materials X has characterised in a laboratory scale the requirements and the handling of an HLFC-Technology (Hybrid Laminar Flow Control) in the application field of a VTP (Vertical Tail Plane) with respect to operational conditions like icing, contamination, rain and moisture. In the main work package 3 (HAP 3), which was coordinated by Airbus Materials X, the behaviour of filler materials in the joint gap between VTP-box and suction nose as well as the understanding of the clogging mechanisms of the micro-perforation caused by insects, water, ice and erosion was investigated.

In work package 3100 (AP-3100), new methods for filling complex shaped joint gaps with sealants and cover strips were developed and evaluated. On the one hand, the effect of a chemical and thermal sealant shrinkage and it's interaction with the cover strip was investigated. On the other hand, the influence of higher temperatures ( $T > 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) regarding sealant expansion and cover strip deformation was characterised. For simplifying the removal of cover strips on top of sealants, a heating foil based method was developed.

The analysis of moisture or water absorption by the micro-perforations as well as an icing wind tunnel campaign was carried out in work package 3200 (AP-3200). It was shown, that a surface modification (surface structuring by anodisation or by laser treatment and a subsequent surface functionalisation with a hydrophobic coating system) reduces the water permeability significantly. To enable the testing of micro-perforated samples in the iCORE (Icing and Contamination Research Facility) wind tunnel at Airbus Materials X, a new test setup with a NACA-like micro-perforated airfoil was designed and developed.

In work package 3300 (AP-3300), the contamination and cleaning of micro-perforations as well as the degradation of surface modified titanium grade 2 (material used for VTP suction nose) was investigated. For structuring the surface, galvanic processes were applied (TiO<sub>2</sub> nanotubes and N4 process). The results of the tests show a clear correlation between the degree of contamination, pore clogging and pressure variation in the vacuum chamber. Furthermore, it could be demonstrated that applying suction through the micro-perforations from the inner side and simultaneously sprinkling water (deionised water at room temperature) from the outer side is suitable for removing insect residues from the micro-perforated surface. To test the degradation of the surface modified grad 2 titanium samples, sand and rain erosion tests were performed and evaluated with contact angle, roll off angle, roughness and optical microscope measurements.

## Zusammenfassung

Airbus Materials X hat im Rahmen des Förderprojekts OptiHyL in LuFo V-2 die Anforderung und Handhabung einer hybriden HLFC-Technologie (Hybrid Laminar Flow Control) im operationellen Betrieb am Beispiel eines Seitenleitwerks (VTP: Vertical Tail Plane) bezüglich der relevanten Umwelteinflüsse (Eis, Kontamination, Regen, Feuchtigkeit) im Labormaßstab analysiert. In dem von Airbus Materials X geleiteten Hauptarbeitspaket 3 (HAP 3) wurde das Verhalten von Füllmassen am Fügeübergang zwischen Seitenleitwerksbox und Absaugnase untersucht und ein Verständnis für die Verschließung der Mikroporen der Absaugnase durch Insekten, Wasser, Eis und Erosionsrückstände erarbeitet.

Im Arbeitspaket 3100 (AP-3100) erfolgte die Entwicklung einer Methode mit der komplex geformte Fügeübergänge unter Verwendung von Dichtmassen und Abdeckleisten eben gefüllt werden können. Es wurde zum einen die Auswirkung des chemisch und thermisch bedingten Schrumpfens von Dichtmassen auf die Abdeckleiste untersucht. Zum anderen wurde der Einfluss von erhöhter Temperatur (60 °C) hinsichtlich einer Dichtmassenexpansion und einer dadurch verbundenen Verformung der Abdeckleiste charakterisiert. Darüber hinaus wurde eine Methode zur vereinfachten Entfernung von Abdeckleisten mittels Heizfolien auf luftfahrtqualifizierten Dichtmassen entwickelt und getestet (Stirnabzugsversuche und Schälversuche).

Die Analyse zur Feuchte bzw. Wasseraufnahme von Mikroperforationen und die Durchführung von Vereisungsversuchen erfolgten im Arbeitspaket 3200 (AP-3200). Es konnte gezeigt werden, dass durch eine Oberflächenmodifizierung (Oberflächenstrukturierung anhand einer Anodisierung bzw. Laserbehandlung und anschließende Oberflächenfunktionalisierung mit hydrophoben Lacksystemen) die Wasserdurchlässigkeit signifikant gesenkt wird. Ferner wurde eine Versuchsmethode entwickelt, mit deren Hilfe NACA ähnliche Versuchsproben mit einer Mikroperforation im Vereisungswindkanal iCORE (Icing and Contamination Research Facility) bei Airbus Materials X getestet werden können.

Im Arbeitspaket 3300 (AP-3300) wurde das Kontaminations- und Reinigungsverhalten von Mikroperforationen sowie die Degradation von oberflächenmodifizierten Titan Grad 2 (Material der VTP Absaugnase) untersucht. Die Strukturierung der Oberflächenmodifizierung erfolgte hierbei galvanisch (TiO<sub>2</sub>-Nanotubes und N4-Prozess). Die Ergebnisse der Kontaminationsversuche zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Grad der Kontamination, Verblockung der Löcher und Druckabfall in der Unterdruckkammer. Weiter konnte anhand von Reinigungsversuchen gezeigt werden, dass eine Reinigung durch Anlegen eines Unterdrucks und gleichzeitigem Besprenkeln der Mikroperforation mit Wasser (VE Wasser; Raumtemperatur) geeignet ist um Insektenrückstände von der mikroperforierten Oberfläche zu entfernen. Für die Untersuchung der Degradation von oberflächenmodifiziertem Titan Grad 2 wurden Sand- und Regenerosionsversuche durchgeführt und mittels Kontaktwinkel, Rollwinkel, Rauheit und Auflichtmikroskopie bewertet.

## 1.2 Erreichung der Ziele des Vorhabens

Alle Ziele seitens Airbus Materials X wurden gemäß der Beschreibung des Gesamtverbundvorhabens erreicht. Die wirtschaftlichen und technischen Erfolgsaussichten haben sich nicht verändert. Es wurde eine kostenneutrale Verlängerung um sechs Monate vorgenommen (Verschiebung vom 30.06.2019 auf den 30.09.2019).

## 2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die bei Airbus Central R&T – Materials X vorhandene Expertise und die enge Verzahnung der Arbeiten mit dem Geschäftsbereich Airbus Operations GmbH in Bremen waren ideale Voraussetzungen zum Erreichen der Projektziele. Airbus Materials X verfügt über ein komplett ausgestattetes experimentelles Aerodynamiklabor mit Vereisungs- und Kontaminationswindkanal (iCORE) sowie Sand- und Regenerosionsprüfstände (P-JET). In dieser Form ist das ein Alleinstellungsmerkmal.

## 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das HAP3 – HLFC operationeller Betrieb unterteilt sich in drei Unterarbeitspakete und betrachtet wichtige Aspekte für den operationellen Betrieb hybrid-laminarer Flügelvorderkanten (siehe Abbildung 1).



Abbildung 1: HAP3-Strukturplan „HLFC Operationeller Betrieb“.

Abbildung 2 zeigt die Meilenstein- und Balkenplanung für HAP3. Sämtliche Aktivitäten innerhalb des Hauptarbeitspaketes HAP3 – HLFC operationeller Betrieb wurden verantwortlich durch

Airbus Materials X geleitet und bearbeitet. Die richtungsweisenden Vorgaben hinsichtlich des Interfacedesigns und der operationellen Rahmenbedingungen wurden seitens der Airbus Operations GmbH an gegebener Stelle aufgestellt und vorgegeben.

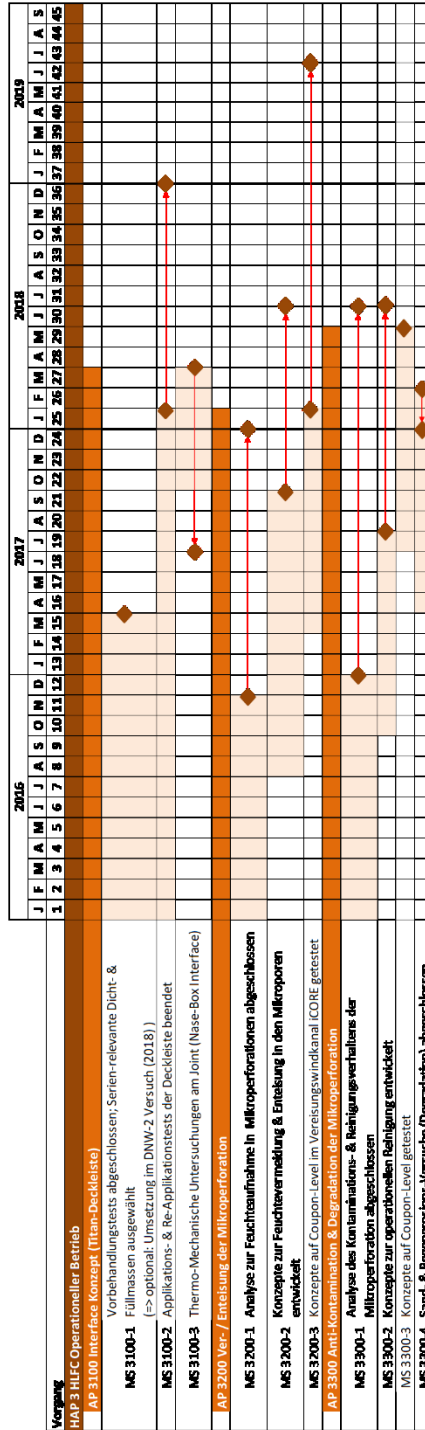


Abbildung 2: HAP3 – HLFC operationeller Betrieb Balkenplan mit Meilensteinen.

## 4 Stand der Technik zu Projektbeginn

Die HLFC Technologie wurde beginnend in den 80er und verstärkt in den 90er Jahren, aufbauend auf den Erkenntnissen und Beschränkungen des Einsatzbereiches der natürlichen Laminarhaltung am Flugzeug zur Reduzierung des Reibungswiderstandes im Flug, untersucht. Die letzten Projekte zur HLFC Technologie wurden in Europa 2004 abgeschlossen. Mit Hilfe dieser Projekte und Untersuchungen konnte die grundsätzliche Funktion der Grenzschichtabsaugung an großen Transportflugzeugen nachgewiesen werden. Ein wichtiger Meilenstein war der Flugversuch mit der Grenzschichtabsaugung an der Vorderkante eines Airbus A320, mit dem die Anwendbarkeit der Absaugtechnik bei einem Airbus nachgewiesen wurde (siehe Abbildung 3).

Da mit diesem System viele unterschiedliche Absaugverteilungen getestet werden sollten, war es von vorneherein sehr komplex ausgelegt. Es hatte neun unabhängige Absaugkammern, die über Ventile einzeln angesteuert werden konnten. Da das System schon in kleinen Flughöhen, also bei großen Reynoldszahlen arbeiten sollte, hatte es daher einen überdimensionierten Kompressor mit einer komplizierten Elektronik für den Einschaltvorgang. Darüber hinaus mussten Kompromisse hinsichtlich der Fertigung eingegangen werden.



**Abbildung 3: Airbus A320 HLFC Seitenleitwerk mit hybrid-laminarer Absaugnase im Flugversuch und Details zum aktiven Pumpensystem. [1]**

Mit diesem Flugversuch wurden die theoretischen Grundlagen zur Entstehung des Umschlagens der Strömung zur Turbulenz und die Verhinderung der frühen Transition durch Grenzschichtabsaugung untersucht und in ersten Validationsversuchen praktisch überprüft. Um die Lauflänge der laminaren Grenzschicht zu detektieren, wurden bisher vor allem Infrarotkameras in Verbindung mit Beschichtungen an der Flugzeugkomponente eingesetzt. Hier ist die Entwicklung eines entsprechenden Sensors zur operationellen Überwachung der Transitionslage und damit der Funktion der Grenzschichtabsaugung notwendig.

Der Übergang der laminaren zur turbulenten Strömung wird bei der HLFC Technologie deutlich (vom Staupunkt bis zu 30% Chordlänge) über die Fügestelle zwischen Seitenleitwerksbox und Absaugnase verlagert. Hierbei muss sichergestellt sein, dass die Fügestelle mit geeigneten Füllmassen passgenau – möglichst ohne Maskierung – entsprechend den hohen Anforderungen der aerodynamischen Oberflächenglätte gefüllt ( $\pm 0,1$  mm) und der Schrumpf der Füllmasse vorgehalten wird. Fügeübergänge werden heutzutage nach dem Fügen mit Füllmasse gefüllt und nach einer gewissen Härtezeit lackiert. Heutzutage ist es möglich auch breite Nutgeometrien ( $< 75$  mm) eben zu füllen. Durch den chemisch und thermisch bedingten Schrumpf, der Alterung und mechanischer Belastung tritt eine Formänderung des Fügeübergangs auf. Dies kann dazu führen, dass der zulässige Toleranzbereich für aerodynamische Übergänge überschritten wird. Um die Formänderung besser vorhersagen zu können, soll eine Abdeckleiste für das Einglätten des Fügeübergangs verwendet werden. Im LuFo IV-4 Projekt LaWOp (Laminar Wing Operation) wurden die materialtechnischen Grundlagen zur Füllmassenapplikation von Airbus Materials X erarbeitet. Es konnten hierbei unterschiedliche Nutgeometrien mit unterschiedlichen Füllmassen (polysulfidbasiert und polythioetherbasiert) mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,3$  mm gefüllt werden.

Die Verlängerung der laminaren Grenzschicht ist nur gewährleistet, wenn die Mikroporen frei von Wasser, Eis oder Kontaminationsrückständen sind. Bezüglich der Kontamination oder Vereisung von mikroperforierten Metallcoupons gibt es keine systematische Datenbasis auf die zurückgegriffen werden kann um Lösungen für das Kontaminations- oder Vereisungsproblem zu finden oder zu erarbeiten. Airbus Materials X zeichnet eine mehrjährige Erfahrung bei Vereisungs-, Kontaminations-, und Erosionsuntersuchungen aus. Es gibt Erfahrungswerte und Lösungen für nicht-perforierte Bleche, welche in den Projekten AEROMUCO (AEROdYNAMIC surfaces by advanced MULTifunctional COatings; [www.aeromuco.eu](http://www.aeromuco.eu)), HAIC (High Altitude Ice Crystals; [www.haic.eu](http://www.haic.eu)) und STORM (efficient ice protection Systems and simulation Techniques Of ice Release on propulsive systeMs; [www.fp7-storm.eu](http://www.fp7-storm.eu)) erarbeitet wurden. Im Projekt AEROMUCO wurden biologische, organische und anorganische Oberflächenbeschichtungen entwickelt um der Vereisung und der Insektenkontamination entgegenzuwirken. Im Projekt HAIC wurden u.a. die Vereisung von Oberflächen durch den Aufprall von Eiskristallen untersucht und Strategien zur aktiven Enteisung ausgearbeitet. Im Projekt STORM wurden eisabweisende Oberflächenbeschichtungen auch für Bereiche in Triebwerken, wo die Oberflächen hohen Temperaturen und Erosionslasten ausgesetzt sind, entwickelt. Es bleibt jedoch zu testen, ob und wie diese Erfahrungen auch auf perforierte Bleche angewendet werden können. Daher ist der wichtigste Schritt die Durchführung von grundlegenden Untersuchungen der in-service Bedingungen (Eis, Wasser, Insektenrückstände, Erosion) welche zur Porenverschließung führen können.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Mit nachfolgenden Firmen/Instituten erfolgte im Rahmen von OptiHyL eine Zusammenarbeit:

- Das **Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahlentechnik (IWS)** Dresden wurde mit der Nanostrukturierungen von Titanproben mittels Lasertechnologie beauftragt.
- Das **Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)** Bremen wurde mit der Erstellung einer Studie zur Untersuchung der Reinigungsmöglichkeiten auf mikroperforierten Coupons und zur Erarbeitung von Konzepten zur Kontaminationsreduzierung beauftragt.
- Das **DNW (German-Dutch Wind Tunnels)** wurden beauftragt Windkanalversuche an einem großen 3D VTP Modell (1:1 in Profilrichtung; in der Höhe verkleinert) mit einem vereinfachten HLFC Design durchgeführt.



## **6 Relevante Ergebnisse Dritter**

### **6.1 AP 3100 – Interface Konzept (Titan-Deckleiste)**

Als Basis für die Untersuchungen bei Airbus Materials X stellte der Verbundpartner Airbus Operations GmbH sämtliche Details des Konstruktionsprinzips und strukturelle Vorgaben zur Verfügung und spezifizierte weiter die genauen Anforderungen an das Interface Konzept sowie dessen fertigungsseitige und operationelle Handhabungen. Die Auswahl der zu verwendenden Materialien, wie z.B. zur Applikation und Fixierung der Deckleisten etc. fand ebenfalls im engen Austausch mit dem Verbundpartner Airbus Operations GmbH statt.

### **6.2 AP 3200 – Feuchte / Vereisungsproblematik der Mikroperforation**

Die relevanten Umgebungs- bzw. Betriebsbedingungen, bei denen die Feuchte- und Wasseraufnahmeuntersuchungen wie auch die Vereisung stattfanden, wurden in Abstimmung mit dem Verbundpartner Airbus Operations GmbH festgelegt. Die mikroperforierten Ti-Coupons für die Tests wurden vom Verbundpartner Airbus Operations GmbH geliefert.

### **6.3 AP 3300 – Anti-Kontamination / Degradation der Mikroperforation**

Die Arbeiten wurden maßgeblich durch Airbus Materials X durchgeführt. Jedoch hat ein sehr enger Austausch mit und eine Richtungsweisung durch den Verbundpartner Airbus Operations GmbH (Airbus M&P Surface Technology) stattgefunden. Der Verbundpartner Airbus Operations GmbH hat bereits umfangreiche und langjährige Entwicklungsarbeiten zum Thema Insektenkontamination und Reinigungsfähigkeit von unterschiedlichen Oberflächen sowohl hybrider wie auch natürlich laminarer Vorderkanten durchgeführt.

Der Verbundpartner Airbus Operations GmbH hat die in der Vergangenheit experimentell sowohl in Windkanalversuchen als auch beim A320 Flugtests durchgeführten Studien zur Kontamination gesichtet und entsprechende Anforderungen für das Arbeitspaket AP-3300 abgeleitet.

Eine weitere wesentliche Basis bezüglich der Richtungsweisung dieser Aufgabenstellung stellte der durch die Verbundpartner Airbus Operations GmbH und Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführte Windkanalversuch am DNW (German-Dutch Wind Tunnels) dar, bei dem unter anderem künstliche Oberflächenstörungen aufgebracht und hinsichtlich ihrer Beeinflussung auf eine hybrid-laminare Strömung analysiert wurden.

## **7 Änderungen in der Zielsetzung**

Die Gesamtzielsetzungen haben sich gegenüber des Antrags im Wesentlichen nicht geändert.



## 8 Technischer Bericht

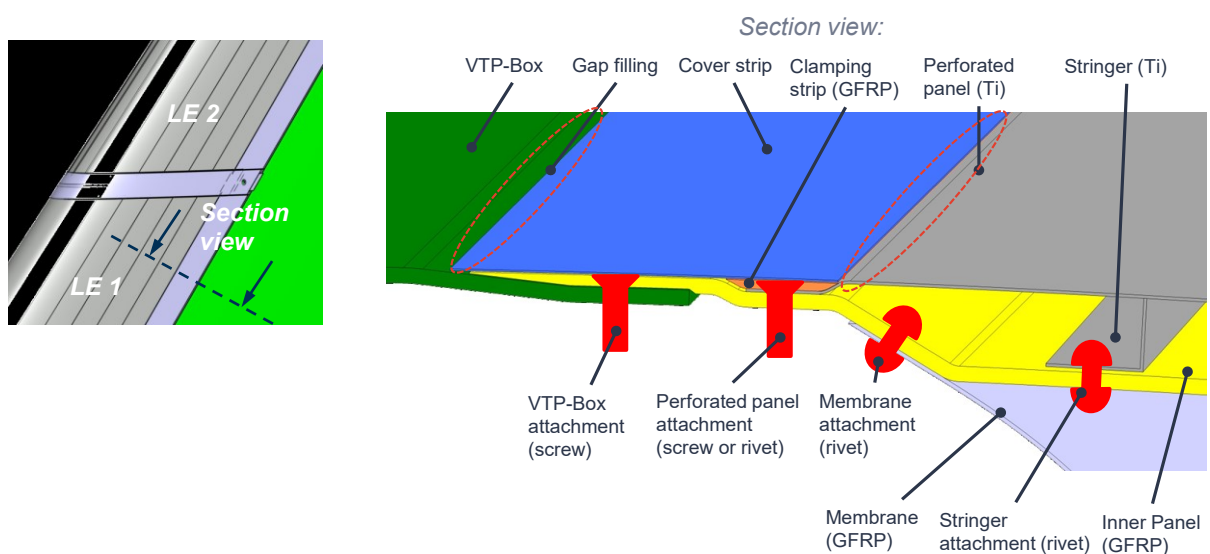
### 8.1 Interface Konzept (Titan-Deckleiste)

Anforderungen an eine Adaption der neu entwickelten hybrid-laminaren Flügelvorderkanten an bereits bestehende Leitwerkskonstruktionen [2] sowie Anforderungen an deren einfache und schnelle Austauschbarkeit im operationellen Betrieb bei den Kunden [3], gepaart mit den aerodynamischen Anforderungen an die Gewährleistung einer laminaren Strömung [4] zwingen zu einem geschickten adaptierfähigen Umkonstruieren des heutigen Übergangsbereichs zwischen Absaugnase an Flügelvorderkante und Leitwerksbox.

Schrauben- oder Nietköpfe als potentielle 3D Störungen für das Aufrechterhalten einer laminaren Strömung sind über einen weiten Bereich flächig abzudecken. Gleichzeitig muss ihre leichte Zugänglichkeit und Austauschbarkeit gewährleistet sein. Resultierende Stufen und/oder Spalte müssen die strikten aerodynamischen Toleranzvorgaben erfüllen; besonders Rückwärtsstufen sind zu vermeiden und entstehende Spalte sind in geeigneter Weise zu füllen. Auch ist mit optischen Ansprüchen seitens der Kunden an die Leitwerke zu rechnen, da die Leitwerke kundenindividuell optisch gestaltet werden sollen.

Eine großflächige Abdeckung von Schrauben- und Nietreihen mit elastischer aerodynamischer Dichtmasse, wie sie im Zusammenhang mit den natürlich laminaren Flügelaktivitäten untersucht werden [5], [6] ist aufgrund von thermomechanischen Schrumpfeffekten und, im Falle eines dünnen Auftrags, von Durchdrückeffekten der Schrauben-/Nietköpfe für die vorliegende Aufgabenstellung ungeeignet. Zu stark aushärtende Dichtmassen lassen sich dagegen später nur schwer wieder rückstandsfrei entfernen ohne Gefahr zu laufen, das Bauteil zu beschädigen.

Ein möglicher konstruktiver Lösungsansatz ist das Versenken der Schrauben- und Nietreihen und das anschließende Abdecken mit einer wieder entfernbaren Deckleiste (schematisch in Abbildung 12 dargestellt).



**Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Übergangsbereichs zwischen Absaugnase und VTP-Box zur Aufrechterhaltung der hybrid-laminaren Strömung.**

Mit Hilfe einer umfassenden Design-for-Value Analyse wurde dieses Konzept in mehreren Workshops zusammen mit den relevanten Fachdisziplinen aus Design, Engineering, Fertigung, Montage und In-Service mit anderen Lösungsvorschlägen verglichen, bewertet und final als das einzig gangbare für eine Applikation an bestehenden Flugzeugprogrammen ausgewählt [7].

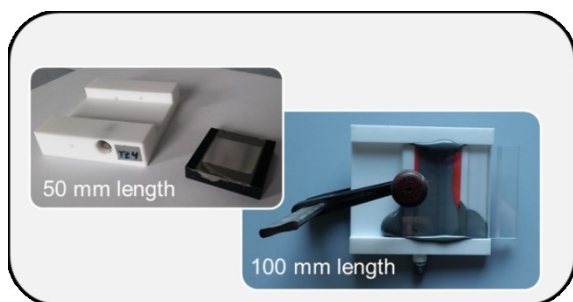
Innerhalb des Arbeitspaketes AP3100 wurde dieses Konzept hinsichtlich der fertigungs- und in-service relevante Tauglichkeit (Applikation, Re-Applikation, etc.) untersucht. Dabei ist es wichtig, die im Rahmen der natürlich laminaren Entwicklungen bereits umfassend erarbeiteten Verhalten aerodynamischer Dichtmassen bei Spaltfüllung, Stufenregulierung und Schrauben- bzw. Nietkopfabdichtung wie die manuell und/oder automatisierbaren Applikationsmöglichkeiten mit einfließen zu lassen. Eine umfassende Zusammenstellung und Wissensaufbereitung steht hierfür seitens Airbus zur Verfügung [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

Aufgrund des gewählten neuen Anbindungskonzeptes müssen bestehende Abdichtprozesse neu durchdacht und gegebenenfalls angepasst werden. Insbesondere die Abdeckung von mit Dichtmasse gefüllten Fügeübergängen mit einem Abdeckstreifen (Stahl, Titan, GFK, ...) ist neu. Die hierbei auftretenden komplexen Wechselwirkungen werden heruntergebrochen und anhand unterschiedlicher Versuche untersucht. Neben der Applizierbarkeit der Dichtmasse (es müssen sowohl tiefe Nutbereiche wie auch flache Nutbereiche gefüllt werden), ist der chemische und thermische Schrumpf von Dichtmassen zu untersuchen. Insbesondere die Auswirkungen einer Schrumpfung oder Expansion der Dichtmasse auf den Abdeckstreifen sind zu untersuchen.

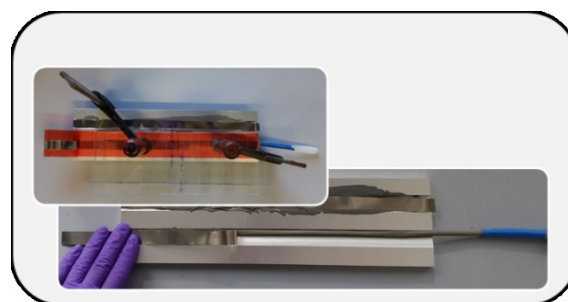
## 8.1.1 Applikation von Abdeckleisten

Um eine geeignete Methode für die Applikation der Dichtmasse und das Anbringen der Abdeckleiste zu finden, wurden vier unterschiedliche Vorgehensweisen definiert und getestet (siehe Abbildung 5). Die Applikationsuntersuchungen wurden im Labormaßstab an Aluminiumroben, mit entsprechenden Nutgeometrien, durchgeführt. Jedoch stand die Übertragbarkeit der Methoden auf großflächige Anwendungen im Vordergrund. Die mit grün umrahmte Methode D hat sich bei den Versuchen als die vielversprechendste herausgestellt (Abbildung 5-d).

a) **Methode A:** Spritzguss der Dichtmasse mit einem festen Anguss.



b) **Methode B:** Spritzguss der Dichtmasse mit einem beweglichen Anguss.



c) **Methode C:** Abrollen der Abdeckleiste und Unterspritzen mit Dichtmasse.



d) **Methode D:** Dichtmassenapplikation und seitliches Anbringen der Abdeckleiste.

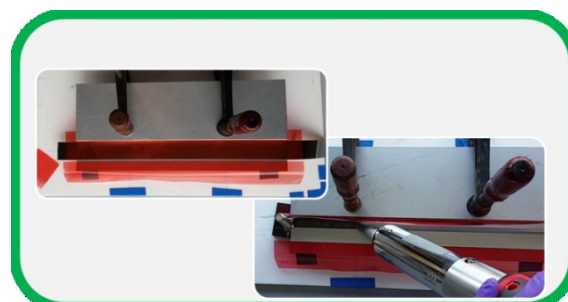
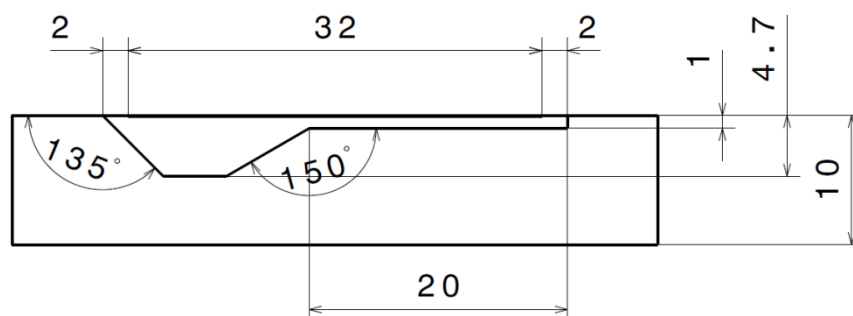


Abbildung 5: Getestete Methoden um komplex geformte Fügeübergänge mit Dichtmasse zu füllen und mit einer Abdeckleiste abzudecken.

Nachfolgend werden die vier getesteten Methoden näher beschrieben.

## 8.1.1.1 Methode A: Spritzguss der Dichtmasse mit einem festen Anguss

Die Verwendung eines Spritzgussprozesses erschien zu Beginn sehr vielversprechend. Im Vergleich zu einer standardmäßig durchgeführten Dichtmassenapplikation muss hierbei weder eine Düse geführt noch die Dichtmasse anschließend geglättet werden. Sogar komplex geformte Nutgeometrien (flacher und tiefer Nutbereich) können in einem Schritt mit Dichtmasse gefüllt werden. Die Spritzgussmethode wurde an Aluminiumnutproben mit einer Länge von 50 mm und 100 mm angewendet. In Abbildung 6 sind die Nutgeometrie und die Abdeckleiste dargestellt.



**Abbildung 6: Nutgeometrie sowie Breite und Position der Abdeckleiste (32 mm).**

Der in Abbildung 7 dargestellte Prozess wird anhand von zwei unterschiedlichen Nutproben (50 mm bzw. 100 mm lange Nut) beschrieben. Vor dem Spritzgießen der Dichtmasse wurde die Abdeckleiste mit einem Klebeband an der Oberseite der Nut fixiert (vgl. Abbildung 7-a und Abbildung 7-b). Nach der Fixierung der Abdeckleiste wurde die Nutprobe in eine Spritzgussvorrichtung montiert und mit Dichtmasse gefüllt (vgl. Abbildung 7-c und Abbildung 7-d). In Abbildung 7-e und Abbildung 7-f ist die 100 mm lange Nutprobe nach der Härtung der Dichtmasse dargestellt. Die 100 mm lange Nutprobe konnte nicht den Anforderungen entsprechend gefüllt werden. Die während des Spritzgussprozesses entstehenden Drücke sind unter anderem von der Länge der zu füllenden Nut abhängig.

### **Folgende Vor- und Nachteile wurden identifiziert:**

- + Kurze Nutproben (50 mm) können sehr exakt gefüllt werden.
- + Der Prozess ermöglicht ein genaues Anbringen der Abdeckleiste.
- + Durch das Abdecken mit Klebeband wird eine ebene Oberfläche geschaffen.
- Bei längeren Nutformen entstehen sehr hohe Drücke.
- Bei einer Anwendung am VTP muss ein entsprechender Anguss sichergestellt sein.

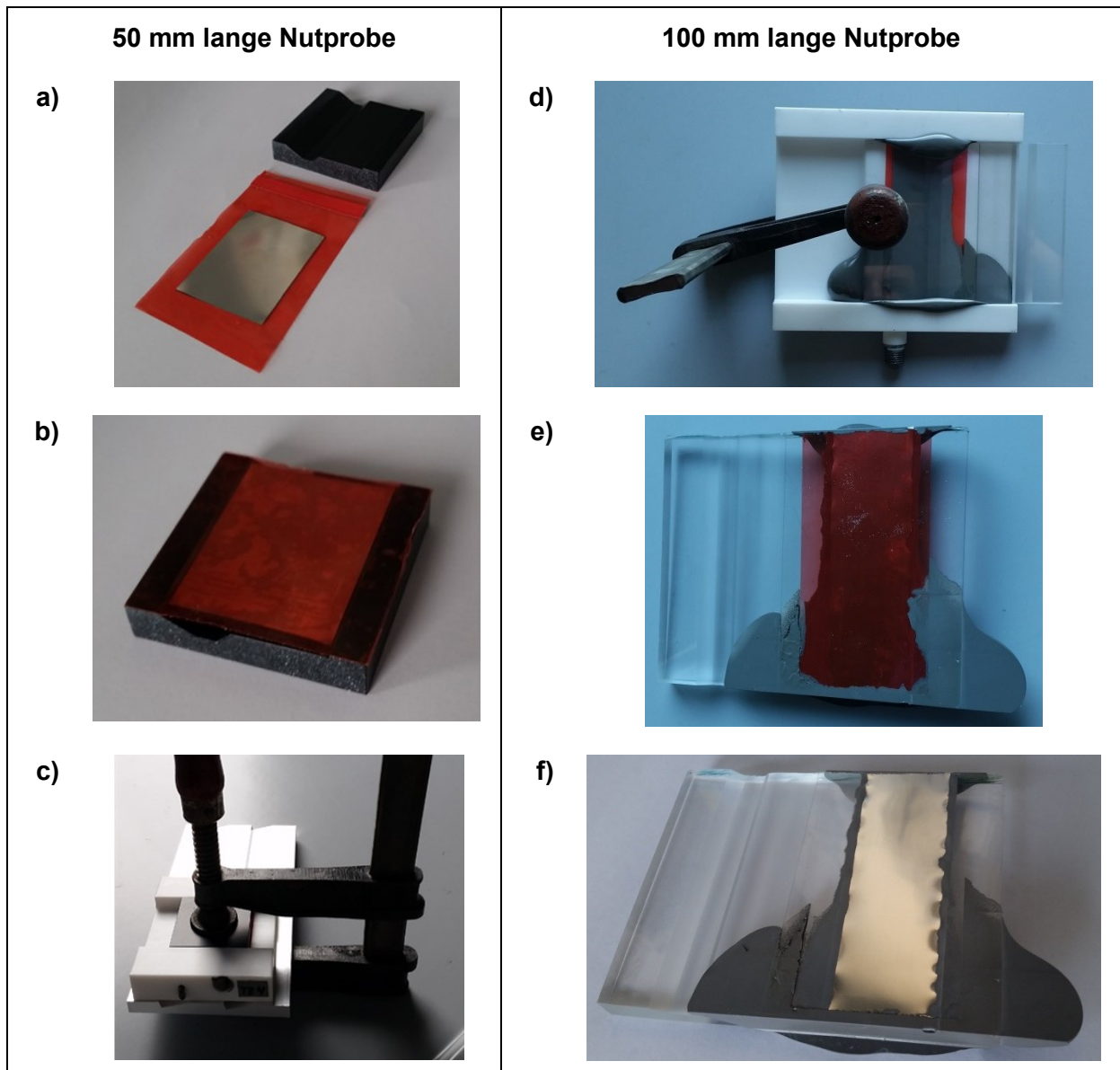


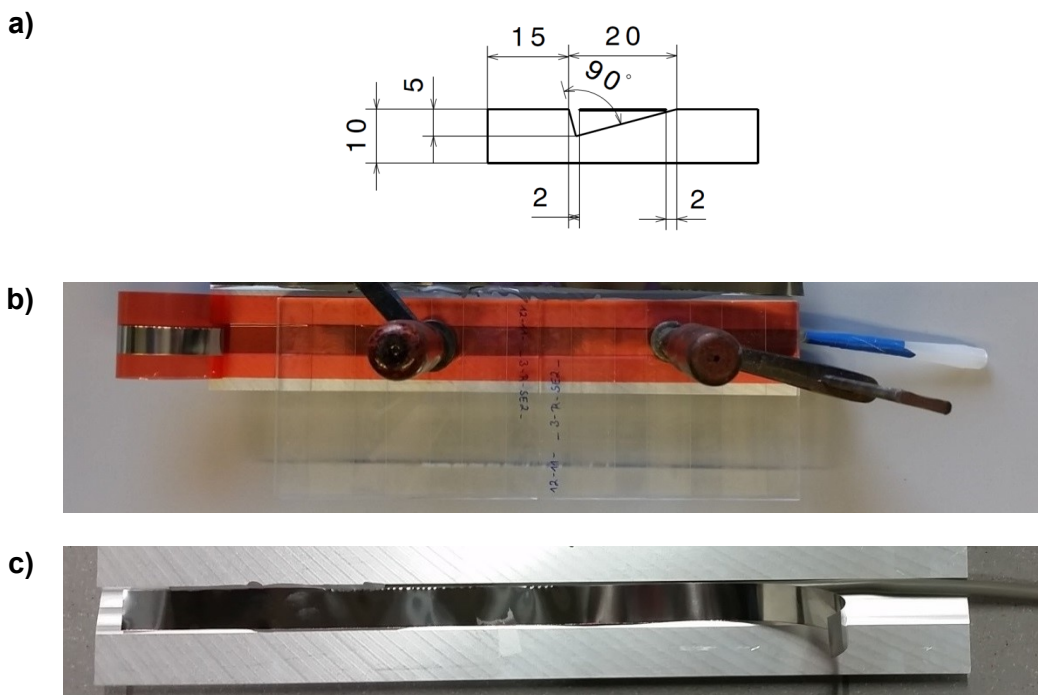
Abbildung 7: Vorgehensweise beim Spritzguss der Dichtmasse mit festem Anguss.

## 8.1.1.2 Methode B: Spritzguss der Dichtmassen mit einem beweglichen Anguss

Um den hohen Druck bei einem Spritzgussprozess mit festen Anguss zu vermeiden, wurde die Dichtmasse lokal mit einem Schlauch unter die Abdeckleiste appliziert. Der Schlauch wird hierbei während der Dichtmassenapplikation entlang der Nut bewegt. Die Versuche wurden an der in Abbildung 8-a dargestellten Nutgeometrie durchgeführt. Die Abdeckleiste wurde hierbei mit einem Klebeband fixiert. Zusätzlich wurde ein Niederhalter montiert, um die Abdeckleiste während des Spritzgussprozesses auf Position zu halten (vgl. Abbildung 8-b). In Abbildung 8-c ist die Nutprobe mit gehärteter Dichtmasse dargestellt. Während der Dichtmassenapplikation wurde der Schlauch durch den entstehenden Druck geweitet, sodass der Versuch bereits nach ca. 100 mm unterbrochen werden musste.

### Folgende Vor- und Nachteile wurden identifiziert:

- + Geringer Druck während der Dichtmassenapplikation auf die Abdeckleiste.
- + Der Prozess ermöglicht ein genaues Anbringen der Abdeckleiste.
- + Durch das Abdecken mit Klebeband wird eine ebene Oberfläche geschaffen.
- Es entstehen hohe Drücke im Schlauch (geringer Durchmesser, große Länge).
- Schlauch muss während der Applikation mit definierter Geschwindigkeit bewegt werden.



**Abbildung 8: Spritzguss der Dichtmasse mit beweglichen Anguss; (a): Technische Zeichnung der getesteten Nutprobe mit Abdeckleiste; (b): Nutprobe (360 mm lang) vor der Dichtmassenapplikation; (c): Nutprobe nach der Härtung der Dichtmasse.**



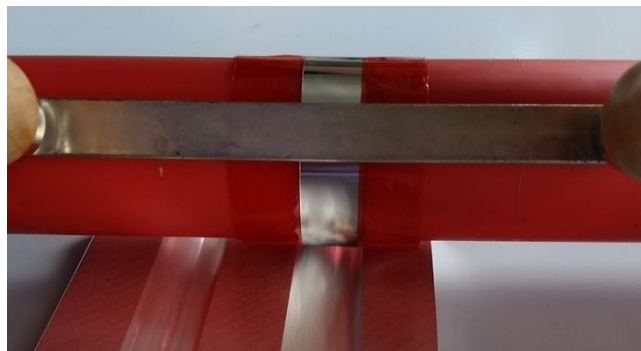
## 8.1.1.3 Methode C: Abrollen der Abdeckleiste und Unterspritzen mit Dichtmasse

Hierbei wurde die Abdeckleiste zusammen mit einem Klebeband auf die zu füllende Nut gerollt (siehe Abbildung 9-a) und gleichzeitig mit Dichtmasse unterspritzt (siehe Abbildung 9-b). Nach der Härtung der Dichtmasse wurde das Klebeband entfernt. In Abbildung 9-c ist die Nutprobe mit gehärteter Dichtmasse dargestellt. Die mit dieser Methode erzielten Füllergebnisse entsprachen nicht den benötigten Anforderungen.

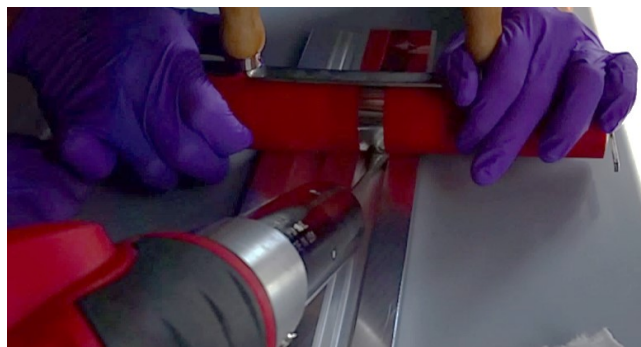
### Folgende Vor- und Nachteile wurden identifiziert:

- + Geringer Druck während der Dichtmassenapplikation auf die Abdeckleiste.
- + Durch das Abdecken mit Klebeband wird eine ebene Oberfläche geschaffen.
- Komplexe Handhabung durch das exakte Abrollen der Abdeckleiste.

a)



b)



c)

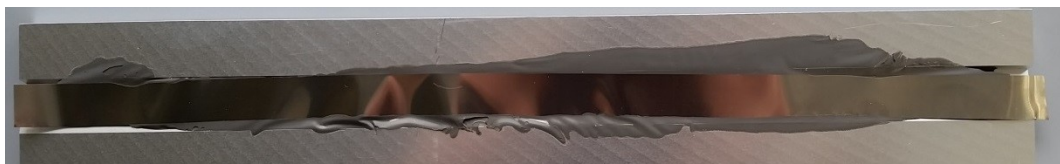
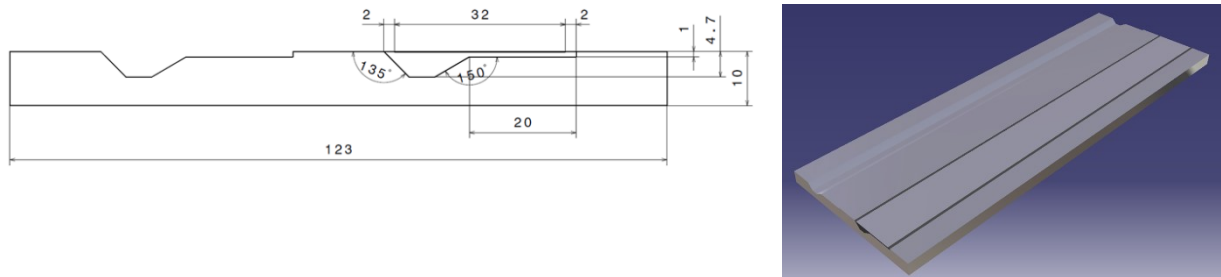


Abbildung 9: Abrollen der Abdeckleiste und Unterspritzen mit Dichtmasse.

## 8.1.1.4 Methode D: Seitliches Anbringen der Abdeckleiste

Die Versuche wurden an einer 360 mm langen Aluminiumnutprobe mit der in Abbildung 10 dargestellten Nutgeometrie durchgeführt. Die Nut wurde mit Dichtmasse gefüllt und anschließend mit einer 0,05 mm dicken Stahlfolie abgedeckt.



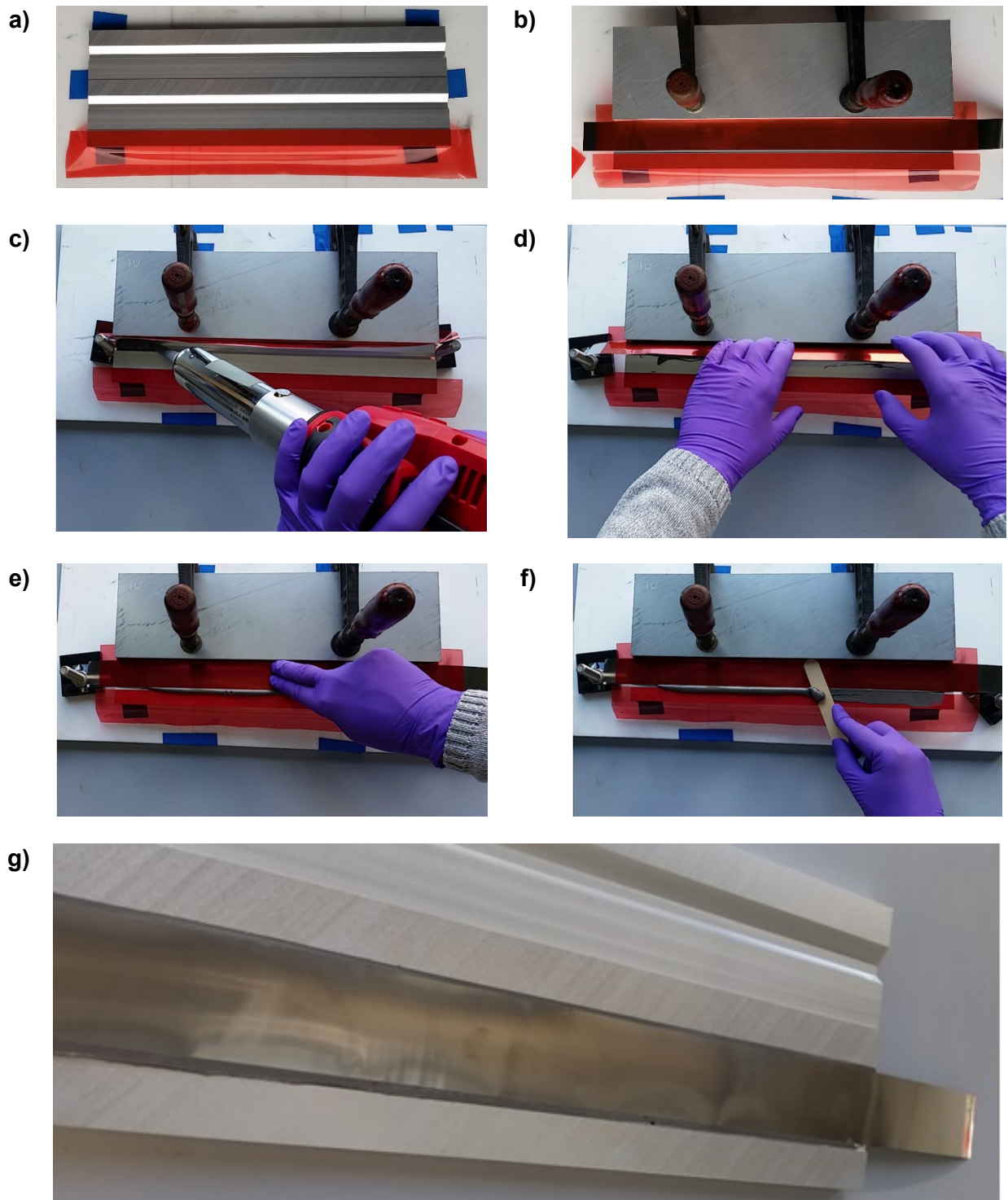
**Abbildung 10: Nutgeometrie (360 mm lang) sowie Breite und Position der Abdeckleiste.**

Im ersten Schritt wurde die an den flachen Nutbereich angrenzende Fläche mit einem Klebeband maskiert (siehe Abbildung 11-a). Anschließend wurde die Abdeckleiste mit einem Klebeband und einem Niederhalter fixiert (siehe Abbildung 11-b). Im nächsten Schritt erfolgte die Applikation der Dichtmasse im tiefen Nutbereich (siehe Abbildung 11-c). Hierbei wurde der tiefe Nutbereich überfüllt. Beim Herunterdrücken der fixierten Abdeckleiste wurde die zu viel applizierte Dichtmasse in den flachen Nutbereich gedrückt (siehe Abbildung 11-d) und die Abdeckleiste auf eine Ebene mit den an die Nut angrenzenden Flächen gebracht (siehe Abbildung 11-e). Die zu viel applizierte Dichtmasse wurde mit einem Spatel abgestreift (siehe Abbildung 11-f). In Abbildung 11-g ist die Nutprobe mit gehärteter Dichtmasse dargestellt. Die an einer 360 mm langen Nut getestete Methode D kann auch für längere Fügeübergänge am VTP verwendet werden. Hierzu müssten jedoch noch für die jeweilige Anwendung passende Niederhalter entwickelt und getestet werden.

### **Folgende Vor- und Nachteile wurden identifiziert:**

- + Methode D kann auch bei längeren Fügeübergängen verwendet werden.
- + Durch das Abdecken mit Klebeband wird eine ebene Oberfläche geschaffen.
- + Der Prozess ermöglicht ein genaues Anbringen der Abdeckleiste.
- Eine spezielle Vorrichtung für das exakte Andrücken der Abdeckleiste wird benötigt.
- Zu viel applizierte Dichtmasse muss mit einem Spatel entfernt werden.

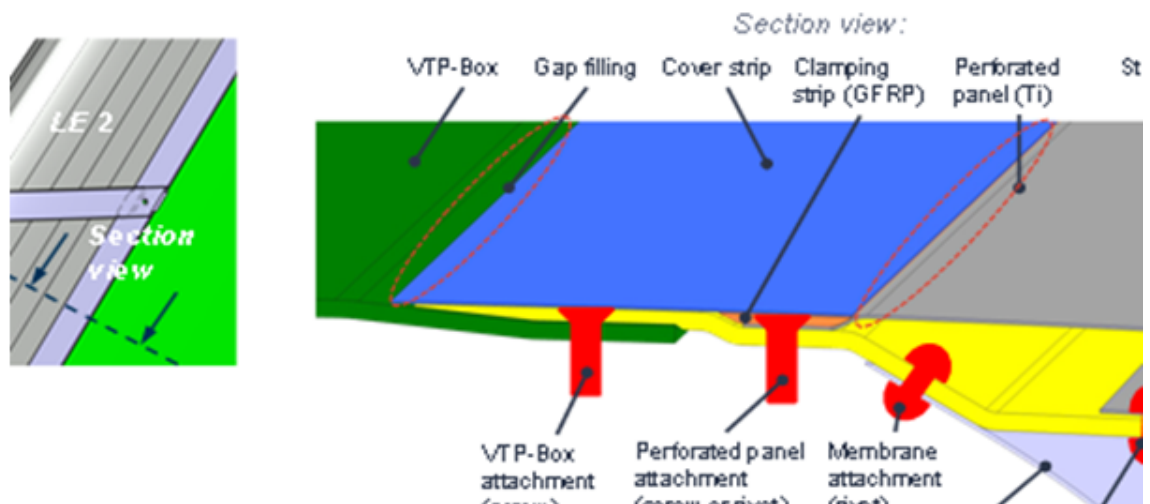




**Abbildung 11: Vorgehensweise Methode D: Dichtmassenapplikation und seitliches Anbringen der Abdeckleiste; a: Maskieren; b: Abdeckleiste mit Kleband und mit Niederhalter fixieren; c: Dichtmasse applizieren; d und e: Abdeckleiste auf benötigte Position bringen; f: zu viel applizierte Dichtmasse abstreifen; g: Nutprobe nach der Härtung der Dichtmasse.**

## 8.1.2 Re-Applikation von Abdeckleisten

Im AP 3100-1 wurde eine Methode zur vereinfachten Entfernung von Abdeckleisten (siehe Abbildung 12) mittels Heizfolien auf luftfahrtqualifizierten Dichtmassen entwickelt und charakterisiert. Hierzu wurden TGA Messungen (siehe 8.1.2.1), Stirnabzugsversuche (8.1.2.2) und Schälversuche (8.1.2.3) durchgeführt.



**Abbildung 12: Schematische Darstellung eines möglichen laminaren Fügeübergangs am Seitenleitwerk unter Verwendung einer Abdeckleiste (blau).**

Durch die Verwendung einer Abdeckleiste soll ein laminarer Fügeübergang realisiert werden. Jedoch soll die Abdeckleiste für Reparatur- und Montagezwecke schnell entfernt werden können. Für die Untersuchung der Re-Applikation wurden eine polysulfidbasierte Dichtmasse (Dichtmasse-A) und eine polythioetherbasierte Dichtmasse (Dichtmasse-B) getestet. Beide Dichtmassen sind Luftfahrtqualifiziert. Die Dichtmasse-A ist ein mangandioxid- und die Dichtmasse-B ein epoxidharzhärtendes Zweikomponentensystem. Die Einsatztemperatur der Dichtmasse-A liegt im Temperaturbereich von  $-55\text{ °C}$  bis  $130\text{ °C}$  und die der Dichtmasse-B bei  $-62\text{ °C}$  bis  $160\text{ °C}$ .

## 8.1.2.1 TGA-Messung

Um den zu testenden Temperaturbereich für die Stirnabzugs- und Schälversuche einzugrenzen, wurden TGA-Messungen mit einer Thermowaage durchgeführt.

Bei einer TGA-Messung wird die Masse einer Probe während des kontinuierlichen Aufheizens gemessen. Daraus kann die Massenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur und/oder Zeit bestimmt werden. Hieraus lässt sich der Temperaturbereich ermitteln, in diesem das Material chemisch stabil ist und sich nicht abbaut. [17]

Zur Bestimmung der Massenänderung der Dichtmasse-A und Dichtmasse-B wurde ein dynamisches Verfahren verwendet. Dabei wurde der dynamische Dampfsorptionsanalysator „TGA Q5000 V3.17 Build 265“ der Marke TA Instruments (New Castle, DE 19720, USA) verwendet.

Bei dem dynamischen Verfahren wird eine Probe mit einer bestimmten Heizrate erwärmt. Die Änderung der Masse wird als Funktion der Temperatur aufgezeichnet. [17]

Für die TGA-Messungen wurden Dichtmassenproben mit einer Höhe von einem Millimeter und einem Durchmesser von vier Millimetern verwendet. Für die Probenherstellung wurde die Dichtmasse-A bzw. Dichtmasse-B haselnussgroß auf die Mitte einer Platte appliziert. Eine zweite Platte wurde anschließend mit einem Abstand von einem Millimeter zur ersten Platte aufgesetzt und mit Schraubzwingen fixiert. In diesem Aufbau härteten die Dichtmassen zwei Wochen aus. Aus den ausgehärteten Dichtmassenschichten wurden abschließend mit einem Lochstanzer die Proben ausgestanzt.

Die Aufheizung der Proben von Raumtemperatur auf 900 °C erfolgte mit einer Heizrate von 10 °C pro Minute. In Tabelle 1 sind die Massenabnahmen der Dichtmassenproben während der TGA-Messung aufgeführt und in Abbildung 13 entsprechend grafisch dargestellt.

**Tabelle 1: Massenabnahme der Dichtmassenproben bei der TGA-Messung.**

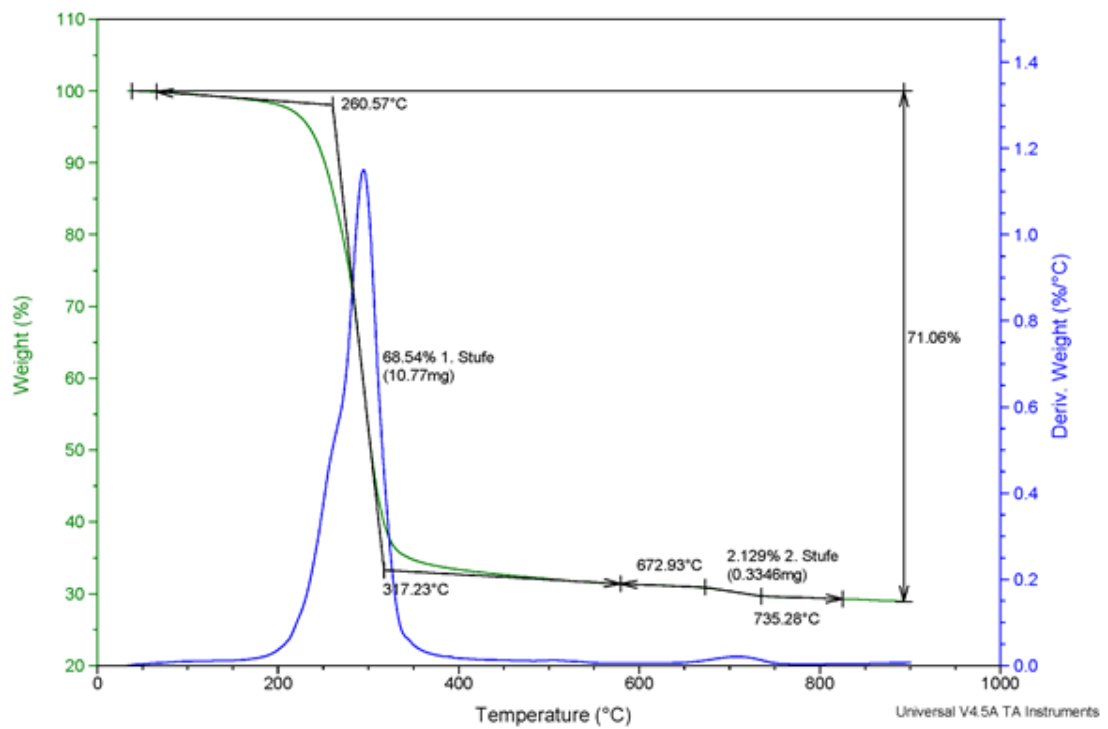
Massenabnahme Dichtmasse-A

Temperatur	Gewicht	Massenabnahme
34 °C	15,717 mg	0,00%
50 °C	15,711 mg	0,04%
75 °C	15,689 mg	0,18%
100 °C	15,655 mg	0,39%
125 °C	15,613 mg	0,66%
150 °C	15,568 mg	0,95%
175 °C	15,513 mg	1,30%
200 °C	15,417 mg	1,90%
225 °C	15,146 mg	3,63%

Massenabnahme Dichtmasse-B

Temperatur	Gewicht	Massenabnahme
42 °C	21,180 mg	0,00%
50 °C	21,175 mg	0,03%
75 °C	21,151 mg	0,14%
100 °C	21,123 mg	0,27%
125 °C	21,091 mg	0,42%
150 °C	21,053 mg	0,33%
175 °C	20,998 mg	0,00%
200 °C	20,922 mg	0,36%
225 °C	20,825 mg	0,82%

a)



b)

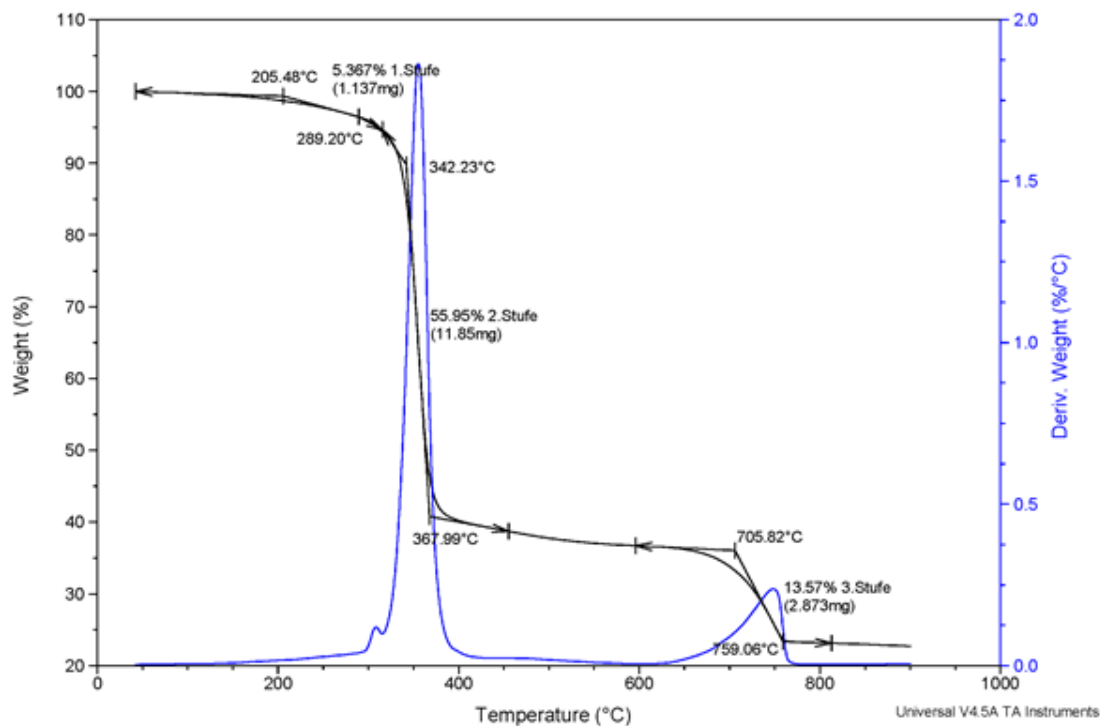


Abbildung 13: TGA-Messung von ausgehärteten Dichtmassenproben (Durchmesser: 4 mm, Dicke: 1 mm) nach einer Härtung bei Raumtemperatur für zwei Wochen; (a): Polysulfid-basierte Dichtmasse-A mit einer Anfangsmasse von 15,718 mg; (b): Polythiother-basierte Dichtmasse-B mit einer Anfangsmasse von 21,179 mg.

Die Dichtmasse-B zeigte im Vergleich zur Dichtmasse-A eine bessere thermische Beständigkeit. Die Dichtmasse-A hat im Vergleich zur Dichtmasse-B einen größeren Massenverlust bei gleichen Temperaturen. Der Massenverlust von 1 % wird bei Dichtmasse-A bei 154 °C und bei Dichtmasse-B bei 185 °C erreicht. Für die Haftfestigkeitsversuche (Stirnabzugs- und Schälversuche) wurde deshalb eine maximale Prüftemperatur von 170 °C festgelegt.

## 8.1.2.2 Stirnabzugsversuche

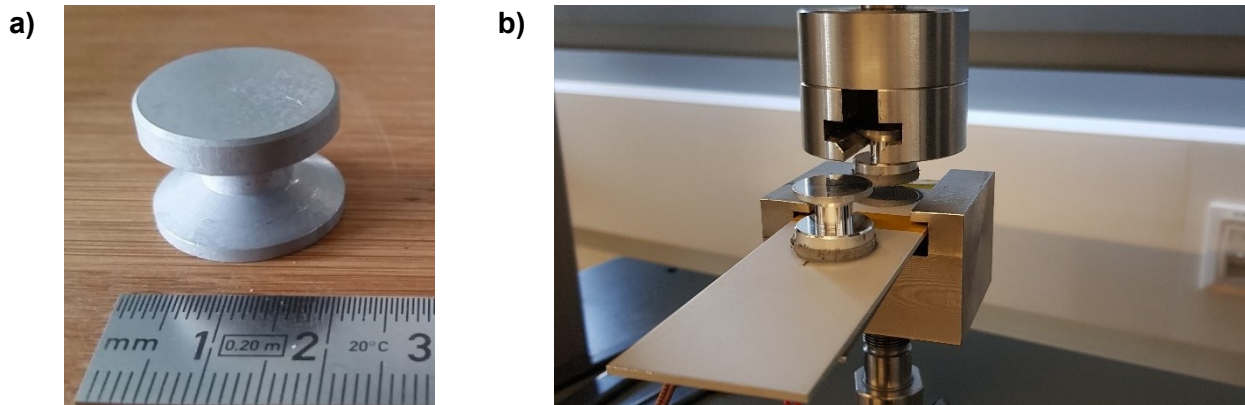
Der Stirnabzugsversuch nach DIN EN ISO 4624:2003 08 ermöglicht die Beurteilung der Haftfestigkeit von Beschichtungsstoffen. Ziel der Prüfung ist es die Art des Versagens (adhäsiv, kohäsiv, Mischform) und die Zugfestigkeit zu ermitteln. Bei dem Versuch wird an einem Stempel (siehe Abbildung 14) gezogen bis ein Versagen auftritt. Laut der DIN-Norm muss die Abziehggeschwindigkeit so eingestellt werden, dass die Spannung in der Probe nicht schneller als 1 MPa/s ansteigt. Der Bruch muss jedoch innerhalb von 90 s erfolgen. Die Stirnabzugsversuche wurden bei insgesamt vier unterschiedlichen Prüftemperaturen durchgeführt (20 °C, 60 °C, 120 °C und 170 °C). Hierzu wurde bei 20 °C ohne und bei den höheren Prüftemperaturen mit Heizfolie getestet. Es wurden pro Prüftemperatur und Dichtmasse (Dichtmasse-A und Dichtmasse-B) vier Proben gezogen. Die jeweiligen Testparameter und Kodierungen der insgesamt 32 Proben sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

**Tabelle 2: Probenmatrix für die Stirnabzugsversuche mit Dichtmasse-A und Dichtmasse-B.**

Nr.	Kodierung	Dichtmasse:	Temperatur	Zeit:	Statistik
		A: Polysulfid Dichtmasse B: Polythioether Dichtmasse	T1: RT T2: 60 °C T3: 120°C T4: 170°C	t1: 6 min t2: 10 min	
1	A-T1t1_01	A	T1	t1	01
2	A-T1t1_02	A	T1	t1	02
3	A-T1t2_01	A	T1	t2	01
4	A-T1t2_02	A	T1	t2	02
5	A-T2t1_01	A	T2	t1	01
6	A-T2t1_02	A	T2	t1	02
7	A-T2t2_01	A	T2	t2	01
8	A-T2t2_02	A	T2	t2	02
9	B-T3t1_01	B	T3	t1	01
10	B-T3t1_02	B	T3	t1	02
11	B-T3t2_01	B	T3	t2	01
12	B-T3t2_02	B	T3	t2	02
13	B-T4t1_01	B	T4	t1	01
14	B-T4t1_02	B	T4	t1	02
15	B-T4t2_01	B	T4	t2	01
16	B-T4t2_02	B	T4	t2	02



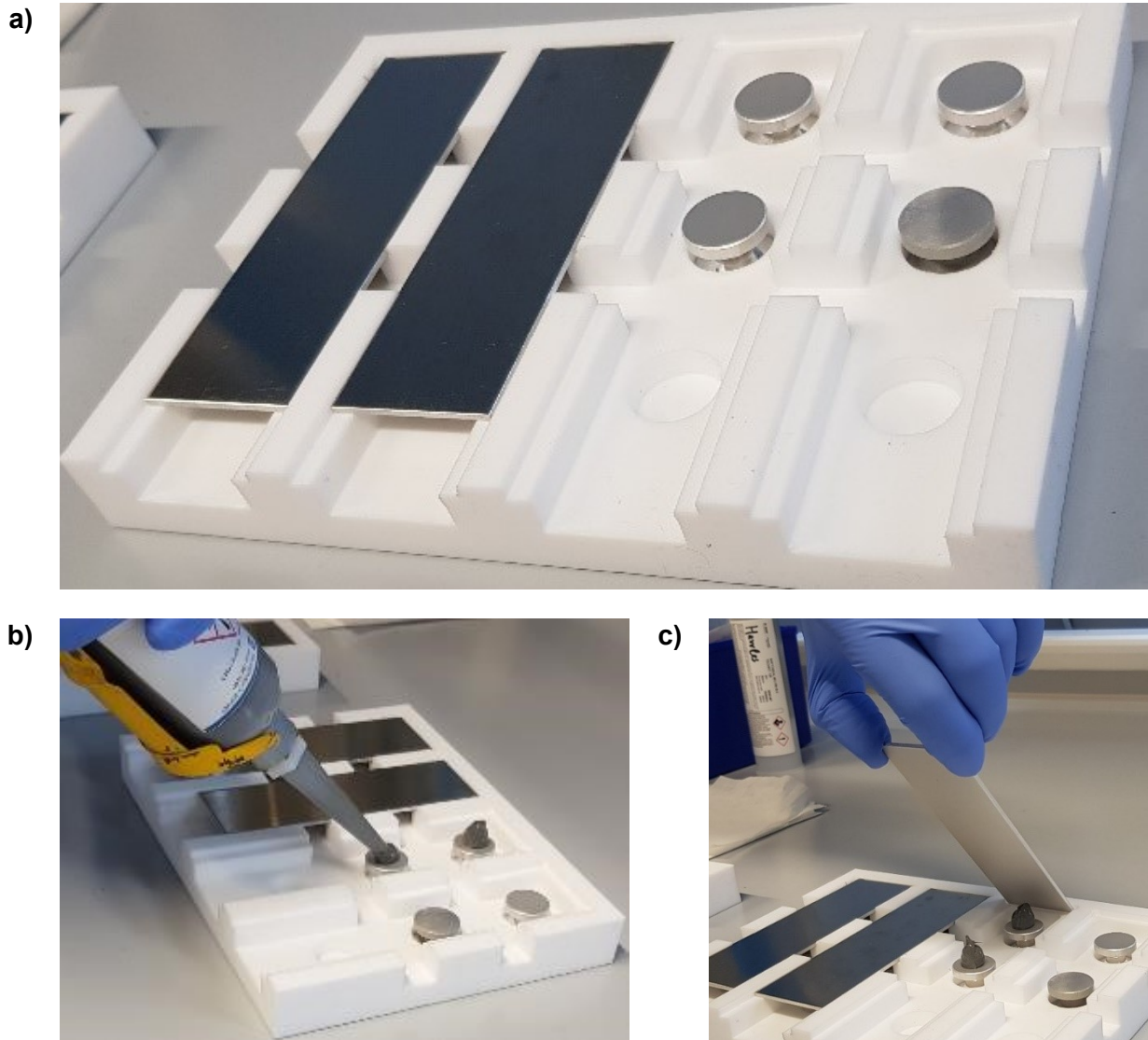
Die Proben für den Stirnabzugsversuch bestehen aus einer Aluminiumplatte (130 mm x 38 mm x 2 mm), einer Dichtmassenschicht von zwei Millimetern und einem Stirnabzugs-stempel mit einem Durchmesser von 20 mm (siehe Abbildung 14).



**Abbildung 14: Stirnabzugsproben; (a): Verwendeter Stempel; (b): Fertige Stirnabzugsprobe in der Vorrichtung, bestehend aus zwei Stempeln, die mit Dichtmasse auf eine Aluminiumplatte verklebt sind.**

Um eine ausreichend gute Haftung zwischen den Dichtmassen und der Aluminiumplatten bzw. den Stempeln zu gewährleisten, wurden die entsprechenden Flächen mit dem Laser „PowerLine E Air 25“ der Marke Rofin (ROFIN-SINAR Laser GmbH, 22113 Hamburg, Deutschland) strukturiert. Alternativ zur Laservorbereitung können die Oberflächen auch chemisch vorbehandelt werden (z.B. Beizen oder Anodisieren). Bei der Laservorbereitung finden eine Vergrößerung der Oberfläche sowie eine Erhöhung der Porosität statt. Zusätzlich wird die Oberfläche gesäubert. Durch die entstehenden Hohlräume gibt es für die Dichtmasse mehr Verankerungsmöglichkeiten auf der Oberfläche, sodass die Adhäsion deutlich verbessert wird. Nach der Laservorbereitung wurden die Proben bis zur Dichtmassenapplikation in Aluminiumfolie verpackt, um die Oberflächen vor Verunreinigungen zu schützen.

Nach dem Anmischen der Dichtmasse mit dem pneumatischen Mischgerät MC-Injection (Maschinenfabrik H. Meyer GmbH, 29664 Walsrode, Deutschland) wurde diese auf Aluminiumplatten appliziert. Die Vermischung von Harz- und Härterkomponente erfolgte hierbei mit 90 Doppelhüben. Für die Herstellung der Stirnabzugsproben wurden Vorrichtungen aus Polytetrafluoräthylen (PTFE) verwendet (siehe Abbildung 15-a), um eine reproduzierbare Dichtmassenschichtdicke von zwei Millimetern zu gewährleisten. Die Stempel wurden hierfür in die vorgesehenen Vertiefungen der PTFE Vorrichtung gelegt. Anschließend wurde auf die Stempel Dichtmasse appliziert (siehe Abbildung 15-b), die Aluminiumplatten aufgelegt und leicht angedrückt (siehe Abbildung 15-c).

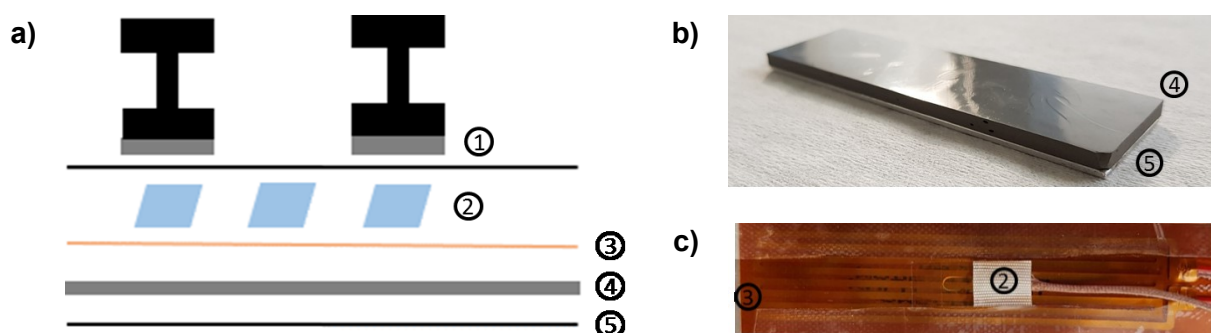


**Abbildung 15: Vorgehensweise für die Probenherstellung der Stirnabzugsversuche: (a): PTFE Vorrichtung mit eingesetzten Stempeln; (b): Dichtmassenapplikation auf Stempel; (c): Aufsetzen der Aluminiumplatte auf Stempel mit Dichtmasse.**

Nach einer Lagerung der Proben bei Raumtemperatur für zwei Wochen wurde überstehende Dichtmasse an den Stempelrändern mit einem Locheisen entfernt. Anschließend erfolgten die Stirnabzugsversuche.

Bei den Stirnabzugsversuchen wurden die Proben auf Temperaturen von bis zu 170 °C erwärmt. Dazu wurde eine flexible Heizfolie mit der Bezeichnung KHLV-104/10 der Marke Omega (OMEGA Engineering, 75392 Deckenfronn, Deutschland) mit einer Leistungsdichte von 10 W/in<sup>2</sup> verwendet. Die Heizfolie wurde an der Unterseite der Aluminiumplatte der Stirnabzugsprobe mit einem Polyimid Klebeband befestigt. Um den Wärmeverlust zu minimieren, wurde die Heizfolie auf der Unterseite isoliert. Der Aufbau der Stirnabzugsprobe mit der Isolation ist der Abbildung 16 zu entnehmen. Zwischen der Heizfolie und Aluminiumplatte wurden drei

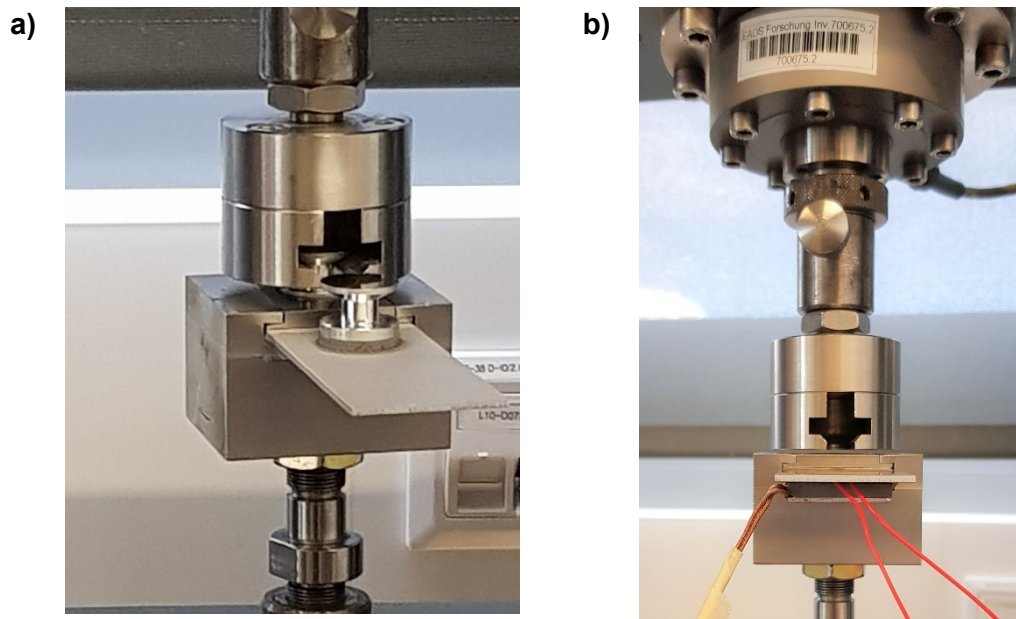
Thermoelemente (Typ T) befestigt, zwei direkt unter den Stempeln und eines dazwischen. Die Heizfolie erwärmt die Probenplatte mit den beiden Stempeln. Die Thermoelemente messen die Temperatur, zwischen der Heizfolie und Aluminiumplatte. Zur Isolation der Heizfolie und zum Ausgleich von lokalen Unebenheiten durch die Thermoelemente wurde eine zwei Millimeter dicke und ausgehärtete Dichtmassenschicht verwendet. Die Heizfolie wurde mit einem Labornetzgerät PS2403-D (Conrad Electronics SE, 92240 Hirschau, Deutschland) betrieben. Die Aufzeichnung des Temperaturverlaufes erfolgte mit einem Datenlogger GL220 der Marke Graphtec (Graphtec Corporation, Tokyo, Japan).



**Abbildung 16: Stirnabzugsversuchsprobe; (a): Aufbau einer Stirnabzugsprobe mit Heizfolie und Isolation; (b): Isolation aus gehärteter Dichtmasse auf einer Aluminiumplatte; (c): Heizfolie mit Thermoelement; (1): Stempel mit Dichtmassenschicht (grau) auf Aluminiumplatte (schwarz); (2): Thermoelemente; (3): Heizfolie; (4): Dichtmassenschicht als Isolator; (5): Aluminiumplatte.**

Nach dem Einspannen einer Stirnabzugsprobe und dem Erreichen der Solltemperatur wurde eine Vorkraft angelegt. Diese betrug bei den Versuchen bei Raumtemperatur und 60 °C 20 Newton und bei den Versuchen bei 120 °C und 170 °C zwei Newton. Während der Stirnabzugsversuche wurden die Stempel mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min abgezogen. In der Abbildung 17 ist der Versuchsaufbau der Stirnabzugsversuche bei Raumtemperatur und bei höheren Prüftemperaturen dargestellt. Bei den Stirnabzugsversuchen mit Heizfolie wurden beide Stempel einer Probe gleichzeitig erwärmt. Bei den Versuchen bei einer Prüftemperatur von 120 °C und 170 °C mussten aufgrund der hohen Prüftemperatur die Proben vor dem Entfernen des ersten Probenstempels bzw. dem Einsetzen des Zweiten zunächst abkühlen.









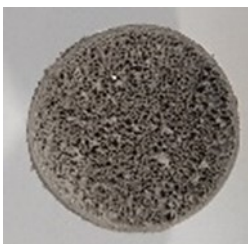
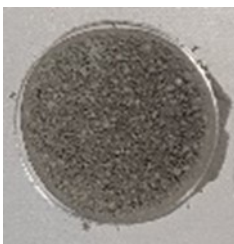



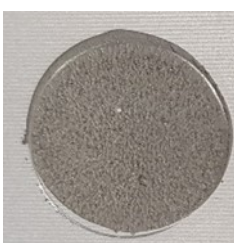






**Abbildung 17: Versuchsaufbau für die Stirnabzugsversuche; (a): Versuche bei 20 °C; (b): Versuche mit Heizfolie und Isolation.**

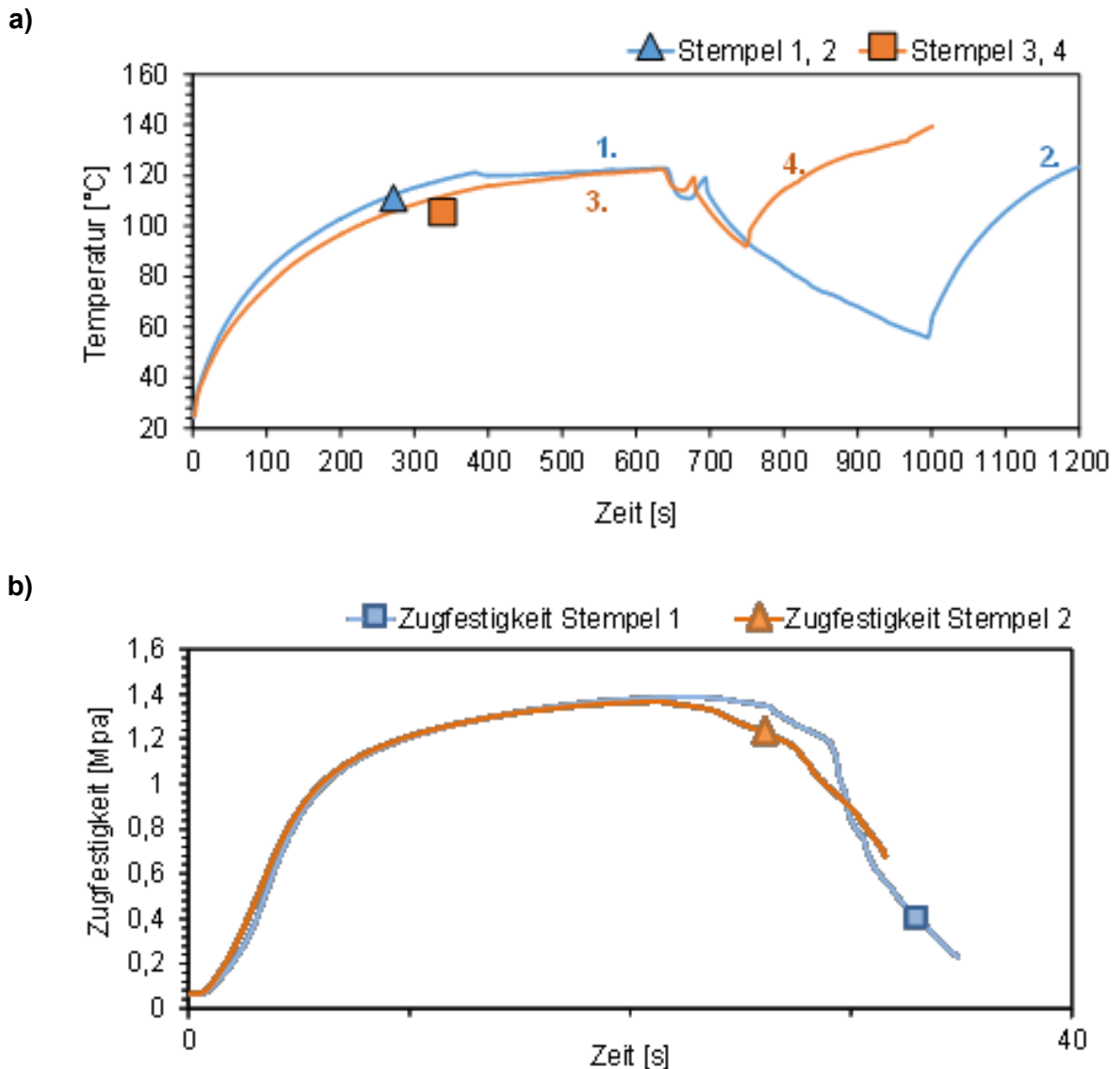
Ein repräsentatives Bruchbild für jede getestete Einstellung von den Stirnabzugsproben ist der Tabelle 3 zu entnehmen. Bei allen getesteten Proben zeigte sich ein kohäsives Versagen der Dichtmasse. Ein Ablösen der Dichtmasse auf den Oberflächen (adhäsives Versagen) konnte nicht beobachtet werden. Bei den Dichtmassen konnte eine signifikante Veränderung der Struktur durch den Temperatureinfluss festgestellt werden. Die Oberfläche der Dichtmasse-A wird mit steigender Prüftemperatur poröser bzw. rauer wohingegen die Oberfläche der Dichtmasse-B bei höheren Prüftemperaturen eine Strukturierung aufweist.

Tabelle 3: Bruchbilder der Stirnabzugsproben.

	Dichtmasse-A		Dichtmasse-B	
	Stempel	Al-Platte	Stempel	Al-Platte
20 °C				
60 °C				
120 °C				
170 °C				

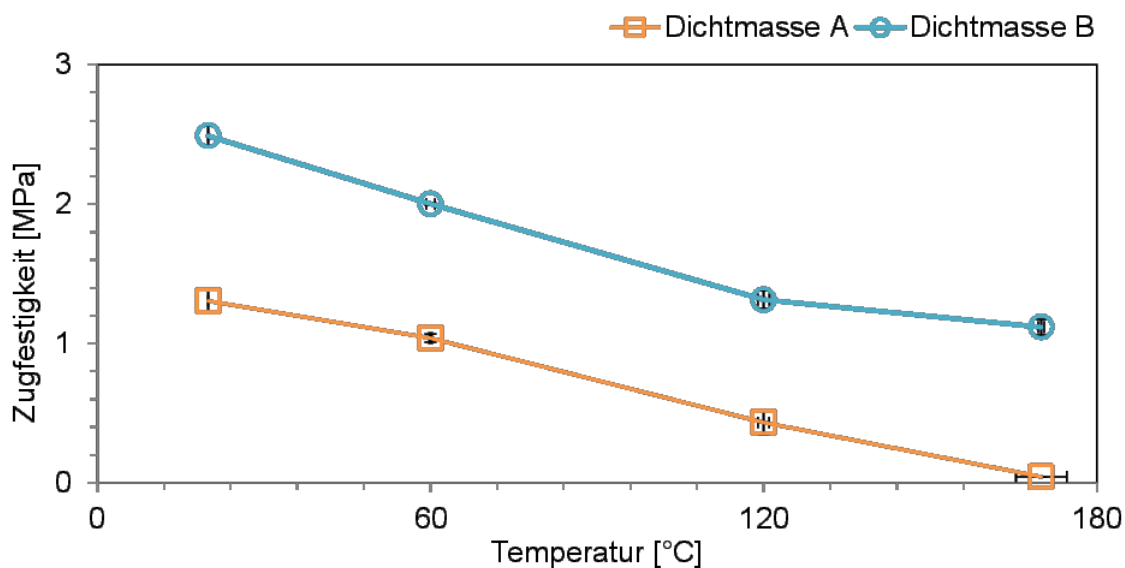
In Abbildung 18-a ist der zeitliche Temperaturverlauf einer bei 120 °C getesteten Stirnabzugsprobe dargestellt. Bei erreichter Prüftemperatur und einer ausreichenden Erwärmungszeit von mindestens sechs Minuten wurde der erste Stempel abgezogen. Die orange Linie zeigt den Temperaturverlauf des Thermoelements unterhalb des ersten Stempels und die blaue Linie den Temperaturverlauf des Thermoelements unterhalb des zweiten Stempels. Das Abziehen des ersten Stempels ist in Abbildung 18-a mit „1.“ bzw. mit „3.“ gekennzeichnet. Wie bereits erwähnt musste die Temperatur bei den Prüftemperaturen von 120 °C und 170 °C zwischen dem Ziehen des ersten Stempels und dem Ziehen des zweiten Stempels gesenkt werden. Der erste abgezogene Probenstempel wurde anschließend aus der Vorrichtung entfernt. Im Anschluss daran wurde der zweite Stempel in die Vorrichtung eingebaut, auf die zu prüfende Temperatur erwärmt und gezogen. Dies ist in Abbildung 18-a mit „2.“ bzw. „4.“ hervorgehoben.

In Abbildung 18-b sind die während des Stirnabzugsversuchs gemessenen Zugfestigkeiten des ersten und zweiten Stempels dargestellt.



**Abbildung 18:** Exemplarische Darstellung der Stirnabzugsversuche mit der Dichtmasse-B bei einer Prüftemperatur von 120 °C; (a): Temperaturverlauf des Thermoelements unterhalb des ersten Stempels (orange Linie) und des Thermoelements unterhalb des zweiten Stempels (blaue Linie); (b): Verlauf der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Zeit beim Abziehen des ersten und zweiten Stempels.

Die bei den Stirnabzugsversuchen ermittelten maximalen Zugfestigkeiten sind in Abbildung 19 dargestellt. Dabei stellt die orangene Linie die Zugfestigkeit der Dichtmasse-A und die blaue Linie die Zugfestigkeit der Dichtmasse-B dar.



**Abbildung 19: Verlauf der maximalen Zugfestigkeiten bei den Stirnabzugsversuchen in Abhängigkeit von der Prüftemperatur.**

Aus Abbildung 19 kann entnommen werden, dass sich die maximalen Zugfestigkeiten zwischen der Dichtmasse-A und Dichtmasse-B bereits bei einer Prüftemperatur von 20 °C deutlich unterscheiden. Die maximale Zugfestigkeit der Dichtmasse-B ist etwa um den Faktor zwei größer als die der Dichtmasse-A. Der Verlauf der maximalen Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Prüftemperatur ist jedoch bei beiden Dichtmassen linear. Beide Verläufe weisen eine annähernd gleiche Steigung auf. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass sich die Dichtmasse-A bei einer Prüftemperatur von 170 °C teilweise verflüssigt. Dies hat zur Folge, dass sich der Probenstempel bereits bei einer geringen Zugfestigkeit löst. Erst bei einer Prüftemperatur von 120 °C wurde bei der Dichtmasse-B eine maximale Zugfestigkeit von 1,31 MPa gemessen, was der maximalen Zugfestigkeit der Dichtmasse-A bei Raumtemperatur entspricht. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Schälversuche ausschließlich mit der Dichtmasse-A durchgeführt.

## 8.1.2.3 Schälversuche

Für die Versuche zur Untersuchung der Re-Applikation von Abdeckleisten bei höheren Temperaturen wurde die DIN-Norm 65262-1:1996-08 entsprechend angepasst. Die Schälproben bestehen aus einer 120 mm langen Aluminiumplatte mit zwei Nutformen (siehe Abbildung 20-a), einer Dichtmassenschicht (siehe Abbildung 20-b) und einer Edelstahlabdeckleiste mit einer Dicken von 0,1 mm (siehe Abbildung 20-c). Vor der Dichtmassenapplikation wurde die Nutprobe mit Ethanol gereinigt und mit einem Klebeband auf einer Grundplatte fixiert. Die an die Nut angrenzenden Flächen wurden mit einem 0,05 mm dicken Klebeband maskiert. Ebenfalls erfolgte eine Maskierung der Flächen in der Nut. Im nächsten Schritt wurde die zu applizierende Dichtmasse mit dem pneumatischen Mischgerät MCI angemischt. Anschließend wurde die Dichtmasse in die Nut der Aluminiumprobe appliziert (siehe Abbildung 20-b). Auf die applizierte Dichtmasse wurde eine 0,1 mm dicke Abdeckleiste aus rostfreiem Stahl gelegt und leicht angedrückt (siehe Abbildung 20-c). Die Abdeckleiste ist insgesamt 300 mm lang und 25 mm breit. Austretende Dichtmasse wurde mit einem Holzspatel entfernt. Im Anschluss daran wurde eine PTFE Platte aufgesetzt und mit Schraubzwingen niedergehalten (siehe Abbildung 20-d). Die überschüssige Dichtmasse konnte hierbei aus den Nutenden austreten. Nach dem Aushärten der Dichtmasse wurde die PTFE Platte demontiert und überschüssige Dichtmasse entfernt. In Abbildung 20-e ist eine fertige Schälversuchsprobe dargestellt.



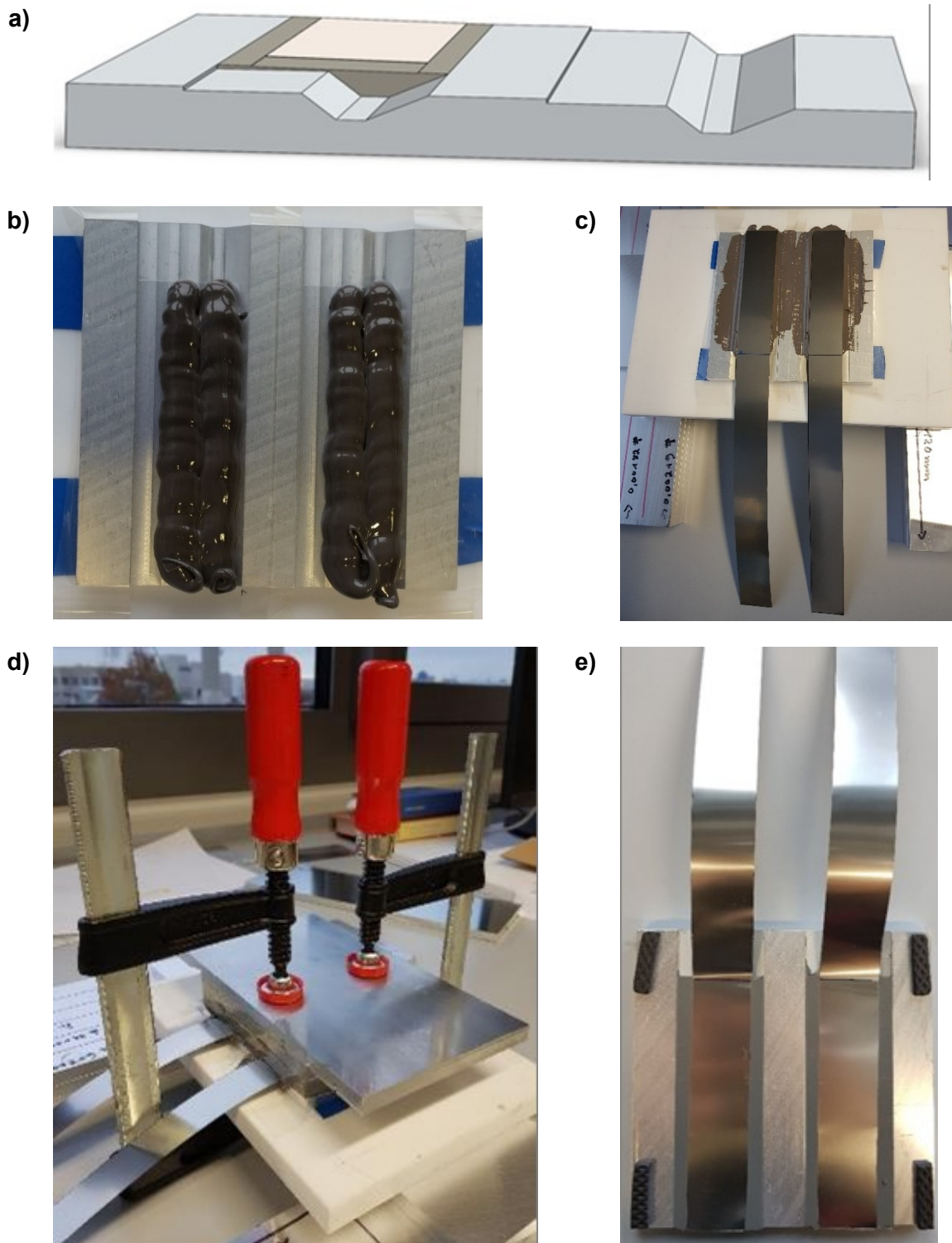
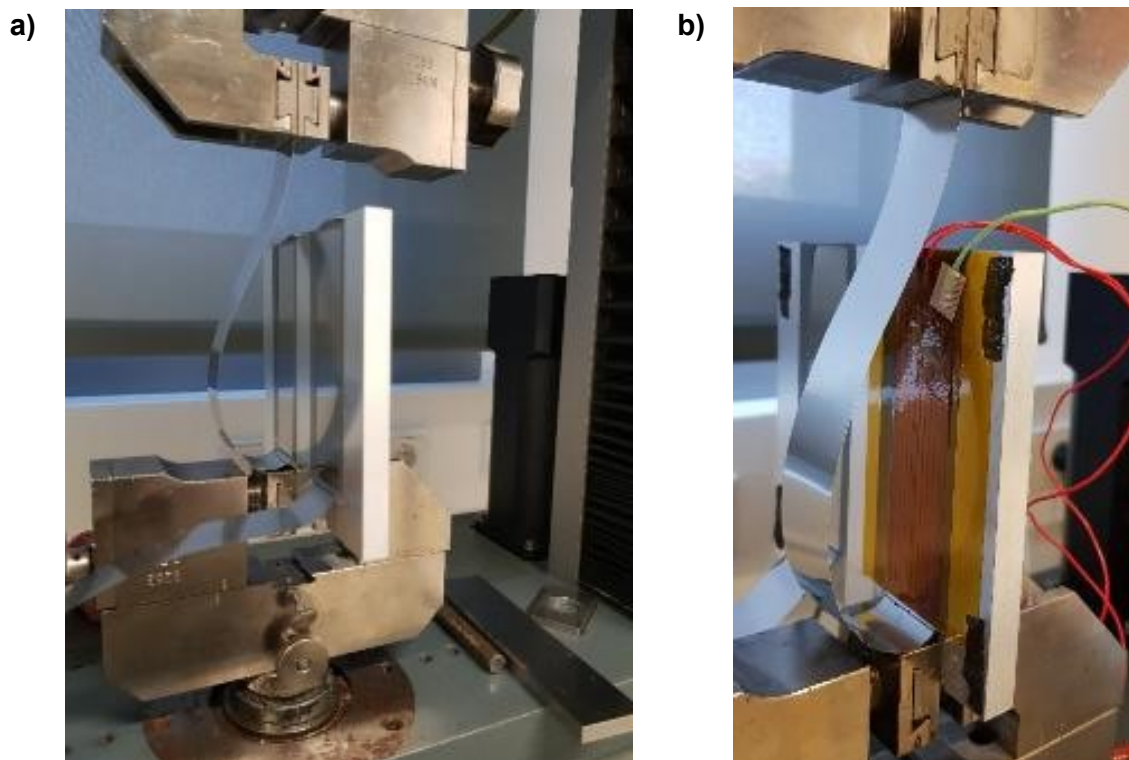


Abbildung 20: Herstellung einer Schälversuchsprobe; (a): Verwendete Nutprobe mit einer Breite von 36 mm, einer Tiefe im tiefen Nutbereich von 3,5 mm und einer Tiefe im flachen Nutbereich von 1 mm [18]; (b): Fixierte und maskierte Nutprobe mit applizierter Dichtmasse; (c): Aufgesetzte Abdeckleiste; (d): Spannvorrichtung; (e): Fertige Schälversuchsprobe nach der Härtung.



Für die Schälversuche wurde die Schälversuchsprobe in eine Zugprüfmaschine der Marke Zwick mit der Bezeichnung Z010, eingespannt (siehe Abbildung 21-a). Vor Versuchsbeginn wurde eine Vorkraft von zwei Newton angelegt. Anschließend wurde die Abdeckleiste von der Nutprobe abgezogen. Die Prüfungsgeschwindigkeit betrug hierbei 50 mm/min. Der Versuch endete entweder bei einer Kraftabschwelle von 90 % oder nach einem Schälweg von 240 mm. In der Abbildung 21-b ist der Versuchsaufbau des Schälversuchs mit einer Heizfolie abgebildet. Die Heizfolie wurde mit einem Polyimid Klebeband auf der Abdeckleiste befestigt. Zur Überwachung der Temperatur wurde ein Thermoelement auf die Heizfolie angebracht und mit einem Datenlogger aufgezeichnet. Beim Erreichen der jeweiligen Solltemperatur wurde der Schälversuch gestartet.



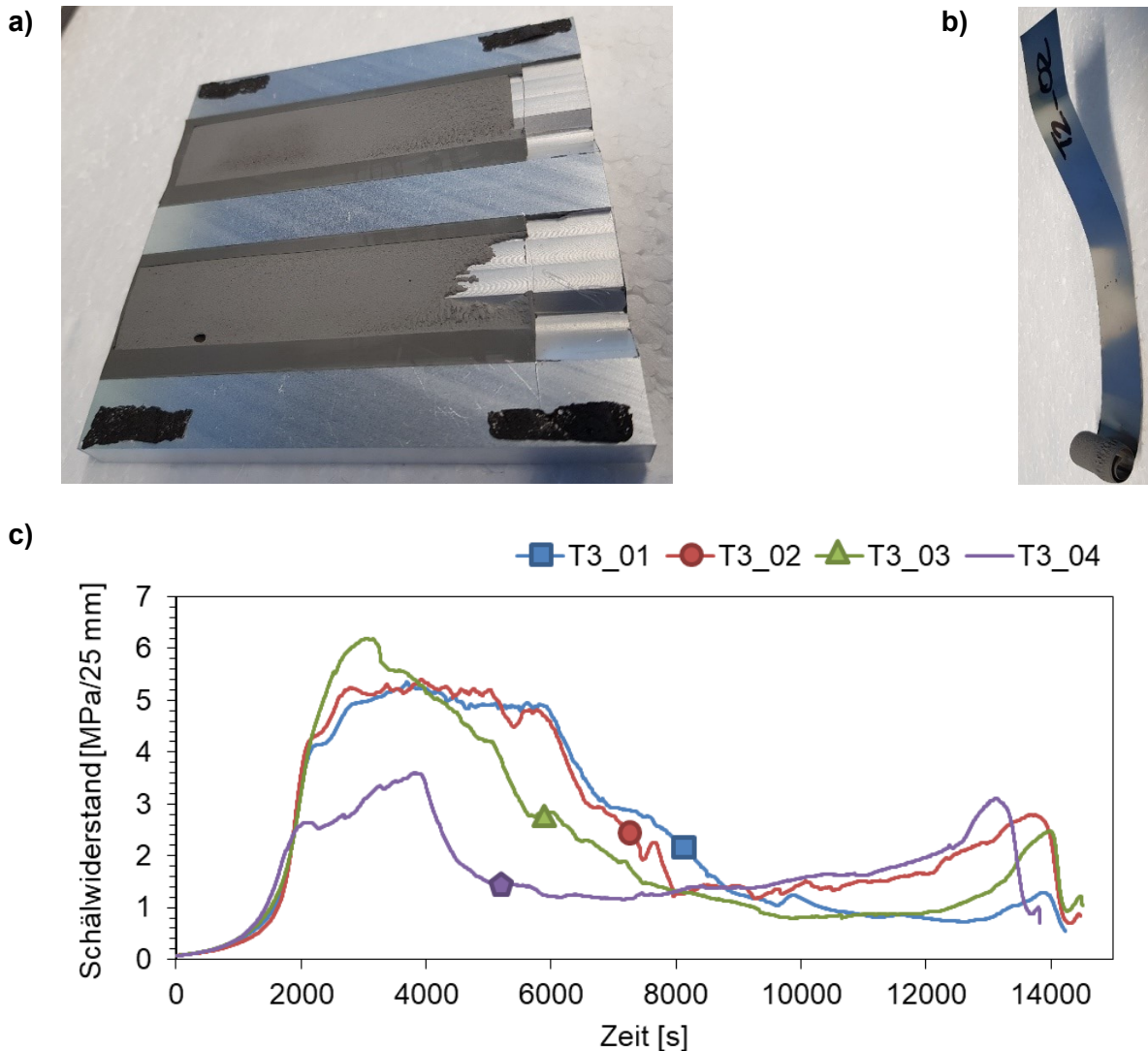
**Abbildung 21: Versuchsaufbau für die Schälversuche: (a): Versuchsaufbau für die Versuche bei einer Prüftemperatur von 20 °C; (b): Schälversuchsprobe in Vorrichtung mit Heizfolie (rote Kabel) und Thermoelement (grünes Kabel) für die Versuche bei Prüftemperaturen von 40 °C, 60 °C, 120 °C und 170 °C.**

Basierend auf den Ergebnissen der Stirnabzugsversuche (vgl. Kapitel 8.1.2.2), wurden die Schälversuche ausschließlich mit der Dichtmasse-A durchgeführt. Pro Prüftemperatur (20 °C, 40 °C, 60 °C, 120 °C und 170 °C) wurden vier Proben getestet. Die jeweiligen Testparameter und Kodierungen der insgesamt 18 Proben sind der Tabelle 4 zu entnehmen.

**Tabelle 4: Probenmatrix für die Schälversuche mit Dichtmasse-A.**

Nr.	Kodierung	Temperatur T1: RT T2: 60 °C T3: 120 °C T4: 170°C	Statistik
1	T1_01	T1	01
2	T1_02	T1	02
3	T1_03	T1	03
4	T1_04	T1	04
5	T2_01	T2	01
6	T2_02	T2	02
7	T2_03	T2	03
8	T2_04	T2	04
9	T3_01	T3	01
10	T3_02	T3	02
11	T3_03	T3	03
12	T3_04	T3	04
13	T4_01	T4	01
14	T4_02	T4	02
15	T4_03	T4	03
16	T4_04	T4	04
17	T5_01	T5	01
18	T5_02	T5	02



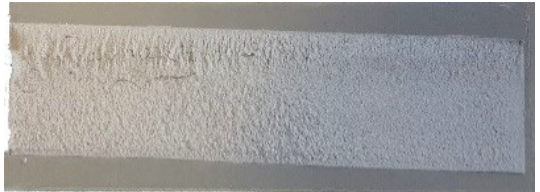







Die Stirnabzugsversuche wurden nach einer Aushärtung der Dichtmasse-A von mindestens zwei Wochen (bei Raumtemperatur) durchgeführt. Die Heizfolie wurde unmittelbar vor dem Schälversuch auf die Probe angebracht. Ein exemplarisches Beispiel einer abgeschälten Probe mit der Dichtmasse-A bei einer Solltemperatur von 60 °C ist der Abbildung 22-a bzw. Abbildung 22-b zu entnehmen. Bei jeder Schälversuchsdurchführung wurde die für das Abschälen benötigte Kraft über die Zeit aufgezeichnet (siehe Abbildung 22-c).



**Abbildung 22: Exemplarische Darstellung der Ergebnisse der Schälversuche am Beispiel der Versuche bei einer Prüftemperatur von 60 °C; (a): Nutprobe mit Dichtmassenrückstände; (b): Abdeckleiste; (c): Verlauf des Schälwiderstandes in Abhängigkeit von der Zeit; Die vier unterschiedlich farbigen Linien stehen für die vier getesteten Proben.**

Ein repräsentatives Schadensbild für jede getestete Einstellung der Schälversuchsproben ist der Tabelle 5 zu entnehmen. Bei allen getesteten Proben zeigte sich ein kohäsives Versagen der Dichtmasse. Bei den Schälversuchen mit einer Solltemperatur von 120 °C und 170 °C verschmorte die Dichtmassenoberfläche. Des Weiteren entstand bei den Versuchen bei 170 °C eine starke Rauchentwicklung, weshalb bei dieser Temperatur nur zwei statt vier Schälversuche durchgeführt wurden.

Tabelle 5: Oberfläche der Schälversuchsproben bei unterschiedlichen Prüftemperaturen.

	Dichtmasse-A in der Nutprobe	Dichtmasse-A auf der Abdeckleiste
20 °C		
40 °C		
60 °C		
120 °C		
170 °C		

Neben der Bewertung des Schadensbildes wurden für jede Schälprobe zwei verschiedene Schälwiderstände zur Bewertung der Dichtmasse ermittelt. Im Nachfolgenden wird der Schälwiderstand als ein maximaler Schälwiderstand und ein konstanter Schälwiderstand angegeben. Beim maximalen Schälwiderstand handelt es sich um das Maximum des Schälwiderstands. Der konstante Schälwiderstand ist der arithmetische Mittelwert zwischen dem maximalen Schälwiderstand und dem Schälwiderstand am Versuchsende. In der Abbildung 23 ist ein exemplarisches Beispiel zur Bestimmung des maximalen und konstanten Schälwiderstands dargestellt.

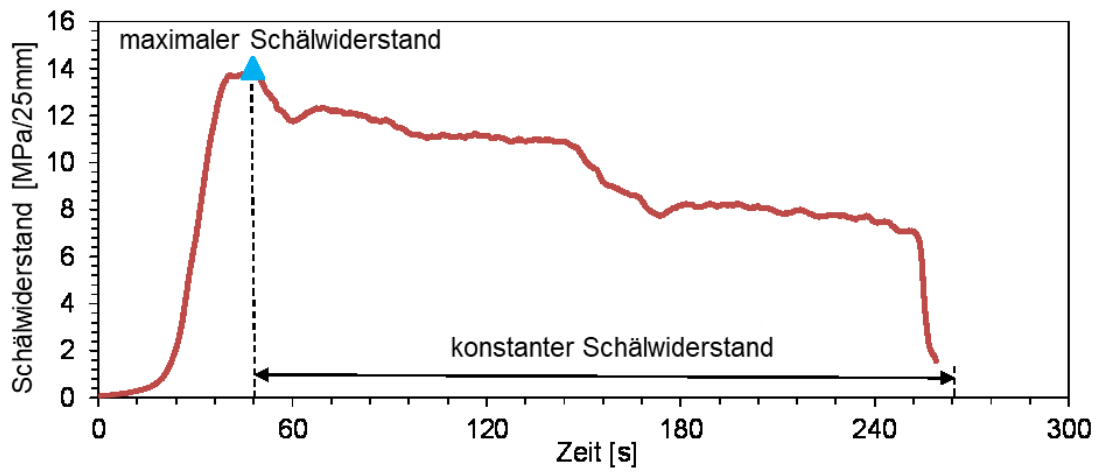


Abbildung 23: Exemplarische Darstellung der Bestimmung des maximalen und konstanten Schälwiderstands am Beispiel des Schälversuches bei einer Prüftemperatur von 20 °C.

Der maximale und konstante Schälwiderstand der getesteten 18 Schälproben sind der Abbildung 24 zu entnehmen.

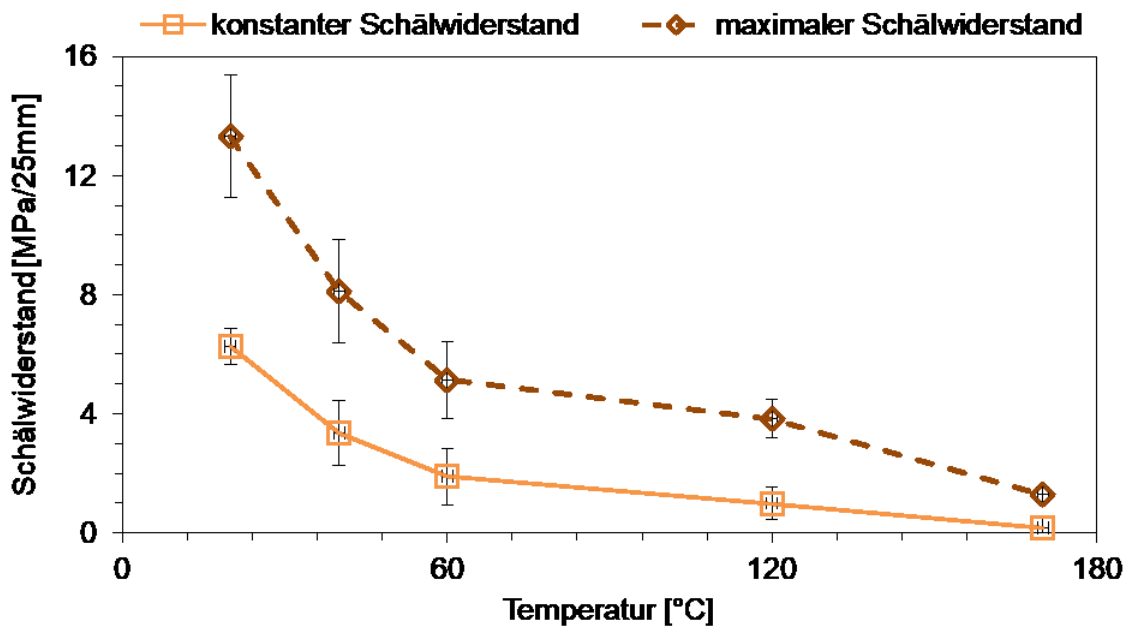


Abbildung 24: Ermittelter Schälwiderstand der Schälversuche in Abhängigkeit von der Temperatur; Volllinie mit Quadrat: konstanter Schälwiderstand; Strichlinie mit Raute: maximaler Schälwiderstand.



Aus Abbildung 24 geht hervor, dass bei einer Erhöhung der Prüftemperatur der Schälwiderstand (konstante und maximale) signifikant abnimmt, was wiederum die Entfernung der Abdeckleiste erleichtert. Die Steigung der Schälwiderstandsverläufe im Temperaturbereich zwischen 20 °C und 60 °C ist jedoch deutlich größer als zwischen 60 °C und 170 °C. Bei einer Prüftemperatur von 60 °C konnte im Vergleich zu den Versuchen bei 20 °C der maximale Schälwiderstand mehr als halbiert und der konstante Schälwiderstand sogar gedrittelt werden.

## **8.1.2.4 Zusammenfassung**

### **TGA-Messung (Kapitel 8.1.2.1)**

Die TGA-Messungen haben gezeigt, dass die Re-Applikationsversuche mit einer maximalen Temperatur von 170 °C durchgeführt werden können. Bei der TGA-Messung zeigte sich weiter, dass die Dichtmasse-A bei gleichen Temperaturen einen größeren Massenverlust im Vergleich zu der Dichtmasse-B aufweist, was auf die höhere chemische Stabilität zurückzuführen ist. Dies wird bestätigt durch den höheren Einsatztemperaturbereich der Dichtmasse-B (vgl. Abbildung 13).

### **Stirnabzugsversuche (Kapitel 8.1.2.2)**

Der Stirnabzugsversuch wurde mit einer Prüftemperatur von 20 °C, 60 °C, 120 °C und 170 °C durchgeführt. Es zeigt sich bei beiden Dichtmassen ein linearer Einfluss der Temperatur auf die Zugfestigkeit (vgl. Abbildung 19). Bei der Dichtmasse-A waren die Zugfestigkeiten im Gegensatz zur Dichtmasse-B deutlich geringer. Bei einer Temperatur von 120 °C beträgt die Zugfestigkeit der Dichtmasse-B im Durchschnitt 1,3 MPa. Dies entspricht der Zugfestigkeit der Dichtmasse-A bei 20 °C. Aus diesem Grund wurde die Dichtmasse-B bei den Schälversuchen nicht weiter untersucht.

### **Schälversuche (Kapitel 8.1.2.3)**

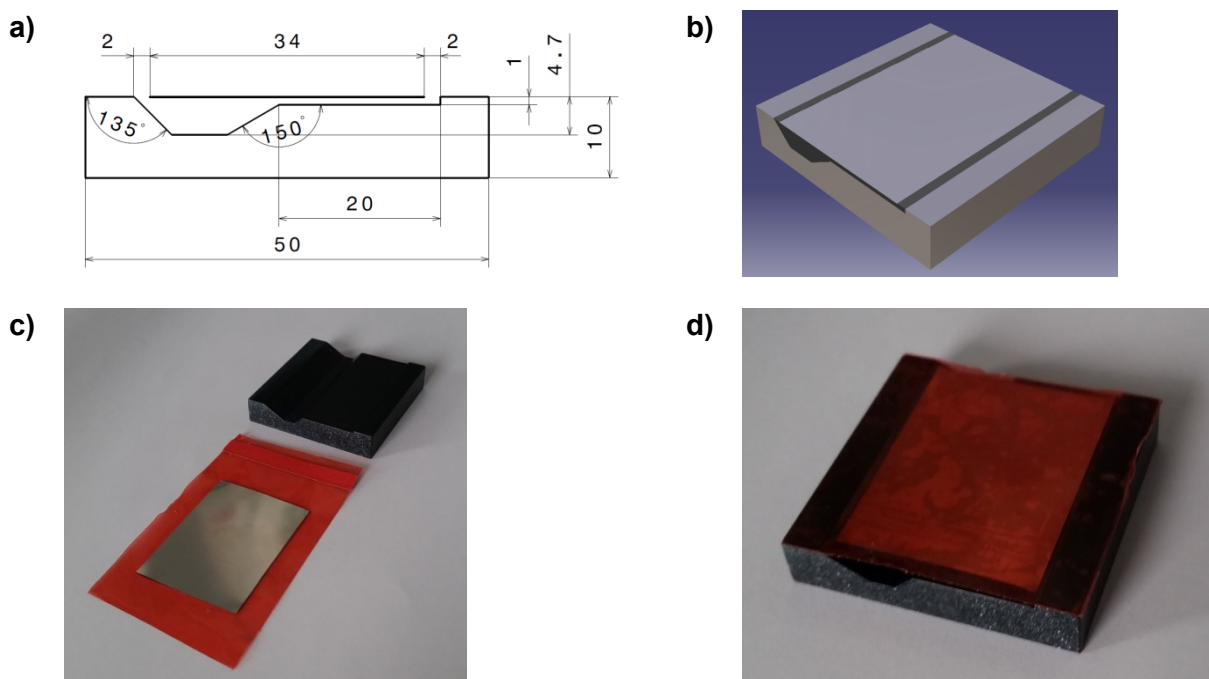
Die Schälversuche wurden mit einer Prüftemperatur von 20 °C, 40 °C, 60 °C, 120 °C und 170 °C durchgeführt. Analog zu den Stirnabzugsversuchen zeigte sich auch bei den Schälversuchen ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und Schälwiderstand. Unter Temperaturerhöhung nimmt der Schälwiderstand signifikant ab, wodurch die Entfernung der Abdeckleiste vereinfacht wird. Ein deutlicher Abfall des Schälwiderstands konnte bis zu einer Temperatur von 60 °C beobachtet werden (siehe Abbildung 24). Bei einer weiteren Erhöhung der Temperatur nimmt der Schälwiderstand weniger stark ab. Bei einer Prüftemperatur von 60 °C konnte im Vergleich zu den Versuchen bei 20 °C der maximale Schälwiderstand mehr als halbiert und der konstante Schälwiderstand sogar gedrittelt werden.



## 8.1.3 Thermomechanische Untersuchungen von Fügeübergängen

Im Rahmen von OptiHyL wurde der chemisch bedingte sowie der thermisch bedingte Schrumpf von Dichtmassen und deren Auswirkung auf die Abdeckleiste untersucht. Weiter wurde der Einfluss von erhöhter Temperatur (60 °C) hinsichtlich einer Dichtmassenexpansion und einer dadurch verbundenen Verformung der Abdeckleiste untersucht.

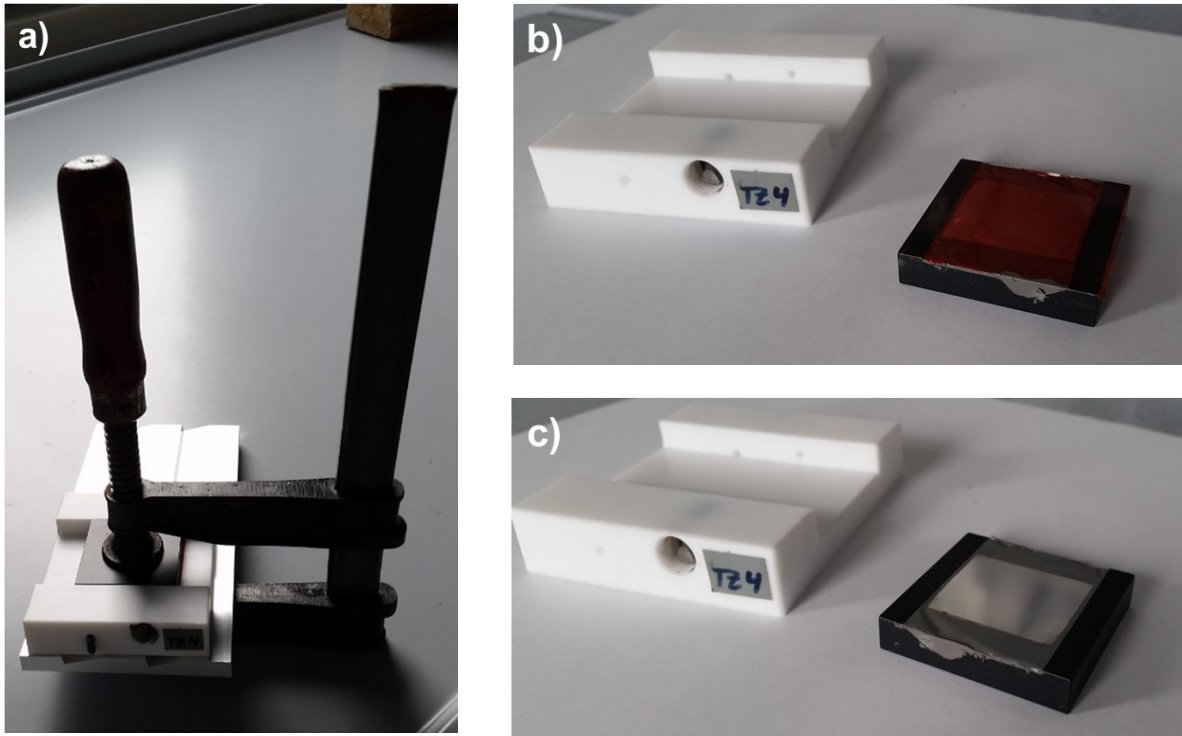
Die Untersuchungen wurden an Nutproben mit der in Abbildung 25-a dargestellten Geometrie durchgeführt. Die Nut wurde hierbei der Einfachheit halber in zehn Millimeter dicke Aluminiumplatten gefräst. Insgesamt wurden vier unterschiedlich dicke Abdeckleisten (aus Stahl) mit einer Dicke von 0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm und 0,20 mm getestet. Für die Füllung der Nut wurde eine polysulfidbasierte Dichtmasse (Dichtmasse-A) verwendet. Die Dichtmasse-A ist ein Zweikomponentensystem und mangandioxidhärtend. Die Einsatztemperatur der Dichtmasse-A liegt im Temperaturbereich von -55 °C bis 130 °C. Für die Applikation der Dichtmasse und Abdeckleiste wurde eine Spritzgussvorrichtung verwendet. In Abbildung 25-c und Abbildung 25-d sind die vorbereitenden Schritte für den Spritzgussprozess dargestellt. Hierbei wurde die Abdeckleiste auf einen Klebefilm gedrückt und zusammen mit diesem an der Nutprobe positioniert.



**Abbildung 25: Probenvorbereitung; (a): Abmaß der getesteten Nutgeometrie; (b): 3D Modell einer mit Dichtmasse gefüllten und mit einer Abdeckleiste applizierten Probe; (c) Position der Abdeckleiste auf einem Klebefilm; (d) Positionierung des Klebefilms mit Abdeckleiste auf einer Nutprobe.**

Nach der Vorbereitung wurden die Proben in eine Spritzgussvorrichtung gelegt, mit einer Schraubzwinde befestigt und mit Dichtmasse gefüllt (siehe Abbildung 26-a). Nach einer gewissen

Härtezeit wurde die Probe aus der Spritzgussvorrichtung montiert (siehe Abbildung 26-b) und der Klebestreifen entfernt (siehe Abbildung 26-c).



**Abbildung 26: Probenherstellung; (a): Fixierung der Nutprobe mit Abdeckleiste in der Spritzgussvorrichtung; (b): mit Dichtmasse gefüllte Probe nach der Härtung; (c): Probe nach der Entfernung des Klebebands.**

Die vier Proben mit den unterschiedlich dicken Abdeckstreifen (0,05 mm, 0,10 mm, 0,15 mm und 0,20 mm) sind in Abbildung 27 dargestellt. Die vier Proben wurden hinsichtlich des chemisch bedingten Schrumpfes (Aushärteschumpf), des thermisch bedingten Schrumpfes sowie des Einflusses von erhöhter Temperatur untersucht.

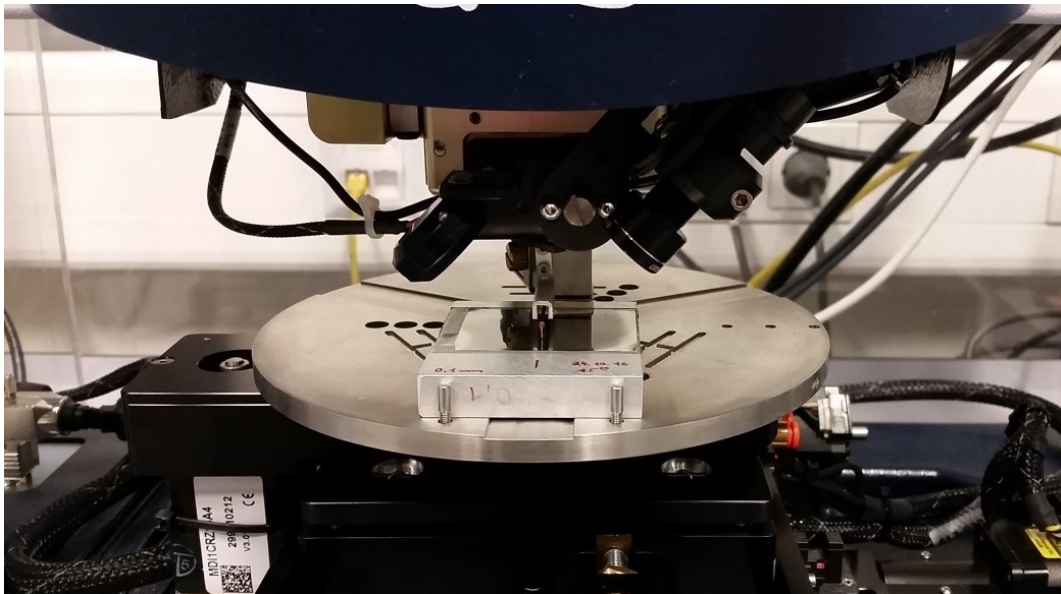


Abbildung 27: Nutproben mit polysulfidbasierter Dichtmasse-A und Abdeckstreifen; Dicke der Abdeckstreifen: 0,05 mm (a), 0,10 mm (b), 0,15 mm (c) und 0,20 mm (d).

## 8.1.3.1 Chemisch bedingter Schrumpfung

Bedingt durch die Vernetzung von Harz und Härter der zwei Komponenten Dichtmasse-A schrumpft das Material während der Aushärtung. Der Aushärteprozess startet ab dem Zeitpunkt der Vermischung von Harz und Härter. Der chemisch bedingte Schrumpfung ist zu Beginn der Härtung betragsmäßig am größten und nimmt mit zunehmender Härtung ab.

Der chemisch bedingte Schrumpfung wurde mit einem taktilen Messgerät Dektak XT (Bruker Corporation, Billerica, USA) ermittelt. In Abbildung 28 ist das verwendete taktilen Messgerät während der Messung einer Probe dargestellt. Jede Probe wurde in verschiedenen Zeitabständen quer zur Nut vermessen. Die Position der einzelnen Messungen einer Probe war hierbei stets die gleiche.



**Abbildung 28: Taktilen Messgerät Dektak XT mit eingelegerter Probe (gehärtete Dichtmasse mit Abdeckleiste darauf).**

Die Zeitspanne zwischen Dichtmassenapplikation und taktiler Messung betrug 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h sowie 360,5 h. In Abbildung 29 sind die Ergebnisse von der Probe mit einer Abdeckleistendicke von 0,05 mm, in Abbildung 30 mit einer Dicke von 0,10 mm, in Abbildung 31 mit einer Dicke von 0,15 mm und in Abbildung 32 mit einer Dicke von 0,20 mm dargestellt. Das jeweils erste Diagramm (a) zeigt die mit dem taktilen Messgerät bestimmte Oberfläche nach unterschiedlichen Zeitspannen zwischen Dichtmassenapplikation und Messung. Das zweite Diagramm (b) zeigt die berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die jeweilig erste Messung (20,5 h nach der Dichtmassenapplikation).

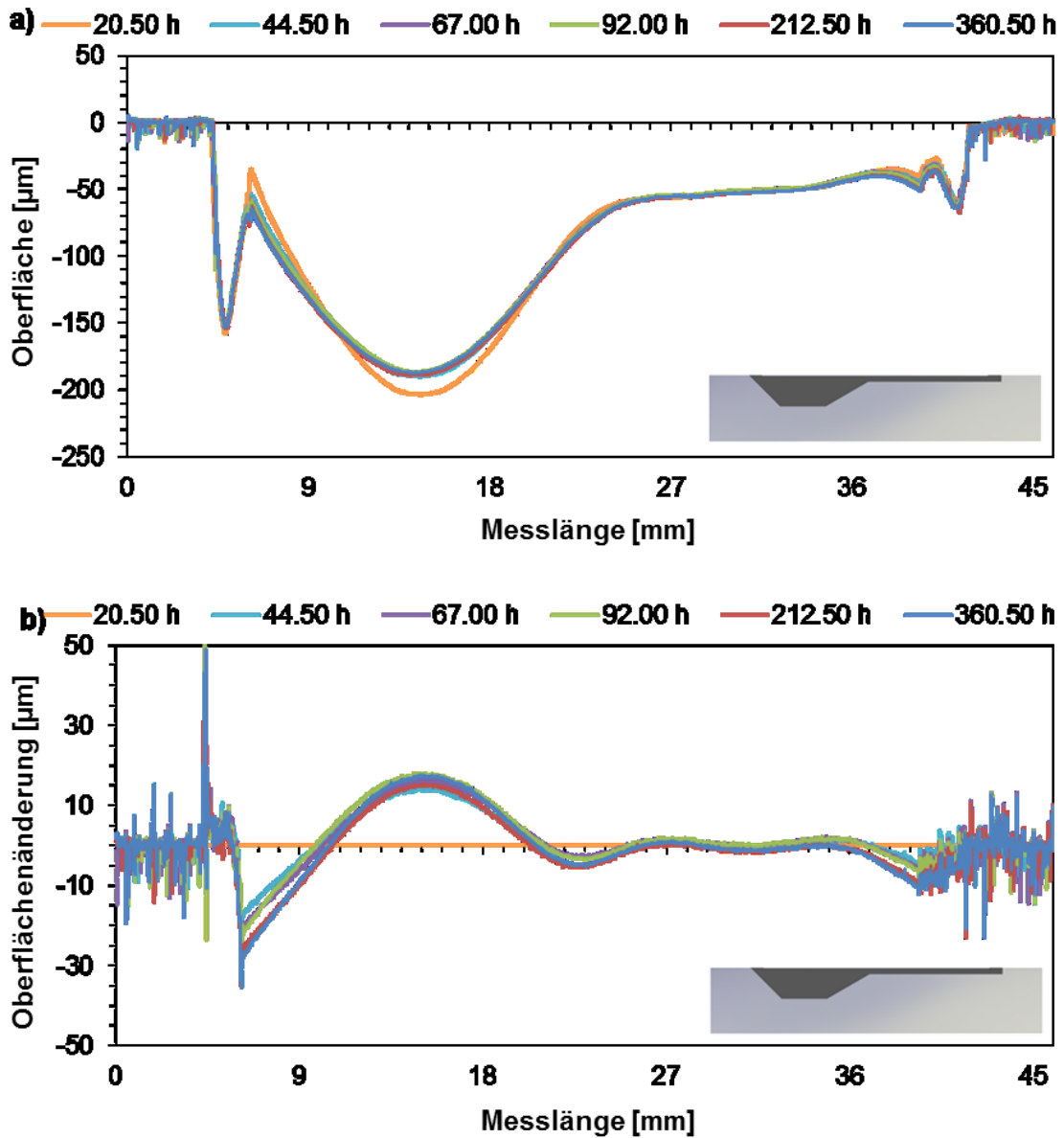


Abbildung 29: Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h.

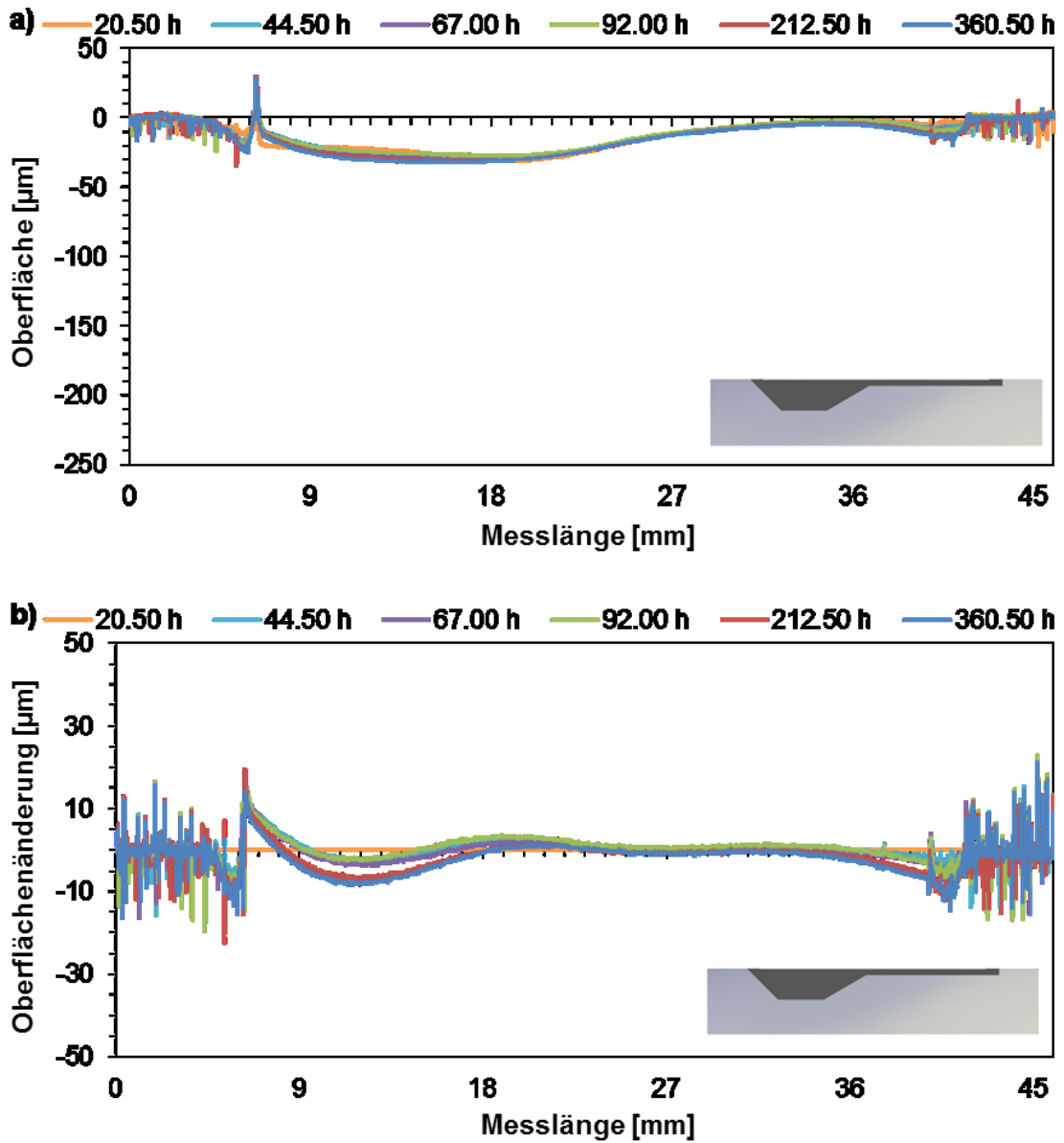


Abbildung 30: Probe mit einem 0,10 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h.



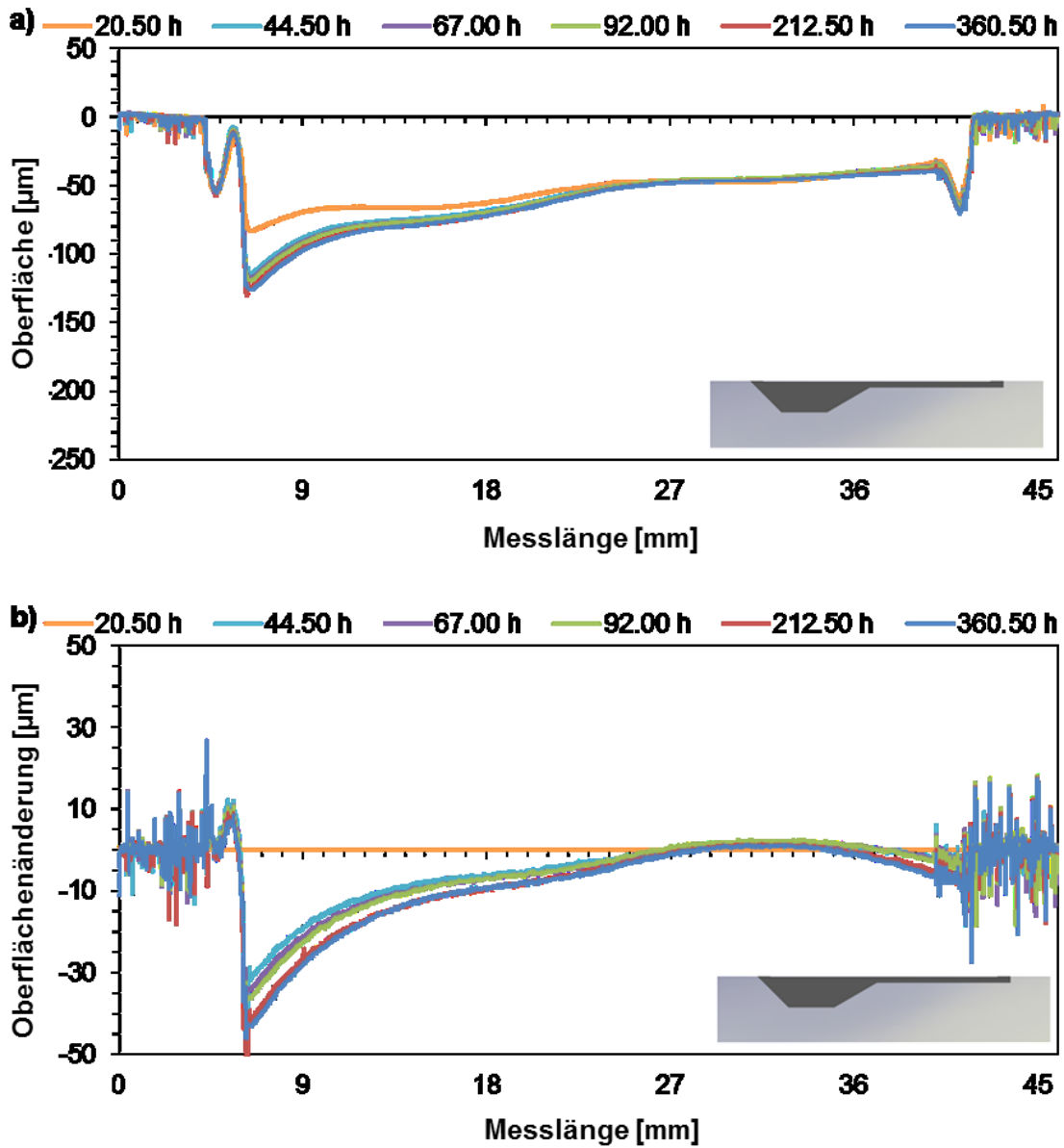


Abbildung 31: Probe mit einem 0,15 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h.

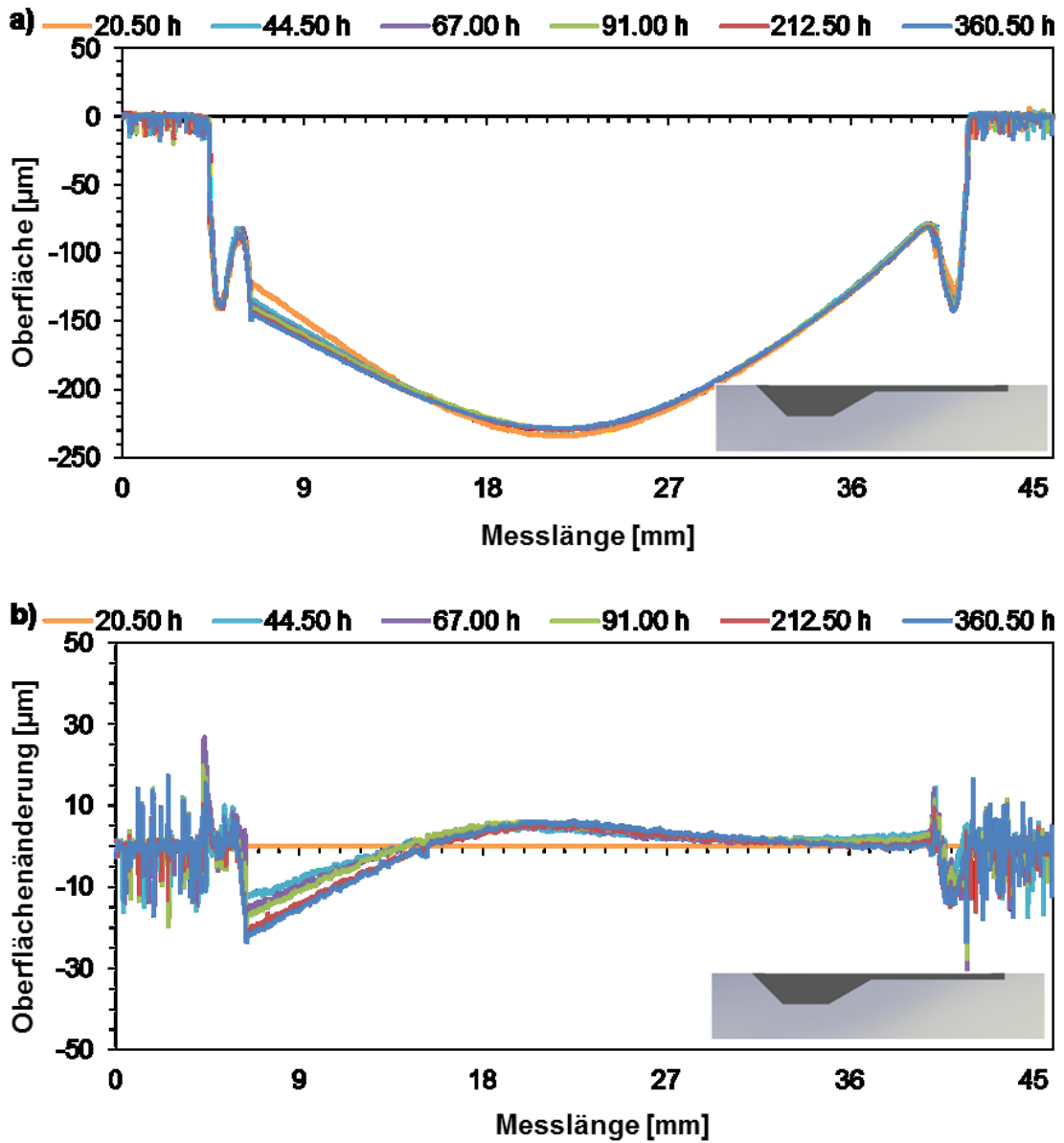


Abbildung 32: Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberfläche nach 20,5 h, 44,5 h, 67 h, 92 h, 212,5 h und 360,5 h nach der Applikation der Dichtmasse; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung nach 20,5 h.

## 8.1.3.2 Thermisch bedingter Schrumpf

Während des Fluges in 10000 m Höhe sinken die Temperaturen auf ca.  $-55\text{ °C}$ . Die tiefen Temperaturen bewirken einen Schrumpf der Dichtmassen in den Fügeübergängen und somit eine Deformation der Abdeckleiste. Dies hat wiederum eine Auswirkung auf die Aerodynamik der Fügezone. Um das Verhalten von Nutproben mit Füllmasse und Deckstreifen zu untersuchen, wurden die Probe mit dem 0,05 mm dicken Deckstreifen und die Probe mit dem 0,20 mm dicken Deckstreifen von  $22\text{ °C}$  (Raumtemperatur) auf  $-50\text{ °C}$  heruntergekühlt. Während des Herunterkühlens wurden die Oberflächen der Proben taktil (Dektak XT) bei  $22\text{ °C}$ ,  $10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $-10\text{ °C}$ ,  $-20\text{ °C}$ ,  $-30\text{ °C}$ ,  $-40\text{ °C}$  und  $-50\text{ °C}$  (Dichtmassentemperatur) gemessen.

In Abbildung 33 sind die Ergebnisse von der Probe mit einer Abdeckleistendicke von 0,05 mm und in Abbildung 34 mit einer Dicke von 0,20 mm dargestellt. Das jeweils erste Diagramm (a) zeigt die mit dem taktilen Messgerät bestimmte Oberfläche bei unterschiedlichen Temperaturen. Das zweite Diagramm (b) zeigt die berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die jeweilig erste Messung bei  $22\text{ °C}$ .

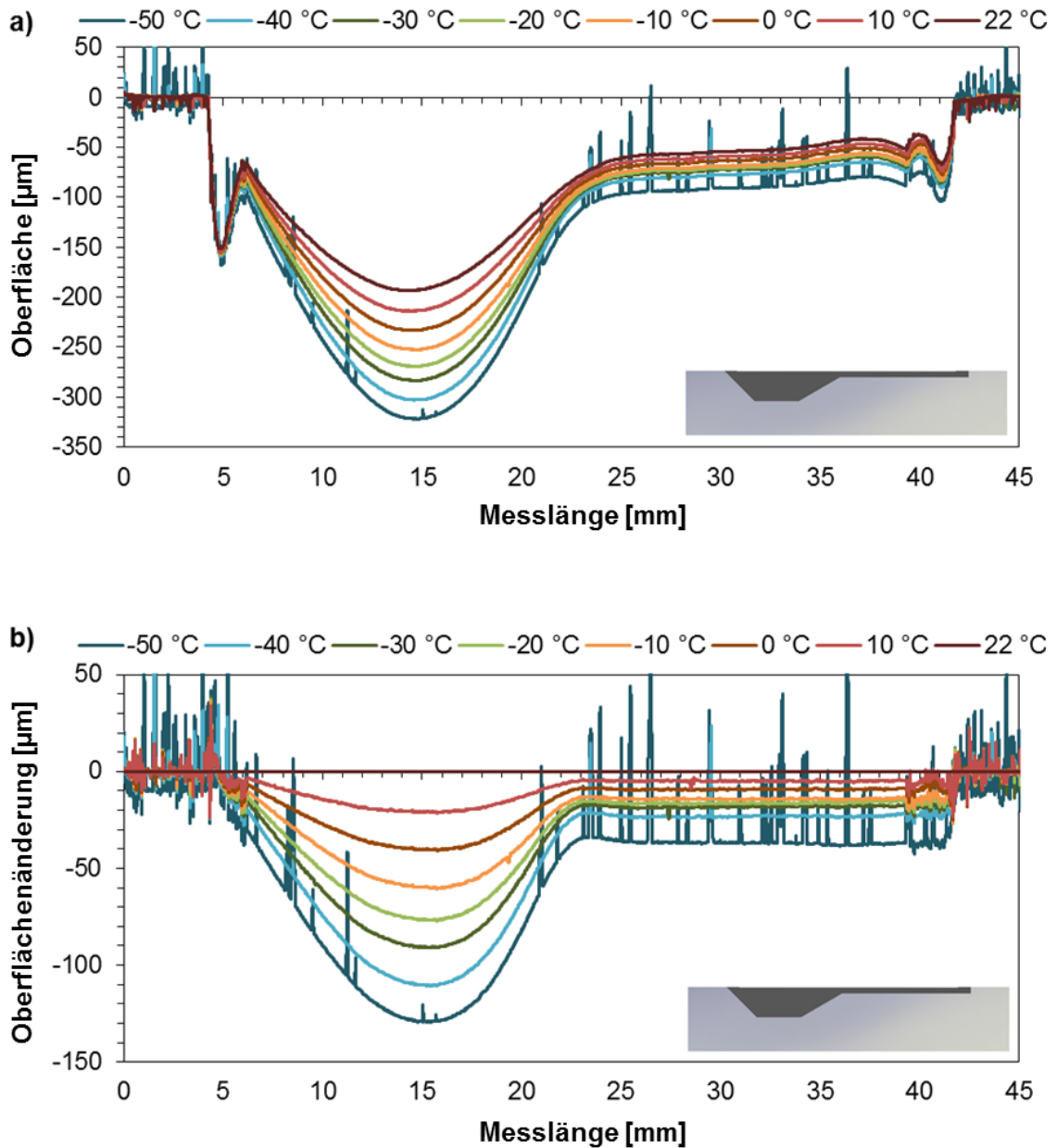
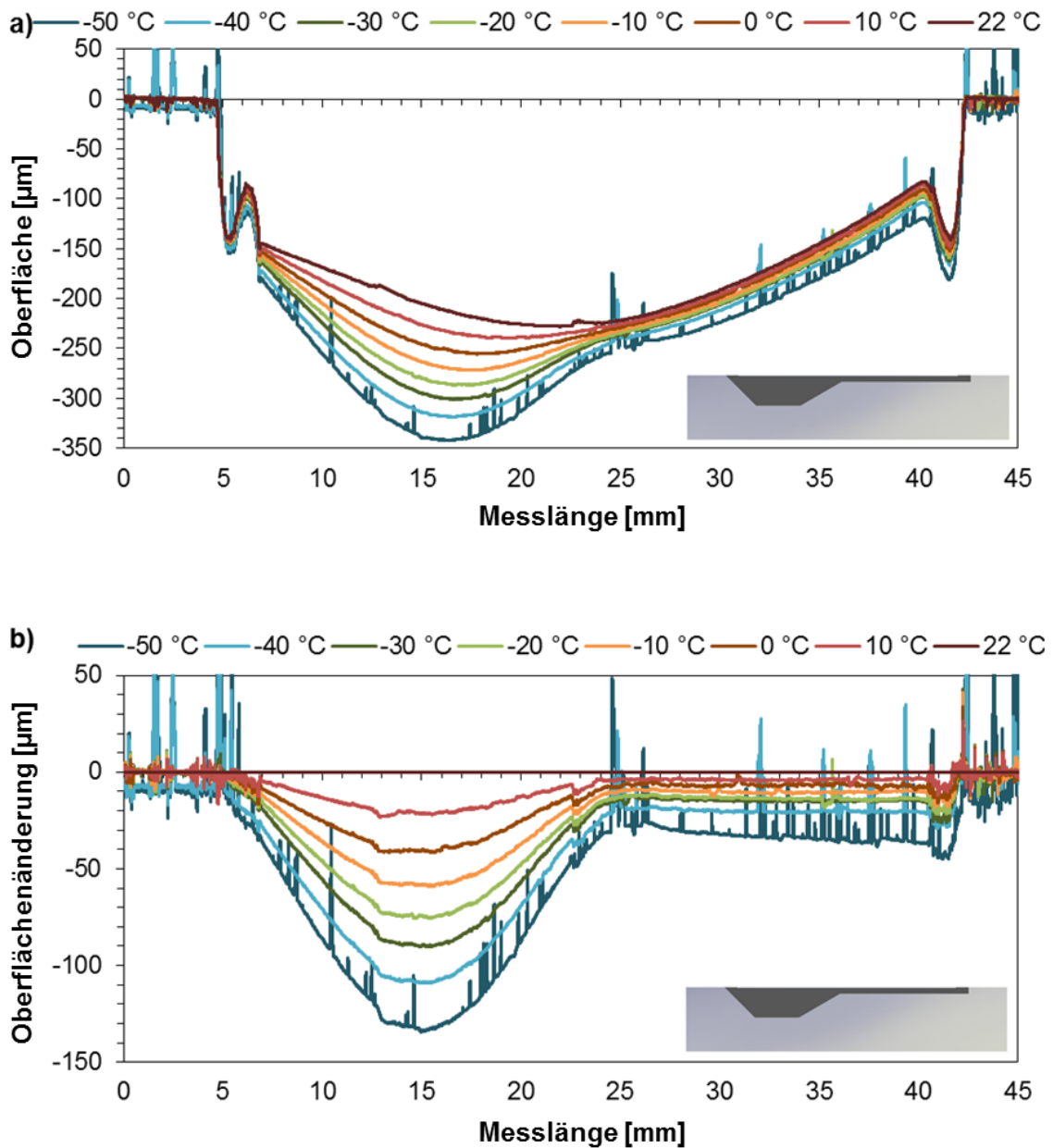


Abbildung 33: Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberflächen bei 22 °C, 10 °C, 0 °C, -10 °C, -30 °C, -40 °C und -50 °C; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.



**Abbildung 34:** Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Messung der Oberflächen bei 22 °C, 10 °C, 0 °C, -10 °C, -30 °C, -40 °C und -50 °C; (b): Berechnete Oberflächenänderung bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.

In Abbildung 35 ist der maximale thermisch bedingte Schrumpfung im tiefen Nutbereich (Rauten) und im flachen Nutbereich (Kreise) in Abhängigkeit von der Füllmassentemperatur dargestellt. In Abbildung 35-a ist die maximale Oberflächenänderung der Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen und in Abbildung 35-b mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen dargestellt. Bei beiden Proben ist die maximale Oberflächenänderung im tiefen Nutbereich signifikant höher als im flachen Nutbereich.

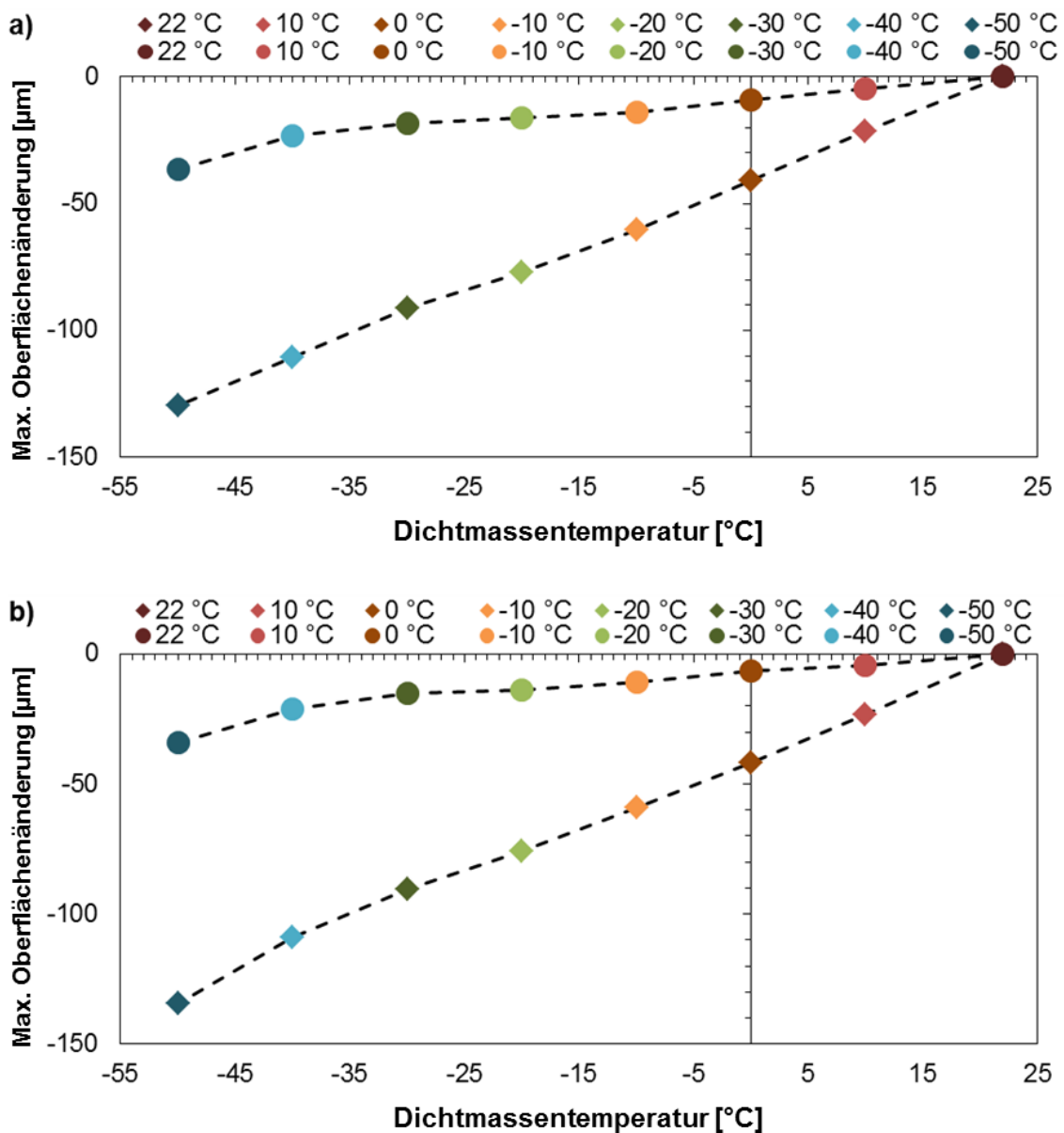
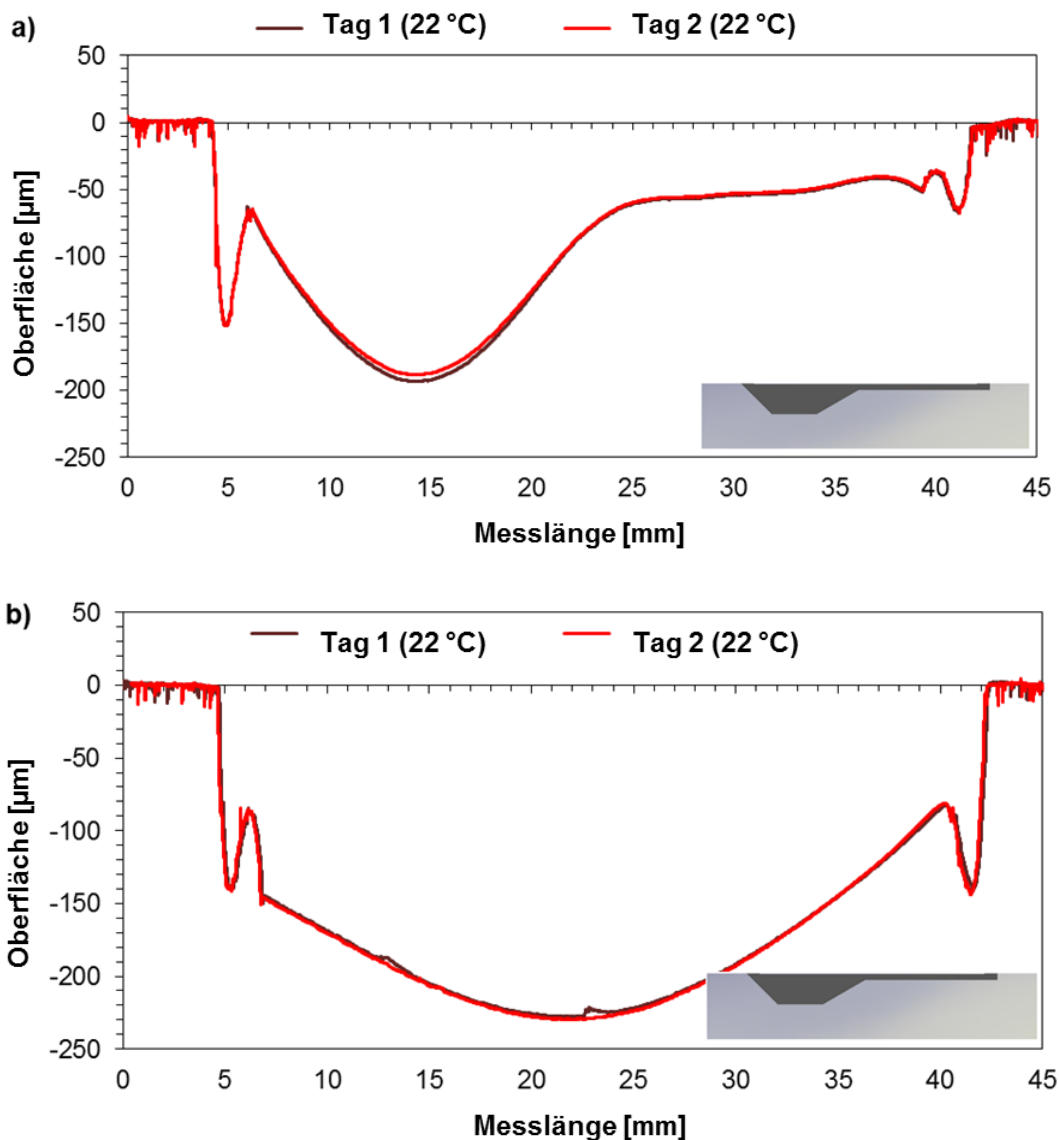


Abbildung 35: Maximaler thermisch bedingter Schrumpfung im tiefen Nutbereich (Rauten) und im flachen Nutbereich (Kreise) in Abhängigkeit von der Dichtmassentemperatur; (a): Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (b): Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen.



Einen Tag nach den Tieftemperaturversuchen wurden die beiden Proben erneut bei 22 °C an derselben Position vermessen. In Abbildung 36-a sind die Oberflächen von der Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen und in Abbildung 36-b mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen dargestellt. Die dunkelrote Linie zeigt die Oberflächen vor den Tieftemperaturversuchen (Tag 1) und die hellrote Linie zeigt die Oberflächen nach den Tieftemperaturversuchen (Tag 2). Die Füllmassen hatten bei der Messung der dargestellten Oberflächen eine Temperatur von 22 °C. Bei beiden Proben konnte keine signifikante Änderung der Oberfläche, bedingt durch das Herabkühlen, beobachtet werden. Folglich ist die Oberflächenänderung bei tiefen Temperaturen reversibel.



**Abbildung 36:** Oberfläche der Proben bei 22 °C vor den Tieftemperaturversuchen (Tag 1; dunkelrote Linien) und danach (Tag 2; hellrote Linien); (a): Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (b): Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen.

### 8.1.3.3 Thermisch bedingte Expansion

Neben tiefen Temperaturen, sind Dichtmassen auch erhöhten Temperaturen (60 °C), z.B. an heißen Sommertagen am Boden, ausgesetzt. Bedingt durch die Erwärmung expandieren die Dichtmassen. Um die Auswirkung der expandierenden Dichtmasse auf den Abdeckstreifen zu untersuchen, wurden die Proben mit den vier unterschiedlich dicken Abdeckstreifen bei erhöhten Temperaturen (60 °C) gelagert.

Vor der Lagerung bei erhöhter Temperatur wurden die Oberflächen der Proben mit dem taktilen Messgerät Dektak XT bei 22 °C vermessen. Anschließend erfolgte die Lagerung der Proben für sechs Stunden in einer Klimakammer bei 60 °C mit einer geringen relativen Luftfeuchtigkeit (10 % r.F.). Vor einer erneuten taktilen Vermessung der Oberflächen mit dem DektakXT, wurden die Proben für zwölf Stunden bei 22 °C gelagert. Die Lagerung bei 60 °C wurde insgesamt viermal durchgeführt. In Abbildung 37-a ist die Temperatur und in Abbildung 37-b die relative Luftfeuchtigkeit während der Untersuchungen dargestellt. Die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit während einer Lagerung der Proben in der Testkammer sind in Abbildung 37-c dargestellt.

In Abbildung 38-a, Abbildung 39-a, Abbildung 40-a und Abbildung 41-a sind die Oberflächen vor bzw. nach der Lagerung bei 60 °C dargestellt. Die nicht reversible Oberflächenänderung ist in Abbildung 38-b, Abbildung 39-b, Abbildung 40-b und Abbildung 41-b dargestellt. Unabhängig von der Dicke der Abdeckleiste konnte eine nicht reversible Oberflächenänderung beobachtet werden.

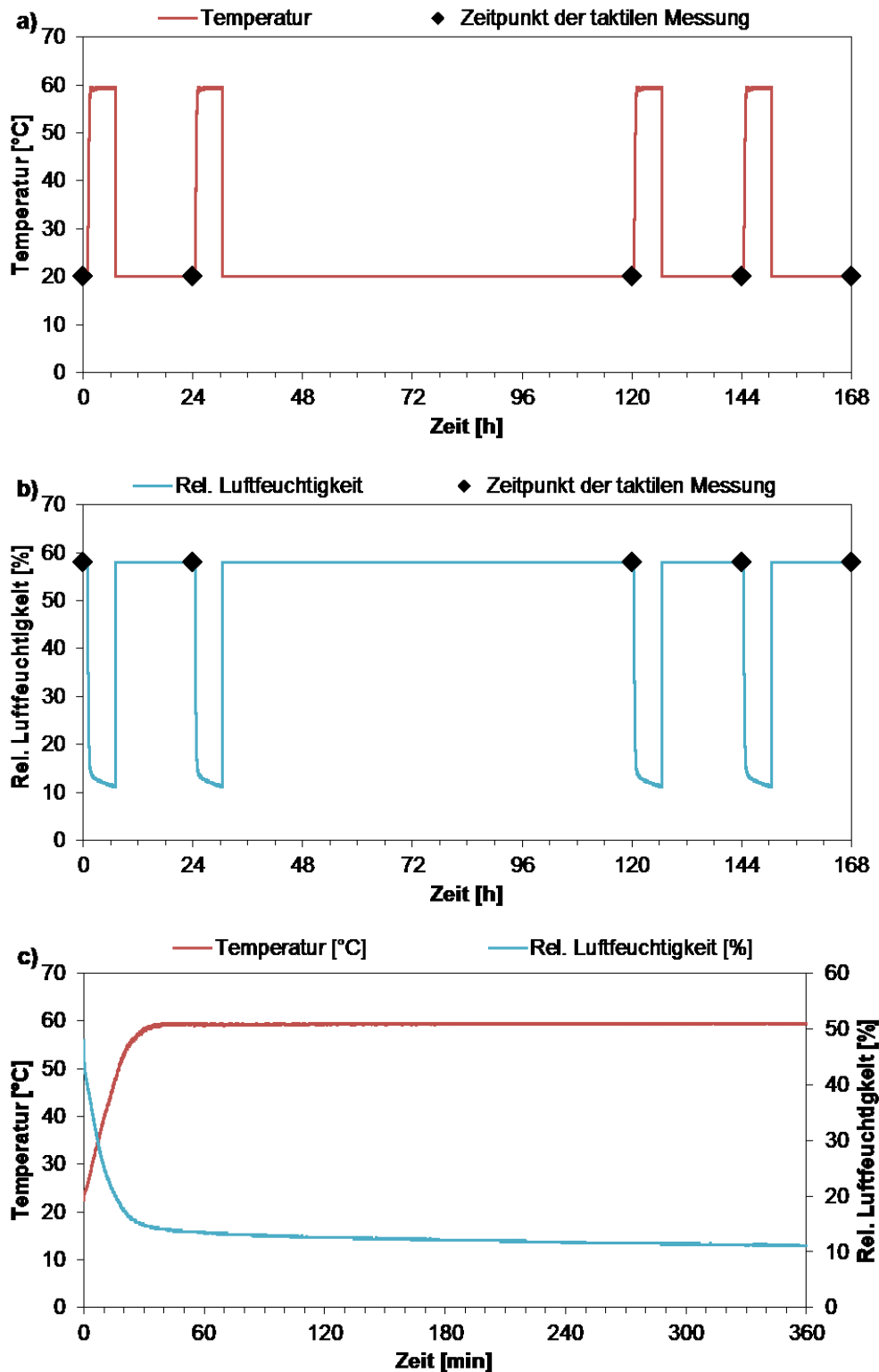


Abbildung 37: Klima während der Auslagerung der Proben bei erhöhter Temperatur; (a): Temperatur während der Untersuchung; (b): Relative Luftfeuchtigkeit während der Untersuchung; (c): Konditionen während einer Lagerung in der Klimakammer.

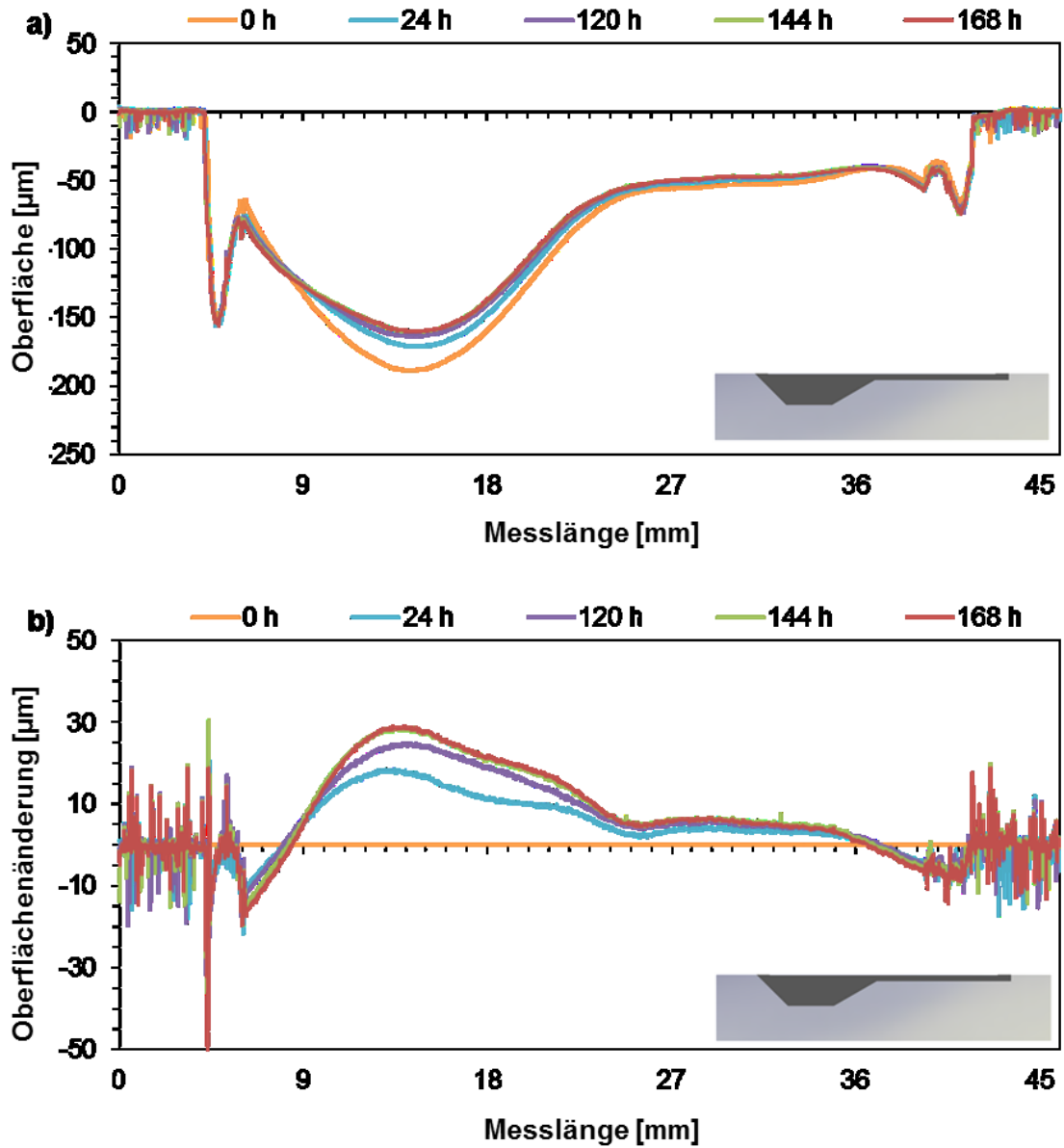


Abbildung 38: Probe mit einem 0,05 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.

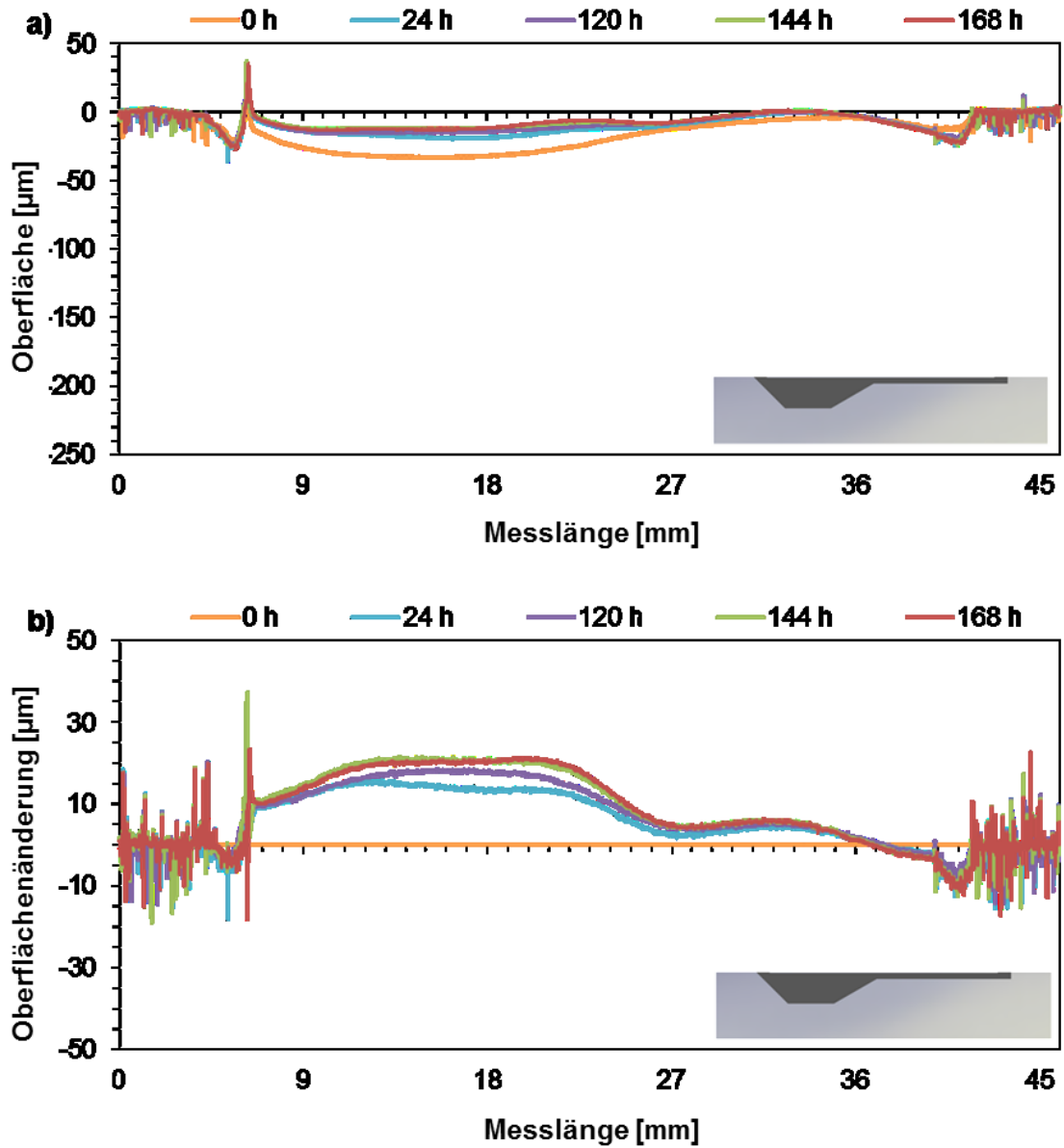


Abbildung 39: Probe mit einem 0,10 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.

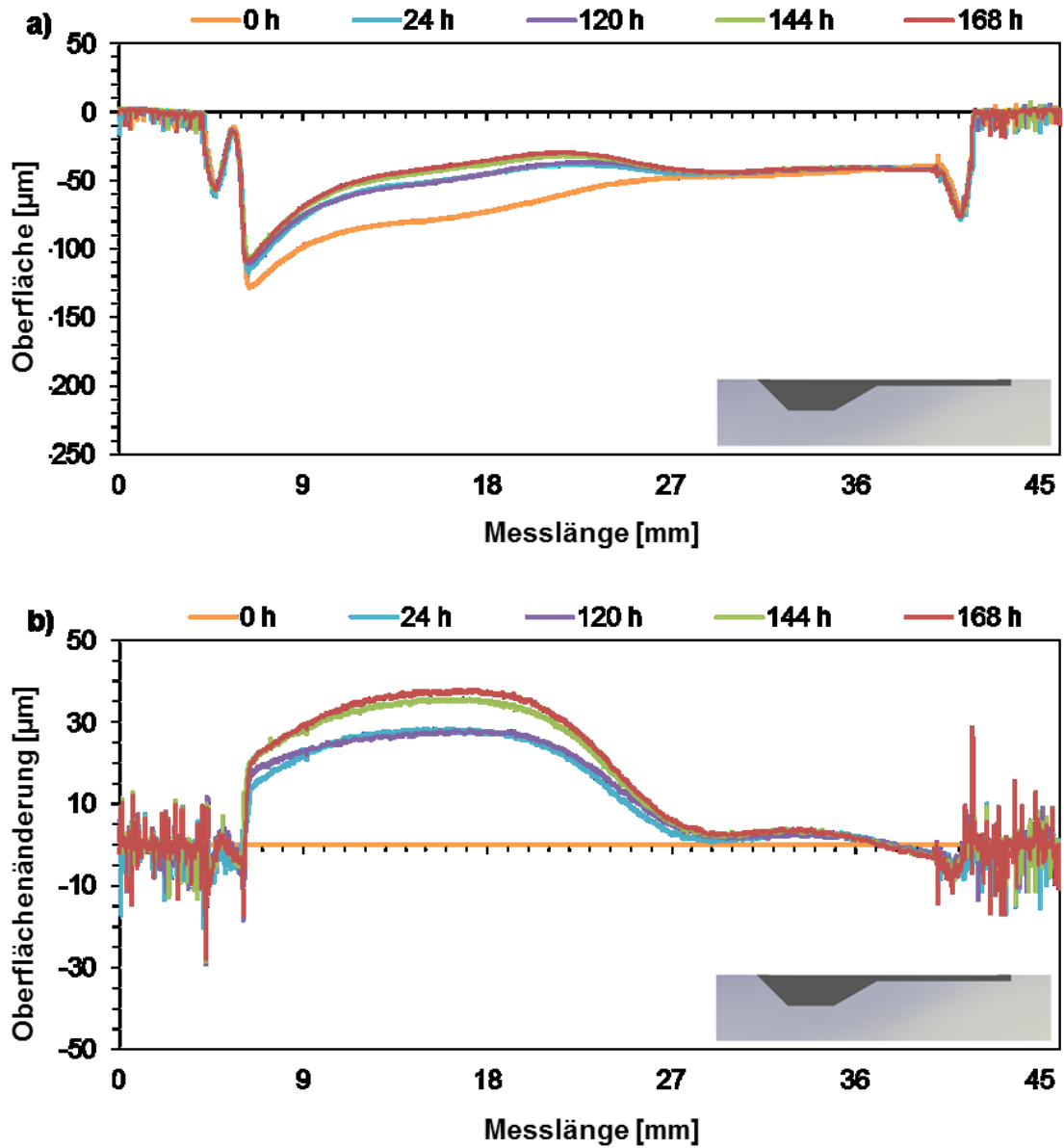


Abbildung 40: Probe mit einem 0,15 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.



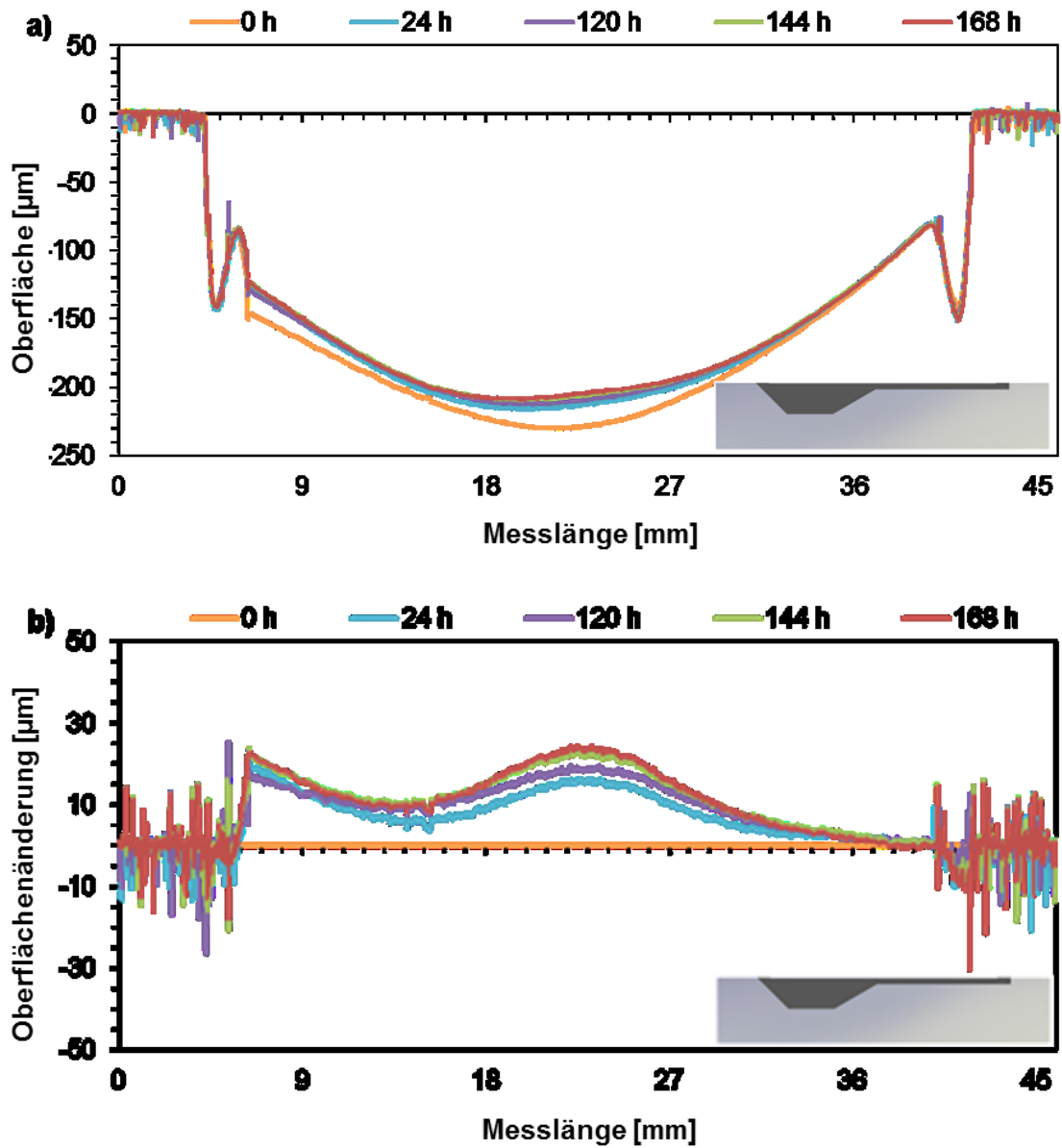


Abbildung 41: Probe mit einem 0,20 mm dicken Abdeckstreifen; (a): Oberfläche vor der Lagerung (0 h) und nach jeweils 4 Lagerungen bei 60 °C (siehe Rauten in Abbildung 37-a); (b): Berechnete Oberflächenänderung gemessen jeweils nach 4 Lagerungen bei 60 °C bezogen auf die erste Messung bei 22 °C.

## 8.1.3.4 Zusammenfassung

### Chemisch bedingter Schrumpfung (Kapitel 8.1.3.1)

Alle vier Proben zeigen eine chemisch bedingte Oberflächenänderung. Die Form und der Betrag der Oberflächenänderung sind jedoch von der Dicke der Abdeckleiste abhängig. Der chemisch bedingte Schrumpfung ist nicht reversibel. Bedingt durch die Steifigkeit der Abdeckleiste kommt es durch den chemisch bedingten Schrumpfung zu einer Expansion der Oberfläche (vgl. Abbildung 29-b und Abbildung 32-b).

### Thermisch bedingter Schrumpfung (Kapitel 8.1.3.2)

Die beiden getesteten Proben zeigen trotz unterschiedlich dickem Abdeckstreifen (0,05 mm und 0,20 mm) ein ähnliches thermisch bedingtes Schrumpfungverhalten (vgl. Abbildung 33-b und Abbildung 34-b). Im tiefen Nutbereich zeigte sich ein signifikant höherer Schrumpfung als im flachen Nutbereich. Die Maximale Oberflächenänderung (Schrumpfung) bei -50 °C betrug bei beiden Proben ca. -140 µm.

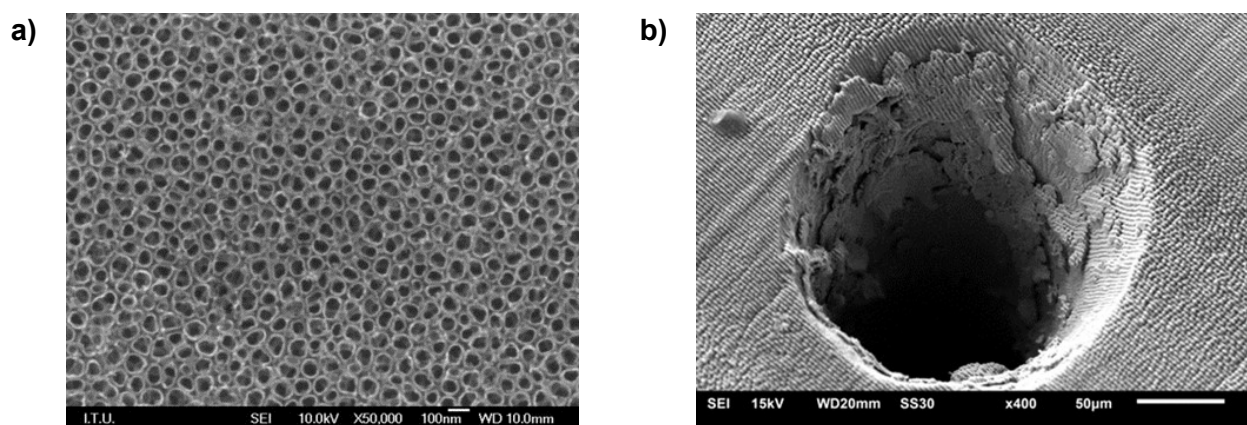
### Thermisch bedingte Expansion (Kapitel 8.1.3.3)

Alle vier Proben zeigten eine Expansion der Oberfläche. Die Expansion war bei allen Proben im tiefen Nutbereich signifikant höher als im flachen Nutbereich. Die maximale Oberflächenänderung betrug bei allen vier Proben ca. 30 µm. Die Oberflächenänderung bedingt durch die Expansion der Füllmasse ist nicht reversibel.

## 8.2 Ver-/Enteisung der Mikroperforation

### 8.2.1 Analyse zur Feuchtaufnahme und Konzept zur Feuchtevermeidung

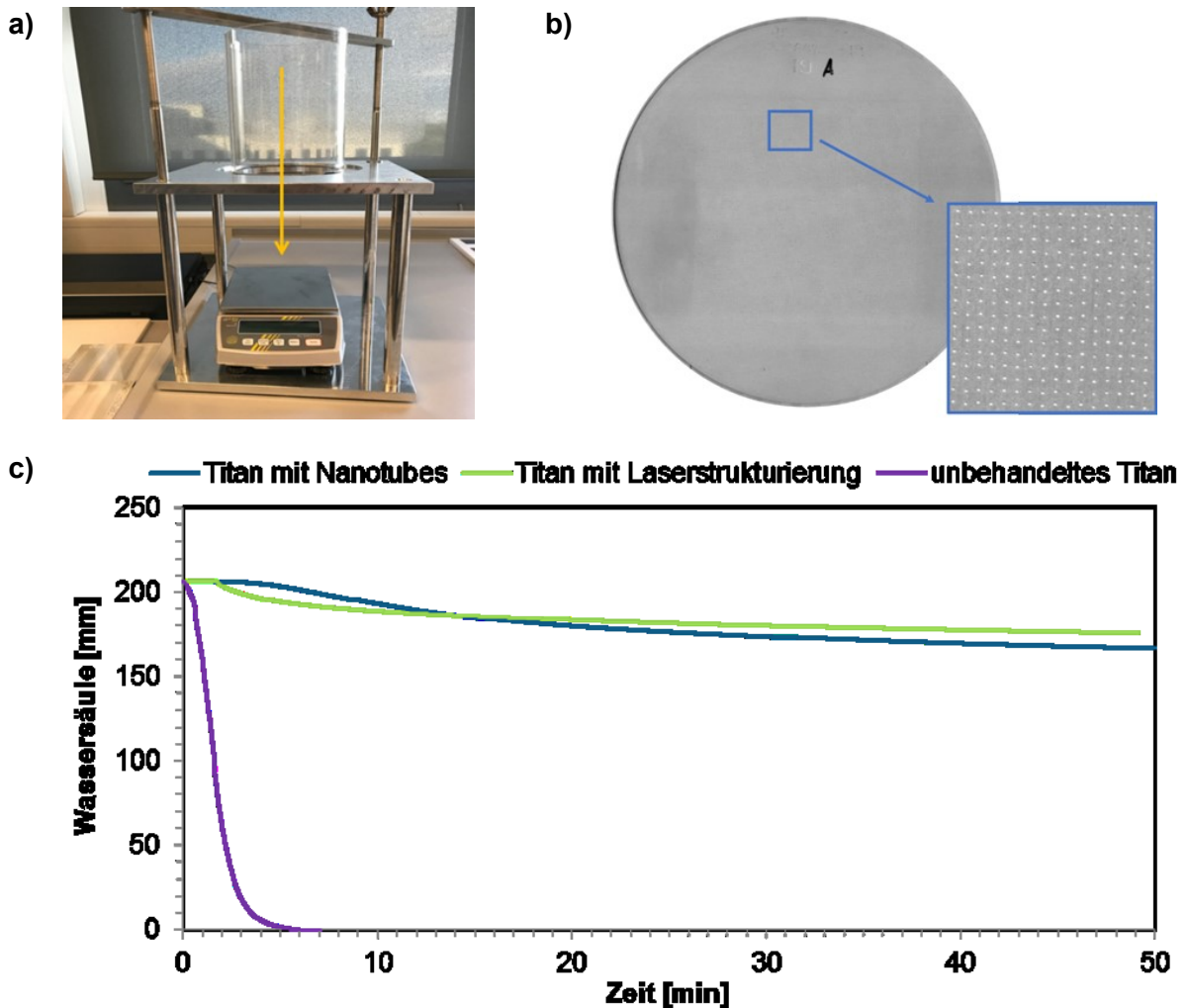
Um den Einfluss von unterschiedlichen Oberflächenmodifizierungen (superhydrophob beschichtete Nanotube- bzw. Laserstruktur) auf die Mikroperforation zu untersuchen, wurde ein Wassersäulenprüfstand in Anlehnung an DIN EN 20811 entwickelt. Die Ronden wurden durch eine Anodisierung bzw. Laserbehandlung strukturiert und anschließend mit einer hydrophoben Lösung (beinhaltet Perfluoropolyether Phosphonate) beschichtet. Als Referenz diente eine unbehandelte Titanrunde. In Abbildung 42-a ist ein REM Bild mit Nanoröhrchen (Anodisierung) und in Abbildung 42-b eine mit einem Pikosekundenlaser (ps-Laser) strukturierte Mikroperforation dargestellt.



**Abbildung 42: Oberflächenstrukturiertes Titan; (a): REM Aufnahme von Titanoxid Nanoröhrchen [19]; (b): REM Aufnahme von einer mit einem Pikosekundenlaser strukturierten Titanoberfläche [20].**

Der Aufbau besteht aus einer Grundplatte und einer mittleren Platte mit einer runden Aussparung (siehe Abbildung 43-a). Auf die Aussparung wird die zu untersuchende mikroperforierte Ronde (siehe Abbildung 43-b) gelegt. Auf die Ronde wird ein Plexiglasrohr mit einem Dichtungsring am Flansch aufgesetzt. Dieses wird von einem Querbalken und zwei Flügelschrauben niedergehalten. Unterhalb der Ronde ist ein Behälter platziert, der auf einer Waage steht. Hierdurch wird das durchlaufende Wasser aufgefangen. Mit der Waage wird kontinuierlich das Gewicht des aufgefangenen Wassers aufgezeichnet.

Der Wassersäulentest wurde mit 3200 ml entionisiertem Wasser durchgeführt, was eine Wassersäule von 206 mm zu Beginn der Testdurchführung ergibt. In Abbildung 43-c sind die Wassersäulen der getesteten Proben in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.



**Abbildung 43: Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit der Mikroperforation; (a): Darstellung des Wassersäulenprüfstandes; (b): Beispiel einer mikroperforierten Ronde; (c): Wassersäule in Abhängigkeit von der Zeit der unterschiedlichen Oberflächenmodifizierten Titanronden.**

Aus den in Abbildung 43-c dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass bei der mikroperforierten Ronde ohne Strukturierung und superhydrophober Beschichtung (unbehandeltes Titan), das Wasser komplett abfließt. Hingegen nähert sich bei den Oberflächen mit superhydrophober Beschichtung (Titan mit Nanotubes bzw. Titan mit Laserstrukturierung) die Wassersäule einem Endwert. Bei den Proben mit einer hydrophoben Beschichtung kommt somit bis zu einer gewissen Wassersäule kein Wasser durch die Perforation.

Die Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit von mikroperforierten Ronden während der Absaugung wird in Kapitel 8.3.1.3 vertieft behandelt.

## 8.2.2 Vereisungsversuche im iCORE Windkanal

Ziel war es, eine Versuchsmethode zu entwickeln, mit Hilfe welcher NACA ähnliche Versuchsproben mit einer Mikroperforation im Vereisungswindkanal iCORE (Icing and Contamination Research Facility) bei Airbus Materials X in Taufkirchen getestet werden können. Der in Abbildung 44 dargestellte iCORE ist ein zirkulierender Windkanal mit einer Maximalgeschwindigkeit (TAS: True Air-Speed) von Mach 0,3 und einer minimalen Temperatur (SAT: Static Air Temperature) von  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Testsektion weist einen rechteckigen Querschnitt mit einer Höhe von 150 mm und einer Breite von 100 mm auf. Die Länge der Testsektion beträgt 450 mm.



**Abbildung 44: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Vereisung von mikroperforierten Proben im Vereisungswindkanal iCORE (Airbus Materials X, Taufkirchen).**

### 8.2.2.1 Probenherstellung und Versuchsaufbau

Für die Herstellung einer mikroperforierten Versuchsprobe wurde ein Titanblech (Reintitan Grad 2) mit einer Dicke von 0,8 mm und einer entsprechenden Mikroperforation verwendet. Die Mikroperforation weist einen Lochdurchmesser von  $50\text{ }\mu\text{m}$  auf der Vorderseite auf. Der Abstand der Löcher zueinander beträgt in X-Richtung und in Y-Richtung  $600\text{ }\mu\text{m}$ .

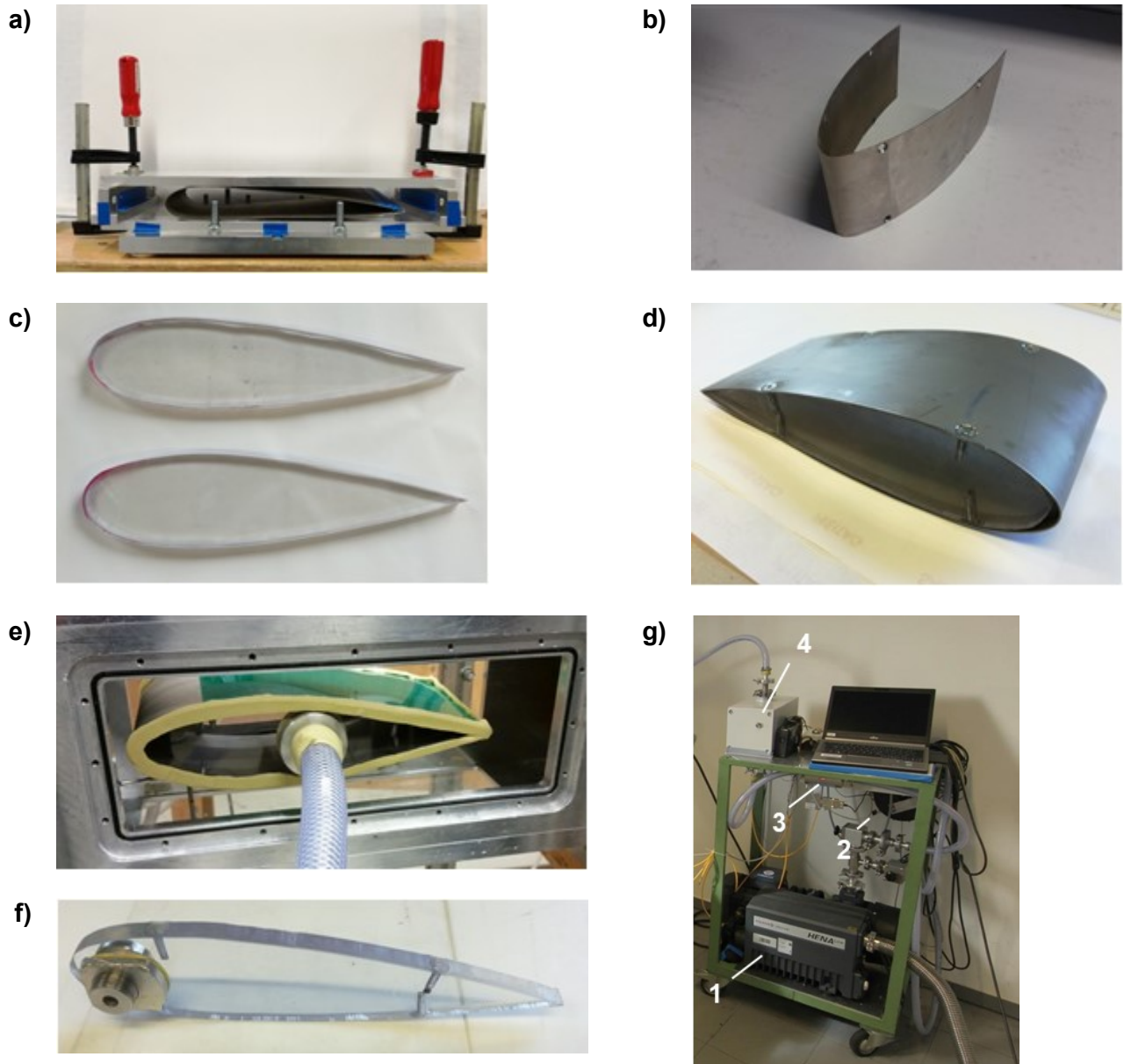
Um das mikroperforierte Titanblech in Form zu biegen, wird eine Niederhaltervorrichtung verwendet (siehe Abbildung 45 a). Die Niederhaltervorrichtung besteht aus einer Grundplatte (Aluminium), einer Druckplatte (Aluminium), zwei Abstandshalter und zwei Schraubzwingen. Das

Zuschneiden des Titanblechs auf eine Länge von 457 mm und eine Breite von 100 mm erfolgte mit einer Schlagschere. Vor dem Einlegen des Titanblechs in die Niederhaltervorrichtung wurde das Blech per Hand so vorgebogen, dass die beiden Enden des Titanblechs aufeinander lagen. Diese Position wurde mit einem Klebeband fixiert. Nach dem Biegen des Titanblechs mit der Niederhaltervorrichtung wurden die Klebebänder wieder entfernt (siehe Abbildung 45 b) und mit den Seitenteilen aus Acrylglas (siehe Abbildung 45 c), unter Verwendung von Schrauben, zu einem NACA 0024 Profil montiert (siehe Abbildung 45 d).

Anschließend wurde für den Anschluss der Absaugvorrichtung (siehe Abbildung 45 e) bzw. des Drucksensors (siehe Abbildung 45 f) in jedes Seitenteil ein Loch gebohrt und ein entsprechender Adapter aus Aluminium montiert.

Um ausschließlich an der Vorderkante abzusaugen, wurde am dahinter liegenden Bereich eine Abdeckklebefolie mit der Bezeichnung PPI 1022-6F (PPI Adhesive Product GmbH, 85411 Hohenkammer, Deutschland) aufgebracht (siehe grüne Folie in Abbildung 45 e). Die Verbindungen zwischen Titanblech, Seitenteile und Seitenfenster wurden mit dem Dichtband Tacky Tape SM5142 (ITW Polymers Sealants North America, 75060 Irving, Texas, USA) abgedichtet (siehe Abbildung 45 e). Die für die Versuche verwendete und in Abbildung 45 g dargestellte Absaugvorrichtung beinhaltet eine Drehschieberpumpe Hena 101 von Pfeiffer Vacuum (Pfeiffer Vacuum GmbH, 35614 Asslar, Deutschland) ein Regelventil, einen Kondensatabscheider DN 40 ISO-KF von Pfeiffer Vacuum und einen Massendurchflussmesser F-113AC von Bronkhorst (Bronkhorst High-Tech B.V., NL-7261 AK Ruurlo, Niederlande).

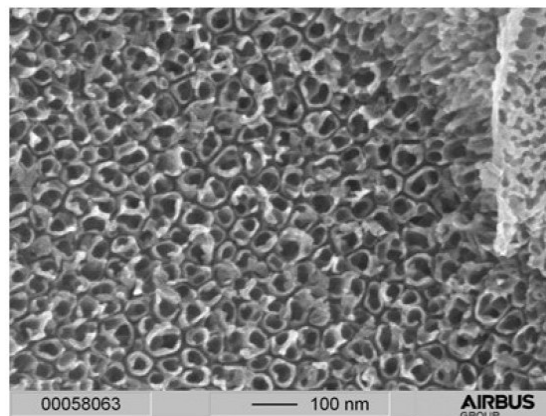




**Abbildung 45:** Herstellung einer mikroperforierten Versuchsprobe für die Vereisungsversuche im iCORE Windkanal; (a): Biegevorrichtung; (b): Vorgebogenes mikroperforiertes Titanblech (Dicke: 0,8 mm); (c): Seitenteile der Versuchsprobe aus Acrylglas; (d): Mittels Verschraubung gefügte Versuchsprobe; (e): In den Vereisungswindkanal iCORE installierte Versuchsprobe; (f): Anschluss für Drucksensor; (g): Absaugvorrichtung mit Drehschieberpumpe Hena 101 (1), Regelventil (2), Massendurchflussmesser F-113AC (3) und Kondensatabscheider (4).

Die NACA 0024 ähnliche Probe wurde sowohl ohne als auch mit einer Oberflächenmodifizierung getestet. Als hydrophobe Oberflächenmodifizierung wurden TiO<sub>2</sub>-Nanotubes erzeugt und mit der kommerziell erhältlichen Beschichtung MecaSurf (Surfactis Technologies, Angers, Frankreich) funktionalisiert. Durch elektrochemisches Anodisieren von Titan in Elektrolytlösungen mit Fluoridzusätzen kommt es zur Bildung von TiO<sub>2</sub> Nanotubes auf der Oberfläche (siehe Abbildung 46).

Die Röhrcchen werden aus der Oxidschicht des Titans gelöst. In Abhängigkeit von pH-Wert, Fluoridkonzentration, Spannung, Temperatur und Anodisierungsdauer wird eine Röhrcchenlänge von  $0,29\ \mu\text{m}$  bis  $250\ \mu\text{m}$  und ein Durchmesser von  $25\ \text{nm}$  bis  $70\ \text{nm}$  erreicht [21] u. [22]. Die Nanostrukturierung führt zu einer Vergrößerung der Oberfläche gegenüber des initialen Zustandes und einer höheren Benetzbarkeit. In [23] wird ein Kontaktwinkel von  $21,9^\circ \pm 5,4^\circ$  bei einem Röhrchendurchmesser von  $68,1\ \text{nm} \pm 3,8\ \text{nm}$  und einer Höhe der Oxidschicht von  $589,2\ \text{nm} \pm 23,7\ \text{nm}$  angegeben.



**Abbildung 46: Titanoberfläche nach der Strukturierung mit TiO<sub>2</sub> Nanotubes [24].**

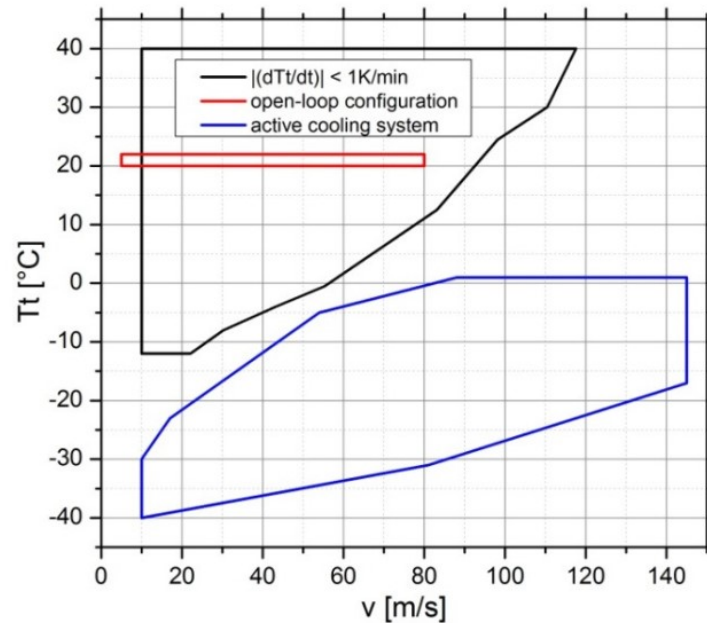
### 8.2.2.2 Vereisungsversuche

Die mikroperforierte Versuchsprobe wurde ohne und mit Oberflächenmodifizierung bei zwei unterschiedlichen Vereisungsbedingungen, die auch im operationellen Betrieb vorkommen können, getestet. Im nachfolgenden werden die hierbei gewählten Parameter für die Totaltemperatur im Windkanal (SAT: Static Air Temperature), die Windgeschwindigkeit (TAS: True Air-Speed) und die Feuchtegehalt der zirkulierenden Luft (LWC: Liquid Water Content) aufgeführt:

- Raueis (Rime Ice; SAT =  $-20\ ^\circ\text{C}$ , TAS =  $50\ \text{m/s}$ , LWC =  $0,3\ \text{g/m}^3$ ) und
- Klareis (Glaze Ice; SAT =  $-5\ ^\circ\text{C}$ , TAS =  $80\ \text{m/s}$ , LWC =  $1,0\ \text{g/m}^3$ ).

Die zu realisierenden Testbedingungen hinsichtlich Windgeschwindigkeit und Totaltemperatur sind der Abbildung 47 zu entnehmen. Die mit einer blauen Linie umrahmte Fläche stellt die möglichen Testbedingungen bei der Verwendung des Kühlsystems und die schwarz umrahmte Fläche die möglichen Testbedingungen ohne die Benutzung eines Kühlsystems dar. Wird der

Windkanal nicht zirkulierend sondern offen betrieben, sind die mit einer roten Linie umrahmten Testbedingungen realisierbar.



**Abbildung 47: Windgeschwindigkeit  $v$  [m/s] und Totaltemperatur  $T_t$  [°C] im iCORE.**

Die Vereisungsversuche gliedern sich in drei Phasen. In der ersten Phase wird die Vakuumpumpe eingeschaltet und der benötigte relative Unterdruck (bezogen auf den umgebenden Druck im Labor) eingestellt. In der zweiten Phase wird anschließend die Luft im Windkanal auf die benötigte Windgeschwindigkeit und Temperatur gebracht. Ist der gewünschte Zustand erreicht, werden in der dritten Phase die drei Wassersprühdüsen mit Druck beaufschlagt. Der Druck wird hierbei so eingestellt, dass die jeweilig zu erzielenden Testbedingungen (Raueis oder Klareis) resultieren.

Während der Vereisungsversuche wurde mit einer Kamera ein Video aufgezeichnet, um das Eiswachstum zu dokumentieren. In Abbildung 48 sind die Bilder von den Vereisungsversuchen (dritte Phase) unter der Testkondition Raueis und in Abbildung 49 unter der Testkondition Klareis nach 0 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s dargestellt. Auf der linken Seite sind die Bilder von den Versuchen ohne Oberflächenmodifizierung und auf der rechten Seite von den Versuch mit Oberflächenmodifizierung zu entnehmen.

Bei allen vier Testvarianten (Raueis, Klareis, ohne Oberflächenmodifizierung, mit TiO<sub>2</sub> Nanotubes und MecaSurf) blieb ein ähnlich großer Teil der Mikroperforation eisfrei (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 49). Beim Eiswachstum konnte kein Unterschied zwischen den unbehandelten und den oberflächenmodifizierten (TiO<sub>2</sub> Nanotubes + MecaSurf) Probenvarianten beobachtet werden.

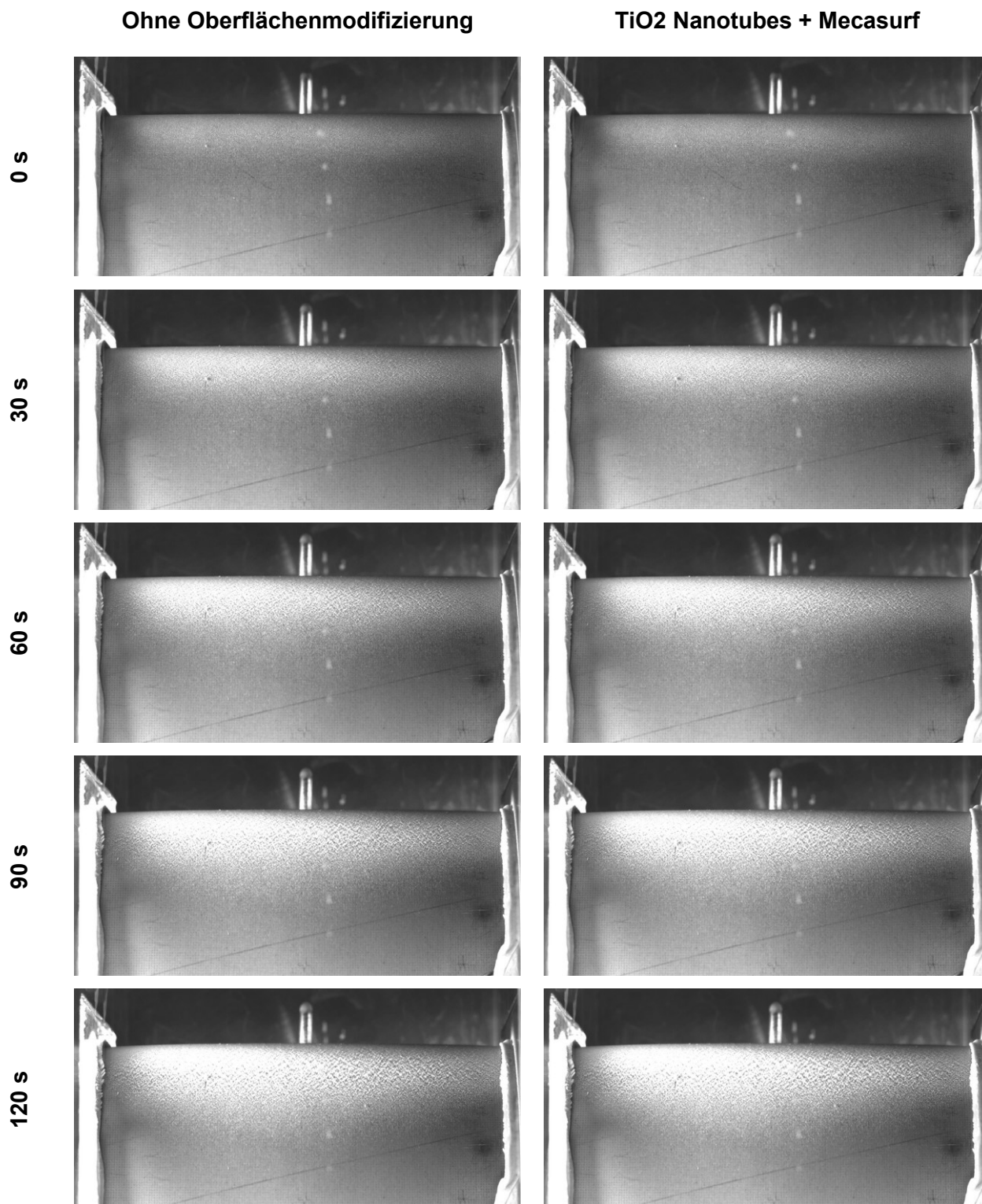


Abbildung 48: Vereisungsversuche unter der Testkondition Raueis (SAT = 20 °C; TAS = 50 m/s; LWC = 0,3 g/m<sup>3</sup>) mit der mikroperforierten NACA 0024 ähnlichen Versuchsprobe ohne Oberflächenmodifizierung (links) und mit TiO<sub>2</sub> Nanotubes und hydrophobem Sealing MecaSurf (rechts).



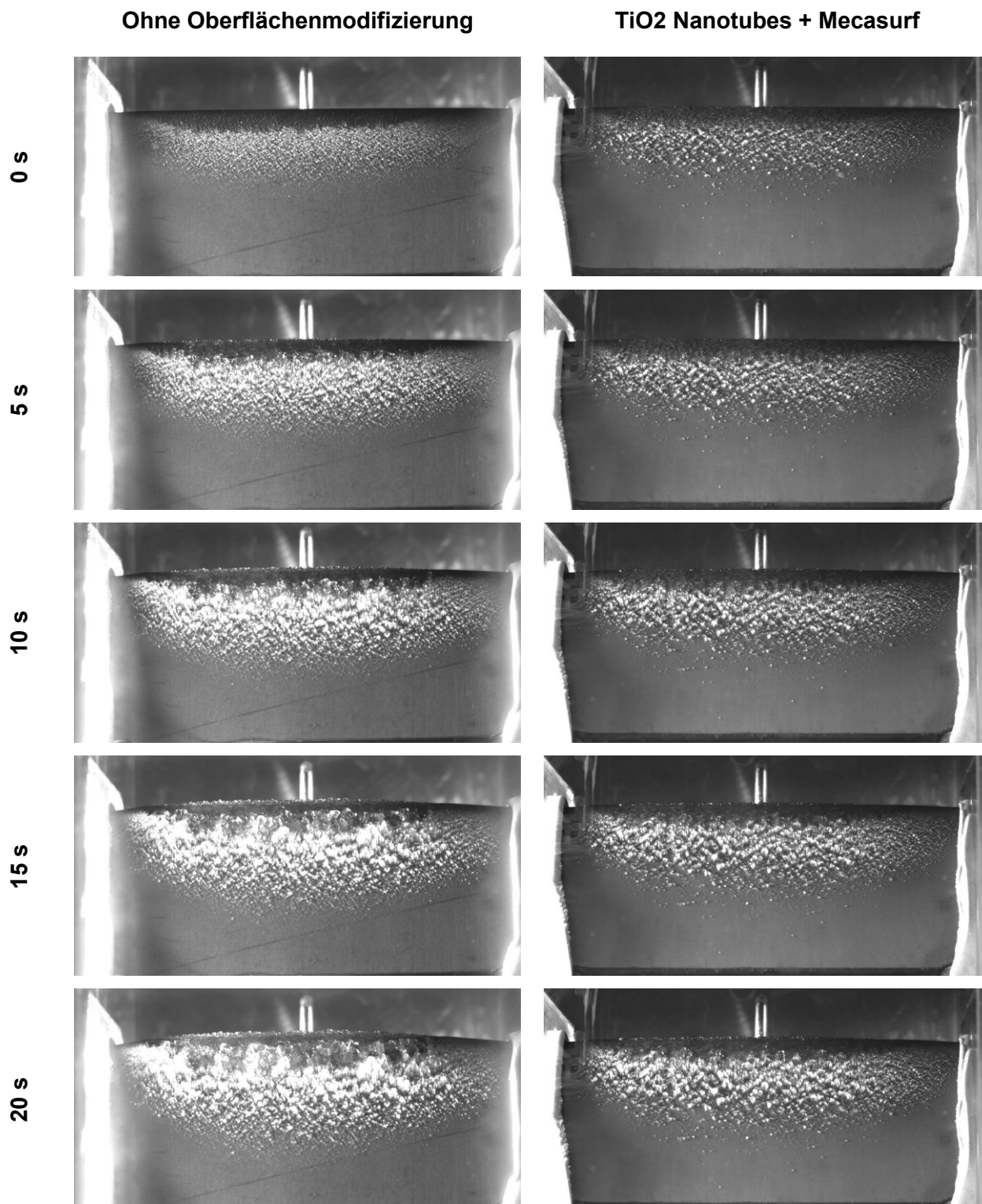


Abbildung 49: Vereisungsversuche unter der Testkondition Klareis (SAT = -5 °C; TAS = 80 m/s; LWC = 1,0 g/m<sup>3</sup>) mit der mikroperforierten NACA 0024 ähnlichen Versuchsprobe ohne Oberflächenmodifizierung (links) und mit TiO<sub>2</sub> Nanotubes und hydrophoben Sealing MecaSurf (rechts).

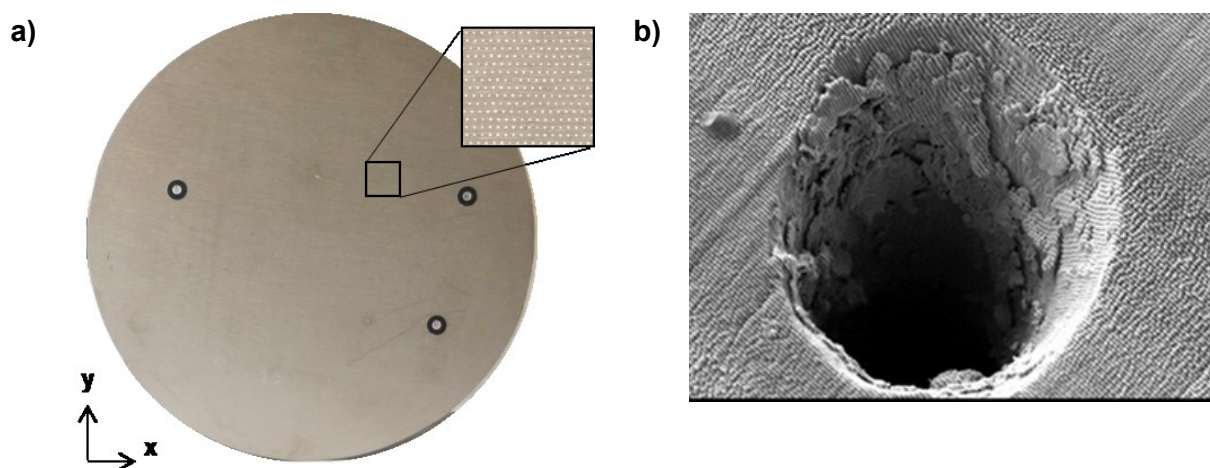
## 8.3 Anti-Kontamination & Degradation der Mikroperforation

### 8.3.1 Kontaminations- und Reinigungsverhalten von Mikroperforationen

Im Kapitel 8.3.1.1 werden zunächst die mikroperforierten Titanproben, die angewendeten Prozesse zur Oberflächenmodifizierung, die verwendeten Insekten sowie die Vorgehensweise zur Bestimmung der Lochverblockung vorgestellt. Die Untersuchung der Insektenkontamination von mikroperforierten Titanproben wird im Kapitel 8.3.1.2 beschrieben. Abschließend werden im Kapitel 8.3.1.3 die Untersuchungen bezüglich der Wasserdurchlässigkeit und operationelle Reinigung von mikroperforierten Oberflächen behandelt.

#### 8.3.1.1 Mikroperforation, Oberflächenmodifizierung u. Lochverblockung

Ziel ist die systematische Untersuchung der Insektenkontamination von mikroperforierten und oberflächenfunktionalisierten Titanblechen im Labormaßstab und deren operationellen Reinigung. Für die Versuche standen sechs kreisförmige Proben aus Reintitan Grad 2 mit einem Durchmesser von 155 mm und einer Dicke von 0,8 mm zur Verfügung. In einem rechteckigen Ausschnitt mit einer Kantenlänge von 90 mm wurde eine Mikroperforation mit einem Laserverfahren erzeugt (siehe Abbildung 50-a). Die Löcher sind konisch zulaufend (siehe Abbildung 50-b). Die Seite mit dem kleineren Durchmesser befindet sich auf der Außenseite des Seitenleitwerks und wird im weiteren Verlauf als Vorderseite bezeichnet.



**Abbildung 50: Mikroperforierte Titanprobe; (a): Makroskopisches Bild der Probe; (b): REM-Aufnahme eines Lochs (Probenrückseite).**

Insgesamt wurden zwei unterschiedliche Lochabstände der Mikroperforation untersucht, 900  $\mu\text{m}$  und 600  $\mu\text{m}$ . Die Proben mit einem Solllochabstand von 600  $\mu\text{m}$  werden im Weiteren mit xx-600 und die mit 900  $\mu\text{m}$  mit xx-900 bezeichnet. „xx“ steht hierbei als Platzhalter für die unterschiedlichen Oberflächenmodifizierungen (Ti: Titan ohne Modifizierung; Na: TiO<sub>2</sub>-Nanotubes mit hydrophober Beschichtung; N4: N4-Prozess mit hydrophober Beschichtung). Zusätzlich



zu den Lochabständen unterscheiden sich die Proben im Lochdurchmesser. Der Lochabstand und der Lochdurchmesser wurden mithilfe des Digitalmikroskops Keyence VHX6000 (Keyence Deutschland GmbH, Neu-Ilseburg, Deutschland) verifiziert. Abbildung 51-a zeigt den mittleren Lochabstand in horizontaler (x) und vertikaler (y) Richtung der Proben xx-600 und xx-900. Für den Lochabstand wurden für jede Probe sechs Messungen in horizontaler (x) und zwei Messungen in vertikaler (y) Richtung durchgeführt und daraus jeweils das arithmetische Mittel und die Standardabweichung bestimmt. Der mittlere Lochdurchmesser wurde aus jeweils 45 Löchern an Vorder- und Rückseite jeder Probe errechnet (Abbildung 51-b).

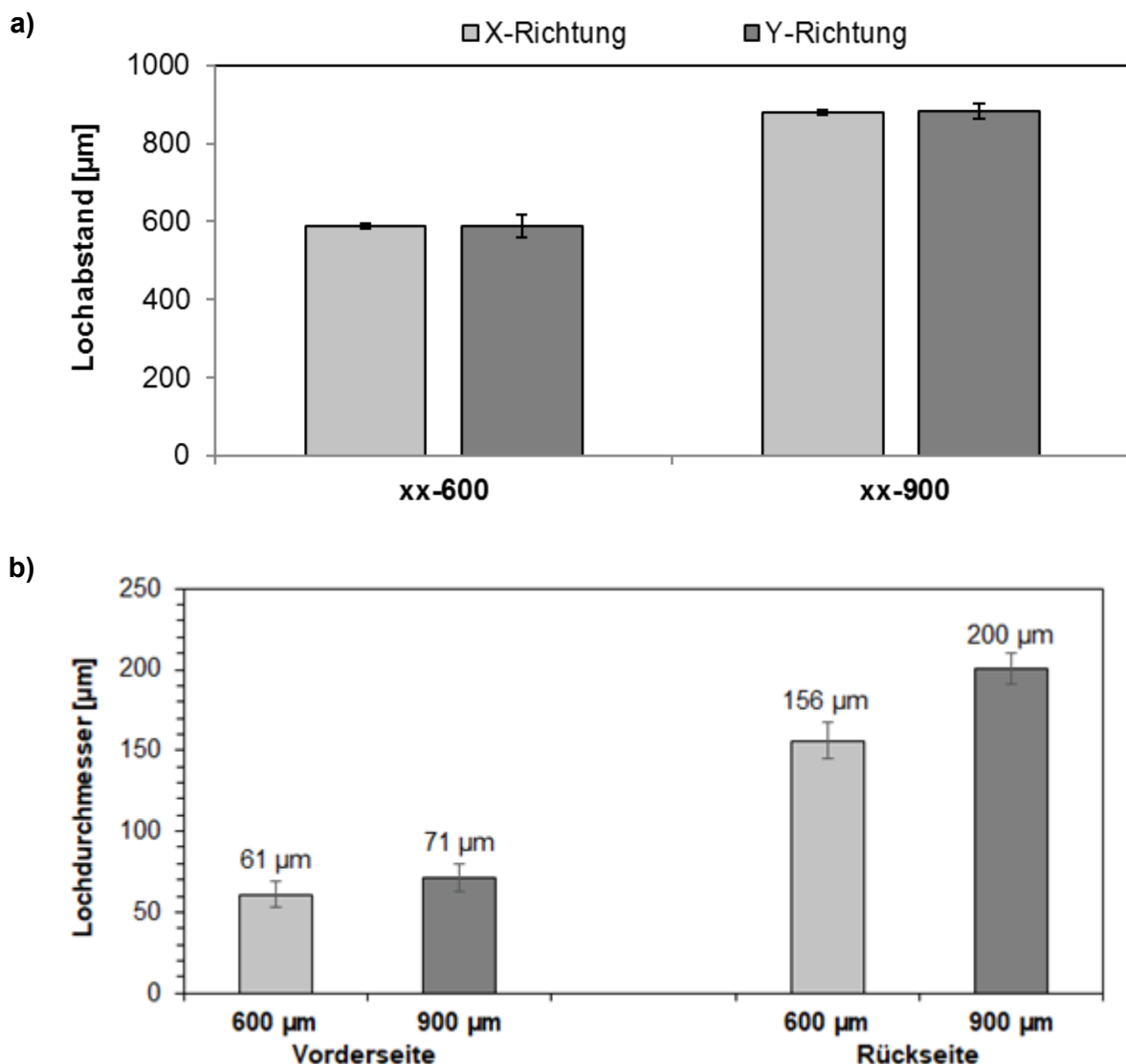


Abbildung 51: Lochabstand und -durchmesser der untersuchten mikroperforierten Proben; (a): Lochabstand der Proben xx-600 und xx-900 in horizontaler (x) und vertikaler (y) Richtung; (b): Lochdurchmesser der Proben mit einem Lochabstand von 600 μm und 900 μm von der Vorder- und Rückseite.

Als kontaminationsabweisende und hydrophobe Oberflächenmodifizierung wurden zwei unterschiedliche Strukturierungen (TiO<sub>2</sub>-Nanotubes und N4-Prozess) erzeugt und mit der kommerziell erhältlichen Beschichtung Episurf (Surfactis Technologies, Angers, Frankreich) funktionalisiert. In den Gruppen xx-600 und xx-900 befinden sich jeweils eine Probe aus Reintitan, eine Probe mit einer TiO<sub>2</sub>-Nanotube Strukturierung und Episurf Funktionalisierung, sowie eine Probe mit N4-Strukturierung und Episurf Funktionalisierung (siehe Tabelle 6).

**Tabelle 6: Verwendete Proben.**

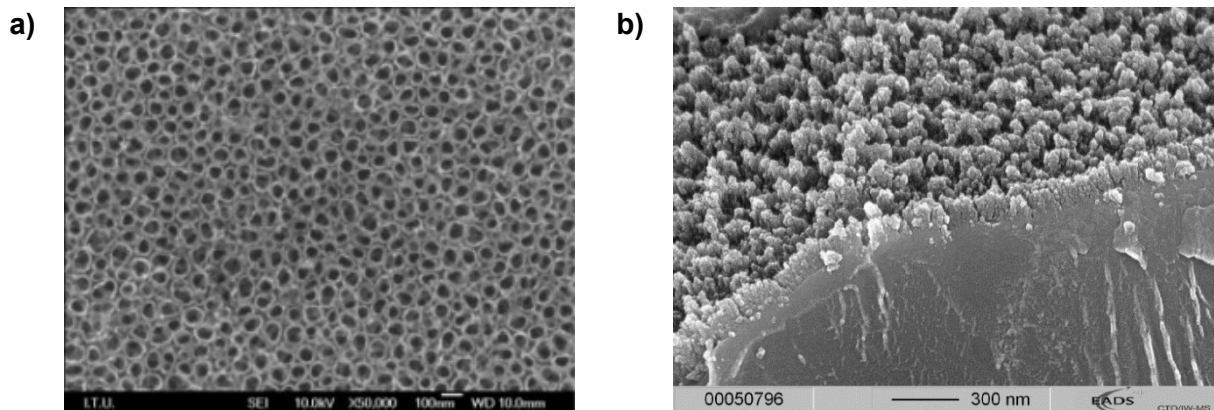
	Oberflächenmodifizierung		
	Titan ohne Modifizierung	TiO <sub>2</sub> -Nanotubes mit hydrophober Beschichtung	N4-Prozess mit hydrophober Beschichtung
Lochabstand von 600 µm	Ti-600	Na-600	N4-600
Lochabstand von 900 µm	Ti-900	Na-900	N4-900

## TiO<sub>2</sub>-Nanotubes

Durch elektrochemisches Anodisieren von Titan in Elektrolytlösungen mit Fluoridzusätzen kommt es zur Bildung von TiO<sub>2</sub>-Nanotubes auf der Oberfläche (siehe Abbildung 52-a). Die Röhrcen werden aus der Oxidschicht des Titans gelöst. In Abhängigkeit von pH-Wert, Fluoridkonzentration, Spannung, Temperatur und Anodisierungsdauer wird eine Röhrcenlänge von 0,29 µm bis 250 µm und ein Durchmesser von 25 nm bis 70 nm erreicht [21], [22]. Die Nanostrukturierung führt zu einer Vergrößerung der Oberfläche gegenüber des initialen Zustandes und einer höheren Benetzbarkeit. In [23] wird ein Kontaktwinkel von  $21,9^\circ \pm 5,4$  bei einem Röhrcendurchmesser von  $68,1 \text{ nm} \pm 3,8$  und einer Höhe der Oxidschicht von  $589,2 \text{ nm} \pm 23,7$  angegeben.

## N4-Prozess

Der N4-Prozess bezeichnet einen galvanischen Badprozess, in dem durch Anodisierung eine nanostrukturierte Oberfläche erzeugt wird. Dazu wird die Probe in eine wässrige, alkalische Lösung mit Natriumhydroxid als Hauptkomponente, getaucht. Durch Anlegen einer Spannung über eine definierte Zeitspanne wird durch anodischer Oxidation eine dünne Schicht auf der Oberfläche erzeugt. Die Oberfläche weist eine charakteristische Nanostruktur mit Erhebungen und Hinterschnitten auf (siehe Abbildung 52-b). Die Strukturen sind in der Größenordnung von 50 nm bis 300 nm einzuordnen, die Proben weisen zudem eine Interferenzfärbung auf [25], [26].



**Abbildung 52: Titanoberfläche nach Strukturierung; (a): TiO<sub>2</sub>-Nanotubes [26]; (b): Mittels N4-Prozess erzeugte Strukturierung [25].**

## Funktionalisierung

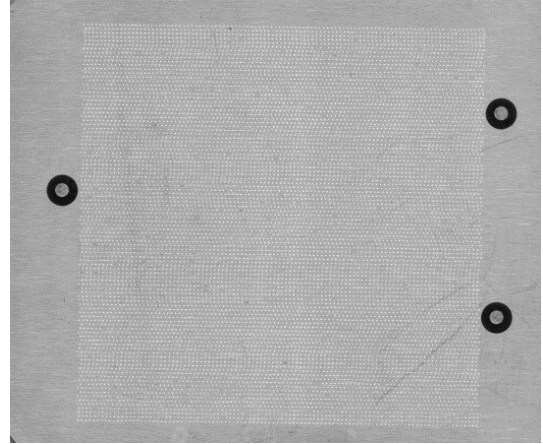
Erst durch Anwendung einer wasserabweisenden Beschichtung wird die strukturierte Oberfläche hydrophob. Dazu wurden die Proben Na-600, Na-900, N4-600 und N4-900 nach der Strukturierung mit Episurf beschichtet.

Für die Bestimmung der Verblockung von mikroperforierten Proben durch Insekten wurde ein Verfahren, basierend auf einem hochauflösenden Scanner (HP Scanjet 200), entwickelt. Hierbei wird die mikroperforierte Probe vor und nach den Kontaminationsversuchen gescannt. Eine Flächenleuchte, die sich auf der Probe befindet, sorgt für eine Durchleuchtung der Löcher (siehe Abbildung 53-a). Nach der Aufnahme des Ausgangszustandes (siehe Abbildung 53-b) wird die mikroperforierte Probe kontaminiert und anschließend erneut gescannt (siehe Abbildung 53-c). Mit einem Bildverarbeitungsprogramm werden anschließend die offenen Löcher markiert und gezählt (siehe Abbildung 53-d). Hierfür wurde die Software „ImageJ 1.50i“ (National Institutes of Health, Maryland, USA) verwendet.

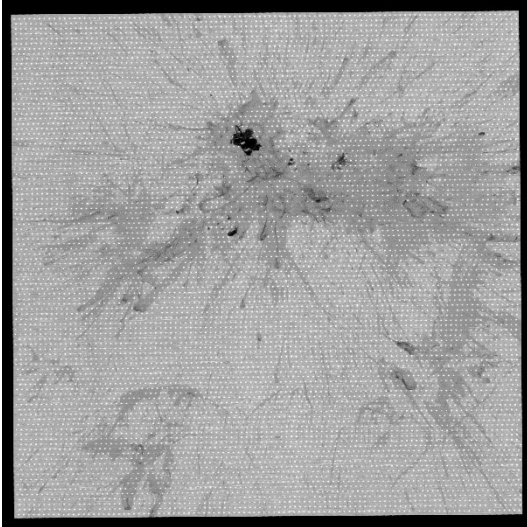
a)



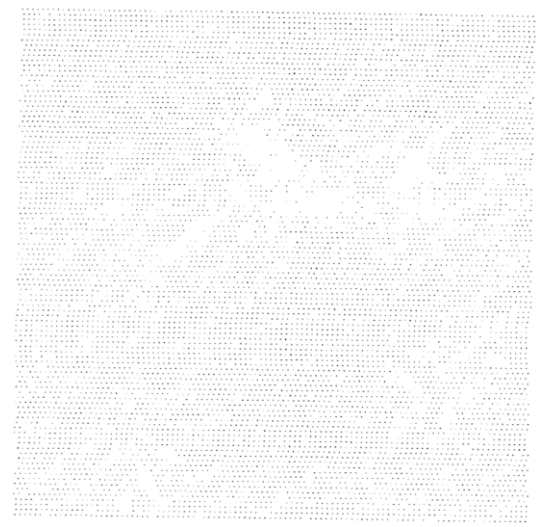
b)



c)



d)



**Abbildung 53: Bestimmung der Verblockung von mikroperforierten Proben mittels hochauflösendem Scanner; (a): Probenscan unter Verwendung einer Flächenleuchte; (b): Eingescannte Probe vor der Insektenkontamination; (c): Eingescannte Probe nach der Insektenkontamination; (d): Mit der Software „ImageJ 1.50i“ markierte offene Löcher.**

Für die Kontaminationsversuche wurde die Goldfliege (*Lucilia sericata*) verwendet, die der Familie der Schmeißfliegen (*Calliphoridae*) zuzuordnen ist. Schmeißfliegen wiederum sind den Zweiflüglern (*Diptera*) zugehörig. Die *Lucilia sericata* kommt insbesondere in Europa und Asien vor und hat eine Größe von 7 mm bis 11 mm [27]. Das Gewicht der untersuchten Insekten beträgt  $24,57 \text{ mg} \pm 1,44$  (arithmetisches Mittel aus 13 gemessenen Fliegen). Die Insekten wurden vor den Kontaminationsversuchen mit Diethylether narkotisiert.

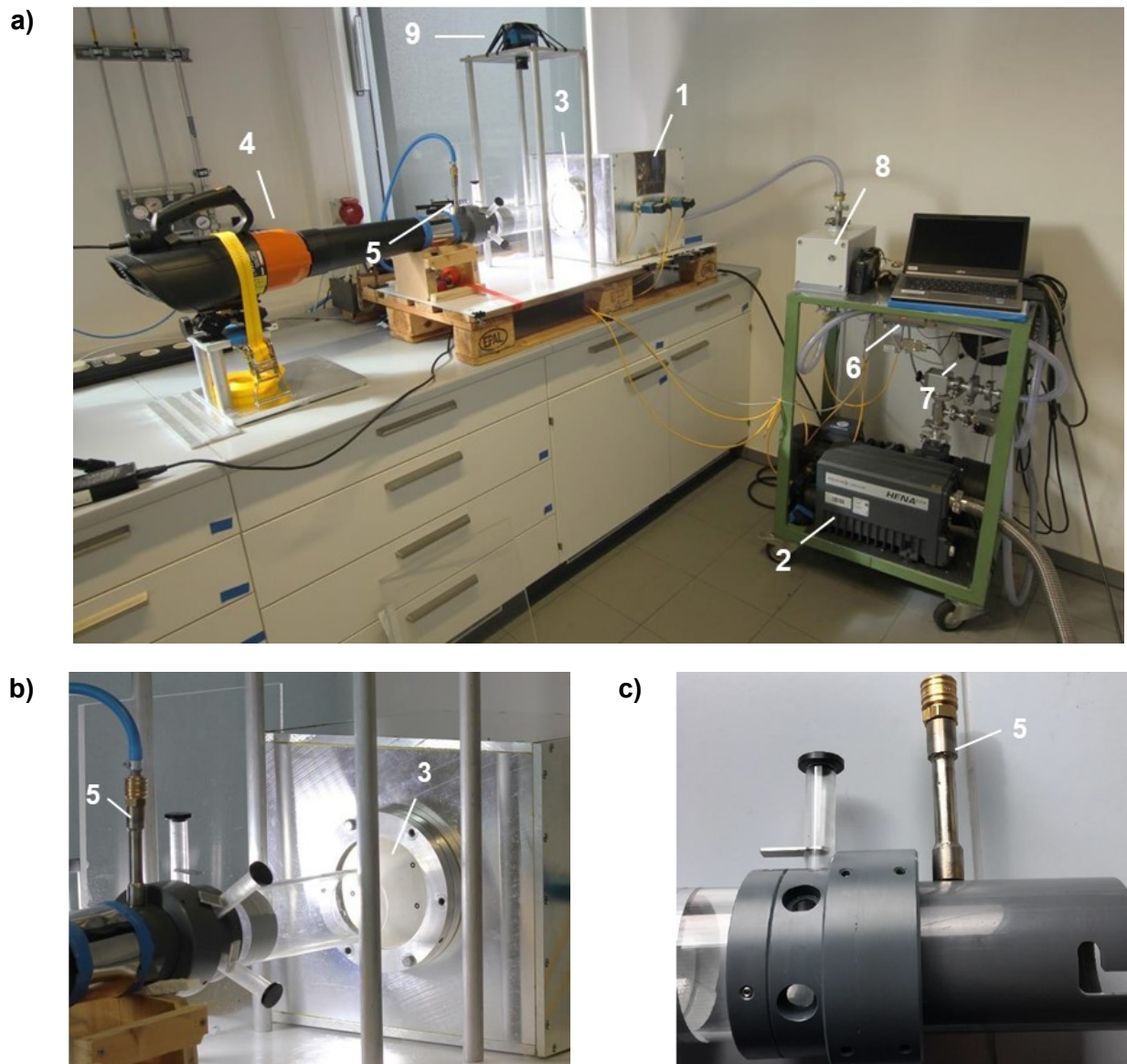


**Abbildung 54: Abbildung 8: Goldfliege *Lucilia sericata*.**

### **8.3.1.2 Untersuchung der Kontamination von mikroperforierten Titanblechen**

Für die Untersuchung der Auswirkung von Insektenkontamination auf die Mikroperforation bzw. die Absaugfunktion wurde der in Abbildung 55 dargestellte Prüfstand entwickelt. Der Prüfstand beinhaltet eine Unterdruckkammer (1), in der mithilfe einer Vakuumpumpe (2) ein Unterdruck erzeugt wird. Die mikroperforierte Ronde (3) wird auf einem Adapter an der Unterdruckkammer fixiert, sodass der erzeugte Unterdruck in der Kammer zu einem Luftdurchsatz durch die freien Löcher führt. Die Insekten werden mit einem modifizierten Labbläser (4) beschleunigt. Zusätzlich dient ein Druckluftanschluss (5) zur Erhöhung der Luftgeschwindigkeit. Drucksensoren im Inneren der Kammer ermöglichen die Bestimmung der Druckverhältnisse bzw. -änderung durch Insektenkontamination. Der abgesaugte Luftstrom wird mithilfe eines Massendurchflusssensors (6), der der Vakuumpumpe vorgeschaltet ist, bestimmt. Der Durchfluss bzw. die Druckverhältnisse in der Kammer werden über ein Regelventil (7) eingestellt. Zusätzlich verhindert ein Wasserabscheider (8) das Eindringen von Feuchtigkeit in die Vakuumpumpe. Eine Hochgeschwindigkeitskamera (9) dient der Ermittlung der Fluggeschwindigkeit der Insekten.

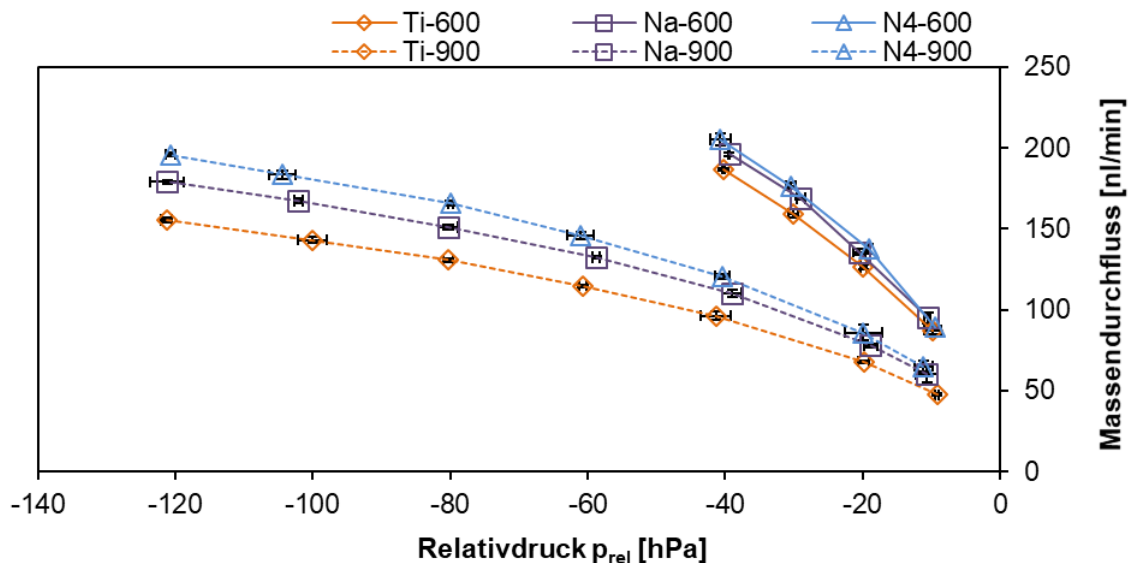




**Abbildung 55: Prüfstand zur Untersuchung der Auswirkung von Insektenkontamination auf die Mikroperforation bzw. die Absaugfunktion; (a): Kontaminationsprüfstand; (b): Mikroperforierte Probe und Kontaminationsvorrichtung; (c): Adapter für Laubbläser mit integriertem Druckluftanschluss; (1): Unterdruckkammer; (2): Vakuumpumpe; (3): Mikroperforierte Probe; (4): Modifizierter Laubbläser; (5): Druckluftanschluss; (6): Massendurchflusssensor; (7): Regelventil; (8): Wasserabscheider; (9): Hochgeschwindigkeitskamera.**



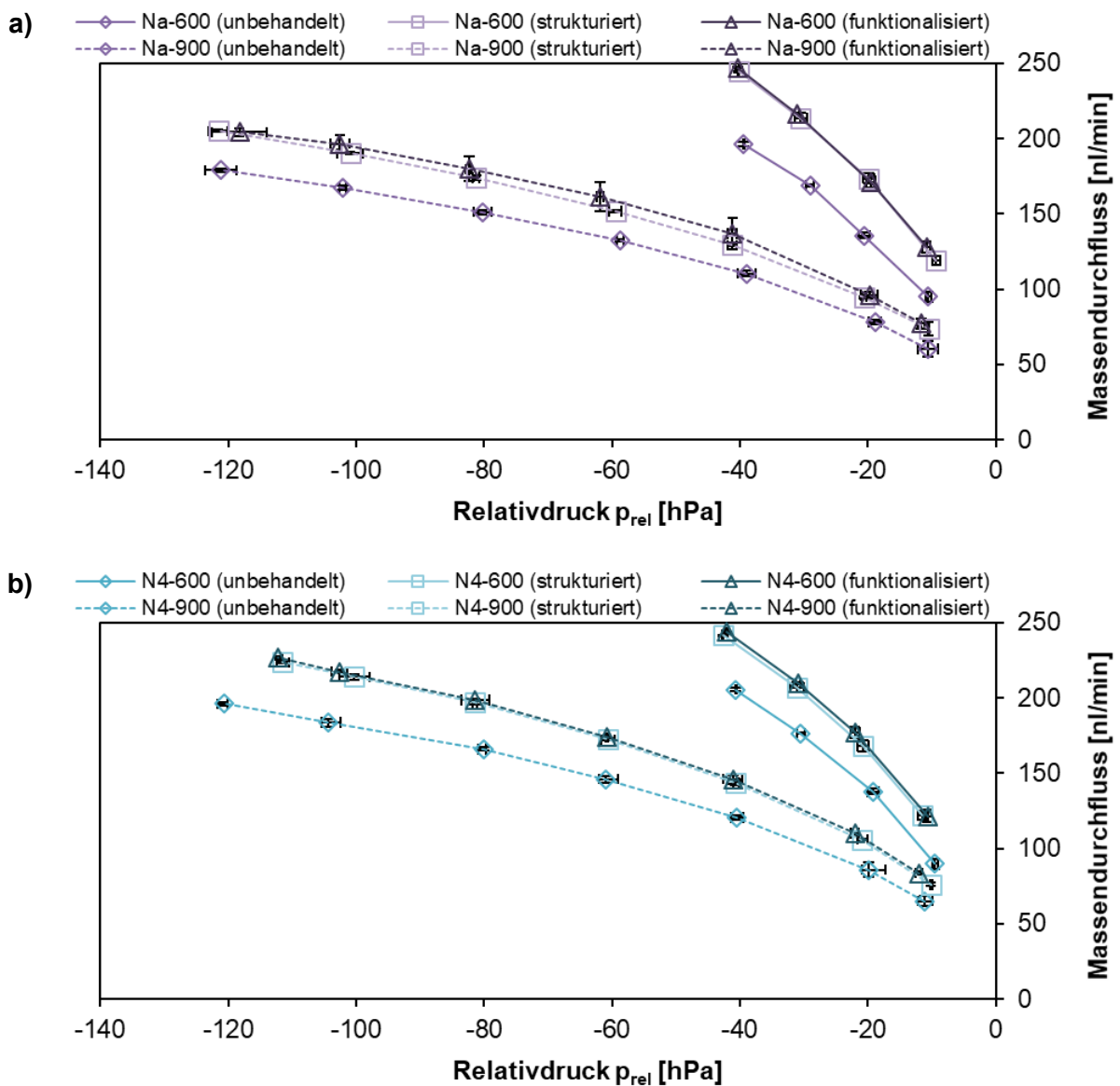
Mit der in Abbildung 55 dargestellten Absaugvorrichtung wurde an den in Tabelle 6 (siehe Seite 80) aufgeführten Proben der Durchfluss bei unterschiedlichen Unterdrücken gemessen. Die Ergebnisse der Durchflussmessungen vor der Oberflächenmodifizierung (Anlieferungszustand) sind der Abbildung 56 zu entnehmen. Es wurden jeweils drei Messungen durchgeführt und hiervon das arithmetische Mittel und die Standardabweichung bestimmt.



**Abbildung 56:** Durchflussmessung vor der Oberflächenmodifizierung (Anlieferungszustand) der in Tabelle 6 (siehe Seite 80) aufgeführten Proben mit der in Abbildung 55 dargestellten Absaugvorrichtung; Volllinien: Mikroperforierte Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$ ; Strichlinien: Mikroperforierte Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$ ; Linien mit Rauten: Mikroperforierte Proben ohne Oberflächenmodifizierung; Linien mit Quadrate: Mikroperforierte Proben mit Nanotube Strukturierung; Linien mit Dreiecken: Mikroperforierte Proben mit N4-Prozess Strukturierung.

Aus Abbildung 56 geht hervor, dass der Massendurchfluss der mikroperforierten Proben im unbehandelten Zustand mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  (Volllinien) geringer ist als der Massendurchfluss der Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  (Strichlinien) bei gleichem Relativdruck. Begründet werden kann dies durch die Gesamtlochoberfläche: Zwar ist der Lochdurchmesser der Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  geringer als bei den Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  (vgl. Abbildung 51-b), die Lochanzahl ist aufgrund des geringeren Lochabstands jedoch höher (z.B. Ti-600: 22607 Löcher; Ti-900: 10002 Löcher). Die Gesamtlochfläche auf der Vorderseite beträgt somit für die Probe Ti-600  $\approx 0,8\%$  bezogen auf die Gesamtfläche. Für Ti-900  $\approx 0,5\%$ . Durch die höhere Lochoberfläche strömt bei gleichem Unterdruck ein höherer Luftmassenstrom durch die Mikroperforation. Innerhalb der Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  bzw. 900  $\mu\text{m}$  ist ebenfalls eine Variation im Druckverlauf (vor der Oberflächenmodifizierung) ersichtlich, was auf Laserfehler und Verunreinigungen in den Löchern zurückzuführen ist, die den Durchfluss mindern.

Um den Einfluss der Oberflächenmodifizierung (Strukturierung und Funktionalisierung) zu untersuchen, wurden die Proben Na-600, Na-900, N4-600 und N4-900 vor der Modifizierung (Anlieferungszustand), nach der Strukturierung und nach der Funktionalisierung in der Absaugvorrichtung getestet. Der Abbildung 57-a sind die gemessenen Massendurchflüsse von den Titanproben mit Nanotubes (Na-600 und Na-900) und der Abbildung 57-b von den Titanproben mit einer N4-Behandlung (N4-600 und N4-900) zu entnehmen.



**Abbildung 57: Durchflussmessung vor der Oberflächenmodifizierung (Linien mit Rauten), nach der Strukturierung (Linien mit Quadrate) und nach der Funktionalisierung (Linien mit Dreiecken) von den Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  (Volllinien) und 900  $\mu\text{m}$  (Strichlinien); (a): Mikroperforierte Proben mit Nanotubestrukturierung; (b): Mikroperforierte Proben mit N4-Prozess Strukturierung.**

In Abbildung 57 ist bei allen vier Proben nach der Strukturierung ein signifikanter Anstieg des Durchflusses ersichtlich. Die Strukturierung (Nanotubes bzw. N4) umfasst eine Konditionierung, bestehend aus alkalischem Entfetten, alkalischer Reinigung und der Erzeugung einer Nanostruktur durch elektrochemisches Anodisieren. Die Vermutung ist, dass der erhöhte Durchfluss durch ein Freispülen verunreinigter Löcher zustande gekommen ist. Die in Abbildung 57 dargestellten Proben wurden vor den Durchflussmessungen im unbehandelten Zustand lediglich mit Aceton auf der Oberfläche gereinigt. Zwischen Strukturierung und Funktionalisierung ist in Abbildung 57 hingegen kein signifikanter Unterschied ersichtlich. In Abbildung 58 sind die Lochdurchmesser der Proben im unbehandelten, strukturierten und funktionalisierten Zustand dargestellt. Hier konnte weder beim Nanotube-Prozess noch beim N4-Prozess ein signifikanter Einfluss festgestellt werden.

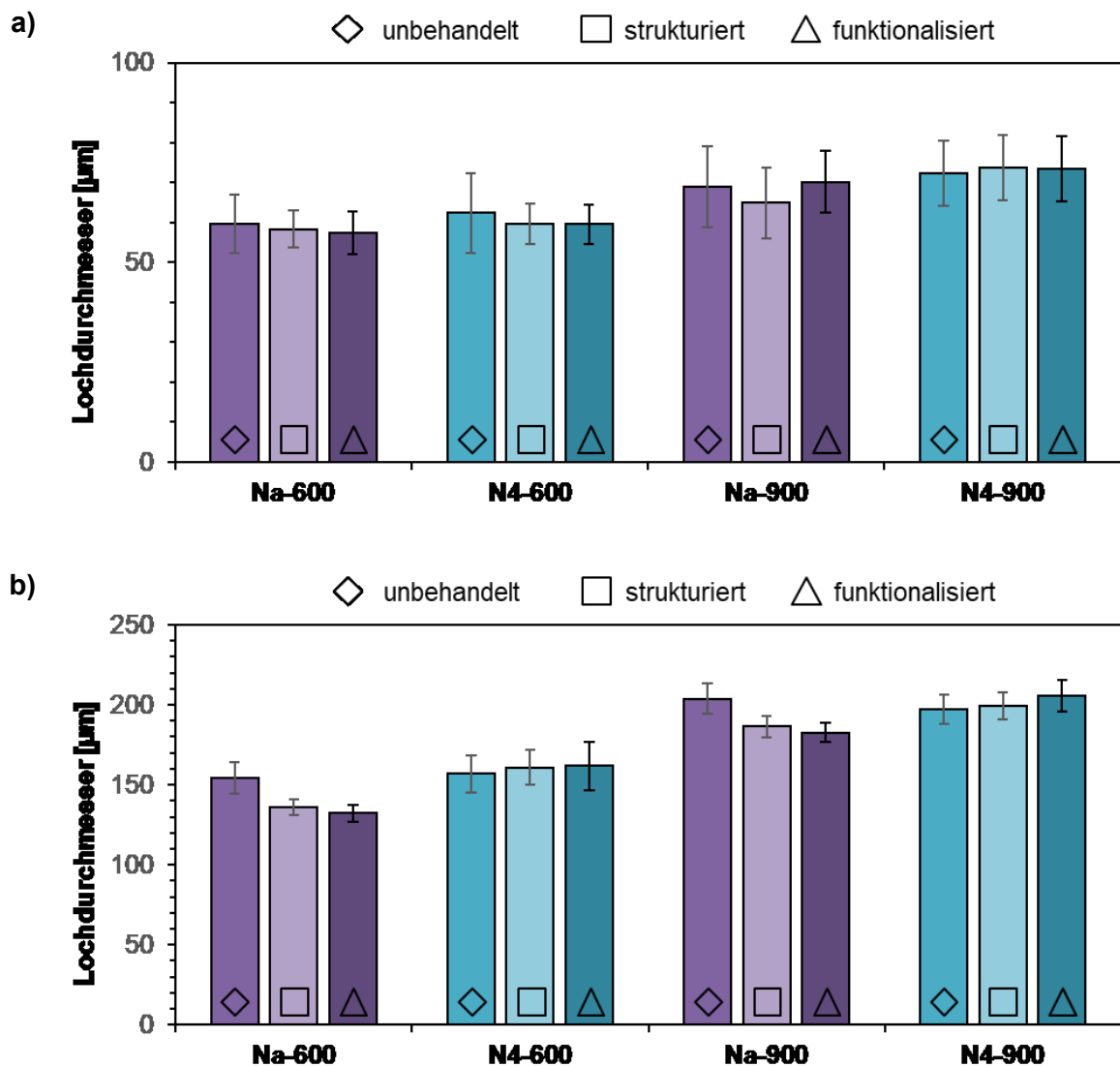
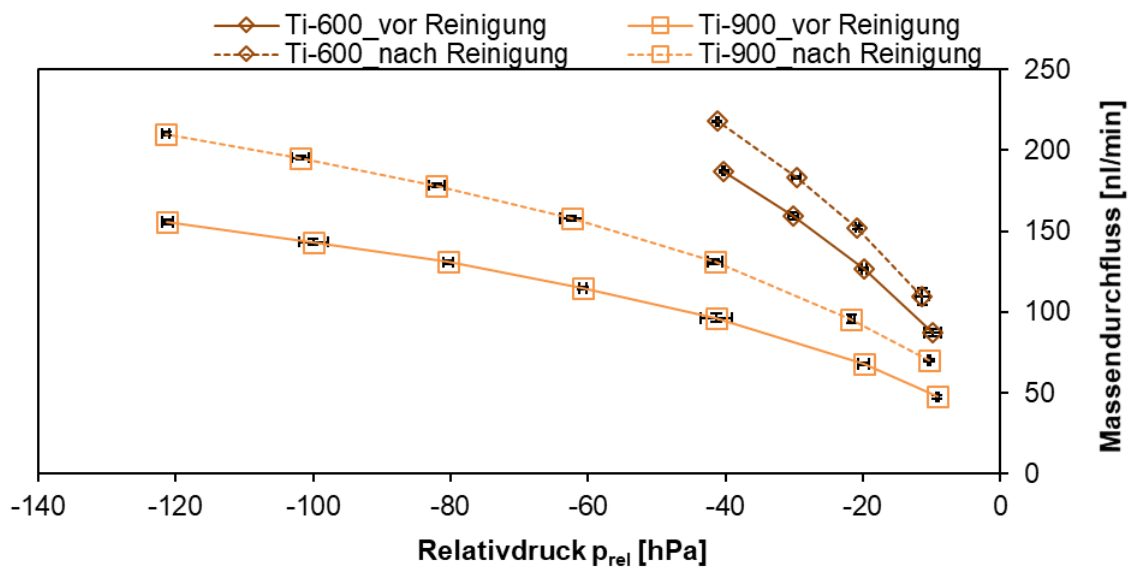


Abbildung 58: Messung der Lochgröße in Abhängigkeit von der Strukturierung und Funktionalisierung; (a): Vorderseite; (b): Rückseite.

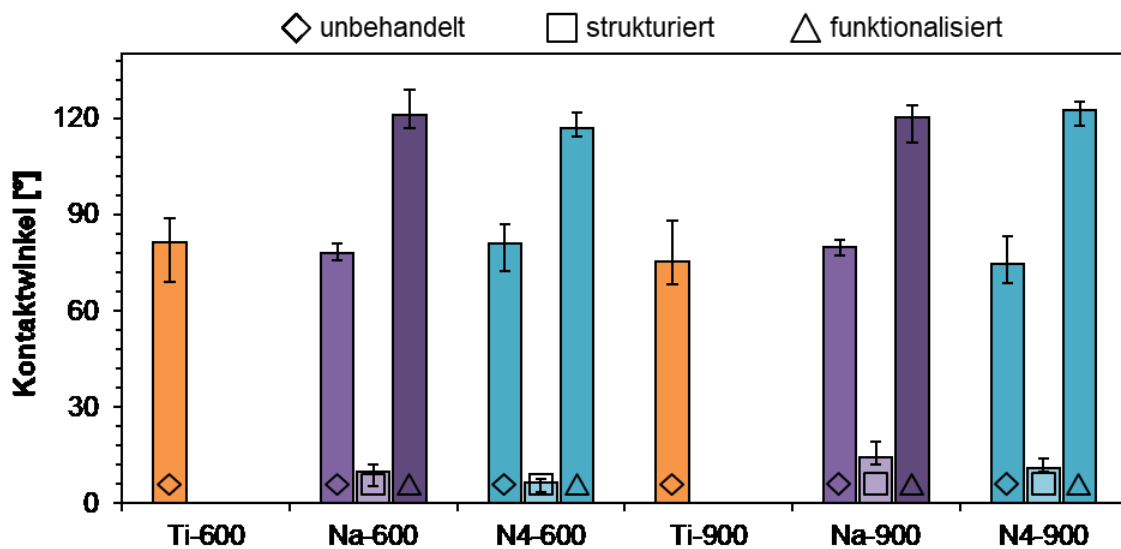
Um zu evaluieren, ob verunreinigte Löcher durch die Strukturierung freigespült werden, wurde der Massendurchfluss von den Proben Ti-600 und Ti-900 vor und nach einer Reinigung mit vollentsalztem Wasser (VE Wasser) und ProCare (Spülmaschinenreiniger) im Ultraschallbad gemessen. Die Ergebnisse sind der Abbildung 59 zu entnehmen. Hieraus geht hervor, dass sich der Durchfluss nach der Reinigung bei beiden Proben (Ti-600 und Ti-900) erhöhte. Dies bestätigt die Vermutung, dass die in Abbildung 57 dargestellten Durchflussänderungen nach der Strukturierung aus einem Freispülen verunreinigter Löcher resultierten und nicht durch eine prozessbedingte Aufweitung der Löcher.



**Abbildung 59:** Änderung des Durchflusses der Proben Ti-600 und Ti-900 vor und nach einer Reinigung mit VE-Wasser und ProCare (Spülmaschinenreiniger) im Ultraschallbad; Volllinien: Durchflussmessung vor der Reinigung; Strichlinien: Durchflussmessung nach der Reinigung; Linien mit Rauten: Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$ ; Linien mit Quadraten: Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$ .

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch die verwendeten Oberflächenmodifizierungen keine signifikante Änderung der Lochdurchmesser entsteht. Die Länge der Nanotubes beträgt in etwa  $589,2 \text{ nm} \pm 23,7$  [23], die Erhebungen der Oberfläche nach einer Behandlung mit dem N4-Prozess zwischen 50 nm und 300 nm [28] und die Beschichtung mit Episurf in etwa 10 nm. Damit liegt die Gesamtdicke aus Strukturierung und Funktionalisierung deutlich unterhalb der Lochgröße von 61  $\mu\text{m}$  bzw. 71  $\mu\text{m}$ , sodass die verwendete Oberflächenmodifizierung nicht zu einer Verblockung der Löcher führt.

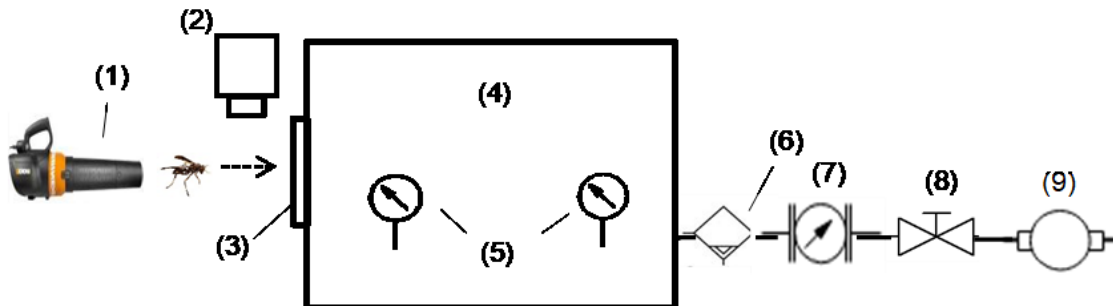
Zur Charakterisierung der Benetzbarkeit der Oberflächen wurden Kontaktwinkelmessungen mit VE-Wassertropfen vor der Strukturierung, nach der Strukturierung und nach der Funktionalisierung durchgeführt. Für die Messungen wurde das Kontaktwinkelmessgerät Drop Shape Analyzer DSA25 (Krüss, Hamburg, Deutschland) verwendet. Hierbei wurden jeweils drei Messung auf einer nicht perforierten Fläche auf der Vorder- und Rückseite einer jeden Probe durchgeführt. Das arithmetische Mittel mit Standardabweichung der gemessenen Kontaktwinkelwerte sind der Abbildung 60 zu entnehmen.



**Abbildung 60: Messung des Kontaktwinkels von VE-Wassertropfen auf den mikroperforierten Titanproben im unbehandelten (Balken mit Quadrat), strukturierten (Balken mit Dreieck) und funktionalisierten (Balken mit Kreis) Zustand.**

Der Kontaktwinkel der mikroperforierten Titanproben vor der Oberflächenmodifizierung liegt zwischen  $81,4^\circ \pm 7,3$  (N4-600) und  $74,6^\circ \pm 8,6$  (Ti-900). Nach der Strukturierung durch Anodisierung sinkt der Kontaktwinkel auf  $6,3^\circ \pm 1,3$  (N4-600) bzw.  $14,4^\circ \pm 4,8$  (Na-900). Die Reduzierung des Kontaktwinkels im Zuge der Strukturierung wird durch andere Studien bestätigt [23], [25], [28], [29] und ist der Reinigungswirkung der Anodisierung geschuldet. Nach der Funktionalisierung steigt der Kontaktwinkel auf  $117,1^\circ \pm 4,9$  (N4-600) bzw.  $122,7^\circ \pm 2,6$  (N4-900), sodass die Proben eine hydrophobe Oberfläche aufweisen. Der Kontaktwinkel ist höher als im unbehandelten Zustand, jedoch geringer als es vergleichbare Messungen erwarten lassen: Reisenauer (2017) und Greggersen (2013) geben bei einer Nanotube Strukturierung und Episurf Funktionalisierung jeweils einen Kontaktwinkel von  $>150^\circ$  an [30], [31]. Die in Abbildung 60 dargestellten Proben weisen trotz unterschiedlicher Strukturierungen einen ähnlichen Kontaktwinkel nach der Funktionalisierung auf. Daher ist der vergleichsweise geringe Kontaktwinkel vermutlich auf den Funktionalisierungsprozess zurückzuführen.

In Abbildung 61 ist der Versuchsaufbau für die Untersuchung der Insektenkontamination schematisch dargestellt.



**Abbildung 61: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Insektenkontamination; (1): Modifizierter Laubbläser; (2): Hochgeschwindigkeitskamera; (3): Mikroperforierte Probe; (4): Absaugkammer; (5): Drucksensoren; (6): Wasserabscheider; (7): Massendurchflussmesser; (8): Regelventil; (9): Vakuumpumpe.**

Bei den Kontaminationsversuchen wurden die mikroperforierten Proben Ti-600 und Ti-900 ohne Oberflächenmodifizierung sowie die Proben Na-600 und Na-900 mit Oberflächenmodifizierung in vier Stufen mit jeweils fünf Insekten kontaminiert. Vor und nach dem Versuch wurde die mikroperforierte Probe, mit dem hochauflösenden Scanner aufgenommen und die Verblockung mit dem Bildbearbeitungsprogramm bestimmt. Bei den Versuchen wurde ein Relativdruck von -10 hPa (Sollwert) in der Absaugkammer angelegt. Die Testmatrix ist Tabelle 7 zu entnehmen.

**Tabelle 7: Testmatrix der Kontaminationsversuche mit den Proben Ti-600 und Na-600 (Lochabstand von 600 µm) und Ti-900 und Na-900 (Lochabstand von 900 µm).**

Probe	Insektenmenge	Relativdruck
Ti-600		
Na-600		
Ti-900	5, +5, +5, +5	-10 hPa
Na-900		

In Abbildung 62 sind die Insektenrückstände nach einer Kontamination mit 20 Insekten zu sehen.



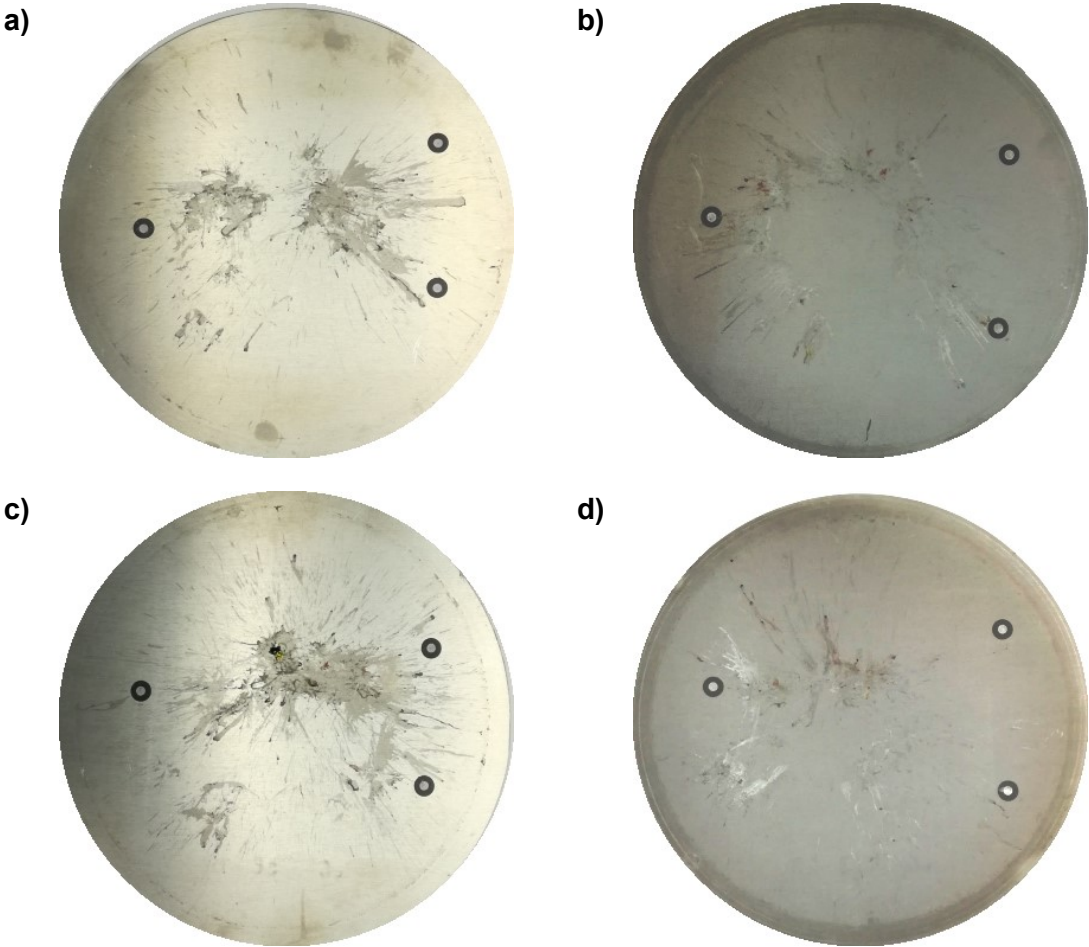


Abbildung 62: Insektenrückstände nach einer Kontamination mit 20 Insekten; (a): Ti-600; (b): Na-600; (c): Ti-900; (d): Na-900.

Der Abbildung 63 ist der Verblockungsgrad von den in Abbildung 62 dargestellten Proben nach einer Kontamination mit 20 Insekten zu entnehmen.

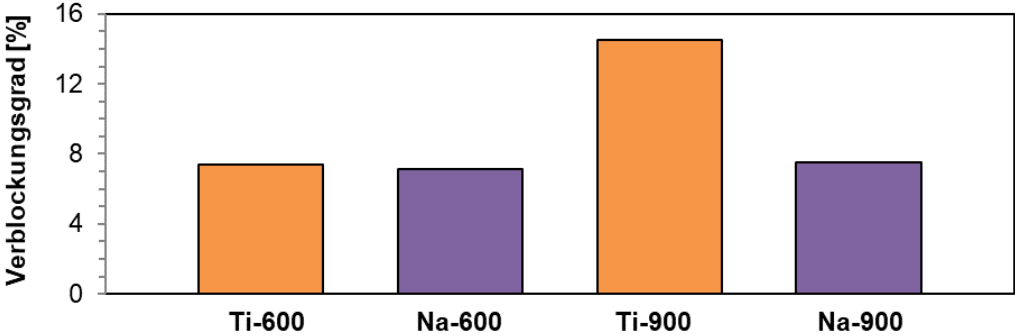
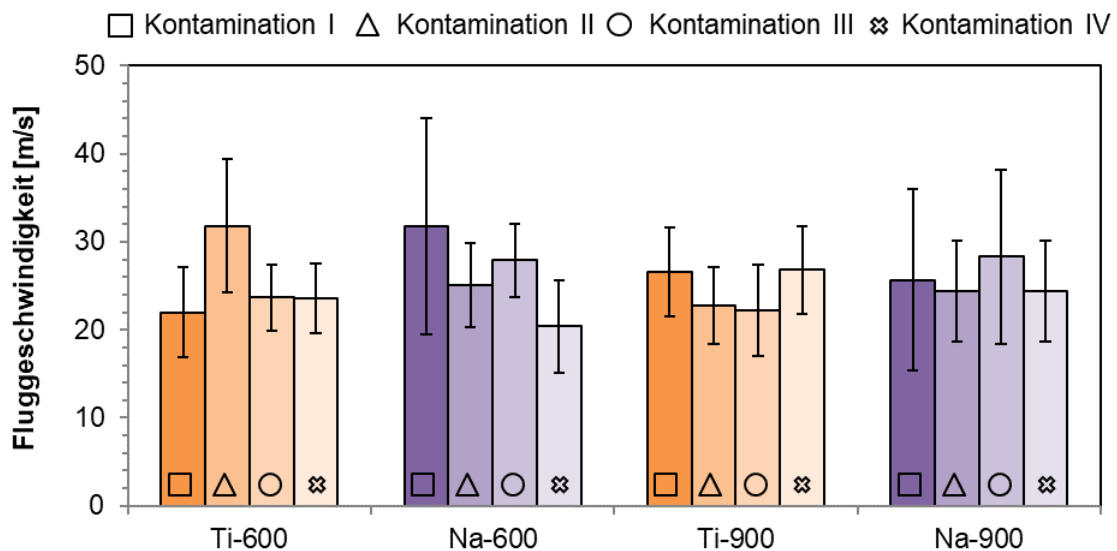


Abbildung 63: Verblockungsgrad der Mikroperforation nach einer Kontamination mit 20 Insekten.

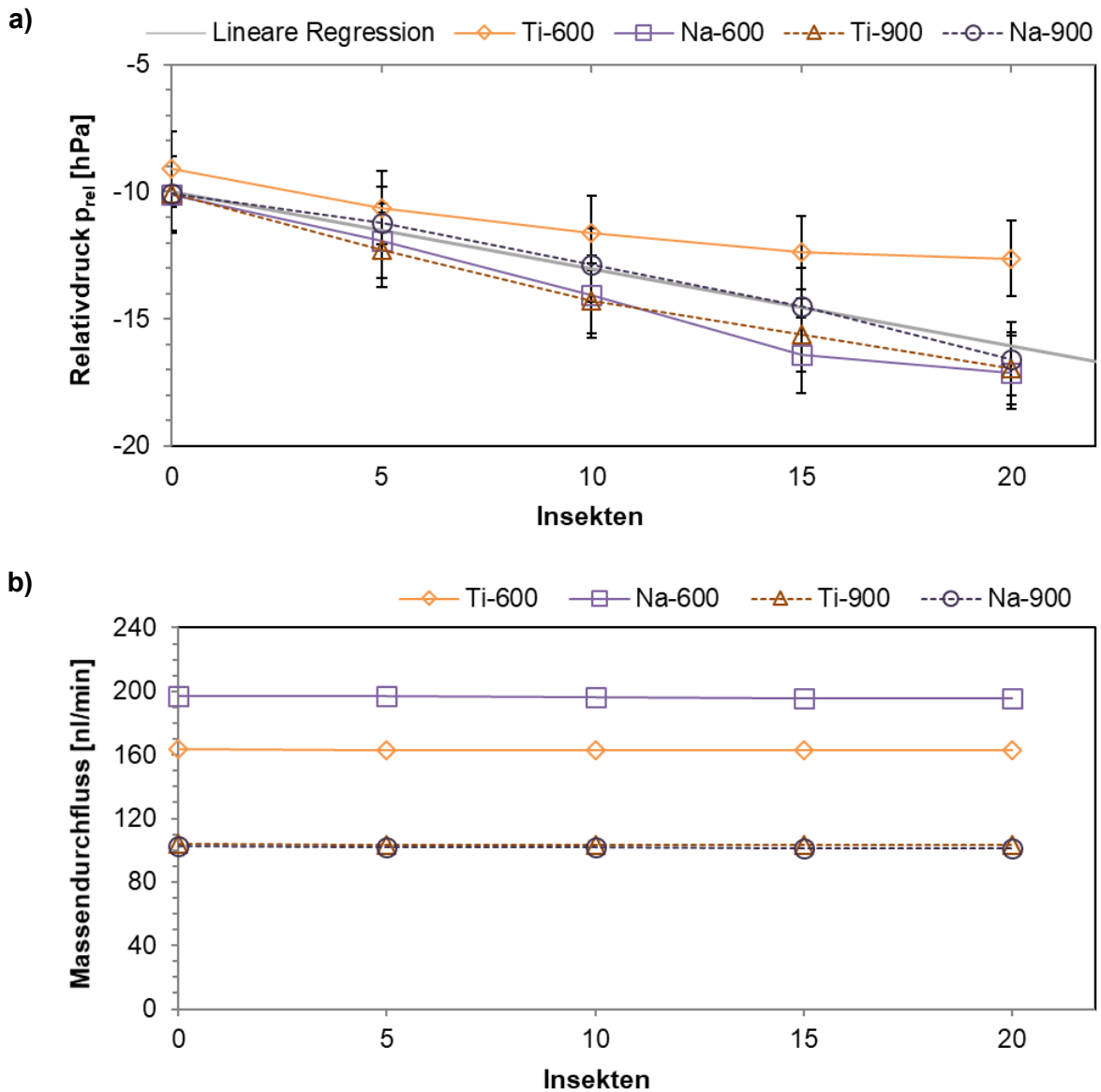
Es zeigt sich, dass der Anteil verblockter Löcher für die Proben Ti-600, Na-600 und Na-900 ähnlich ist (Ti-600: 7,4 %; Na-600: 7,1 %; Na-900: 7,5 %), der Verblockungsgrad der Probe Ti-900 ist mit 14,5 % deutlich höher (vgl. hierzu auch Abbildung 62).

Die Fluggeschwindigkeit der Insekten vor dem Aufprall ist in Abbildung 64 dargestellt. Die mittlere Geschwindigkeit lag hierbei bei ca. 25 m/s (Ti-600: 25,2 m/s  $\pm$  4,1; Na-600: 26,3 m/s  $\pm$  13; Ti-900: 24,6 m/s  $\pm$  5,2; Na-900: 25,7 m/s  $\pm$  6,0).



**Abbildung 64: Fluggeschwindigkeit der Insekten vor dem Aufprall; Kontamination I bis Kontamination IV: die Proben wurden in jeder Kontaminationsphase mit fünf Insekten kontaminiert.**

Die Änderung des Druckes in der Absaugkammer und die Änderung des Massendurchflusses während der Kontaminationsversuche ist der Abbildung 65 zu entnehmen. Die dargestellten Werte beziehen sie auf eine Aufnahmedauer des Unterdruckes bzw. Massendurchflusses von 40 s.



**Abbildung 65:** Kontaminationsversuche von mikroperforierten Titanproben unter Verwendung der in Abbildung 55 dargestellten Absaugvorrichtung; (a): Relativdruck in Abhängigkeit von der Anzahl kontaminierter Insekten; (b): Massendurchfluss in Abhängigkeit von der Anzahl kontaminierter Insekten.

Es zeigt sich in Abbildung 65-a eine nahezu lineare Abhängigkeit der Druckänderung von der Insektenmenge (vgl. lineare Regression). Im Durchschnitt verändert sich der Unterdruck um 0,3 hPa je aufgetroffener Fliege. Zwischen den Proben mit und ohne Oberflächenmodifizierung ist kein signifikanter Unterschied bei den Relativdrücken zu erkennen. Ebenfalls zeigen die unterschiedlichen Lochabstände und -größen keinen signifikanten Unterschied im Verlauf des Relativdruckes. Der Massendurchfluss bleibt mit steigender Kontamination nahezu konstant (vgl. Abbildung 65-b). Dadurch erhöht sich die Luftgeschwindigkeit beim Durchströmen der unverblochten Löcher. Die Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  (Ti-900 und Na-900) weisen einen geringeren Massendurchfluss auf als die Proben mit einem Lochabstand von

600  $\mu\text{m}$  (Ti-600 und Na-600). Die Minderung des Durchflusses nach einer Kontamination mit 20 Insekten gegenüber dem Zustand vor der Kontamination ist gering: Ti-600: -0,36 %; Na-600: -0,54 %; Ti-900: -0,61 %; Na-900: -1,29 %.

Die Ergebnisse der Kontaminationsversuche zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Insektenmenge, Verblockung der Löcher und Druckabfall in der Unterdruckkammer (siehe Abbildung 66).

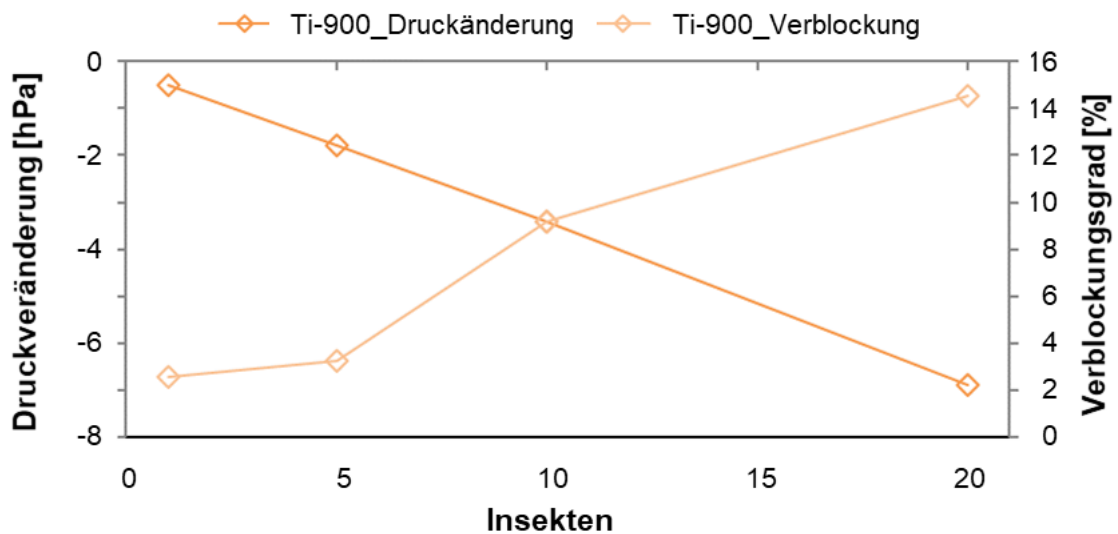
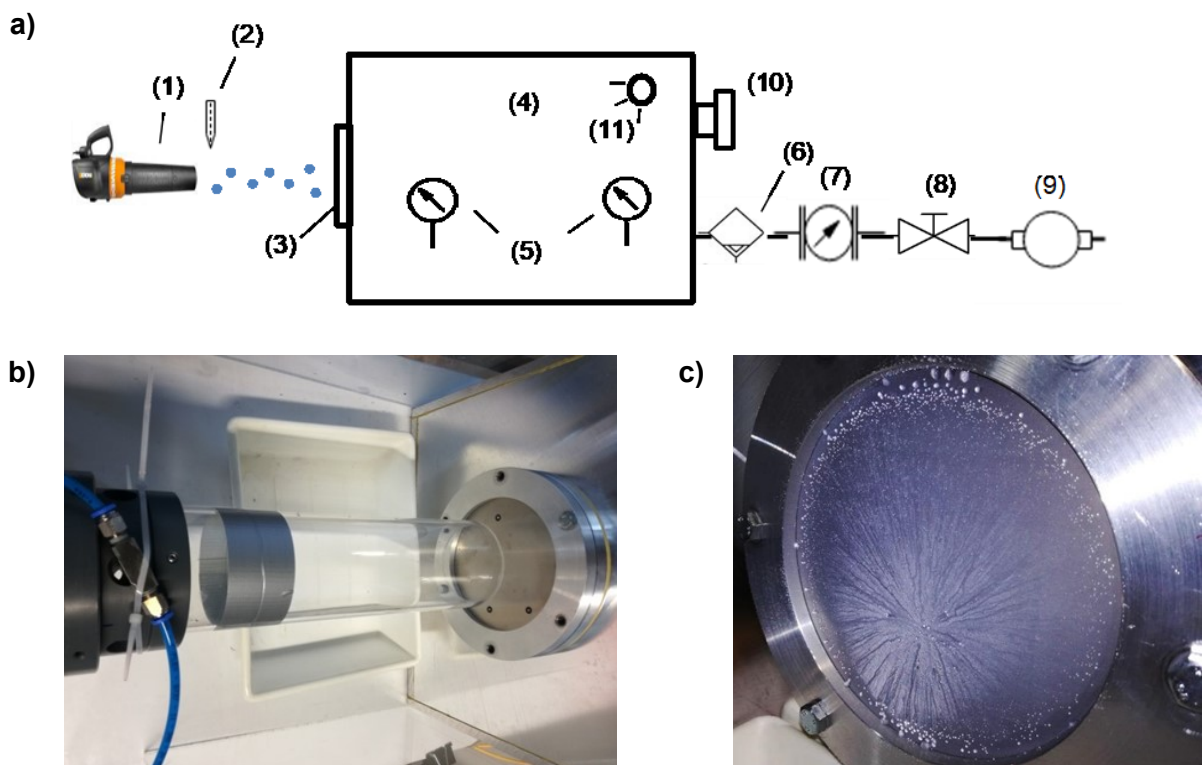


Abbildung 66: Änderung des Relativdruckes und des Verblockungsgrades in Abhängigkeit von der Anzahl kontaminierter Insekten.

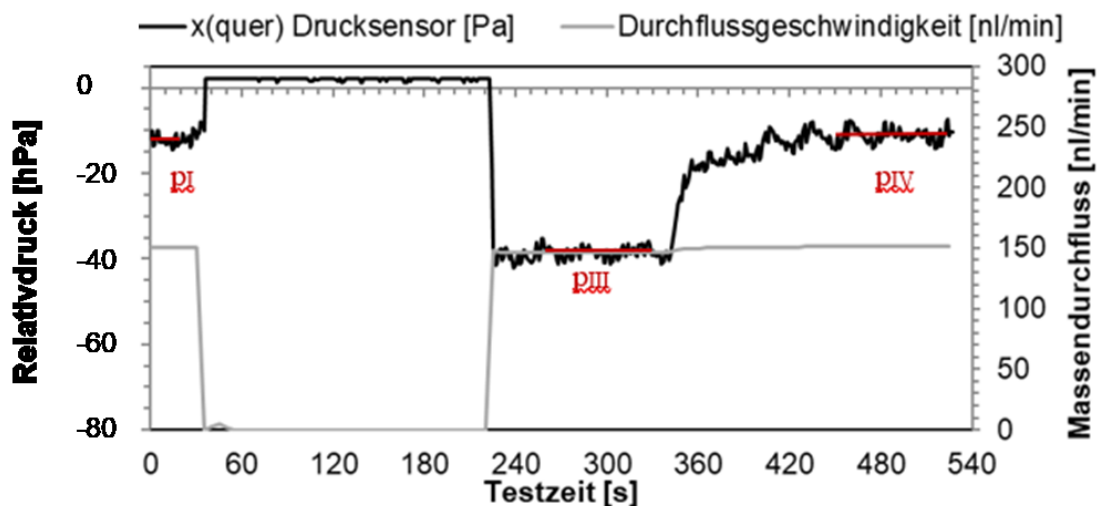
## 8.3.1.3 Wasserdurchlässigkeit und operationelle Reinigung

Zur Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit von mikroperforierten Oberflächen und deren operationelle Reinigung werden Wassertropfen (VE-Wasser; Raumtemperatur), wie in Abbildung 67-a schematisch dargestellt, aus einer Düse mit dem modifizierten Laubbläser auf die zu untersuchende mikroperforierte Probe hin beschleunigt. Es wird hierbei evaluiert, inwieweit Wasser in die Löcher eindringt, sich wieder aus den Löchern entfernen lässt und welchen Einfluss die Wasseraufnahme auf Druck und Durchfluss hat. Der Testaufbau simuliert die Auswirkungen von Regenwolken auf die Absaugung. Eindringendes Wasser könnte beim Absinken der Temperatur vereisen und stellt eine zusätzliche Belastung der Materialien im Inneren der Absaugkammer des Seitenleitwerks dar. Die mikroperforierten Proben sind während der Untersuchungen im Labor an die Absaugkammer montiert, sodass Druckänderungen bestimmt werden können. Auf der Probe zugewandten Seite der Unterdruckkammer befindet sich eine Videokamera, mit dieser die Aufnahme von Feuchtigkeit visuell beurteilt werden kann. Zusätzlich wurde eine Lichtquelle in der Absaugkammer installiert, um durch die Mikroperforation eindringendes Wasser auf der Probenrückseite mit der Videokamera zu detektieren.



**Abbildung 67: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit und des Konzeptes zur operationellen Reinigung; (a): Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus: (1): Modifizierter Laubbläser, (2): Wasserdüse, (3): Mikroperforierte Probe, (4): Absaugkammer, (5): Drucksensoren, (6): Wasserabscheider, (7): Massendurchflussmesser, (8): Regelventil, (9): Vakuumpumpe, (10): Videokamera, (11): Lichtquelle; (b): Modifizierter Laubbläser mit montierter Wasserdüse; (c): Beregnung einer mikroperforierten Probe.**

Die Versuche zur Wasserdurchlässigkeit wurden mit allen sechs Proben durchgeführt (Ti-600, Na-600, N4-600, Ti-900, Na-900 und N4-900) um den Einfluss der unterschiedlichen Lochabstände (600  $\mu\text{m}$  und 900  $\mu\text{m}$ ), Lochdurchmesser (Vorderseite: 61  $\mu\text{m}$  bzw. 71  $\mu\text{m}$ ; Rückseite: 156  $\mu\text{m}$  bzw. 200  $\mu\text{m}$ ) und Oberflächenmodifizierungen (keine, Nanotubes und N4-Prozess) untereinander vergleichen zu können. Der Versuch der Wasserdurchlässigkeit gliedert sich in vier Phasen: In Phase I wird ein Sollunterdruck für 60 s angelegt, um den Referenzzustand (Unterdruck, Massendurchfluss) zu bestimmen (siehe linke rote Linie in Abbildung 68). Bei den Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  beträgt der Sollunterdruck -10 hPa, -20 hPa und -40 hPa und bei den Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  -10 hPa, -40 hPa und -100 hPa. In Phase II wird die Vakuumpumpe ab- und die Wasserdüse für 180 s angeschaltet. Daraufhin wird in Phase III die Vakuumpumpe angeschaltet, während für weitere 120 s Wasser auf die Probe trifft (siehe mittlere rote Linie in Abbildung 68). In Phase IV wird die Wasserzufuhr unterbrochen, um zu untersuchen, ob das in die Löcher eingedrungene Wasser wieder entweicht und der Druck und Massendurchfluss den Referenzzustand von Phase I erreicht.



**Abbildung 68:** Unterdruck- und Durchflussmessungen während der Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit am Beispiel der Probe Ti-600;  $p_I$ : Mittelwert des Referenzdruckes;  $p_{III}$ : Mittelwert während dem Besprenkeln mit Wasser;  $p_{IV}$ : Mittelwert nach dem Besprenkeln.

In Phase I wurde das arithmetische Mittel  $p_I$  (Druck) und  $m_I$  (Massendurchfluss) im Zeitraum zwischen 0 s und 30 s ermittelt. In Phase II wurde die Wasseraufnahme ohne Unterdruck mit einer Videokamera dokumentiert. In Phase III wurde das arithmetische Mittel  $p_{III}$  (Druck) und  $m_{III}$  (Massendurchfluss) im Zeitraum zwischen 250 s und 310 s ermittelt. Die Ermittlung des arithmetischen Mittels  $p_{IV}$  (Druck) und  $m_{IV}$  (Massendurchfluss) erfolgte in Phase IV im Zeitraum zwischen 460 s und 520 s (nachdem eine Sättigung erreicht wurde). Der Verlauf des mittleren Unterdruckes in der Phase I, Phase III und Phase IV ist der Abbildung 69 und der Verlauf des mittleren Durchflusses der Abbildung 70 zu entnehmen.



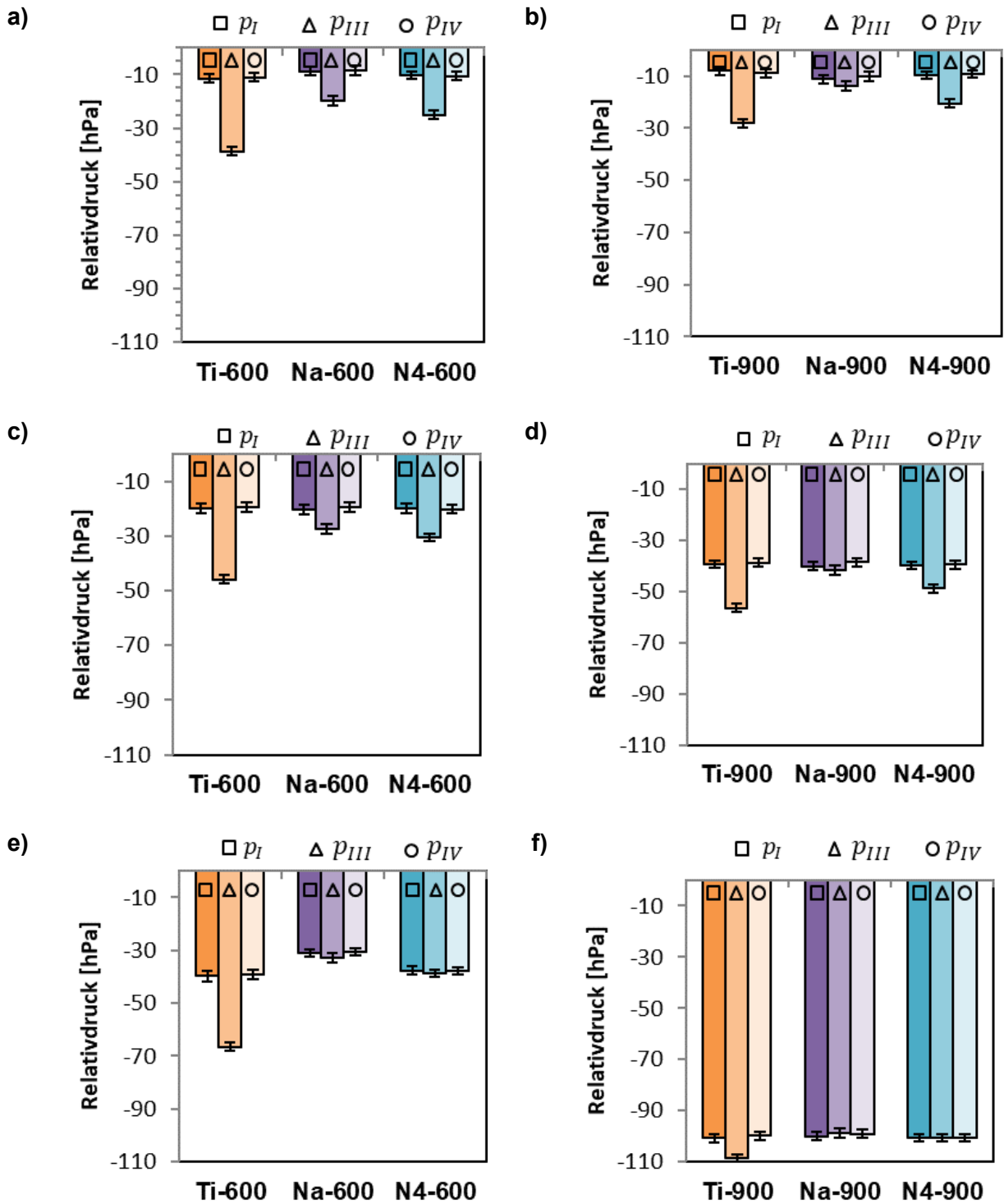


Abbildung 69: Druckänderung durch Wasseraufnahme der Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  (a, c und e) und der Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  (b, d und f) nach der in Abbildung 68 dargestellten Vorgehensweise bei unterschiedlichen Soll-Relativunterdrücken: -10 hPa (a und b), -20 hPa (c), -40 hPa (d und e) und -100 hPa (f).

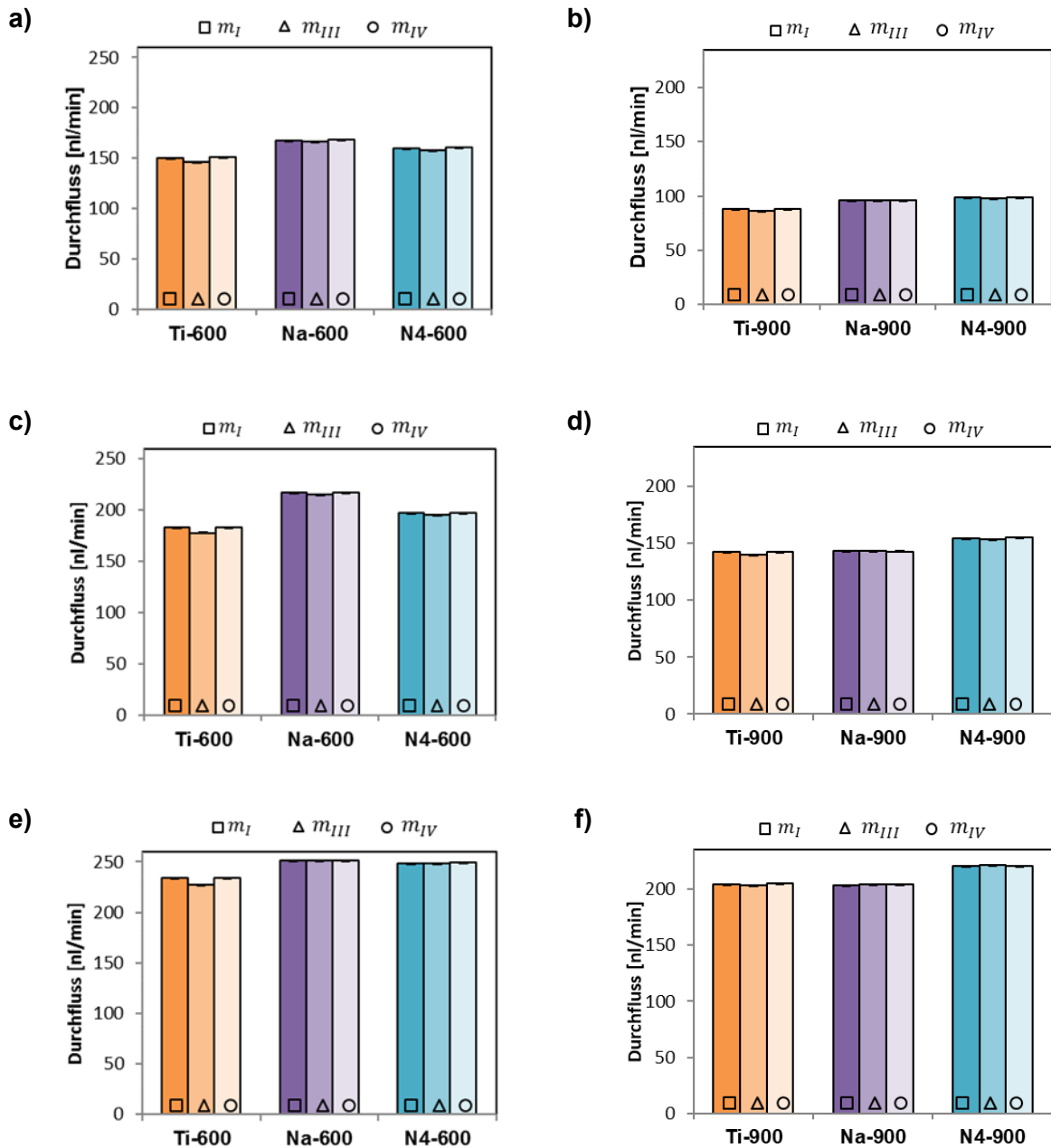


Abbildung 70: Durchflussänderung durch Wasseraufnahme der Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  (a, c und e) und der Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  (b, d und f) nach der in Abbildung 68 dargestellten Vorgehensweise bei unterschiedlichen Soll-Relativunterdrücken: -10 hPa (a und b), -20 hPa (c), -40 hPa (d und e) und -100 hPa (f).

Die Änderung des Durchflusses durch die Aufnahme von Wasser ist bei allen sechs Proben gering (vgl. Abbildung 70). Der Massendurchfluss verringert sich bei Auftreffen der Wassertropfen in Phase III gegenüber Phase I bei den unbehandelten Proben weniger als 3 % (Ti-600: -2,6 % bei -10 hPa, -2,8 % bei -20 hPa und -2,9 % bei -40 hPa; Ti-900: -1,9 % bei -10 hPa, -1,9 % bei -40 hPa und -0,6 % bei -100 hPa) und bei den Oberflächenmodifizierten Proben weniger als

2 % (Na-600: -1,3 % bei -10 hPa, -1,0 % bei -20 hPa und 0,1 % bei -40 hPa; N4-600: -1,4 % bei -10 hPa, -1,0 % bei -20 hPa, -0,02 % bei -40 hPa; Na-900: 0,2 % bei -10 hPa, -0,04 % bei -40 hPa und 0,5 % bei -100 hPa; N4-900: -0,6 % bei -10 hPa, -0,5 % bei -40 hPa und -0,6 % bei -100 hPa). 120 s nach Abschalten der Wasserdüse entspricht der Durchfluss  $m_{IV}$  bei allen Proben und allen Druckstufen wieder dem Referenzzustand  $m_I$ .

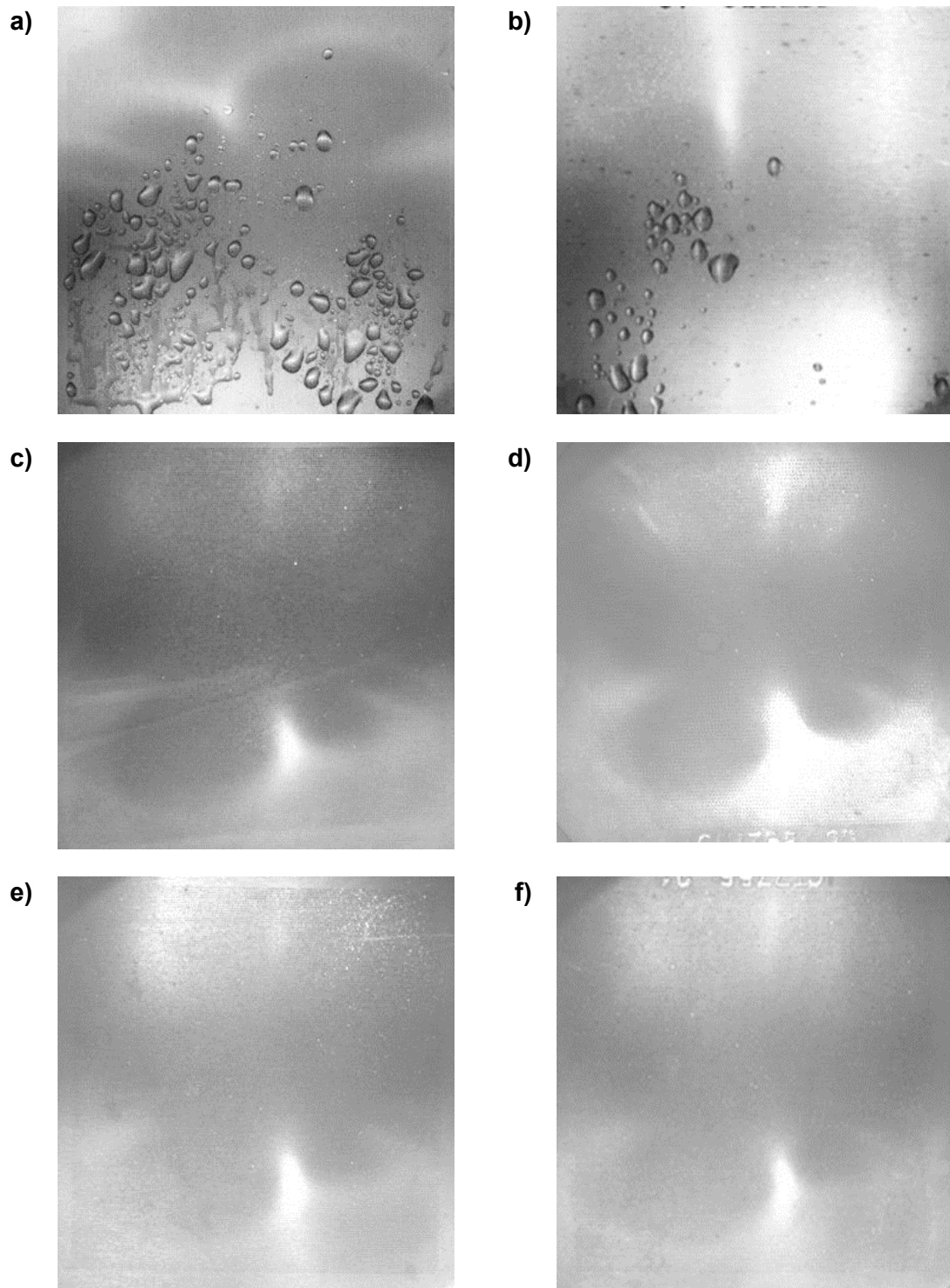
Bei den in Abbildung 69 dargestellten Druckunterschieden ist ein Einfluss der Probengeometrie (Lochabstand und -durchmesser), des Ausgangsdruckes sowie der Oberflächenmodifizierung zu erkennen:

- **Einfluss der Probengeometrie:** Bei den in Abbildung 69 dargestellten Druckänderungen ist ein Einfluss des Lochabstandes und -durchmessers zu beobachten. Bei einem Ausgangsdruck von -10 hPa (vgl. Abbildung 69-a und Abbildung 69-b) ist die Druckänderung durch Besprenkeln mit Wasser bei den Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  (Ti-600, Na-600 und N4-600) und gleicher Vorbehandlung höher als bei den Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$  (Ti-900, Na-900 und N4-900). Bei einem Ausgangsdruck von -40 hPa zeigt sich jedoch lediglich bei Ti-600 eine höhere Druckdifferenz im Vergleich zur Probe Ti-900. Für Na-600 und N4-600 ist die Druckdifferenz geringer als für Na-900 bzw. N4-900 (vgl. Abbildung 69-d und Abbildung 69-e). Folglich hat bei einem geringeren Unterdruck, die Lochgeometrie (Lochabstand/Lochdurchmesser) bzw. die Gesamtlochoberfläche einen stärkeren Einfluss auf die Verblockung der Löcher durch Wasseraufnahme als bei einem höheren Unterdruck.
- **Einfluss des Ausgangsdruckes:** Für die unbehandelten Proben Ti-600 und Ti-900 zeigt sich für alle Ausgangsdrücke eine Erhöhung des Unterdrucks in Phase III im Vergleich zum Referenzzustand in Phase I (vgl. Abbildung 69). Mit wachsendem Ausgangsdruck sinkt bei Probe Ti-900 sowohl in Absolutwerten als auch bei prozentualer Betrachtung die Druckdifferenz zum Ausgangsdruck bei Aufbringen von Wasser (vgl. Abbildung 69-b, Abbildung 69-d und Abbildung 69-f). Bei der Probe Ti-600 bleibt der Druckunterschied zwischen Phase I und Phase III bei allen drei Ausgangsdrücken in absoluten Werten betrachtet konstant. Die Proben Na-600, N4-600, Na-900 und N4-900 mit einer Oberflächenmodifizierung zeigen bei geringem Unterdruck (Solldruck -10 hPa) eine Druckänderung in Phase III gegenüber dem Ausgangszustand in Phase I. Mit wachsendem Ausgangsdruck sinkt die Druckdifferenz. Zusammenfassend ist demnach eine Verringerung der Druckdifferenz zwischen Phase I und Phase III durch Wasseraufnahme mit wachsendem Ausgangsdruck zu erkennen (eine Ausnahme bildet hierbei lediglich die Probe Ti-600).
- **Einfluss der Oberflächenmodifizierung:** Der Druckabfall durch Wasseraufnahme variiert je nach Oberflächenbehandlung. Es zeigt sich, dass bei einem Ausgangsdruck von -10 hPa und -20 hPa (bei den Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$ ) bzw. -10 hPa und -40 hPa (bei den Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$ ) die unbehandelten Proben Ti-600 bzw. Ti-900 die höchste Druckdifferenz durch die Aufnahme durch Wasser gegenüber dem Ausgangszustand aufweisen (vgl. hierzu Abbildung 69-a, Abbildung 69-b, Abbildung 69-c und Abbildung 69-d). Zudem ist ersichtlich, dass die Druckdifferenz zwischen Phase I und Phase III bei den Proben mit

deiner N4-Strukturierung höher ist als bei den Proben mit einer Nanotubestrukturierung. Bei hohen Anfangsunterdrücken (-40 hPa und -100 hPa) ist bei den Proben mit einer Oberflächenmodifizierung kein signifikanter Druckabfall zwischen Phase I und Phase III zu erkennen (mit Ausnahme von der Probe Na-900 bei einem Ausgangsruck von -40 hPa; siehe Abbildung 69-d). Obige Beobachtungen zusammenfassend, zeigt sich demnach eine Verringerung der Druckdifferenz durch eine Oberflächenmodifizierung. Es können jedoch Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Strukturierungen (Nanotubes bzw. N4) beobachtet werden.

Bei Betrachtung des Druckes in Phase IV nach Abstellen der Wasserzufuhr zeigt sich unabhängig von Lochabstand bzw. -durchmesser, Ausgangsdruck und Vorbehandlung, dass sich spätestens 120 s nach Abstellen der Wasserzufuhr der Referenzdruck von Phase I wieder einstellt.

Die Wasserdurchlässigkeit der Proben in Phase II – wenn kein Unterdruck angelegt ist – wurde von der Probenrückseite her mit einer Videokamera aufgezeichnet. Die Bilder sind der Abbildung 71 zu entnehmen. Die Aufnahmen ermöglichen keine quantitative Analyse, es zeigt sich jedoch, dass nur bei den unbehandelten Proben Ti-600 und Ti-900 Wasser durch die Mikroperforation dringt. Die Proben Na-600, N4-600, Na-900 und N4-900 mit einer Oberflächenmodifizierung hingegen zeigen keine Durchlässigkeit für Wasser, sofern kein Unterdruck an die Probe angelegt ist. Ein Vergleich der Proben Ti-600 und Ti-900 zeigt, dass augenscheinlich mehr Wasser durch die Probe Ti-600 mit geringerem Lochabstand (höhere Lochanzahl) dringt als durch die Probe Ti-900.



**Abbildung 71: Bilder der Probenrückseite während der Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit von mikroperforierten Proben in Phase II (vgl. Abbildung 68); (a): Ti-600; (b): Ti-900; (c): Na-600; (d): Na-900; (e): N4-600; (f): N4-900.**

Aufbauend auf den Untersuchungen zur Wasserdurchlässigkeit wurden Reinigungsversuche an mit Insekten kontaminierten mikroperforierten Proben im Labormaßstab durchgeführt. Hierfür wurde der in Abbildung 67 dargestellte Versuchsaufbau (Seite 95) verwendet. Es soll untersucht werden, ob und in welchem Maße die Kontamination (20 Insekten) durch Besprenkeln mit Wasser unter zeitgleicher Absaugung der Mikroperforation entfernt werden kann. Das Reinigungskonzept ist zum einen der natürlichen Reinigungswirkung beim Durchfliegen von Regenwolken nachempfunden, zum anderen ist ein Abspritzen am Boden mit Wasser bei gleichzeitig angelegtem Unterdruck denkbar. Die Versuche wurden mit VE-Wasser und bei Raumtemperatur an den Proben ohne Oberflächenmodifizierung (Ti-600 und Ti-900) sowie an den Nanotubes strukturierten und hydrophob beschichteten Proben (Na-600 und Na-900) durchgeführt. Die Reinigungswirkung wurde durch die Änderung von Druckabfall und Massendurchfluss quantifiziert. Zudem wurde die Restverblockung nach dem Reinigungsvorgang analysiert. Die Untersuchungen wurden an mit 20 Insekten kontaminierten Proben durchgeführt.

Der Reinigungsvorgang selbst gliedert sich in drei Phasen: Zunächst wird ein Unterdruck eingestellt und Druck und Massendurchfluss aufgenommen, um eine Referenzbedingung für die Quantifizierung der Reinigungswirkung zu erhalten (Phase I). Anschließend wird die Probe bei bestehendem Unterdruck mit Wasser besprüht (Phase II). In Phase III wird das Wasser abgestellt und der sich einstellende Unterdruck und Massendurchfluss kann mit dem Referenzzustand verglichen werden. Ein anschließender Scan der Probe mit einem hochauflösenden Scanner ermöglicht die Bestimmung der Restverblockung gegenüber dem kontaminierten bzw. dem nicht kontaminierten Zustand.

Der Druck- und Durchflussverlauf während der Reinigungsversuche ist am Beispiel der mit 20 Insekten kontaminierten Probe Ti-600 in Abbildung 72 dargestellt. Aus den Messdaten wird das arithmetische Mittel für Druck  $p$  und Durchfluss  $m$  bestimmt:  $p_I$  und  $m_I$  bestimmt sich aus den Messdaten von 0 s bis 45 s,  $p_{II}$  und  $m_{II}$  aus 120 s bis 180 s sowie  $p_{III}$  und  $m_{III}$  aus 360 s bis 420 s.



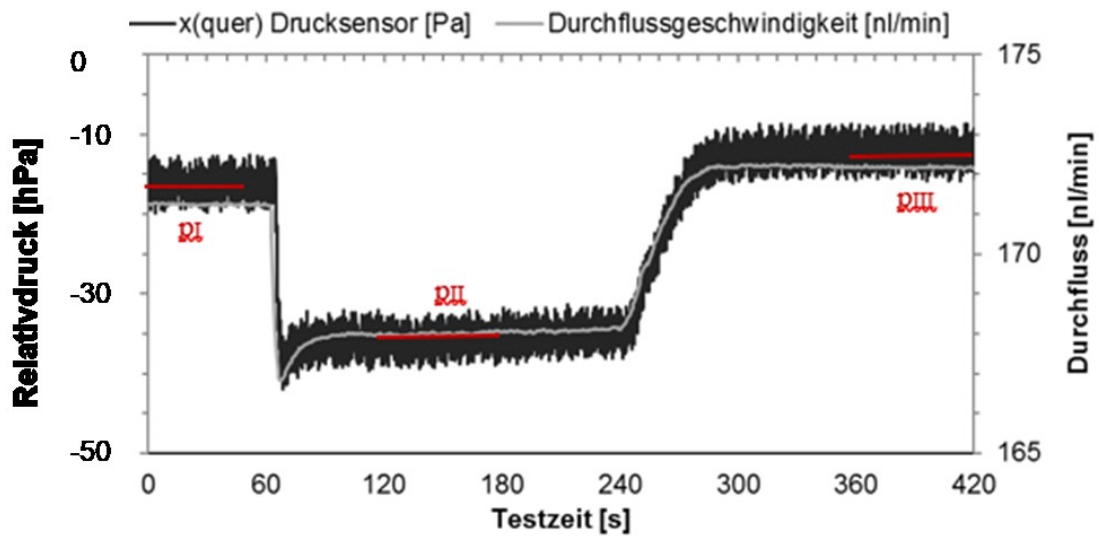


Abbildung 72: Unterdruck- und Durchflussmessungen während der Reinigungsversuche am Beispiel der Probe Ti-600;  $p_I$ : Mittelwert des Referenzdruckes;  $p_{II}$ : Mittelwert während dem Besprenkeln mit Wasser;  $p_{III}$ : Mittelwert nach der Reinigung.

In Abbildung 73 sind die Mittelwerte der Unterdrücke  $p_I$ ,  $p_{II}$  und  $p_{III}$  der vier getesteten Proben (Ti-600, Ti-900, Na-600 und Na-900) dargestellt.

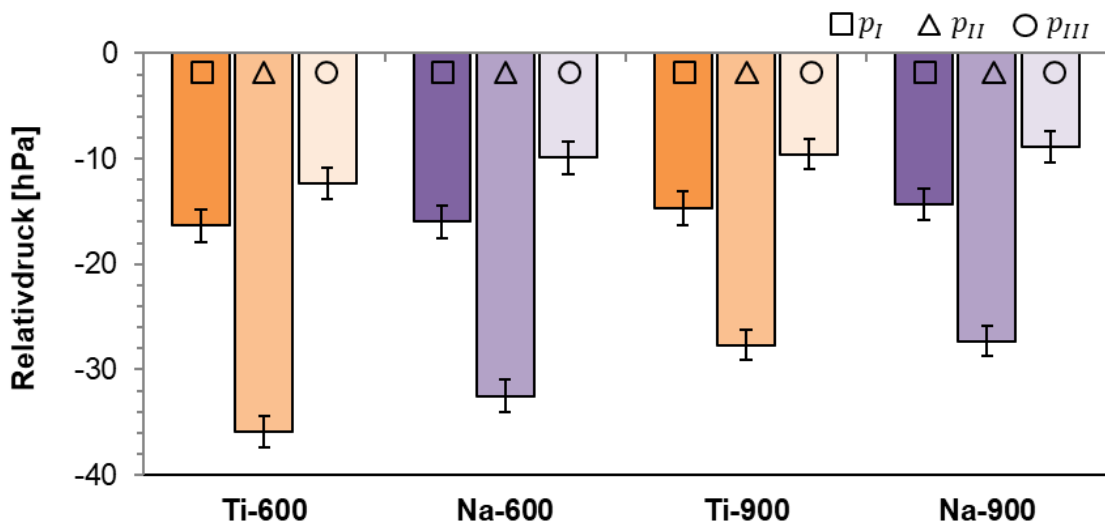
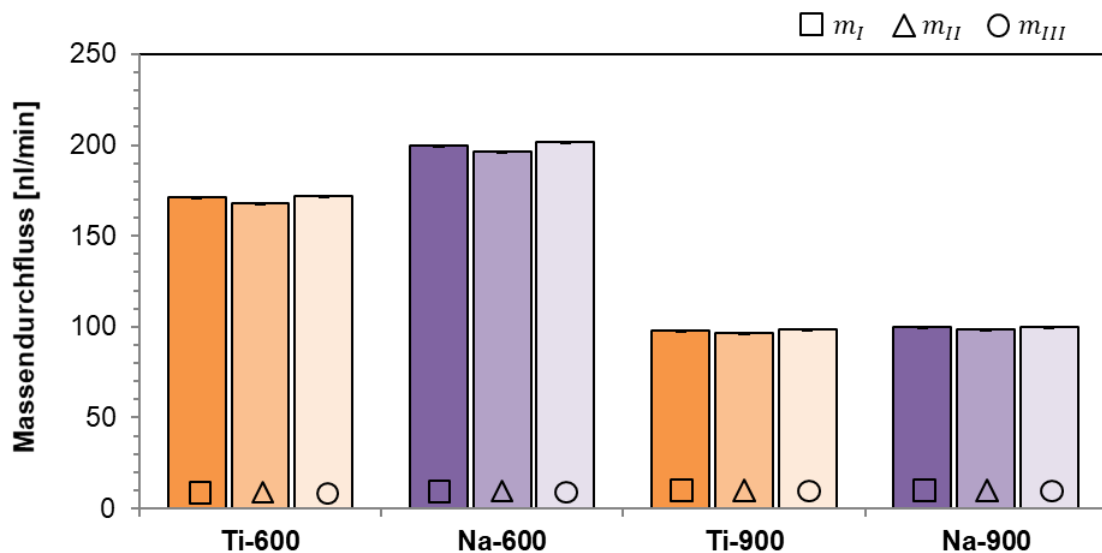


Abbildung 73: Ermittelte Druckunterschiede bei den Reinigungsversuchen von kontaminierten mikroperforierten Proben (mit 20 Insekten); Balken mit Quadrat: Unterdruck der kontaminierten Proben vor der Reinigung ( $p_I$ ); Balken mit Dreieck: Unterdruck während dem Besprenkeln mit Wasser ( $p_{II}$ ); Balken mit Kreis: Unterdruck nach dem Besprenkeln mit Wasser ( $p_{III}$ ).

Der Druckverlauf während Phase I, Phase II und Phase III ist für alle Proben qualitativ ähnlich (vgl. Abbildung 73). Bei dem Besprenkeln mit Wasser (Phase II) steigt der Unterdruck in der Kammer gegenüber dem Referenzzustand (Phase I) an. Demnach dringt Wasser in und durch die Löcher. Wird die Wasserzufuhr in Phase III abgestellt, so sinkt der Unterdruck gegenüber Phase II ab. Es zeigt sich auch, dass der Unterdruck nach dem Besprenkeln mit Wasser (Phase III) geringer ist als im kontaminierten Referenzzustand (Phase I). Bei den Proben mit einem Lochabstand von 600  $\mu\text{m}$  stellt sich während dem Besprenkeln mit Wasser (Phase II) ein höherer Unterdruck ein als bei den Proben mit einem Lochabstand von 900  $\mu\text{m}$ . In Phase III sind hingegen keine quantitativen Unterschiede festzustellen.

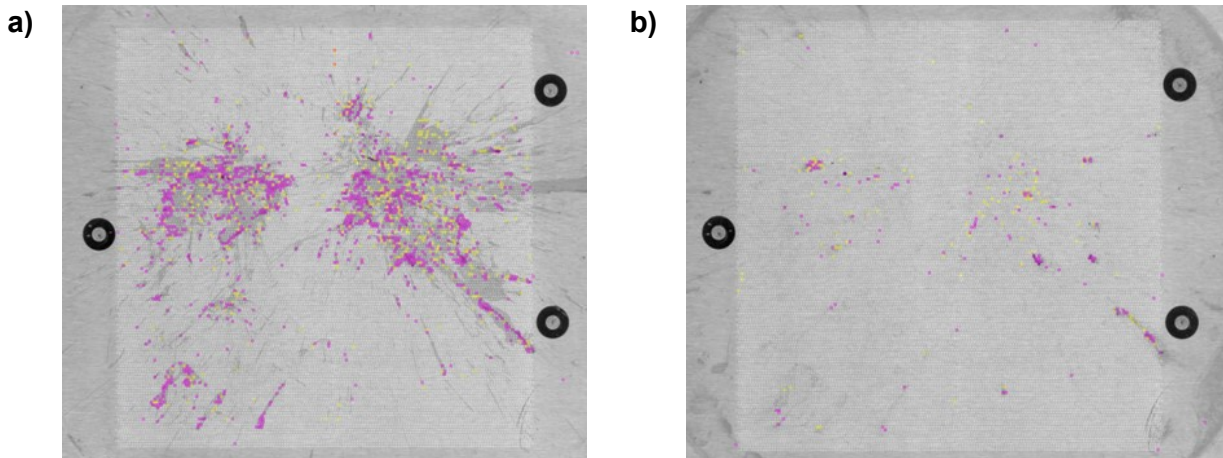
Die Mittelwerte der Massendurchflüsse  $m_I$ ,  $m_{II}$  und  $m_{III}$  der vier getesteten Proben (Ti-600, Ti-900, Na-600 und Na-900) sind der Abbildung 74 zu entnehmen.



**Abbildung 74:** Ermittelte Massendurchflüsse bei den Reinigungsversuchen von kontaminierten mikroperforierten Proben (mit 20 Insekten); Balken mit Quadrat: Durchfluss der kontaminierten Proben vor der Reinigung ( $m_I$ ); Balken mit Dreieck: Durchfluss während dem Besprenkeln mit Wasser ( $m_{II}$ ); Balken mit Kreis: Durchfluss nach dem Besprenkeln mit Wasser ( $m_{III}$ ).

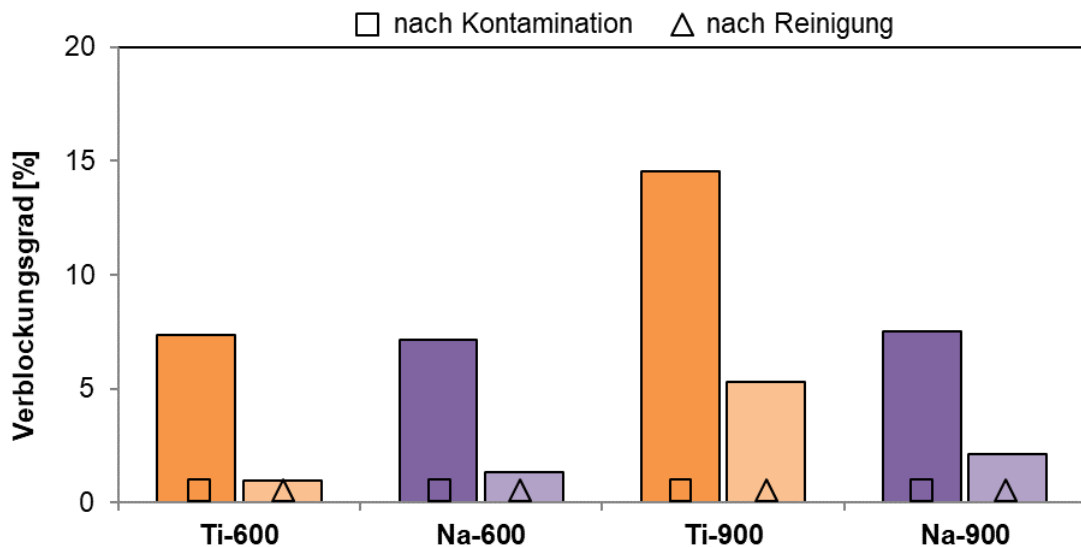
Es zeigt sich, dass infolge des Besprenkeln mit Wasser eine geringe Reduzierung des Massendurchflusses eintritt (vgl. Abbildung 74). Nach Abstellen der Wasserzufuhr erhöht sich der Massendurchfluss, sowohl gegenüber des Besprenkeln mit Wasser als auch des Ausgangszustandes (kontaminierte Probe).

Die Verblockung vor den Reinigungsversuchen und danach ist am Beispiel der Probe Ti-600 in Abbildung 75 dargestellt.



**Abbildung 75: Verblockte Löcher der Probe Ti-600 nach der Kontamination mit 20 Insekten (a) und nach dem Besprenkeln mit Wasser (b).**

Der Verblockungsgrad der vier getesteten Proben (Ti-600, Ti-900, Na-600 und Na-900) ist der Abbildung 76 zu entnehmen.



**Abbildung 76: Ermittelter Verblockungsgrad bei den Reinigungsversuchen von kontaminierten mikroperforierten Proben; Balken mit Quadrat: Verblockungsgrad nach der Kontamination mit 20 Insekten; Balken mit Dreieck: Verblockungsgrad nach dem Besprenkeln mit Wasser.**

Es zeigte sich für alle mikroperforierten Proben eine signifikante Reduktion der Verblockung nach dem Reinigungsvorgang mit Wasser bei angelegtem Unterdruck (vgl. Abbildung 76). Bei den Reinigungsversuchen konnte kein signifikanter Einfluss der Oberflächenmodifizierung gegenüber der nicht oberflächenmodifizierten Oberfläche beobachtet werden.

## 8.3.1.4 Zusammenfassung

### Untersuchung der Insektenkontamination

- Die Ergebnisse der Kontaminationsversuche zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Insektenmenge, Verblockung der Löcher und Druckabfall in der Unterdruckkammer (vgl. Abbildung 66). Der Massendurchfluss bleibt während der Kontamination unverändert (vgl. Abbildung 65-b).
- Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Proben mit und ohne Oberflächenmodifizierung beobachtet werden (vgl. Abbildung 65).

### Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit von mikroperforierten Proben

- Die Versuche zeigen, dass die Proben mit einem Lochabstand von 600 µm einen höheren Druckabfall durch auftreffende Wassertropfen haben als die Proben mit einem Lochabstand von 900 µm (vgl. Abbildung 69). Die Änderung des Durchflusses durch die Aufnahme von Wasser ist bei allen sechs getesteten Proben gering (vgl. Abbildung 70).
- Die Versuche verdeutlichen zudem, dass der Druckabfall in der Kammer bei den oberflächenmodifizierten Proben (Na-600, N4-600, Na-900 und N4-900) geringer ausfällt als bei den unbehandelten Proben (vgl. Abbildung 69). Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die Strukturierung mit Nanotubes zu einem geringeren Druckabfall führt als die Strukturierung mit einem N4-Prozess.
- Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass mit wachsendem Unterdruck in der Kammer die Druckdifferenz bei auftreffendem Wasser sinkt (vgl. Abbildung 69).
- Die qualitative Analyse der Wasseraufnahme durch die Aufnahme der Probenrückseite mit einer Kamera zeigt, dass bei Atmosphärendruck in der Kammer nur bei der unbehandelten Proben (Ti-600 bzw. Ti-900) Wasser eindringt (vgl. Abbildung 71). Bei den Proben mit hydrophober Beschichtung ist jedoch keine Wasseraufnahme zu erkennen.

### Untersuchung der operationellen Reinigung von mikroperforierten Proben

- Das dargestellte Reinigungskonzept zeigt, dass eine Reinigung am Boden durch Anlegen eines Unterdrucks und gleichzeitigem Besprenkeln der Mikroperforation mit Wasser (VE-Wasser; Raumtemperatur) geeignet ist um Insektenrückstände von der mikroperforierten Oberfläche zu entfernen.
- Beim Besprenkeln der kontaminierten mikroperforierten Proben mit Wasser steigt der Unterdruck in der Absaugkammer an, was darauf hindeutet, dass Wasser in und durch die Löcher dringt (vgl. Abbildung 73).
- Der Unterdruck ist nach der Reinigung geringer als nach der Kontamination (vgl. Abbildung 73). Ebenfalls steigt der Massendurchfluss nach der Reinigung im Vergleich zur kontaminierten Proben (vgl. Abbildung 74). Der Verblockungsgrad wird durch das Besprenkeln mit Wasser signifikant reduziert, jedoch bleibt eine Restverblockung (vgl. Abbildung 75 und Abbildung 76).

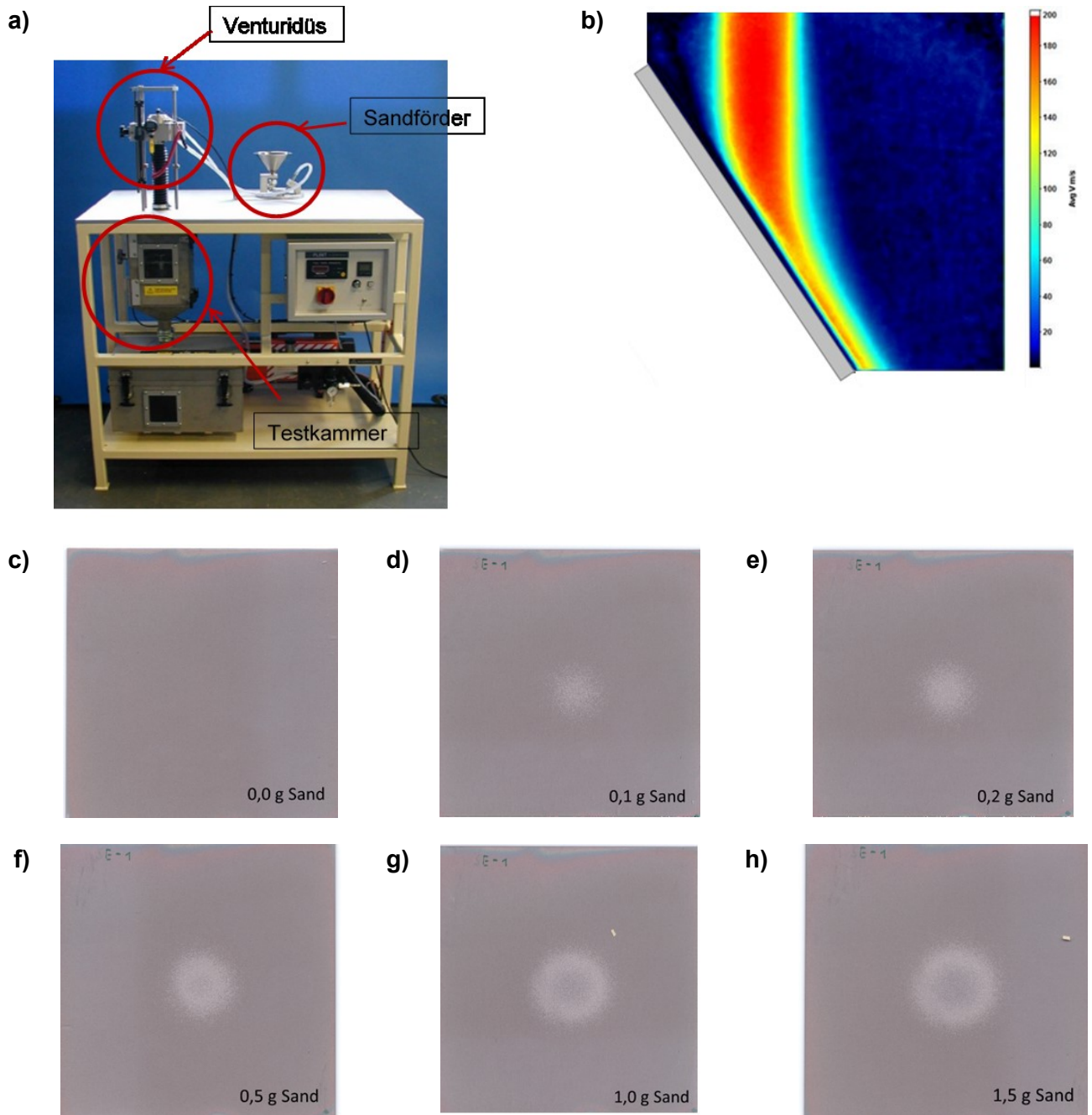
## 8.3.2 Degradation von oberflächenmodifiziertem Titan Grad 2

Zur Untersuchung der Degradation von oberflächenmodifiziertem Titan Grad 2 (Material der Absaugnase) wurden Sand- und Regenerosionsversuche durchgeführt. Die Bleche wurden durch eine Anodisierung bzw. Laserbehandlung strukturiert und anschließend mit einer hydrophoben Lösung (beinhaltet Perfluoropolyether Phosponat) beschichtet (vgl. Abbildung 42 in Kapitel 8.2.1). Als Referenz diente ein unbehandeltes Titanblech.

Die für die Versuche verwendeten Titanbleche hatten eine quadratische Form mit einer Kantenlänge von 50 mm und einer Dicke von 0,8 mm. Oberflächen mit einem Kontaktwinkel kleiner  $90^\circ$  werden als hydrophil, zwischen  $90^\circ$  und  $150^\circ$  als hydrophob und größer  $150^\circ$  als superhydrophob bezeichnet.

### 8.3.2.1 Sanderosion

Für die Untersuchung der Sanderosion wurde der in Abbildung 77-a dargestellte Sanderosionsprüfstand verwendet. Der Aufbau entspricht der Norm ASTM G 76 07. Einzig der Abstand zur Probe wurde um 10 mm erhöht, um einen größeren Erosionskrater zu erhalten und ein anderes Strahlgut (Sandpartikel mit einem durchschnittlichen Durchmesser von  $220\ \mu\text{m}$ ) verwenden zu können. Weiter ist in Abbildung 77-b die Geschwindigkeitsverteilung während der Sanderosionsversuche dargestellt. Abbildung 77-c bis Abbildung 77-h zeigen beispielhaft eine Titanprobe nach unterschiedlichen Erosionsschritten.



**Abbildung 77: Untersuchung der Sanderosion; (a): Sanderosionsprüfstand; (b): Geschwindigkeitsverteilung der Sandpartikel während der Erosionsversuche; (c) - h): Beispielhafte Darstellung einer Probe nach unterschiedlichen Erosionsschritten.**

Die Charakterisierung der erodierten Oberflächen erfolgte anhand des Kontaktwinkels, des Rollwinkels und der Rauheit.



## Kontaktwinkel

Die gemessenen Kontaktwinkel nach unterschiedlichen applizierten Sandmassen sind in Abbildung 78 dargestellt.

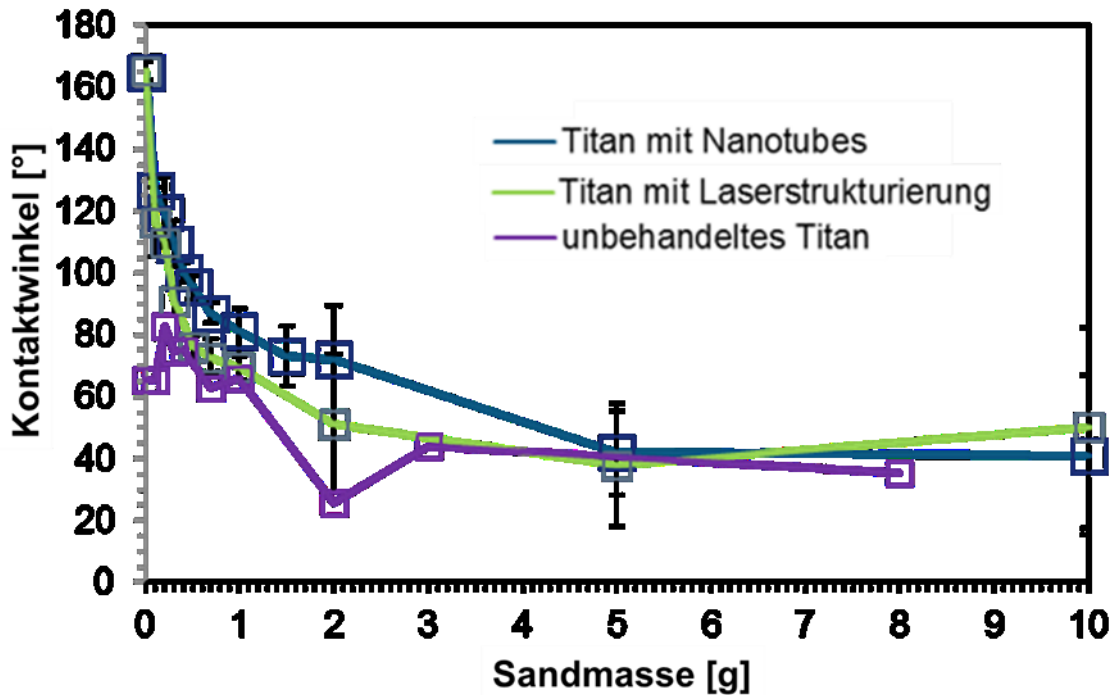


Abbildung 78: Vergleich der Kontaktwinkelverläufe nach unterschiedlich applizierten Sandmassen.

Im Ausgangszustand ist der in Abbildung 78 dargestellte Kontaktwinkel bei den Proben mit einer superhydrophoben Beschichtung (Nanotube- und Laserstruktur) signifikant höher als bei der unbehandelten Titanprobe. Zuerst genannte besitzen einen Kontaktwinkel von 155° bzw. 165°. Ab einer applizierten Sandmenge von 5 g erreichen alle drei Proben einen Kontaktwinkel von 40°. Die oberflächenmodifizierten Proben sind, im Vergleich zum reinen Titan, etwas beständiger. Es ist jedoch zu erkennen, dass die Abnahme des Kontaktwinkels der beschichteten Oberflächen dem Muster des Reintitans folgt. Es wurden jedoch auch Unterschiede zwischen der laserstrukturierten Probe und der Probe mit Nanotubes festgestellt. Obwohl der Kontaktwinkel der laserstrukturierten Probe zu Beginn größer ist, fällt dieser schneller als bei der Probe mit Nanotubes, ab. Die Erosionsbeständigkeit ist somit bei der mit Nanotubes strukturierten Probe etwas größer als bei der laserstrukturierten.

## Rollwinkel

In Abbildung 79 ist der Rollwinkelverlauf in Abhängigkeit von der applizierten Sandmasse dargestellt. Ein Rollwinkel von  $90^\circ$  bedeutet hierbei eine maximale Haftung des Tropfens an der Oberfläche.

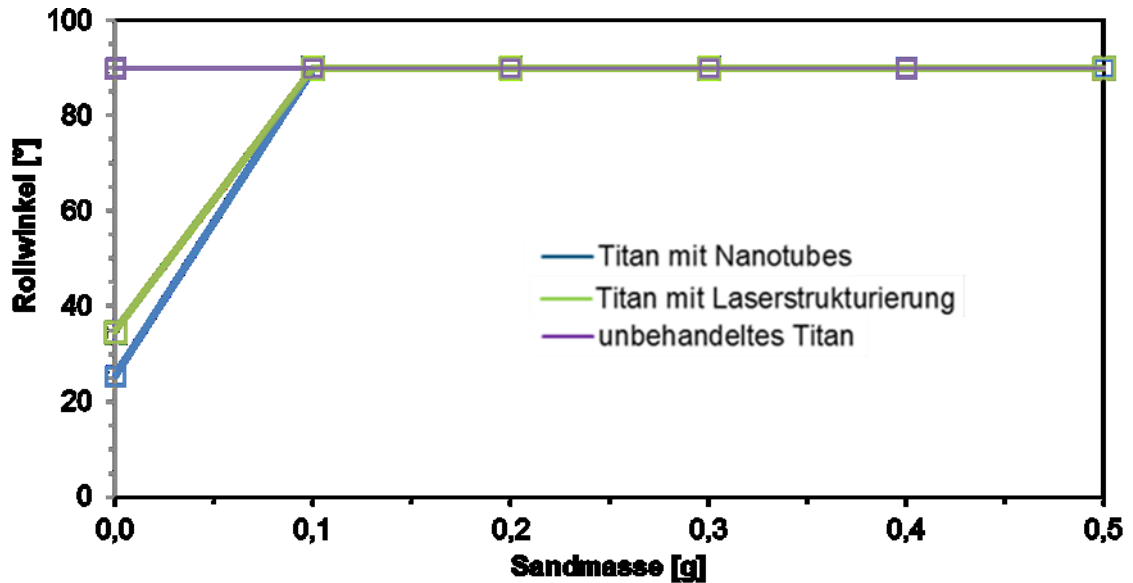


Abbildung 79: Vergleich der Rollwinkelverläufe nach unterschiedlich applizierten Sandmassen.

Das unbehandelte Titan weist von Beginn an einen Rollwinkel von  $90^\circ$  auf. Die oberflächenmodifizierten Proben hingegen zeigen zu Beginn einen Rollwinkel von  $25^\circ$  bzw.  $35^\circ$ . Jedoch erhöhte sich der Rollwinkel bei den beschichteten Proben bereits nach einer applizierten Sandmasse von 0,1 g auf  $90^\circ$ .

## Rauheit

In Abbildung 80 sind die Ergebnisse aus der Rauheitsmessung dargestellt.

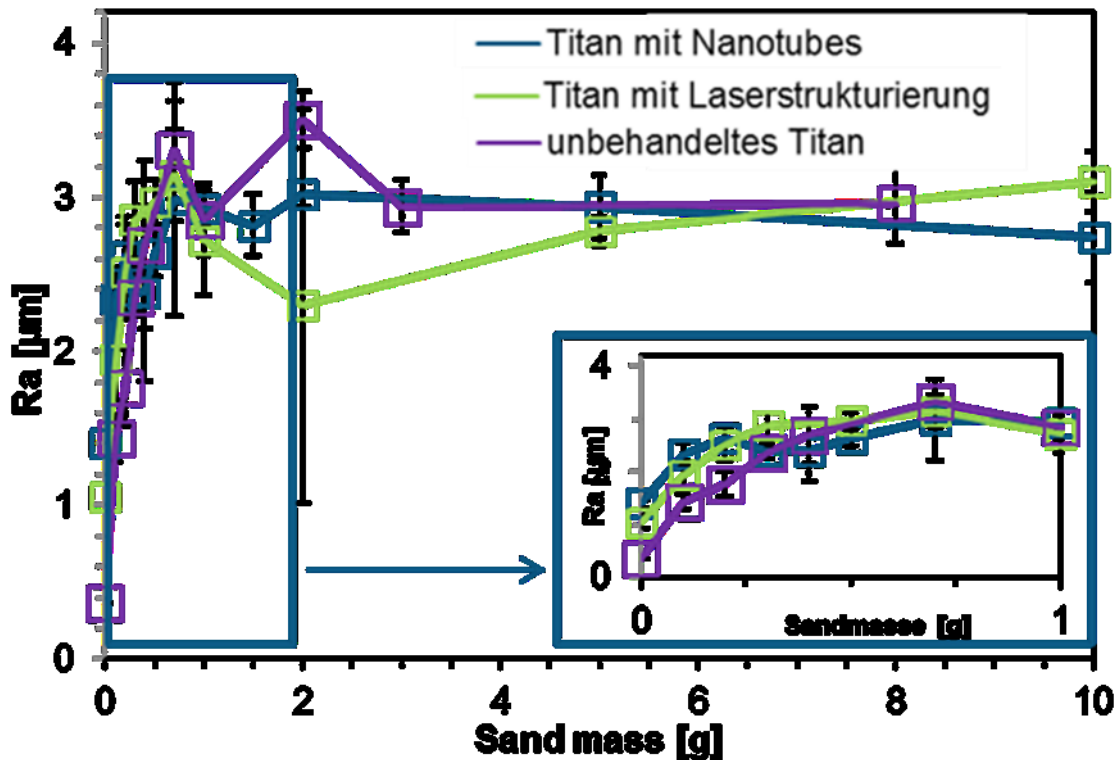


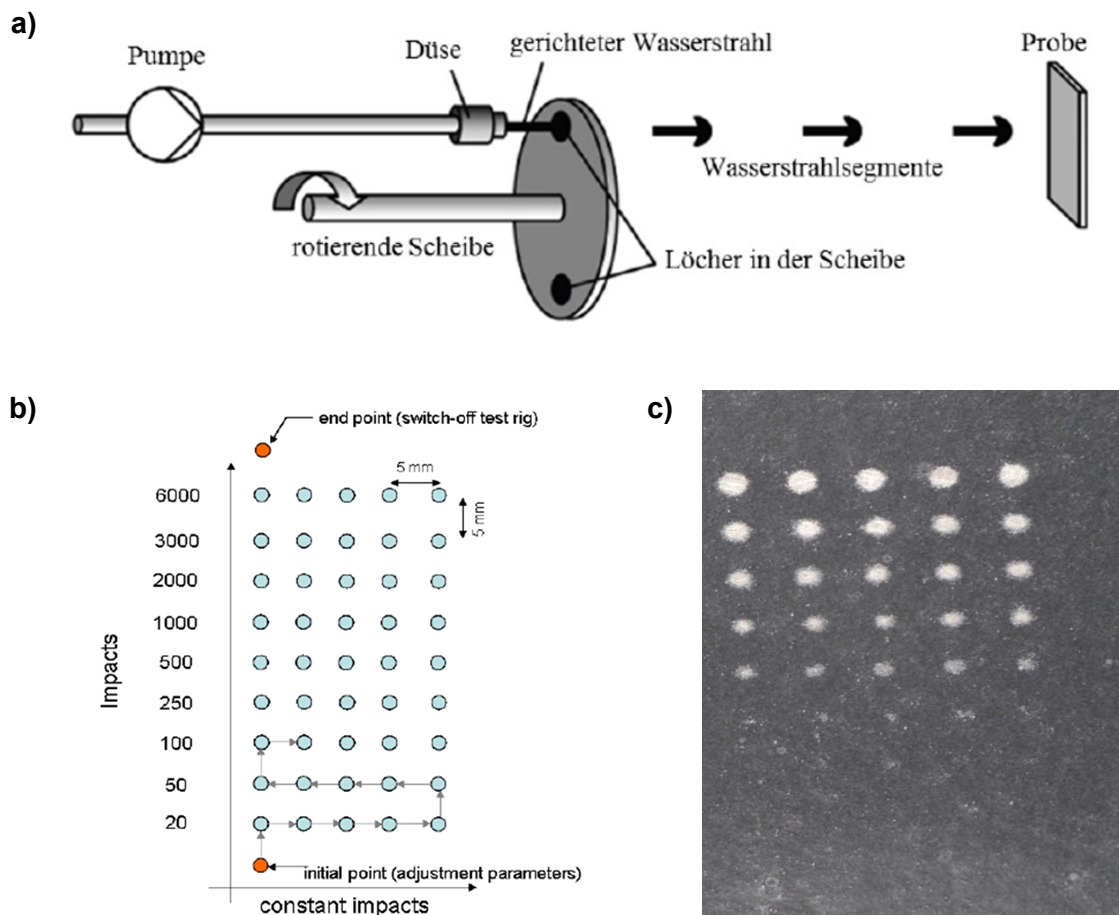
Abbildung 80: Vergleich der Rauheit nach unterschiedlich applizierten Sandmassen.

Wie in Abbildung 80 zu erkennen ist, pendelt sich die Rauheit bei allen drei Oberflächen auf einen Ra-Wert von 3 µm ein. Der stärkste Rauheitsanstieg wurde bei allen drei Proben im Bereich bis zu einem Gramm applizierter Sandmasse beobachtet. Unbehandeltes Titan weist hierbei die geringste Rauigkeit auf. Allerdings steigt diese, wie die Rauheit der anderen beiden Oberflächen, schnell an und erreicht ab einer applizierten Sandmenge von 1 g einen Endwert von 3 µm.

### 8.3.2.2 Regenerosion

Für die Untersuchung der Regenerosion wurde ein Prüfstand verwendet, bei diesem die Wassertropfen mit einer rotierenden Lochscheibe erzeugt werden. In Abbildung 81-a ist der schematische Aufbau des Regenerosionsprüfstands zu entnehmen. Hierbei trifft ein Wasserstrahl auf eine rotierende Scheibe. Die Scheibe zerteilt den Strahl, wobei Jets mit einer kugelförmigen Front entstehen. In Abbildung 81-b ist beispielhaft ein Prüfprogramm dargestellt. Hierbei kann eine maximale Anzahl von neun Reihen und fünf Spalten definiert werden. Jeder Reihe kann eine

Anzahl an Regentropfen zugeordnet werden. Die zusätzlichen Werte der Spalten werden als Vergleichswerte verwendet, um eine statistische Absicherung zu erhalten. Mit zunehmender Anzahl von Regentropfen (Impacts) ist das Schadensbild, wie in Abbildung 81-c beispielhaft dargestellt, deutlicher zu erkennen.

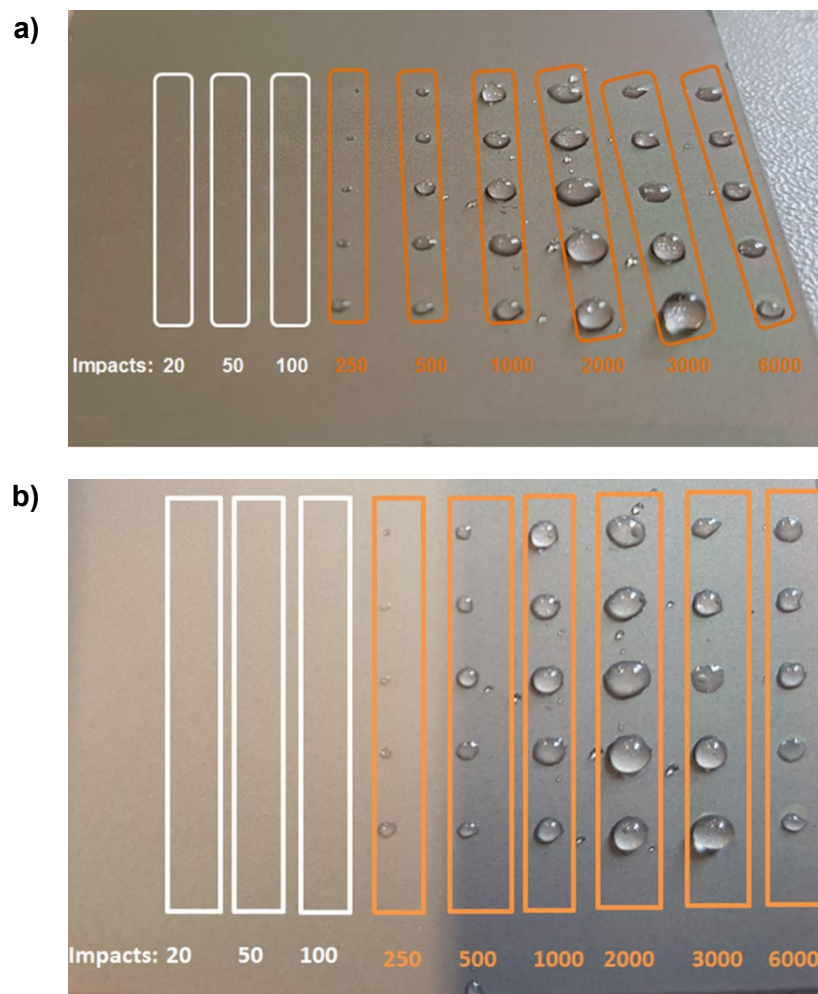


**Abbildung 81: Untersuchung der Regeneration; (a): Schematische Darstellung des Regenerationsprüfstands; (b): Beispiel eines Erosionsprogrammes; (c): Beispiel einer erodierten Aluminiumprobe.**

Nachfolgendes Prüfprogramm wurde angewandt (Anzahl der Regentropfen auf einer Stelle): 20, 50, 100, 250, 500, 1000, 2000, 3000, 6000 Impacts. Die Wasserstrahlsegmente wurden auf eine Geschwindigkeit von 225 m/s beschleunigt. Hierbei wird das Durchfliegen einer Wolke nachgestellt. Es wurde eine Tropfengröße von 2,1 mm gewählt, welche eine hohe Regenintensität darstellt.

Bei der Regeneration zeigten die getesteten Oberflächenmodifizierungen unterschiedliche Versagenszeitpunkte. So ist bei reinem Titan erst nach mehreren Millionen Einschlägen Erosion zu erkennen. Die beschichteten Proben verlieren jedoch schon nach wenigen hundert Einschlägen ihre superhydrophobe Oberfläche. In dem ausgewählten Prüfprogramm zeigte das unbeschichtete Titan folglich eine vernachlässigbar geringe Erosion.

Um den Einfluss der Regenerosion auf die hydrophobe Beschichtung sichtbar zu machen, wurden die erodierten Proben in entionisiertes Wasser getaucht und langsam aus diesem entnommen. An den Stellen, wo die hydrophobe Beschichtung durch die Erosion abgetragen wurde, blieb das Wasser haften. In Abbildung 82-a ist die Titanoberfläche mit Nanotubes und superhydrophober Beschichtung und in Abbildung 82-b mit Laserstrukturierung und superhydrophober Beschichtung dargestellt. Die Bereiche mit einer intakten hydrophoben Beschichtung sind weiß und die abgetragenen orange umrahmt.



**Abbildung 82: Untersuchung der Regenerosion; (a): Titanoberfläche mit Nanotubes und superhydrophober Beschichtung nach Regenerosion; (b): Titanoberfläche mit Laserstrukturierung und superhydrophober Beschichtung nach Regenerosion.**

Bei den in Abbildung 82 dargestellten Proben mit superhydrophober Beschichtung zeigt sich deutlich, dass sowohl die Probe mit Nanotubestrukturierung wie auch die Probe mit einer Laserstrukturierung einer Erosion von 100 Impacts standgehalten haben (weiße Umrahmungen). Allerdings verlieren die Probe ab einer Anzahl von 250 Impacts ihre hydrophoben Eigenschaften. Höhere Impactzahlen erzeugen einen etwas größeren erodierten Radius auf der Oberfläche.

## **9 Aufwendungen und deren Angemessenheit**

Die im Projekt getätigten Aufwendungen sind detailliert im zahlenmäßigen Verwendungsnachweis dargestellt. Bei der Bearbeitung des Vorhabens wurden die Werte der Vorkalkulation weitestgehend eingehalten.

## **10 Ergebnisverwertung / Fortschreibung des Verwertungsplans**

Als Konzernforschung ist es die Aufgabe von Airbus Materials X, Innovationen in Kooperation mit den Airbus Geschäftsbereichen zu entwickeln und diese zur Optimierung ihrer Produkte bereitzustellen. Airbus Materials X hat die in diesem Vorhaben erzielten Ergebnisse dem Verbundführer Airbus Operations GmbH zur Verwertung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich nutzt Airbus Materials X die Innovationen zur Verbreitung innerhalb der weiteren Airbus Geschäftsbereiche.

## **11 Planung der nächsten Schritte**

Die gesamten Ergebnisse des Projektes OptiHyL wurden von Airbus Materials X am 4. September 2019 Airbus Operations präsentiert und hinsichtlich der Verwertung diskutiert.



## 12 Zusammenstellung der verwendeten Fachliteratur

- [1] A320 HLFC fin - LaTeC, HYLDA, Airbus-3E.
- [2] *Garcia Rojo, Huan Carlos; A350XWB Interchangeability requirements; Airbus internal, 2014.*
- [3] *Presentation: HLFC VTP TRL3 Action Closure Review – Operability Readiness; Airbus internal, 2016.*
- [4] *Christian Heck; Requirements for a A350-1000 VTP Hybrid-Laminar-Flow-Control Leading Edge; Airbus internal, 2015.*
- [5] *Christian Herrles, Meinhard Meyer; Airbus Group Technical note: Achievements in LaWOp with relevance to BLADE filler material PR-2001 B2 and BLADE shaped joint gaps; Airbus internal, 2015.*
- [6] *Christian Herrles, Airbus Group Presentation; Filler Application on BLADE joint gap; Airbus internal, 2015.*
- [7] *Design-for-Value Matrix; Document: DfV\_HLFC\_Workbook\_Joggle\_v1\_2016\_03\_22; Airbus internal, 2016.*
- [8] *Jeremy Bradley; Technical report: Technical requirements of aerodynamic filler materials for laminar flow – Test programme; Airbus internal, 2009.*
- [9] *Jeremy Bradley; Technical report: Technical requirements of aerodynamic filler materials for laminar flow – General technical requirements; Airbus internal, 2009.*
- [10] *Jeremy Bradley; Technical report: Aerodynamic filler evaluation – Part1; Airbus internal, 2009.*
- [11] *Jeremy Bradley; Technical report: Aerodynamic filler evaluation – Part2; Airbus internal, 2010.*
- [12] *Jeremy Bradley; Technical report: Surface profile measurements of Chemetall MC340 sealant; Airbus internal, 2010.*
- [13] *Jeremy Bradley; Presentation: TRL4 feeder-review on NLF Filler – Baseline solution; Airbus internal, 2013.*
- [14] *Jeremy Bradley; Presentation: BLADE filled fasteners; Airbus internal, 2014.*
- [15] *Jeremy Bradley; Presentation: Overview of aerodynamic sealing activities for LDA; Airbus internal, 2016.*
- [16] *Jeremy Bradley; Presentation: LDA – Development of an automated aerodynamic filler device using UV curing sealant; Airbus internal, 2016.*
- [17] *G. W. Ehrenstein, G. Riedel und P. Trawiel, Praxis der Thermischen Analyse von Kunststoffen, München: Carl Hanser Verlag, 2003.*
- [18] *C. Herrles, Automatisiertes Auftragen von Füllmassen für aerodynamische Oberflächen am Beispiel des Überganges Flügelvorderkante / Flügelkasten, Regensburg, 2013.*
- [19] *Y. O. M. Ramazanoglu, Osseointegration and Bioscience of Implant Surfaces - Current Concepts at Bone-Implant Interface, 2011.*

- [20] B. A. A. T. Kunze, *Wettability of line - and crosslike patterns on Ti fabricated by pico - and nano-second Direct Laser Interference Patterning*, Fraunhofer IWS, 2017.
- [21] D. Regonini, C. R. Bowen, A. Jaroenworarluck, and R. Stevens, *A review of growth mechanism, structure and crystallinity of anodized TiO<sub>2</sub> nanotubes*, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 74, no. 12, pp. 377-406, 2013.
- [22] P. Roy, S. Berger, and P. Schmuki, *TiO<sub>2</sub>-Nanoröhren: Synthese und Anwendungen*, *Angewandte Chemie*, vol. 123, no. 13, pp. 2956-2995, 2011.
- [23] L. Wermuth, M. Kolb, T. Mertens, T. Strobl, and D. Raps, *Superhydrophobic surfaces based on self-organized TiO<sub>2</sub>-nanotubes*, *Progress in Organic Coatings*, vol. 87, pp. 242-249, 2015/10/01/ 2015.
- [24] B. Rico-Oller, T. Mertens, M. Kolb, J. Wehr, T. Hack, M. Zheludkevich, „Degradation and adhesion properties of titanium oxide layers in hot/wet conditions”, in 7th European Corrosion Congress (EUROCORR), Graz, Austria, 2015.
- [25] T. Mertens, F. J. Gammel, J. Wehr, M. Kolb, and U. Krupp, *Development of new anodising processes for structural bonding of titanium*. 2013, pp. 617-627.
- [26] M. Ramazanoglu and Y. Oshida, *Osseointegration and bioscience of implant surfaces-current concepts at bone-implant interface*, in *Implant Dentistry-A Rapidly Evolving Practice: InTech*, 2011.
- [27] P. Dolle, *Biochirurgische Therapie von Problemwunden durch die Fliegenmade *Lucilia sericata**. GRIN Verlag, 2011.
- [28] T. Mertens and G. Franz, *Verfahren zur Herstellung einer haftvermittelnden Schicht auf einer Oberfläche eines Titanwerkstoffs durch anodische Oxidation , Verwendung einer Lösung für die anodische Oxidation und haftvermittelnde Schicht*, ed: Google Patents, 2013.
- [29] T. Mertens, *Untersuchung von selbstorganisierten anodischen Titanoxidschichten als Vorbehandlung für das strukturelle Kleben von Titanlegierungen*. Shaker, 2013.
- [30] N. Reisenauer, *Untersuchung der Erosionsbeständigkeit von mikroperforierten Titanblechen*, B. Sc., DHBW Ravensburg, 2017.
- [31] A. Greggersen, *Untersuchung von unterschiedlich beschichteten Titan-Nanoröhren-Oberflächen zur Erzeugung von Anti-Kontaminationseigenschaften*, B.Sc., *Mechanical Production and Engineering*, Hochschule Bremen, 2013.

## 13 Veröffentlichungen und Vorträge

Im Rahmen von OptiHyL wurden nachfolgende Veröffentlichungen und externe Präsentationen erstellt:

- Vom 01.07.2017 bis 30.09.2017 wurde eine **Bachelorarbeit** zum Thema „Untersuchung der Erosionsbeständigkeit von mikroperforierten Titanblechen“ von Niklas Reisenauer verfasst. Die Bachelorarbeit wurde der Dualen Hochschule Baden-Württemberg vorgelegt. Betreuer bei Airbus Central R&T – Materials X: Christian Herrles. Betreuer an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg: Dr. Wolfgang Schäfer.
- Vom 01.07.2017 bis 31.03.2018 wurde eine **Masterarbeit** zum Thema „Untersuchung der Kontamination und Wasserdurchlässigkeit mikroperforierter und oberflächenmodifizierter Titanproben“ von Nikolai Striffler verfasst. Die Masterarbeit wurde der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München vorgelegt. Betreuer bei Airbus Central R&T – Materials X: Christian Herrles. Betreuer an der Technischen Universität München: Univ.-Prof. Dr.-Ing Klaus Drechsler.
- Vom 01.01.2018 bis 31.05.2018 wurde eine **Studienarbeit** zum Thema „Optimierung einer Beschleunigungsvorrichtung“ von Melanie Kaiser verfasst und der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München vorgelegt. Betreuer bei Airbus Central R&T – Materials X: Christian Herrles. Betreuer an der Universität der Bundeswehr München: PD Dr.-Ing. habil. Michael Johlitz.
- Am 10.04.2018 wurde ein **Vortrag** mit dem Titel „Sand and rain erosion testing of structured and modified Titanium surfaces“ am 14. Zsigmondy Kolloquium (Mainz) gehalten. Hierin wurden die im Rahmen von OptiHyL erlangten Erkenntnisse hinsichtlich Sand- und Regenerosion von Christian Herrles vorgestellt und mit dem Auditorium diskutiert.
- Vom 01.10.2018 bis 31.01.2019 wurde eine **Bachelorarbeit** zum Thema „Re Applikation von Abdeckkleisten mithilfe von Heizfolien am Beispiel eines laminaren Fügeüberganges am Seitenleitwerk“ von Melanie Kaiser verfasst. Die Bachelorarbeit wurde der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München vorgelegt. Betreuer bei Airbus Central R&T – Materials X: Christian Herrles. Betreuer an der Universität der Bundeswehr München: PD Dr. Ing. habil. Michael Johlitz.

## 14 Liste der erstellten Dokumentation

Die verfassten und abgelieferten Halbjahresberichte wurden auch als „Technical Report“ referenziert und bei Airbus Central R&T – Materials X dokumentiert. Nachfolgende interne Berichte wurden verfasst:

- **TX1RP1620245:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.01 - 30.06.2016)
- **TX1RP1720587:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.07 - 31.12.2016)
- **XCX1RP1720830:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.01 - 30.06.2017)
- **XRXGRP1820997:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.07 - 31.12.2017)
- **XRXGRP1821147:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.01 - 30.06.2018)
- **XRXGRP1921258:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.07 - 31.12.2018)
- **XRXGRP1921352:** Status Report for LuFo-V2 project OptiHyL – Optimised Hybrid Laminarity (01.01 - 30.06.2019)