

Aus der  
Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
Tübingen

Abteilung Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik

**Experimentelle Untersuchung zur Verbundfestigkeit  
von dreidimensional gedruckten Aufbisschienen  
mit anderen in der Zahntechnik verwendeten chemisch  
härtenden Kunststoffen und Reparaturmaterialien,  
unter Verwendung von Haftvermittlern und  
unterschiedlicher Oberflächenbehandlung**

**Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät  
der Eberhard Karls Universität  
zu Tübingen**

**vorgelegt von**

**Wahl, Ebru, geb. Kuscu**

**2022**

Dekan: Professor Dr. B. Pichler  
1.Berichterstatter: Privatdozentin Dr. E. M. Engel  
2.Berichterstatter: Professor Dr. B. Koos  
  
Tag der Disputation: 01.02.2022

Meiner Familie

## Inhaltsverzeichnis

### Abkürzungsverzeichnis .....

### **1 Einleitung..... 15**

#### 1.1 Aufbissschienen ..... 15

##### 1.1.1 Begriffsbestimmung und Prävalenz CMD ..... 15

##### 1.1.2 Symptome ..... 15

##### 1.1.3 Parafunktionen ..... 16

##### 1.1.4 Schienenarten zur Therapie einer CMD ..... 16

###### 1.1.4.1 Äquilibrationsschiene ..... 17

###### 1.1.4.2 Zentrikschiene ..... 17

###### 1.1.4.3 Anteriore Positionierungsschienen ..... 17

###### 1.1.4.4 Vertikalisierungsschienen ..... 18

##### 1.1.5 Schienenmaterialien ..... 18

###### 1.1.5.1 Polymethylmethacrylat ..... 18

#### 1.2 Herstellungsverfahren von Aufbissschienen ..... 19

##### 1.2.1 konventionelle Schienenherstellung ..... 19

###### 1.2.1.1 Modellherstellung ..... 19

###### 1.2.1.2 individuelle Schienen-Modellation ..... 19

##### 1.2.2 Digitale Schienenherstellung ..... 20

###### 1.2.2.1 Modellherstellung ..... 20

###### 1.2.2.2 digitale Konstruktion ..... 21

##### 1.2.3 digitaler Herstellungsprozess ..... 22

###### 1.2.3.1 Subtraktiver Herstellungsprozess ..... 22

###### 1.2.3.2 Additiver Herstellungsprozess ..... 23

#### 1.3 Vergleich konventionell / digital ..... 25

##### 1.3.1 Unterschiede bei den Materialien ..... 26

#### 1.4 Reparaturen und Erweiterungen..... 28

##### 1.4.1 Klinische Relevanz und Fragestellung..... 28

#### 1.5 Anforderungen an dentale Kunststoffe ..... 29

# Inhaltsverzeichnis

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 1.5.1    | Verbundfestigkeitsprüfung.....                              | 30        |
| 1.6      | Zielsetzungen der Untersuchung.....                         | 32        |
| <b>2</b> | <b>Material und Methode .....</b>                           | <b>33</b> |
| 2.1      | Übersicht Versuchsreihen.....                               | 33        |
| 2.1.1    | Überblick der Versuche .....                                | 34        |
| 2.1.2    | Überblick der Materialien.....                              | 36        |
| 2.2      | Materialien der Prüfkörper- (Schienen-) Basis.....          | 37        |
| 2.3      | Reparaturmaterialien .....                                  | 37        |
| 2.3.1    | Palapress®, klar.....                                       | 38        |
| 2.3.2    | Freeprint® splint 2.0 UV, clear .....                       | 38        |
| 2.3.3    | primosplint® .....  | 39        |
| 2.3.4    | freeform® fixgel.....                                       | 40        |
| 2.3.5    | freeform® plast.....  | 40        |
| 2.4      | Haftvermittler .....  | 41        |
| 2.5      | 3D- Drucker für die Basisherstellung.....                   | 42        |
| 2.6      | Versuchsaufbau.....   | 42        |
| 2.6.1    | Übersicht der Versuchsgruppen .....                         | 42        |
| 2.6.1.1  | Prüfkörper konventionelle Kontrollgruppe .....              | 42        |
| 2.6.1.2  | Prüfkörper der additiven Prüfgruppen .....                  | 44        |
| 2.6.2    | Herstellung der Halterungen und Metallplättchen.....        | 49        |
| 2.7      | Durchgeführte Versuchsreihen .....                          | 51        |
| 2.7.1    | Basisherstellung der Kontrollgruppe.....                    | 51        |
| 2.7.2    | Basisherstellung der additiven Prüfgruppe .....             | 52        |
| 2.7.3    | Alterung #1 der Prüfkörperbasis.....                        | 55        |
| 2.7.4    | Oberflächenkonditionierung.....                             | 55        |
| 2.7.4.1  | Oberflächenkonditionierungen der additive Prüfgruppen ..... | 56        |
| 2.7.4.2  | unbehandelte Oberfläche: [keine].....                       | 59        |
| 2.7.4.3  | Strahlen: [gestrahlt] .....                                 | 59        |
| 2.7.4.4  | Monomer- Benetzung: [monomer].....                          | 61        |

## Inhaltsverzeichnis

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.7.4.5  | Strahlen und Monomer- Benetzung: [gestrahlt + monomer]....       | 62        |
| 2.7.4.6  | Haftvermittler primostick®: [primostick] .....                   | 63        |
| 2.7.4.7  | Strahlen und primostick®: [gestrahlt + primostick] .....         | 63        |
| 2.7.4.8  | Haftvermittler freeform® bond: [freeform bond].....              | 63        |
| 2.7.4.9  | Strahlen und freeform® bond: [gestrahlt + freeform bond] .....   | 64        |
| 2.7.5    | Zylinderherstellung mit den Reparaturmaterialien .....           | 64        |
| 2.7.5.1  | Reparaturmaterial Palapress®, klar (PMMA) .....                  | 65        |
| 2.7.5.2  | Reparaturmaterial primosplint®.....                              | 65        |
| 2.7.5.3  | Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV.....                  | 66        |
| 2.7.5.4  | Reparaturmaterial freeform® fixgel .....                         | 66        |
| 2.7.5.5  | Reparaturmaterial freeform® plast .....                          | 67        |
| 2.7.6    | Alterung #2 der Prüfkörper .....                                 | 67        |
| 2.7.7    | Vermessung der Verbundfläche .....                               | 68        |
| 2.7.8    | Scherversuch.....  | 69        |
| 2.7.9    | Bruchflächenanalyse .....  | 70        |
| 2.7.10   | Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) .....          | 71        |
| 2.7.11   | Oberflächenbeschaffenheit .....                                  | 71        |
| 2.8      | Statistische Auswertung .....                                    | 72        |
| <b>3</b> | <b>Ergebnisse.....</b>   | <b>76</b> |
| 3.1      | konventionelle Prüfgruppe: Kontrollgruppe Palapress® .....       | 76        |
| 3.1.1    | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung | 76        |
| 3.1.1.1  | Alterung: 24Std. trocken .....                                   | 76        |
| 3.1.1.2  | Alterung: 14Tg. Wasser.....                                      | 76        |
| 3.1.2    | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung.....              | 76        |
| 3.2      | Reparaturmaterial: Palapress® auf additiver Basis .....          | 78        |
| 3.2.1    | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung | 78        |
| 3.2.1.1  | Alterung: 24Std. trocken .....                                   | 78        |
| 3.2.1.2  | Alterung: 14Tg. Wasser.....                                      | 80        |
| 3.2.2    | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung.....              | 82        |
| 3.2.2.1  | Oberflächenkonditionierung: keine .....                          | 82        |
| 3.2.2.2  | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt.....                       | 83        |

## Inhaltsverzeichnis

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 3.2.2.3 | Oberflächenkonditionierung: monomer .....  | 84  |
| 3.2.2.4 | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt + monomer .....                              | 85  |
| 3.2.3   | Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten<br>Kontrollgruppe ..... | 86  |
| 3.3     | Reparaturmaterial: primosplint® auf additiver Basis .....                          | 87  |
| 3.3.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung                   | 87  |
| 3.3.1.1 | Alterung: 24Std. trocken .....   | 87  |
| 3.3.1.2 | Alterung: 14Tg. Wasser .....   | 89  |
| 3.3.2   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung .....                               | 90  |
| 3.3.2.1 | Oberflächenkonditionierung: keine .....  | 91  |
| 3.3.2.2 | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt .....  | 92  |
| 3.3.2.3 | Oberflächenkonditionierung: primostick .....                                       | 93  |
| 3.3.2.4 | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt + primostick .....                           | 94  |
| 3.3.3   | Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten<br>Kontrollgruppe ..... | 94  |
| 3.4     | Reparaturmaterial: freeprint® splint 2.0 UV auf additiver Basis .....              | 97  |
| 3.4.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung                   | 97  |
| 3.4.1.1 | Alterung: 24Std. trocken .....   | 97  |
| 3.4.1.2 | Alterung: 14Tg. Wasser .....   | 98  |
| 3.4.2   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung .....                               | 99  |
| 3.4.2.1 | Oberflächenkonditionierung: keine .....  | 99  |
| 3.4.2.2 | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt .....  | 100 |
| 3.4.3   | Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten<br>Kontrollgruppe ..... | 101 |
| 3.5     | Reparaturmaterial: freeform® fixgel auf additiver Basis .....                      | 102 |
| 3.5.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung                   | 102 |
| 3.5.1.1 | Alterung: 24Std. trocken .....   | 102 |
| 3.5.1.2 | Alterung: 14Tg. Wasser .....   | 104 |
| 3.5.2   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung .....                               | 106 |
| 3.5.2.1 | Oberflächenkonditionierung: keine .....  | 106 |

## Inhaltsverzeichnis

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 3.5.2.2 | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt.....   | 107 |
| 3.5.3   | Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten<br>Kontrollgruppe .....   | 108 |
| 3.6     | Reparaturmaterial: freeform® plast auf additiver Basis .....   | 109 |
| 3.6.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung<br>109  |     |
| 3.6.1.1 | Alterung: 24Std. trocken .....   | 109 |
| 3.6.1.2 | Alterung: 14Tg. Wasser.....  | 111 |
| 3.6.2   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung.....  | 113 |
| 3.6.2.1 | Oberflächenkonditionierung: keine .....  | 113 |
| 3.6.2.2 | Oberflächenkonditionierung: gestrahlt.....   | 114 |
| 3.6.3   | Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten<br>Kontrollgruppe .....   | 115 |
| 3.7     | alle additiven Prüfgruppen gegenüber der konventionellen<br>Kontrollgruppe .....   | 116 |
| 3.7.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung<br>116  |     |
| 3.7.1.1 | Alterung: 24Std. trocken .....   | 116 |
| 3.7.1.2 | Alterung: 14Tg. Wasser.....  | 119 |
| 3.8     | additiven Prüfgruppen mit unbehandelter Oberfläche [keine], gegenüber<br>der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress].....                                       | 121 |
| 3.8.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung<br>121  |     |
| 3.9     | additive Prüfgruppen mit Oberflächenkonditionierung [gestrahlt],<br>gegenüber der [Kontrollgruppe Palapress] .....   | 123 |
| 3.9.1   | Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung<br>124  |     |
| 3.10    | additiven Prüfgruppe mit Reparaturmaterial [Palapress] und<br>Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] im Vergleich zur<br>[Kontrollgruppe Palapress]..... | 126 |
| 3.11    | additive Prüfgruppen im Vergleich zur [Kontrollgruppe Palapress] ..  | 128 |

## Inhaltsverzeichnis

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.12     | Bruchflächenanalyse.....  | 132        |
|          | Bruchtypen in Abhängigkeit der Alterung .....   | 132        |
| 3.12.1   | Bruchtypen in Abhängigkeit der Konditionierung .....  | 134        |
| 3.12.1.1 | Alterung: 24Std. trocken.....   | 135        |
| 3.12.1.2 | Alterung: 14Tg. Wasser.....   | 137        |
| 3.13     | Rasterelektronenmikroskopie.....  | 140        |
| 3.13.1   | Oberflächenkonditionierung in Abhängigkeit der Alterung .....   | 140        |
| 3.13.1.1 | konventionelle Prüfgruppe: [Kontrollgruppe Palapress].....  | 140        |
| 3.13.1.2 | additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [keine] und [gestrahlt].....  | 141        |
| 3.13.1.3 | additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [monomer] und [gestrahlt + monomer].....                              | 142        |
| 3.13.1.4 | additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [primostick] und [gestrahlt + primostick].....                        | 143        |
| 3.13.1.5 | additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [freeform bond] und [gestrahlt + freeform bond] .....                 | 144        |
| 3.13.2   | additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] im Vergleich zur konventionellen Kontrollgruppe. | 145        |
| 3.14     | Oberflächenbeschaffenheit .....   | 146        |
| 3.14.1   | Alterung: 24Std. trocken .....  | 146        |
| 3.14.2   | Alterung: 14Tg. Wasser .....  | 147        |
| 3.14.3   | Visualisierung Oberflächenbeschaffenheit.....   | 149        |
| 3.14.3.1 | konventionelle Prüfgruppe: [Kontrollgruppe Palapress].....  | 149        |
| 3.14.3.2 | additive Prüfgruppen .....  | 150        |
| <b>4</b> | <b>Diskussion .....</b>   | <b>157</b> |
| 4.1      | Ziel der vorliegenden Studie .....  | 157        |
| 4.2      | Auswahl der durchgeführten Methode.....   | 159        |
| 4.2.1    | Basisherstellung .....  | 160        |
| 4.2.1.1  | konventionelle Kontrollgruppe Palapress .....   | 160        |
| 4.2.1.2  | additive Prüfgruppe freeprint splint 2.0 UV.....  | 161        |
| 4.2.2    | Alterung # 1 .....  | 164        |

## Inhaltsverzeichnis

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.2.3   | Oberflächenkonditionierung.....  | 165 |
| 4.2.3.1 | Strahlen der Prüfkörperbasis.....  | 165 |
| 4.2.3.2 | Monomer- Benetzung der Prüfkörperbasis.....  | 166 |
| 4.2.3.3 | Strahlen + Monomer- Benetzung der konventionellen und<br>additiven Prüfkörperbasis ..... | 166 |
| 4.2.3.4 | Anwendung primostick® auf der Prüfkörperbasis.....                                       | 167 |
| 4.2.3.5 | Anwendung Freeform® bond auf der Prüfkörperbasis .....                                   | 167 |
| 4.2.3.6 | Strahlen + Anwendung von Haftvermittlern .....   | 168 |
| 4.2.4   | Zylinderherstellung mit den Reparaturmaterialien .....                                   | 168 |
| 4.2.4.1 | Reparaturmaterial: Palapress® .....  | 168 |
| 4.2.4.2 | Reparaturmaterial: primosplint®.....   | 168 |
| 4.2.4.3 | Reparaturmaterial: Freeprint® splint 2.0 UV .....  | 168 |
| 4.2.4.4 | Reparaturmaterialien: Freeform® fixgel und freeform® plast                               | 169 |
| 4.2.5   | Alterung # 2 .....   | 170 |
| 4.2.6   | Vermessung der Verbundfläche .....   | 170 |
| 4.2.7   | Scherversuch.....  | 171 |
| 4.2.8   | Bruchflächenanalyse .....  | 172 |
| 4.2.9   | Oberflächenbeschaffenheit.....   | 173 |
| 4.3     | Diskussion der Ergebnisse .....  | 173 |
| 4.3.1   | Einordnung der Ergebnisse unter klinischen Aspekten .....                                | 173 |
| 4.3.1.1 | Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit der<br>Kontrollgruppe .....              | 174 |
| 4.3.2   | Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Prüfkörperbasis.....                          | 175 |
| 4.3.2.1 | Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die<br>Verbundfestigkeit.....                | 175 |
| 4.3.2.2 | Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit.....                                     | 176 |
| 4.3.3   | Reparaturmaterial primosplint® auf additiver Prüfkörperbasis .....                       | 176 |
| 4.3.3.1 | Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die<br>Verbundfestigkeit.....                | 176 |
| 4.3.3.2 | Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit.....                                     | 177 |
| 4.3.4   | Reparaturmaterial Freeprint® splint 2.0 UV auf additiver<br>Prüfkörperbasis .....        | 178 |

## Inhaltsverzeichnis

---

|  |            |
|--|------------|
| 4.3.4.1 Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die Verbundfestigkeit.....                   | 178        |
| 4.3.4.2 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit.....                                     | 178        |
| 4.3.5 Reparaturmaterial freeform® fixgel und freeform® plast auf additiver Prüfkörperbasis ..... | 178        |
| 4.3.5.1 Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die Verbundfestigkeit.....                   | 178        |
| 4.3.5.2 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit.....                                     | 180        |
| 4.3.6 Schlussfolgerungen .....   | 181        |
| <b>5 Zusammenfassung.....</b>  | <b>183</b> |
| <b>6 Literaturverzeichnis .....</b>  | <b>185</b> |
| <b>7 Erklärung zum Eigenanteil .....</b>   | <b>196</b> |
| <b>8 Veröffentlichung.....</b>   | <b>197</b> |
| <b>Anhang.....</b>   | <b>198</b> |

## Abkürzungsverzeichnis

---

### Abkürzungsverzeichnis

|                        |  |
|------------------------|--|
| µg                     | Mikrogramm   |
| µm                     | Mikrometer   |
| 3D                     | dreidimensional  |
| bzgl.                  | bezüglich  |
| C                      | Celsius  |
| ca.                    | circa  |
| CAD                    | Computer Aided Design  |
| CAM                    | Computer Aided Manufacturing   |
| CAS-Nr.                | Chemical Abstracts Service   |
| CMD                    | kraniomandibulären Dysfunktion                                       |
| D.h.                   | das heißt  |
| dest.                  | destilliert  |
| DGFDT<br>therapie      | Deutschen Gesellschaft für Funktionsdiagnostik und -<br>therapie     |
| DIN                    | Deutsches Institut für Normung                                       |
| DLP                    | Digital Light Processing   |
| EG-Nr.<br>Gefahrstoffe | Verzeichnis Nummer der Europäischen Gemeinschaft für<br>Gefahrstoffe |
| EMG                    | Elektromyografie   |
| EN                     | Europäische Norm   |
| evtl.                  | eventuell  |

## Abkürzungsverzeichnis

---

|                        |  |
|------------------------|--|
| FDM                    | Fused Deposition Modeling                      |
| g                      | Gramm  |
| H <sub>2</sub> O dest. | destilliertes Wasser                           |
| HWS                    | Halswirbelsäule                                |
| ISO                    | International Organization for Standardization |
| KI                     | Konfidenzintervall                             |
| LED                    | Light- Emitting Diode                          |
| mind.                  | mindestens                                     |
| ml                     | Milliliter                                     |
| mm                     | Millimeter                                     |
| mm <sup>2</sup>        | Quadratmillimeter                              |
| mm <sup>3</sup>        | Kubik Milliliter                               |
| MMA                    | Methylmethacrylat                              |
| MPa                    | Megapascal                                     |
| MPG                    | Medizinproduktegesetz                          |
| n                      | Anzahl   |
| N                      | Newton   |
| n.a.                   | nicht angegeben                                |
| nm                     | Nanometer                                      |
| o.g.                   | oben genannte                                  |
| P- Profil              | Primärprofil                                   |
| PMMA                   | Polymethylmethacrylate                         |
| R- Profil              | Rauheit  |

## Abkürzungsverzeichnis

---

|           |                                |
|-----------|--------------------------------|
| REF       | Referenznummer                 |
| REM       | Rasterelektronenmikroskop      |
| SLA       | Stereolithografie              |
| Std.      | Stunden                        |
| Std. abw. | Standardabweichung             |
| STL       | Standard Tessellation Language |
| Tg.       | Tage                           |
| u.a.      | unter anderem                  |
| UV        | Ultraviolettstrahlung          |
| W- Profil | Welligkeit                     |
| z.B.      | zum Beispiel                   |

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufbissschienen

Als Aufbissschienen werden okklusale Behelfe genannt, die in der Zahnheilkunde zur Therapie unterschiedlicher Erkrankungen und Dysfunktionen eingesetzt werden. Eines der wichtigsten therapeutischen Einsatzgebiete von okklusalen Aufbissschienen ist die Therapie von funktionellen Erkrankungen des kranio- mandibulären Systems [1]. Diese Erkrankungen werden auch unter dem Begriff der kranio- mandibulären Dysfunktion (CMD) umfasst.

#### 1.1.1 Begriffsbestimmung und Prävalenz CMD

Unter einer CMD werden Schmerzen und Dysfunktionen (auch ohne Schmerzen möglich), die im Bereich der Kaumuskulatur, der Kiefergelenke [2] sowie im Kiefergesichts- und des Hals-Schulter-Nackenbereiches zu finden sind, bezeichnet.

Die Prävalenzen der CMD bewegen sich in der Fachliteratur zwischen 1%- 25% bei Kindern [3], [4]. Bei Erwachsenen werden Prävalenzen bei Vorhandensein von mindestens einem Symptom der CMD bis zu 60% angegeben [5], [6]. Aus einer Studie im Einzugsgebiet von Tübingen liegt eine Prävalenz von 8% bei insgesamt 1524 untersuchten Patienten vor [7]. Schwankungen in der Prävalenz einer diagnostizierten CMD existieren aufgrund fehlender Standardisierung in den Untersuchungs- und Diagnostik- Methoden [8], [9].

#### 1.1.2 Symptome

Symptome einer CMD können sich nicht nur als Schmerzen an der Kaumuskulatur und/ oder im Bereich der Kiefergelenke zeigen. Auch werden von betroffenen Patienten Beschwerden wie Kopf- Gesichts- mit und ohne der HWS, Schmerzen beschrieben [10]. Zudem werden Zahnschmerzen, die aufgrund von Parafunktionen oder von Projektions- sowie

Übertragungsschmerzen auftreten können, auch unter der Begriffsbezeichnung einer CMD zugeordnet [11].

### 1.1.3 Parafunktionen

Das Pressen und Knirschen/ Bruxieren mit den Zähnen wird als Parafunktionen bezeichnet. Nächtlicher Bruxismus führt nach Nishigawa et al. zu hohen Kräften zwischen den Ober- und Unterkieferzähnen. Sie zeigten in ihrer Studie, dass beim nächtlichen, unbewussten Bruxismus Maximal Kräfte bis 796,3 N gemessen wurden. Der Durchschnitt der maximalen Bisskraft, die bewusst durch die Probanden durchgeführt wurde, betrug 774,73 N [12].

Diese hohen Kräfte, die aufgrund von Parafunktionen entstehen, können zu Schmerzen und Dysfunktionen an der Kaumuskulatur und im Bereich der Kiefergelenke führen. Auch sind Parafunktionen eine Ursache von Verlust der Zahnhartsubstanz (Abrasionen) und Hypersensibilitäten [13]. Bruxismus kann während dem Schlafen oder auch im Wachen Zustand ausgeführt werden [14].

Um Zähne vor Abrasionen zu schützen und die Kau- und Begleitmuskulatur zu entspannen, werden Aufbissschienen als Therapiemittel eingesetzt [15].

Okklusale Aufbissschienen, die bei der Therapie einer CMD eingesetzt werden, sind überwiegend harte Schienen. Grund hierfür sind die guten klinischen Ergebnisse über den Wirkungserfolg und die bessere Stabilität gegenüber weichen und mit Flüssigkeit gefüllten Aufbissbehelfen [16].

### 1.1.4 Schienenarten zur Therapie einer CMD

Schienen können sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer eingesetzt werden [17]. In der Literatur finden sich unterschiedliche Arten von Aufbissbehelfen, die zur Therapie bei einer kranio-mandibulären Dysfunktion (CMD) eingesetzt werden können [18]. In Bezug auf den Therapieerfolg und die Wirkungsweise zeigen einige Studien auf, dass therapeutische Aufbissbehelfe die Intensität und Frequenz parafunktioneller Aktivitäten reduzieren, Zahnhartsubstanz geschützt wird und Kopfschmerzen reduziert werden, die im Zusammenhang mit parafunktionellen Aktivitäten entstehen [19], [16].

Klasser und Greene führen in ihrer Literaturrecherche auf, dass Aufbissbehelfe neuromuskuläre Programme (Regelkreise), welche die Beziehungen zwischen den Zähnen, der Kaumuskulatur, des Kiefergelenks und der Fossa bestimmen, de-programmieren [16]. Auch werden Placebo- Effekte, die durch kognitive Wahrnehmung der Schiene entstehen zur Wirkungsweise von Aufbissschienen gezählt [18].

Im Folgenden werden einige Formen von Schienen aufgeführt, die zur Therapie bei einer CMD eingesetzt werden können.

### 1.1.4.1 Äquilibrationsschiene

Äquilibrationsschienen werden auch als Relaxierungsschienen oder Stabilisierungsschienen genannt. Ziel dieser Schiene ist es, den Muskeltonus der Kaumuskulatur zu reduzieren und die okklusalen Kontakte gleichmäßig auf der Schiene zu verteilen. Dabei wird eine unilaterale Führung angestrebt [20].

### 1.1.4.2 Zentrikschiene

Die sogenannte Zentrikschiene oder „Michiganschiene“ genannt, wird nach dem Michigan- Konzept erstellt. Dabei werden die tragenden Höcker im Seitenzahnggebiet gleichmäßig abgestützt, exzentrische Bewegungen bei Lateralbewegung werden mit einer Front- Eckzahnführung eingestellt [21]. Dadurch sind horizontale Bewegungsspielräume von ca. 1 mm auf der Schiene möglich sind. Eine Untersuchung zeigte, dass diese Schienenform vor allem einen kurzzeitigen positiven Effekt auf Schmerzen im Bereich der Kaumuskulatur und der Kiefergelenke hat [22].

### 1.1.4.3 Anteriore Positionierungsschienen

Anteriore Positionierungsschienen oder auch Repositionierungsschienen genannt, sind bei partiell/ total nach anterior verlagertem Discus articularis indiziert [23]. Die Patienten werden angehalten, diese Schienen 24 Std. für drei Monate zu tragen, da der Erfolg laut Davies und Gray signifikant abnimmt, wenn diese nicht ständig getragen wird [24]. Im Anschluss dieser therapeutischen Phase ist ein Ausschleichen der Schiene mit einer

allmählichen Entwöhnungsphase empfohlen [18]. Ziel dieser Schienenform ist, den Unterkiefer in einer therapeutischen Position zu halten, in welchem keine „Knack- Geräusche“ zu palpieren oder zu hören sind [18]. Diese Schienen sollten nur zur kurzfristigen Therapie eingesetzt werden, da eine über lange Zeit hinweg getragene anteriore Positionierungsschiene zu irreversiblen okklusalen und skelettalen Veränderungen führt [16].

#### 1.1.4.4 Vertikalisierungsschienen

Vertikalisierungsschienen werden zur Therapie bei abgesunkener Vertikaldimension eingesetzt. Sie werden auch als „Bisshebungsschienen“ bezeichnet. Ziel ist es, mit dieser Schiene die neue angestrebte Bisshebung neuro- muskulär auszutesten, bevor diese in einer definitiven Okklusionsveränderung umgesetzt wird [25].

#### 1.1.5 Schienenmaterialien

##### 1.1.5.1 Polymethylmethacrylat

Polymethylmethacrylate (PMMA) sind thermoplastische Kunststoffe. Dr. Otto Röhm entwickelte 1901 ein transparentes Polymer aus PMMA, welches auch Plexiglas genannt wurde [26].

Polymere aus PMMA werden aus dem Monomer Methylmethacrylat (MMA) durch Polymerisation gebildet. Die Polymerisation kann dabei durch die Zufuhr von Energie (z.B. in Form von Wärme) oder durch eine chemische Reaktion ausgelöst werden [27].

Zwischen den Jahren 1930-1940 wurde PMMA in der Herstellung von Totalprothesen verwendet [28]. Werkstoffe auf Kunststoffbasis sogenannte Acrylate haben sich nicht nur für die Herstellung von Totalprothesen bewährt, sondern auch in vielen anderen Bereichen der Medizin und Zahnmedizin [29].

Nach der DIN EN ISO 20795- 2 für zahnärztliche Kunststoffe (Teil 2) werden Kunststoffe in Typen kategorisiert [30]:

- Typ 1: Autopolymerisate: Kettenbildung wird durch eine chemische Reaktion ausgelöst,

- Typ 2: Lichtpolymerisate: Kettenbildung wird durch Licht bestimmter Wellenlänge ausgelöst,
- Typ 3: Thermoplast: Werkstoff wird durch Wärme plastisch formbar und nach dem Abkühlen wie beim Ausgangszustand wieder hart.

Das PMMA ist nach Green ein Werkstoff, das sich zur Herstellung von Aufbissschienen eignet [31].

## 1.2 Herstellungsverfahren von Aufbissschienen

### 1.2.1 konventionelle Schienenherstellung

#### 1.2.1.1 Modellherstellung

Zur Herstellung von Aufbissschienen werden zunächst Situationsabformungen in der Regel mit Alginat genommen. Alginate sind irreversibel elastische Abformmaterialien, die sich zur Herstellung von Situationsmodellen aus Gips eignen [32]. Auf diesen Modellen (auch sogenannten Arbeitsmodellen) können im nächsten Schritt Aufbissschienen mit verschiedenen Methoden hergestellt werden.

#### 1.2.1.2 individuelle Schienen-Modellation

Der Kunststoff kann mit Hilfe des Anteigverfahrens auf das Modell aufgebracht werden. Dabei werden das PMMA in Pulverform und das Monomer MMA in Flüssigform nach Herstellerangaben dosiert und angemischt. Im Anschluss wird es auf das Modell angebracht und entsprechend geformt [33], [34]. Die Aushärtung erfolgt im Drucktopf nach Herstellerangaben. Eine Alternative zur Anteigmethode ist das sogenannte Streuverfahren, dabei werden Pulver und Flüssigkeit immer abwechselnd auf das Gipsmodell aufgebracht bis die gewünschte Form und Dicke erreicht ist [34]. Studien haben belegt, dass bei der Anteigmethode der Restmonomergehalt höher war als beim Streuverfahren [35]. Restmonomere, die in der Mundhöhle freigesetzt werden, können zu lokalen entzündlichen Schleimhautreaktionen bis hin zu systemischen Reaktionen führen [36].

Herstellungsverfahren von Aufbissschienen aus Autopolymerisaten bringen Vorteile wie Zeitersparnis, sind einfach in der Handhabung und es besteht die Möglichkeit die Schiene in Schichten aufzubauen [37], [38].

Bohnenkamp untersuchte die Dimensionsstabilität von verschiedenen Schienenherstellungsmethoden und wies auf, dass die höchste Abweichung bei der Herstellungsmethode mit der Tiefziehtechnik vorlag, bei welcher auf eine tiefgezogene Basis autopolymerisierender Kunststoff angefügt wurde [39].

Die sogenannte Tiefziehtechnik ist eine weitere Methode zur Herstellung von Aufbissschienen. Dabei werden zunächst thermoformbare Polymerfolien auf die Modellbasis tiefgezogen. Dies wird zunächst durch Erwärmen der Folie erreicht, die im plastischen Zustand mit Hilfe von Vakuum über das Arbeitsmodell gezogen wird [39]. Ein individueller okklusaler Aufbiss kann im Anschluss durch ein Auto- oder Lichtpolymerisat auf die Folie anpolymerisiert werden [33], [40]. Aufbissschienen können auch komplett aus lichthärtenden Kunststoffen direkt auf dem Gipsmodell modelliert werden [41], [42].

### 1.2.2 Digitale Schienenherstellung

#### 1.2.2.1 Modellherstellung

Mit Einzug der digitalen Fertigungsverfahren in die dentale Industrie werden die individuellen und konventionellen Herstellungsverfahren mittlerweile durch semi- und oder volldigitale Schienenherstellungsverfahren ergänzt.

Bei der semidigitalen Herstellungsmethode können individuelle Abformungen z.B. mit Alginaten erstellt werden, um Arbeitsmodelle herzustellen. Diese können im Anschluss durch spezielle Scanner digitalisiert werden [43].

Bei der volldigitalen Herstellungsmethode können Abformungen der Kiefer mit Intraoralkameras (sogenannte „Intraoralscanner“) erstellt werden. Die Intraoralkamera erstellt beim Abfahren der Zähne durch das Scannen der Strukturen eine dreidimensionale Abbildung der Oberfläche [44], [45]. Nach dem Scan der gesamten Kieferareale entstehen dreidimensionale virtuelle Modelle, die im Anschluss mit einer entsprechenden Software weiterbearbeitet werden können. Die digitale Abformung bezahnter Areale mit Intraoralkameras

ist wie aus vielen Studien herausgeht in ihrer Präzision mit konventionellen Abformtechniken gleichzustellen [46]. Im Vergleich zu einer konventionellen Abformung haben Intraoralkameras beim optischen Erfassen gesamter Kiefer hinsichtlich der Präzision jedoch noch Nachteile. Hier schneiden die Intraoralkameras schlechter ab als konventionelle Abformmethoden [47].

Studien belegen, dass die Präzision von Intraoralkameras auch sehr anwenderspezifisch ist, Müller et. al. zeigten, dass unterschiedliche Scanstrategien die Genauigkeit einer digitalen Abformung beeinflussen können [48]. Ein Vorteil des volldigitalen Herstellungsprozesses ist der entfallene Zwischenschritt der Modellherstellung mit Gips [49]. Untersuchungen bezüglich der Präzision zwischen digitaler Abformungen und digitalisierten Gipsmodellen oder Abformungen zeigten, dass die direkte digitale Modellherstellung mit einer Intraoralkamera präziser war als die Digitalisierung von Abformungen oder Gipsmodellen [50].

### 1.2.2.2 digitale Konstruktion

Diese entweder semi- oder volldigital generierten Daten der Kiefer können im Anschluss mit speziellen Computerprogrammen weiterverarbeitet werden. Durch das sogenannte computer aided design (CAD), können unter anderem Aufbissschienen am virtuellen Situationsmodell geplant und modelliert werden [51]. Für diese digitale Konstruktion der Aufbissschienen sind spezielle Programme mit entsprechenden Funktionen notwendig [52]. Wang et al. zeigten in einer Studie, dass digital konstruierte Schienen im Vergleich zu konventionellen Schienen eine Verbesserung die okklusale Gestaltung erlauben und die zahntechnischen Schritte vereinfachen [53].

Mit Hilfe dieser Computerprogramme sind nicht nur digitale Konstruktionen von Schienen sondern auch zum Beispiel Zahnersatz in Form Totalprothesen [54], Kronen und Brücken möglich [55]. Auch können auf diesem semi- oder volldigitalen Herstellungsweg Bohrschablonen, welche die Position der geplanten Implantate vorgeben, digital konstruiert werden [56].

Weitere Anwendungen der digitalen Planung und Herstellungsverfahren sind in der Kieferorthopädie vorzufinden [57]. Ein Fallbericht über den volldigitalen

Herstellungsprozess der sogenannten „Tübinger Spornplatte“ zeigt, dass die digitale Datenerhebung mit Hilfe von Intraoralkameras schonend bei Neugeborenen angewendet werden kann, um im Anschluss durch additive Herstellungsprozesse diese spezielle Spornplatte herzustellen [58].

Fallberichte von digital hergestellten Schienen, die zur Fraktur Sicherung während Operationen eingesetzt werden, Planungen und Konstruktion von kieferorthopädischen Schienen bis hin zum Zahnersatz zeigen, dass die digitale Fertigung ein breites Spektrum in der Zahnheilkunde abdeckt. Auch werden digitale Fertigungstechniken inzwischen in der Epithetik bei der Herstellung von fehlenden Körperbereichen angewendet [59].

### 1.2.3 digitaler Herstellungsprozess

Die digitalen Konstruktionen können für die Umsetzung entweder an den subtraktiven oder additiven Herstellungsprozess angeknüpft werden [49]. Beim subtraktiven Herstellungsprozess werden Fräsen zum Einsatz gebracht, beim additiven Herstellungsprozess 3D- Drucker.

#### 1.2.3.1 Subtraktiver Herstellungsprozess

Beim sogenannten subtraktiven Herstellungsprozess werden die Daten aus dem CAD an eine Fräsmaschine übermittelt. Die Aufbisschiene wird dabei aus einem vorgefertigten Materialblock gefräst [60]. Diese Materialblöcke, die sich für die Schienenherstellung eignen, können aus PMMA und z.B. Polycarbonat sein [61]. Aufgrund dessen, dass diese Materialblöcke bereits auspolymerisiert sind, ist der Restmonomergehalt und die Polymerisationsschrumpfung geringer als bei den konventionellen Herstellungstechniken mit PMMA. [61].

Nachdem die Fräsmaschine die Schiene aus dem Materialblock herausgefräst hat, kann die Schiene von den Stützkonstruktionen durch manuelle zahntechnische Methoden entfernt und nach geringfügigen Politurmaßnahmen beim Patienten eingegliedert werden [62].

Ein Nachteil subtraktiven Herstellungsprozesse ist der hohe Materialverbrauch, da die Materialreste, die nach dem Herausfräsen bestimmter Objekte übrig bleiben, nicht mehr weiter verwendet werden können [63].

### 1.2.3.2 Additiver Herstellungsprozess

Im Vergleich zum subtraktiven Herstellungsverfahren können auch additive Fertigungsverfahren angeschlossen werden. Die generierten Daten werden dabei mit der Standard Tessellation Sprache (im englischen auch „standard tessellation language (STL)“ genannt) an den 3D- Drucker weitergeleitet und können dreidimensional gedruckt werden [64].

Die ersten 3D- Drucker wurden in den 1980- bis 1990- ern eingeführt [65]. Die erste Anwendung an einem Patienten des 3D- Drucks erfolgte 1999 [66]. Mit der Weiterentwicklung des 3D- Drucks findet man ein breites Anwendungsspektrum von der Medizin bis Zahnmedizin [67]. In der Zahnmedizin wird der 3D- Druck von der Prothetik, Mund- Kiefer- Gesichtschirurgie, Kieferorthopädie, bis hin zur Endodontologie eingesetzt [68].

Beim 3D- Druck werden Objekte mit lichtsensitiven Materialien in Schichten gedruckt und durch Energie in Form von Licht bestimmter Wellenlänge auspolymerisiert [69]. Im Vergleich zu einem zweidimensionalen Drucker, welcher in der x- Achse (Bewegungen von rechts nach links) und y- Achse (Bewegungen von oben nach unten) druckt, ist beim dreidimensionalen Drucker eine weitere Achse, die z- Achse hinzugefügt. Diese bewegt sich zusätzlich in hoch und runter, sodass ein dreidimensionales Objekt gedruckt wird [70]. Beim 3D- Druck handelt es sich daher genaugenommen, um ein dreidimensionales Schnittbild eines Objektes, dabei wird ein gescanntes Objekt zunächst mit dem CAD- Programm in Schichten zerlegt [71].

Beim Drucken wird auf eine bereits auspolymerisierte Schicht wiederholt eine neue aufgebracht und wieder auspolymerisiert. Die Objekte entstehen daher additiv in mehreren Schichten [72].

Unterschiedliche Druckverfahren ermöglichen dabei den additiven Fertigungsprozess [73]:

- Stereolithografie (SLA)- Verfahren
- „Digital light processing“ (DLP) - Verfahren
- „Fused deposition modeling“ (FDM) - Verfahren
- Polyjet- Verfahren.

### 1.2.3.2.1 SLA- Verfahren

Beim Stereolithografie- Verfahren wird ein lichtsensitives Material in eine Druckerwanne gefüllt. In dieser Wanne befindet sich die Bauplattform, die sich während des dreidimensionalen Druckes immer weiter absenkt. Die Auspolymerisation erfolgt durch einen Laserpunkt, der die Bauplattform Reihe für Reihe abfährt. Das Aushärten erfolgt daher punktuell durch den Laserstrahl. Der Laser arbeitet dabei mit einer UV- Lichtquelle. Nach der punktuellen Aushärtung der ersten Schicht senkt sich die Bauplattform ab, die gedruckte Schicht wird mit einer neuen Materialschicht überzogen und ein neuer Punkt wird ausgehärtet [74]. Das Muster, welches die Form des Objektes bestimmt, wird dabei durch den computer- gesteuerten Laser vorgegeben [75].

### 1.2.3.2.2 DLP- Verfahren

Bei diesem Verfahren wird die durchsichtige Druckerwanne mit einem flüssigen, lichtsensitiven und druckbaren Material gefüllt. Diese Wanne ist am Boden lichtdurchlässig, sodass das entsprechende Material durch den Wannboden hindurch polymerisiert werden kann. Die Lichtpolymerisation erfolgt mit Hilfe einer hochauflösenden Lichtquelle/ Projektoren (LED´ s), die für den Drucker speziell eine definierte Wellenlänge hat [76]. Die Formgebung beim DLP- Verfahren erfolgt mittels einer Maskenbelichtung. Der Projektor projiziert dabei eine Bildmaske auf die Wanne. Diese Bildmaske definiert die zu belichtenden Areale, indem sie in bestimmten Arealen schwarz, also lichtundurchlässig ist und in bestimmten Arealen lichtdurchlässig ist. Die Lichtquelle wird über tausende Mikro- Spiegel auf die gesamte Schicht projiziert, sodass die Aushärtung des gesamten Querschnittes der einzelnen Schicht erfolgt [77]. Im Anschluss wird eine weitere Schicht aufgebracht und wiederholt durch die Projektion über mehrere Mikrospiegel ausgehärtet [78]. Das im Anschluss entstandene dreidimensionale Objekt hängt auspolymerisiert an der sogenannten Bauplattform des 3D- Druckers. Die Bauplattform selbst wird während des Druckprozesses immer weiter (in der sogenannten z- Achse) von der Wanne heraus bewegt. Aufgrund dessen, dass beim DLP- Verfahren ganze Schichten ausgehärtet werden, ist dieses Verfahren eine schnelle Druckmethode [79]. Nach dem vollständigen 3D- Druck des Objekts kann die

Bauplatzform vom Drucker abgenommen werden. Die Objekte werden im Anschluss im Nachbearbeitungsprozess vollständig auspolymerisiert. Diese Polymerisation im Nachbearbeitungsprozess ist notwendig, da die Objekte direkt nach dem dreidimensionalen Druck noch nicht vollständig auspolymerisiert sind [80]. Je nachdem welche Materialien verwendet werden, variiert der Nachbearbeitungsprozess und sollte nach Herstellerangaben strikt eingehalten werden [81].

### 1.2.3.2.3 FDM-Verfahren

Beim „fused deposition modeling“ (FDM) - Verfahren werden thermoplastische Filamente durch eine Drucker- Düse erwärmt und dadurch formbar [82]. Die Düse gibt das plastische Filament auf die Bauplatzform und bewegt sich dabei in der vom Computer aus gesteuerten Richtungen [83]. Auf der Bauplatzform härtet das Material aus und eine nächste Schicht wird aus der erwärmten Düse abgegeben. Die gedruckten Objekte entstehen dabei wiederholt wie bei den anderen Druckverfahren in Schichten [84].

### 1.2.3.2.4 Polyjet- Verfahren

Beim Polyjet- Verfahren werden aus mehreren Drucker- Düsen lichtsensitive druckbare Materialien in Tropfen abgegeben, die mit einer LED- Leuchte direkt nach der Abgabe auf die Bauplatzform ausgehärtet werden [85].

Die Drucker- Düsen bewegen sich dabei auf zwei- dimensional Bildern, die durch Aufbringen mehrerer folgender Schichten eine Dreidimensionalität bekommen [78].

## 1.3 Vergleich konventionell / digital

Vergleicht man die konventionelle Schienenherstellung mit der voll- und oder semidigitalen Herstellungsmethode, so ist vor allem der volldigitaler Herstellungsprozess effektiver, da die konventionelle Modellherstellung mit Gips im zahntechnischen Labor entfällt. Auch können die Daten vom Scanlaptop direkt an das zahntechnische Labor gesendet werden und sind binnen weniger

Minuten übertragen. Mit Hilfe der additiven Herstellungsverfahren ist es möglich, komplexe Formen herzustellen. Beim 3D- Druck können je nach Bedarf kleine Mengen gedruckt werden bei einer Materialverwendung von nahezu 100%, da keine Überschüsse oder große Mengen an Restmaterial entstehen [86]. Der additive Herstellungsprozess ist zeiteffektiv, jedoch ist der Kostenaufwand bei der Anschaffung der 3D- Drucker und druckbaren Materialien erhöht. Ein weiterer Nachteil der additiven Druckverfahren ist das notwendige technische Wissen über den digitalen Arbeits- und Herstellungsprozess [87]. Aufgrund dessen, dass der 3D- Druck immer mehr zur Anwendung kommt, ist dabei der Aspekt der Umweltbelastung nicht zu vernachlässigen. Beim Nachbearbeitungsprozess können Kunststoff-Nanopartikel bei der Reinigung mit Alkohol und deren Entsorgung in die Umwelt gelangen [88]. Auch verursacht vor allem der Nachbearbeitungsprozess eine große Menge an Chemieabfällen und einen hohen Energieverbrauch [89].

Bei der konventionellen Herstellungsmethode müssen die Schienen mit Kunststoff modelliert werden oder mindestens der individuelle Aufbiss, wenn die Basis zunächst tiefgezogen wird. Die auspolymerisierten Schienen werden im Anschluss ausgearbeitet, bis sie intraoral eingesetzt werden können. Beim CAD und dem sogenannten „computer aided manufacturing“ (CAM) dagegen werden die Schienen bis hin zur Okklusion am Computer designt und werden dann entweder subtraktiv oder additiv hergestellt. Während des Schleifprozesses oder des additiven Drucks muss der Zahntechniker nicht während der gesamten Zeit anwesend sein.

### 1.3.1 Unterschiede bei den Materialien

Hinsichtlich der Schienenmaterialien gibt es Unterschiede in der Zusammensetzung.

Bei den konventionellen Schienenmaterialien handelt es sich um Heißpolymerisate oder Kaltpolymerisate aus PMMA. Werden Schienen mit der Tiefziehtechnik hergestellt, besteht die Tiefziehfolie in der Regel aus Polymerisaten auf Polypropylen - Basis [90] oder aus Polyethylen [91].

Der Aufbiss kann dann entweder mit einem Autopolymerisat oder Lichtpolymerisat hergestellt werden.

Bei gefrästen Schienen handelt es sich in der Regel um vorgefertigte Materialblöcke aus PMMA.

Beim additiven Herstellungsprozess von Aufbisschienen und zum Beispiel von gedruckten Modellen handelt es sich um lichtempfindliche Kunstharze. Kunstharze sind Materialien mit einer reaktiven funktionellen Gruppe, die unter Wärme- oder Lichtenergie durch radikalische Kettenreaktion auspolymerisieren [92]. Die geringe Viskosität der Kunstharze vor der Polymerisation erlaubt den dreidimensionalen Druck [93]. In dieser Studie wurde ein Methacrylharz bestehend aus mindestens 90% Methacrylat-Oligomeren verwendet. Phosphinoxide, die als Photoinitiatoren wirken, liegen in dieser Monomermischung zwischen 1-5% vor. Diese Zusammensetzung ist bei weiteren druckbaren Materialien vorzufinden [94]. Durch die Kettenreaktion vernetzen sich die Monomere zu Polymeren, daher handelt es sich bei den 3D-druckbaren Materialien um druckbare Polymere [95]. Nach Reymus et. al hat die Zusammensetzung der Kunstharze einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der gedruckten Objekte [96].

### 1.4 Reparaturen und Erweiterungen

#### 1.4.1 Klinische Relevanz und Fragestellung

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsgebiete von Aufbissschienen sind diese unterschiedlichen mechanischen und chemischen Einflüssen ausgesetzt. Betrachtet man die Tragedauer von Schienen können sie nur kurz zum Einsatz kommen, wie zum Beispiel Bohrschablonen für die Implantation [56] oder über einen längeren Zeitraum getragen werden. Die Tragedauer von Aufbissschienen, die zur Therapie einer CMD eingesetzt werden, variiert von einigen Wochen bis hin zu mehreren Monaten oder Jahren [97]. Diese werden entweder nur nachts, nur tagsüber oder 24 Stunden getragen. Werden Schienen zur Umstellung der Biss- Situation eingesetzt, werden diese sogar über den ganzen Tag, auch während den Mahlzeiten getragen [98].

Aufbissschienen sind bei Patienten, die unter Bruxismus leiden, enormen Kaukräften ausgesetzt. Gibbs et al. zeigten, dass maximale Bisskräfte von bis zu 74 kg erreicht [99] werden können. Kerr et al. zeigten, dass kieferorthopädische Geräte und Aufbissbehelfe zu 57% frakturierten. Gründe hierfür war die fehlerhafte Aufbewahrung dieser oder Brüche beim Herausnehmen. Auch wurden die Apparaturen häufig während der Reinigung fallen gelassen [100].

Casey zeigte in einer Studie aus 2003, dass Schienen auch mechanischen und chemischen Verschleiß ausgesetzt sind. Dabei wurden die Schienen auf den Materialverschleiß untersucht [101].

Diese Faktoren, die zum Verschleiß und oder zur Fraktur einer Schiene führen können zeigen, dass Schienen repariert werden müssen. Über den Erfolg von Reparaturmaßnahmen an dreidimensional gedruckten Schienen gibt es nach aktueller Studienlage kaum Erfahrungen.

Eine weitere Notwendigkeit des nachträglichen Anfügens von Reparaturmaterial können auch die in Kapitel 1.2.2.1. ab Seite 20 beschriebenen geringen Passungsprobleme sein, die sich bei der digitalen Abformung von gesamten Kiefern einschleichen können.

Komplexe Individualisierungen von 3D- gedruckten Schienen können notwendig sein, wenn z.B. Drahtelemente (wie zum Beispiel Klammern) oder ein Lingualbogen nachträglich in die 3D- gedruckte Schiene eingearbeitet werden müssen. Dies ist zum aktuellen Standpunkt der Technik nicht vollständig additiv herzustellen.

Bei Reparaturen oder möglicher Erweiterungen an dreidimensional gedruckten Schienen gibt es von Seiten der Hersteller kaum Empfehlungen bezüglich der Vorgehensweise. Bei konventionellen Schienenmaterialien auf PMMA- Basis ist es üblich, den Kunststoff evtl. vor dem Anfügen des Materials anzurauen und die Oberfläche mit einer Monomer- Flüssigkeit zu benetzen. Als Reparaturmaterialien können Kaltpolymerisate oder Lichtpolymerisate eingesetzt werden.

Hinsichtlich des Materialverbunds zwischen additiven Materialien und Reparaturmaterialien liegen keine ausreichenden Untersuchungen vor.

### **1.5 Anforderungen an dentale Kunststoffe**

Aufgrund der o.g. Ursachen für Schienenfrakturen und oder Verschleiß von Aufbisschienen sind nicht nur konventionelle Kunststoffe, sondern auch additiv druckbare Schienenmaterialien klinischen und chemischen Anforderungen ausgesetzt. Dabei sollten dentale Kunststoffe auch Anforderungen wie z.B. die Möglichkeit einer Reparatur erfüllen.

Anforderungen und mechanische Eigenschaften von dentalen Kunststoffen werden durch die DIN ISO- Normen 20795- eins und zwei für zahnärztliche Kunststoffe festgelegt. Dabei werden standardisierte Testverfahren zur Überprüfung der mechanischen Eigenschaften unter Werkstoffkundlichen Aspekten vorgegeben.

Die DIN EN ISO- Norm 20795- 1 Teil 1 befasst sich dabei um Prothesenkunststoffe. Diese Norm unterteilt die verschiedenen Kunststoffe nach ihrer Art der Polymerisation in verschiedene Typen (heißhärtende-, thermoplastisch formbare-, lichthärtende- und in Mikrowellen- härtende

Kunststoffe) und gibt eine Mindestnorm der Biegefestigkeit von 60 – 65 MPa vor. Für das Prüfverfahren ist der Drei- Punkt- Biegeversuch vorgegeben [102]. Die DIN EN ISO 20795- 2 Teil 2 führt die Normanforderungen für kieferorthopädischer Kunststoffe auf. Eine Biegefestigkeit (getestet mit dem Drei- Punkt- Biegeversuch) von mindestens 50 MPa wird hier für kieferorthopädische Kunststoffe, die sich zur Herstellung von Aufbisschienen eignen, gefordert [30].

Verfahren zur Testung der Verbundfestigkeit zwischen zwei verschiedenen Kunststoffen sind bei diesen o.g. DIN ISO- Normen weder für additive Schienenmaterialien noch für konventionelle Schienenmaterialien definiert.

Weitere Untersuchungsverfahren der mechanischen Eigenschaften von dentalen Kunststoffen werden durch die DIN EN ISO- Norm 10477 für Polymerbasierte Kronen- und Verblendwerkstoffe definiert. Hier wird auch ein Verfahren zur Testung der Verbundfestigkeit zwischen zwei Werkstoffen (Metall- Kronen/ Brücken und Verblendkunststoffe) definiert. Die Verbundfestigkeit sollte dabei mindestens 5 MPa erreichen und sollte mit einem (Ab-) Scherversuch getestet werden [103].

### 1.5.1 Verbundfestigkeitsprüfung

Die in der DIN EN ISO- Normierung 10477 (2018) aufgeführten Prüfverfahren dienen der Untersuchungsmethoden der Verbundfestigkeit zwischen Metallplättchen mit Verblendkunststoffen von Kronen- und Brückenversorgungen. Die ISO- Norm sieht die Herstellung von Metallprüfkörpern vor, an welche Zylinder aus Verblendwerkstoffen angebracht werden sollen. Die Dimensionen der Metallplättchen sind vordefiniert. Eine Anzahl von fünf Metallplättchen ist vorgegeben. Die Oberfläche der Metallplättchen soll plan sein und je nach verwendeter Legierungsart entsprechend den Herstellerangaben bearbeitet werden. Die Verblendwerkstoffe sollen in Form von Zylindern auf diese Metallplättchen angefügt werden. Entsprechend der Herstellerangaben der Verblendwerkstoffe soll eine Oberflächenkonditionierung erfolgen. Der Verblendwerkstoff wird im Anschluss durch eine vorgefertigte Form mit einer Bohrung durchgepresst und

## Einleitung

---

ausgehärtet. Die Bohrung für den Zylinder soll einen Durchmesser von 4,9 mm-5 mm (+/- 0,1 mm), bei einer Höhe von 2,5 mm (+/- 0.05 mm) aufweisen. Nach der Aushärtung der Zylinder kann die Form mit der Bohrung entfernt werden und die so hergestellten Prüfkörper sollen für 24 Std. (+/- 2 Std.) bei 23° C (+/- 2° C) getrocknet werden. Im Anschluss an die Trocknung gibt die ISO- Norm vor, die Prüfkörper in einem Wasserbad zyklisch wechselnder Temperaturen (bei 5° C und 50° C) zu altern. Nach der Alterung soll der Zylinderdurchmesser zweimal vermessen werden. Nach der Bestimmung der Verbundfläche sieht die ISO- Norm vor, die Prüfkörper in einem Scher- Gerät, welches zur Durchführung eines (Ab-) Scherversuches geeignet ist zu testen und die Verbundfestigkeit danach zu ermitteln. Die Zylinder sollen mit einem Stößel von den Metallplättchen ab- geschert werden. Der Stößel soll dabei mit einer Geschwindigkeit von einem Millimeter (+/- 0,3 mm) pro Minute oder mit einer Kraft von 50 N (+/- 16 N) pro Minute auf den Prüfkörper treffen. Die Kraft (F) soll beim Bruch aufgezeichnet werden [103].

Die Testung der Verbundfestigkeit mit einem Scherversuch in Anlehnung an die ISO- Norm 10477 wurde nach aktuellem Standpunkt der Literatur (zuletzt abgerufen am 09.01.2021) an additiv druckbaren Schienenmaterialien durch Perea- Lowery und Vallittu durchgeführt [104].

Weitere Überprüfungen zur Testung der Festigkeit von Werkstoffen sind folgende Prüfmethode:

- Biegeversuch: zur Ermittlung der Biegefestigkeit
- Zugversuch: zur Ermittlung der Zugfestigkeit
- Scherversuch: zur Ermittlung der Scherfestigkeit.

Mit diesen Methoden ist es möglich, die Festigkeit eines Werkstoffverbundes zu testen [105].

In Bezug auf Kaukräfte sind Aufbisschienen unterschiedlichen Kraftausübungen ausgesetzt. Beim Knirschen werden Lateralbewegungen ausgeübt, welche seitlich auf Zähne und Aufbissbehelfe auftreten [106]. Auch führen Kau- / Mahlbewegungen zu axialen und horizontalen Kraftausübung auf Zähne und wiederum auf okklusale Behelfe, die auf Zähne aufgesetzt werden

[107]. In einer Studie von Peck über die Biomechanik der Okklusion werden auf Scherkräfte aufgeführt, die bei Mahlbewegungen auftreten können [108].

In Anbetracht dessen, sind auch an Reparaturmaterialien klinische und mechanische Anforderungen gestellt. Dabei sollte ein Reparaturmaterial eine hohe Biege- und Verbundfestigkeit besitzen [109]. Auch führen nach Mariatos et al. Scherkräfte am häufigsten zum Versagen des Haftverbundes zwischen zwei Materialien [109].

### 1.6 Zielsetzungen der Untersuchung

Ziel dieser Studie ist es, die Reparaturmöglichkeit von dreidimensional druckbaren Schienen zu untersuchen.

Folgende Nullhypothese wurde formuliert und untersucht:

- Die Reparatur von 3D- gedruckten Schienen mit einem Autopolymerisat, drei verschiedenen Lichtpolymerisaten und einem lichtsensitiven 3D- druckbaren Kunstharz, zeigt keinen Unterschied zur Reparatur von konventionell mit autopolymerisierendem PMMA hergestellten Aufbissschienen.
- Die Oberflächenkonditionierung der Schienenbasis hat keinen Einfluss auf die Verbundfestigkeit.
- Die künstliche Alterung hat keinen Einfluss auf den Materialhaftverbund.

Diese Fragestellungen waren mit folgenden Methoden zu untersuchen und mit den Ergebnissen zu belegen oder widerzulegen.

## 2 Material und Methode

### 2.1 Übersicht Versuchsreihen

In der vorliegenden In- vitro Studie wurde der Materialhaftverbund zwischen einem additiv druckbaren Schienenmaterial mit anderen Kunststoffen untersucht. Auch wurde zum Vergleich eine Kontrollgruppe mit einer konventionellen Kunststoffbasis, welches für die Herstellung von Aufbisschienen geeignet ist, hergestellt. Dabei wurde der Versuchsaufbau in Bezug auf die Prüfkörperherstellung und Testung der Verbundfestigkeit in Anlehnung an die DIN ISO 10477 (2018) normierte Untersuchungsmethode aufgebaut und entsprechend der Zielformulierung modifiziert. Dieser ISO- Norm entsprechend, wurden Prüfkörper- (Schienen-) Basen additiv mit Hilfe des 3D- Druckers von Rapid Shape, D30 II (Rapid Shape GmbH; Generative Produktion Systems, Heimsheim, Deutschland) hergestellt. Diese additiven Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurden mit einem druckbaren Kunstharz Freeprint®splint 2.0 (DETAX GmbH& Co. KG, Ettlingen Deutschland) dreidimensional gedruckt. Zusätzlich wurden für die konventionelle Kontrollgruppe Prüfkörper- (Schienen-) Basen individuell aus autopolymerisierendem Kunststoff (PMMA), (Palapress® klar, Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) hergestellt. Nach der Herstellung der Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurden diese entweder für 24 Stunden trocken (bei 23° C) oder für 14 Tage in destilliertem Wasser (bei 37° C) gealtert (Alterung #1). Nach dieser Alterung wurde die Oberfläche der Prüfkörper- (Schienen-) Basen, je nach Versuchsreihe unterschiedlich konditioniert. Dabei wurde die Oberfläche gestrahlt und/ oder mit entsprechenden Haftvermittlern oder Monomer benetzt. Zum Vergleich wurde dabei auch die Oberfläche unbehandelt belassen. Direkt im Anschluss an die Oberflächenkonditionierung wurden die Prüfkörper- (Schienen-) Basen in einer Halterung fixiert. Mit Hilfe eines Formteils wurden unterschiedliche Reparaturmaterialien in Form von Zylindern an die Prüfkörper- (Schienen-) Basis angefügt. Die verwendeten Reparaturmaterialien eignen sich

für das Anfügen und Reparieren von Aufbisschienen. Dabei wurden ein Autopolymerisat, drei Lichtpolymerisate und das druckbare Kunstharz selbst, welches als Prüfkörper- (Schienen-) Basis diente, als Reparaturmaterialien verwendet. Nach dieser Zylinderherstellung wurden die Prüfkörper analog der Alterung #1 wiederholt einer Alterung (Alterung #2) zugeführt und im Anschluss unter einem Makroskop WILD M400 (Wild, Heerburg, Schweiz) mit einer 20-fachen Vergrößerung fotografiert. Mit Hilfe dieser Aufnahmen wurden die Zylinder 3x vermessen und die Verbundfläche wurde ermittelt. Die Vermessung und Berechnung der Verbundfläche erfolgte mit der Software Datinf® Measure Version 2.2 (Datinf GmbH, Tübingen, Deutschland). Danach wurden die Prüfkörper dem Scherversuch zugeführt. Dabei wurden die Prüfkörper einzeln in die Prüfmaschine Zwick Z010/ TN2A (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) eingespannt und der Zylinder wurde entsprechend den Vorgaben der ISO- Norm 10477 von der Prüfkörperbasis abgeschert. Die Kraft, die dabei bis zum Abscheren des Zylinders auftraf, wurde gemessen. Nach dem Scherversuch erfolgte eine Untersuchung der Bruchflächen und eine Kategorisierung dieser in adhäsive, kohäsive oder gemischte Brüche. Des Weiteren wurde die Oberfläche der Prüfkörper- (Schienen-) Basen mit einem Rasterelektronenmikroskop REM LEO 1430 (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland) untersucht, Aufnahmen wurden erstellt.

Auch wurde die Oberflächenbeschaffenheit der Prüfkörper- (Schienen-) Basen mit Hilfe der Prüfvorrichtung Perthometer S6P (Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland) analysiert. Die Rauheit und Welligkeit der Oberfläche bei jeglicher Art der Oberflächenkonditionierung wurde vermessen. Die Daten aus den Versuchsreihen wurden mit Hilfe der Software JMP, Version 14 (SAS, Cary, USA) statistisch ausgewertet. Dabei wurden die unterschiedlichen Prüfgruppen auf den Einfluss der Oberflächen- konditionierung und der Alterung verglichen.

### 2.1.1 Überblick der Versuche

Das nachfolgende Flussdiagramm (Abbildung 1 auf Seite 35) stellt die durchgeführten Schritte des gesamten Versuchsaufbaus (wie oben beschrieben in Kapitel 2.1, Seite 33) schematisch auf.

## Material und Methode

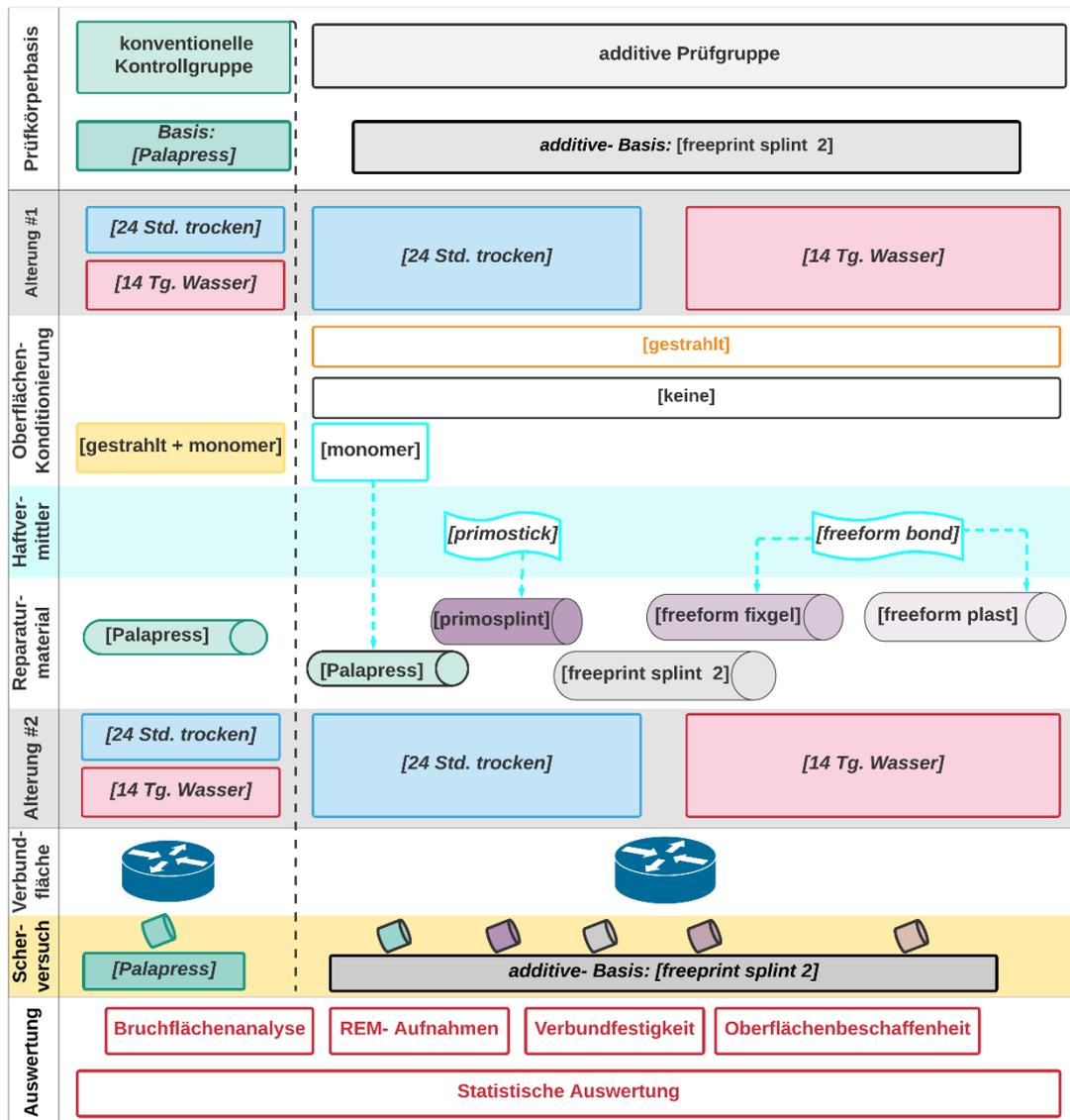


Abbildung 1: Flussdiagramm gesamter Versuchsaufbau. Der Versuchsaufbau ist von oben nach unten mit unterschiedlichen Bahnen dargestellt. Die erste Bahn führt die Prüfgruppen mit den Prüfkörper- (Schienen) Basen auf. Die zweite Bahn stellt die Alterung #1 der Prüfkörper- (Schienen-) Basen dar. Nach der Alterung #1 folgen die unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen. Bei der konventionellen Kontrollgruppe wurde die Oberfläche gestrahlt und danach mit Monomer benetzt. Das Reparaturmaterial aus Palapress® wurde im Anschluss anpolymerisiert. Bei den additiven Prüfgruppen wurde bei allen Gruppen bei jeweils einer Prüfreihe die Oberfläche angestrahlt oder unbehandelt belassen. Auch wurden je nach Prüfreihe die jeweiligen Haftvermittler und Monomer zu den entsprechenden Reparaturmaterialien (mit und ohne Abstrahlen) untersucht. Die Reparaturmaterialien wurden angefügt und danach nochmal gealtert (Alterung #2). Die Verbundfläche wurde bestimmt und im direkten Anschluss der Scherversuch durchgeführt. Die letzte Bahn stellt die Auswertung auf.

### 2.1.2 Überblick der Materialien

Die Abbildung 2 (Seite 36) zeigt die verwendeten Materialien für die Prüfkörper- (Schienen-) Basis, sowie die für die jeweilige Versuchsgruppe verwendeten Reparaturmaterialien. Die konventionelle Kontrollgruppe ist in der ersten grünen Bahn dargestellt und diente als Goldstandard. Die Prüfkörper bestanden hier aus einer Palapress®- Basis, an welche das Reparaturmaterial ebenso aus Palapress® angefügt wurde. Bei den additiven Prüfgruppen (graue Bahn) wurde die Basis dreidimensional aus dem Kunstharz freeprint® splint 2.0 UV gedruckt und es wurden fünf verschiedene Reparaturmaterialien (Palapress®, primosplint®, das Kunstharz (freeprint® splint 2.0 UV) selbst, freeform® fixgel und freeform® plast untersucht.

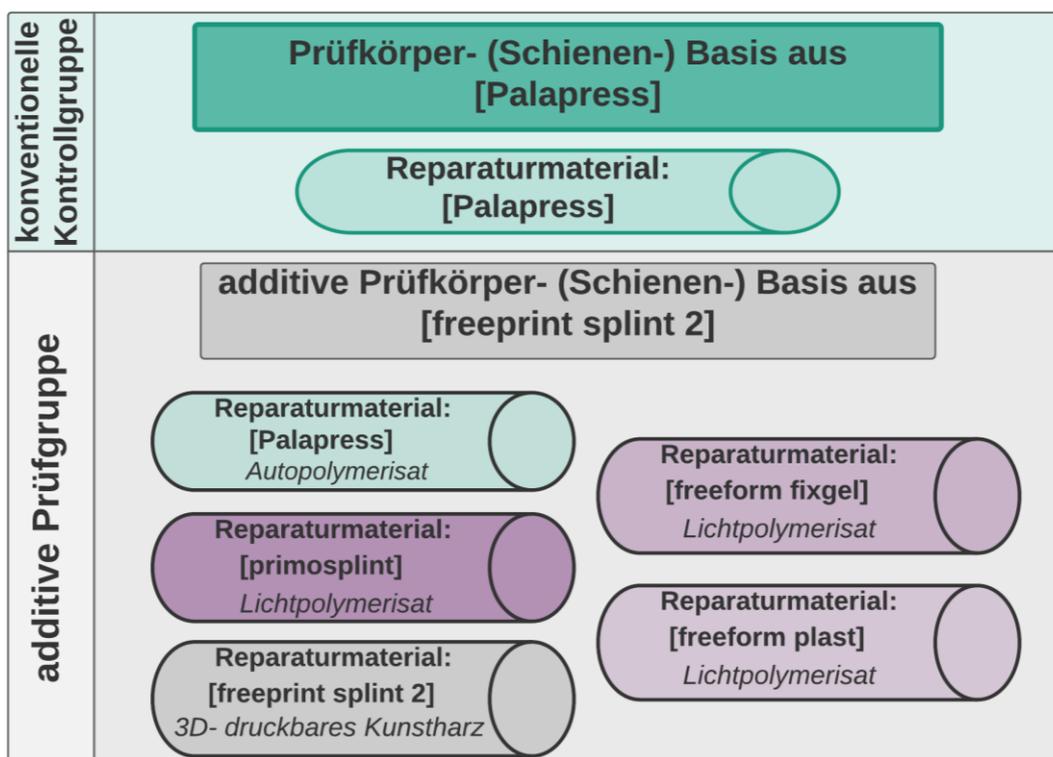


Abbildung 2: Verwendeten Materialien für die Prüfkörper- (Schienen-) Basis, sowie als Reparaturmaterial. Bei der konventionellen Kontrollgruppe bestanden die Basis und das Reparaturmaterial aus Palapress®. Bei den additiven Prüfgruppen wurden die Prüfkörper- (Schienen-) Basen aus dem druckbaren Kunstharz (Bezeichnung [freeprint splint 2]) verwendet. Bei diesen Prüfgruppen wurden fünf verschiedene Reparaturmaterialien untersucht.

### 2.2 Materialien der Prüfkörper- (Schienen-) Basis

Für diese Studie wurden zwei verschiedene Materialien für die Herstellung der Prüfkörper- (Schienen-) Basis verwendet:

- **Autopolymerisat:**
  - Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland), (PMMA)
- **Dreidimensional druckbares Kunstharz:**
  - Freeprint® splint 2.0 UV (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen, Deutschland).

In der vorliegenden Studie wurde die Kontrollgruppe mit konventionellen zahntechnischen Methoden aus Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) hergestellt.

Mit dem druckbaren Kunstharz Freeprint® splint 2.0 UV (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) wurden die Prüfkörper- (Schienen-) Basen dreidimensional gedruckt.

### 2.3 Reparaturmaterialien

Folgende Reparaturmaterialien wurden als Zylinder an die Prüfkörper- (Schienen-) Basen angefügt:

- **Autopolymerisat:**
  - Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland), PMMA
- **Lichtpolymerisate:**
  - primosplint® (primotec, Joachim Mosch e.K., Bad Homburg, Deutschland)
  - freeform® fixgel (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen, Deutschland)
  - freeform® plast (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen, Deutschland)
- **Dreidimensional druckbares Kunstharz:**
  - Freeprint® splint 2.0 UV (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen, Deutschland)

### 2.3.1 Palapress®, klar.

Das Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) besteht aus einer Monomer- Flüssigkeit und einem Pulver. Palapress® wurde für die Herstellung der Kontrollgruppe mit individuellen und konventionellen zahntechnischen Methoden verwendet. Zudem wurde das Palapress® (PMMA) als Reparaturmaterial bei einer der 3D- gedruckten Prüfgruppen verwendet. Bei der Kontrollgruppe bestanden sowohl die Basis als auch die Zylinder aus PMMA. Bei der additiv hergestellten Prüfgruppe wurde der Zylinder aus PMMA nach der Alterung der Basis auf diese an- polymerisiert. Bei beiden Gruppen wurde das PMMA mit konventionellen zahntechnischen Methoden angemischt und ausgehärtet. Das Material wurde dabei nach Herstellerangaben in einem Silikon- Becher gemischt. Dabei wurden jeweils Zehn Gramm (g) Pulver und Sieben Milliliter (ml) Monomer Flüssigkeit abgewogen. Die Monomer-Flüssigkeit wurde dem Pulver hinzugefügt. Mit einem Zement- Anmisch- Spatel wurde für 10 Sekunden gemischt. Der Kunststoff wurde in einem noch viskösen Zustand in die entsprechenden Formen eingefügt und im Anschluss auspolymerisiert. Die Polymerisation erfolgte wie vom Hersteller empfohlen im Drucktopf (Dreve, Unna, Deutschland) bei einer Wassertemperatur von 55° Celsius und zwei bar Druck für 20 Minuten.

In den Tabellen (Tabelle 1, Seite 198 und Tabelle 2, Seite 198 im Anhang) ist die Zusammensetzung der einzelnen Komponenten von Palapress® aufgeführt.

### 2.3.2 Freeprint® splint 2.0 UV, clear

Das druckbare Schienenmaterial Freeprint®splint 2.0 (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) ist ein lichtsensitives dreidimensional druckbares Material, welches bei einer Wellenlänge von 385 nm aushärtet. Das Produkt ist für die additive Herstellung von Schienen, Fixierungs- und Übertragungsschlüssel indiziert. Es ist gemäß dem Medizinproduktegesetz (MPG) als Klasse IIa Produkt zugelassen.

Nach dem dreidimensionalen Druck der Prüfkörperbasis wurden die Herstellerangaben zur Nachbearbeitung durchgeführt.

Die sogenannte Vor- und Nachreinigung erfolgte mit der Lagerung der Prüfkörperbasen in einer mit Isopropanol  $\geq 98\%$  gefüllten Wanne. Diese Wanne wurde in einem Ultraschallbad (Ultrasonic Cleaner; Proclean 10.0M ECO, ulsonix® cleaning instruments, Zielona, Polen) gelagert. Die gedruckten Prüfkörperbasen wurden für drei Minuten in dieser Wanne ultraschallaktiviert gereinigt. Im Anschluss wurde die Prüfkörperbasen nachbelichtet. Die Nachbelichtung wurde in einem Lichthärtegerät (Otoflash G171, NK- OPTIK, Baierbrunn, Deutschland) mit 2x 2000 Xenonlichtblitzen unter einer Stickstoffgeschützten Gasatmosphäre durchgeführt. Zwischen den 2000 Lichtblitzen wurden die gedruckten Prüfkörperbasen einmal umgedreht, um auch eine Lichthärtung von der anderen Seite zu gewährleisten.

Die Bestandteile des dreidimensional druckbaren Schienenmaterials, sowie die Voraussetzungen der Lichthärtung sind in der Tabelle 3, Seite 199 im Anhang aufgelistet.

### 2.3.3 primosplint®

Das primosplint® (primotec® Joachim Mosch e.K, Bad Homburg, Deutschland) ist ein Acrylharz, welches zur Individualisierung von vorgefertigten Schienen dient. Auch kann das Material zur Herstellung von kompletten Aufbissschienen genutzt werden. Das Material ist Methylmethacrylat (MMA)- und Peroxid frei. Die Aushärtung erfolgt im UV-A- Lichthärtegerät bei einer Wellenlänge von 320 nm- 400 nm für ca. zehn Minuten. Primosplint® wird in Strängen in lichtundurchlässigen Stiften geliefert. Für Reparaturmaßnahmen empfiehlt der Hersteller vor der Anwendung des Materials das mechanische Anrauen und das Auftragen eines entsprechenden Haftvermittlers (auch sogenanntes „Bonding“- Material) primostick®. Das „Bonding“- Material ist wie die Modelliermasse lichthärtend und sollte im Lichthärtegerät für zwei Minuten auspolymerisieren, um vollständig auszuhärten. Der Modellierwerkstoff primosplint® setzt sich aus verschiedenen Acrylharzen mit Füllstoffen sowie auch Fotoinitiatoren zusammen. Die knetbare Konsistenz des Materials macht das manuelle Anfügen und oder das Anfügen mit Instrumenten möglich.

In der Tabelle 4 (auf der Seite 200 im Anhang) sind die einzelnen Bestandteile anteilig aufgeführt und die chemischen Eigenschaften kurz beschrieben.

### 2.3.4 freeform® fixgel

Das freeform® fixgel (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) ist ein Reparaturmaterial, welches ebenso lichthärtend ist und aus einer Komponente besteht. Das Material ist für die Anwendung als Reparatur und Verstärkungen von dentalen Formteilen zugelassen. Das Material hat eine viskose gelartige Konsistenz und eignet sich zum Anfügen von kleinen Mengen und oder zum Fixieren von Objekten auf Schienen, wie zum Beispiel das nachträgliche Anbringen von Bügeln bei Aufbisschienen oder die Fixierung von Röntgenreferenzkugeln bei Implantat- Schienen. Das Material ist frei von Methylmethacrylat (MMA). Das Materialkonsistenz ist viskös, leicht fließend und wird daher in Kartuschen geliefert. Die Applikation erfolgte mit zu Hilfenahmen von Applikationsspitzen. Bei der Anwendung des Materials auf neu gedruckten Schienen wird vom Hersteller das mechanische Anrauen der betreffenden Stelle empfohlen. Bei Schienen, die schon in Gebrauch waren, sollte nach Herstellerangaben zusätzlich zum mechanischen Anrauen, der Haftvermittler freeform® bond (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) aufgetragen werden. Nach der Applikation des Haftvermittlers kann das freeform® fixgel angefügt werden. Eine gemeinsame Lichthärtung sollte danach erfolgen. Freeform® fixgel ist farblos. Für die Lichthärtung sind UV oder UV- A- Leuchtmittel von einer Wellenlänge von 320 nm- 400 nm notwendig. Für die durchschnittliche Polymerisation werden fünf bis zehn Minuten empfohlen. Die einzelnen Komponenten und die notwendige Lichthärtung sind tabellarisch in der Tabelle 5 (Seite 200 im Anhang) aufgeführt.

### 2.3.5 freeform® plast

Der lichthärtende Modellierkunststoff freeform® plast (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen, Deutschland) ist für Individualisierung von gedruckten Schienenmaterialien wie das freeform® splint 2.0 UV geeignet. Es kann sowohl für Reparaturen als auch für die individuelle Formgebung zum Beispiel bei der Individualisierung des Aufbisses genutzt werden. Nach Herstellerangaben kann

dieses Material auf gedruckten Schienen nachträglich angefügt werden. Das Material ist knetbar und kann somit mit Modellierinstrumenten oder manuell angefügt werden. Für die Polymerisation empfiehlt der Hersteller die Lichthärtung mit einem Lichtspektrum von 320 nm- 400 nm. Die Aushärtung erfolgt in UV- Lichtgeräten für ca. für zehn Minuten. Vor der mechanischen Politur der angefügten Masse sollte diese für ca. weitere fünf Minuten von der anderen Seite beleuchtet werden. Für die Verwendung des Materials als Reparatur- und oder Ergänzungsmasse bei bereits älteren Schienen empfehlen die Produkthersteller wie oben beschrieben (Kapitel 2.3.4, Seite 40), das betroffene Areal entsprechend zu konditionieren. Die Korrekturmasse wird in lichtgeschützten Boxen geliefert und ist farblos. Der Modellierkunststoff ist MMA- frei und setzt sich aus verschiedenen Acryl-/ Methacrylatharzen mit Hilfsstoffen zusammen.

In der Tabelle 6 (Seite 201 im Anhang) sind die näheren Bestandteile Eigenschaften des Materials zusammengefasst.

### 2.4 Haftvermittler

Für die Reparaturmaterialien primosplint®, freeform® plast und freeform® fixgel, wurden die entsprechenden Haftvermittler vor der Applikation der Reparaturmasse aufgetragen. Die Haftvermittler verbessern laut Hersteller den Verbund zwischen Reparaturmaterial und Schiene. Bei der Verwendung von PMMA als Reparaturmaterial wurde in dieser Studie experimentell Monomer-Flüssigkeit verwendet. Für das Reparaturmaterial primosplint® wurde der Haftvermittler primostick® verwendet. Für das freeform® kit von Detax bestehend aus freeform® plast und freeform® fixgel, wurde der dazugehörige Haftvermittler freeform® bond verwendet. Beide Haftvermittler sind lichthärtend und polymerisieren bei der Verwendung von Lichthärtegeräten aus.

In der Tabelle 7 (auf Seite 201 im Anhang) und Tabelle 8 (auf Seite 202 im Anhang) sind Bestandteile und Eigenschaften von primostick® und freeform® bond aufgelistet.

### 2.5 3D- Drucker für die Basisherstellung

Für den dreidimensionalen Druck der Prüfkörper-(Schiene-) Basis wurde der 3D- Drucker von Rapid Shape, D30 II (Rapid Shape GmbH; Generative Produktion Systems, Heimsheim, Deutschland) verwendet. Der Drucker ist für die Herstellung von dreidimensionalen Formteilen aus Kunstharzen geeignet. Das dreidimensionale Druckverfahren basiert auf der Technologie der Maskenbelichtung, das sogenannte „digital light processing“ (DLP).

Die Kennzeichnungen und Eigenschaften des 3D- Druckers sind in der Tabelle 9 (Seite 202 im Anhang) aufgeführt.

### 2.6 Versuchsaufbau

In der vorliegenden In- vitro Studie wurde der Versuchsaufbau in Bezug auf die Prüfkörperherstellung und Testung der Verbundfestigkeit in Anlehnung an die ISO normierte Untersuchungsmethode DIN EN ISO- 10477 (2018) aufgebaut und entsprechend der Zielformulierung der Studie modifiziert. Die vorgegebenen Dimensionen der Prüfkörperbasen mit den Maßen von 20 mm (+/- 1 mm) x 10 mm (+/- 1 mm) x 2 mm (+/- 0,5 mm) wurden übernommen.

#### 2.6.1 Übersicht der Versuchsgruppen

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Versuchsgruppen mit Hilfe von Abbildungen dargestellt. Die Abbildungen zeigen die Alterungsformen und die durchgeführte Art der Oberflächenkonditionierung auf. Die Anzahl (n) der hergestellten und getesteten Prüfkörper wird ergänzend aufgeführt.

##### 2.6.1.1 Prüfkörper konventionelle Kontrollgruppe

Bei der Kontrollgruppe wurde die Prüfkörper- (Schiene-) Basis aus autopolymerisierendem Kunststoff Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) konventionell hergestellt. Diese Prüfkörper- (Schiene-) Basen wurden nach der Herstellung entweder für 24 Std. bei 23° C trocken oder für 14 Tage in destilliertem Wasser (bei 37° C) gealtert (Alterung #1). Die Oberfläche

der Prüfkörperbasis wurde gestrahlt und mit dem entsprechenden Monomer benetzt. Das Reparaturmaterial aus Palapress® klar wurde an die Prüfkörperbasis als Zylinder anpolymerisiert. Eine weitere Alterung #2 analog der Alterung #1 wurde durchgeführt.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 3, Seite 44 bis Abbildung 8, Seite 49) stellen eine Übersicht für jede Versuchsreihe dar.

Dabei sind die Prüfkörper der konventionellen Kontrollgruppe in der Abbildung 3, Seite 44) als grüne Prüfkörper schematisch dargestellt. Die Abbildungen danach führen eine Übersicht der additiven Prüfgruppen auf. Hier sind die Prüfkörper mit der additiven Basis (grau) und dem verwendeten Reparaturmaterial (farblich hinterlegte Zylinder mit der jeweiligen Bezeichnung) oben aufgeführt. Die nach der Alterung #1 in der jeweiligen Versuchsreihe durchgeführte Konditionierung der Oberfläche wird unter dem Prüfkörper in unterschiedlichen Feldern benannt. Die unbehandelte Oberfläche wurde als [keine] bezeichnet, das Abstrahlen als [gestrahlt], die Monomer- Benetzung als [monomer]. Die Haftvermittler wurden als [primostick] und [freeform bond] bezeichnet. Von diesen Feldern gehen die Anzahl (n) der konditionierten Prüfkörper- (Schienen-) Basen als Pfeile ab (durchgezogene Pfeile für die Trockenalterung und gestrichelte Pfeile für die Nassalterung) und werden der jeweiligen Alterung (24Std. trocken oder 14Tg. Wasser) zugeführt. Die blauen Felder stehen für die Trockenalterung, die roten Felder für die Nassalterung. In diesen wird auch die Gesamtanzahl der hergestellten und der zum Scherversuch zugeführten Prüfkörper aufgeführt.

Die Abbildung 3 auf Seite 44 stellt die konventionelle Kontrollgruppe dar.

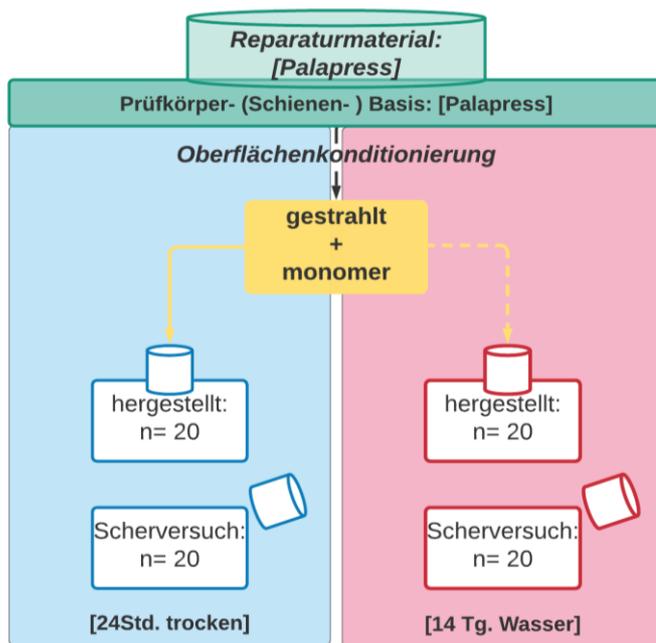


Abbildung 3: Konventionellen Kontrollgruppe mit dem Prüfkörper aus Palapress®. Die Oberfläche der Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurde gestrahlt und mit Monomer benetzt (Bezeichnung [gestrahlt + monomer]). Beide Alterungsformen [24Std. trocken] und [14Tg. Wasser] wurden untersucht. Für jede Oberflächenkonditionierung und Alterung wurden n=20 Prüfkörper hergestellt und erfolgreich zum Scherversuch zugeführt.

### 2.6.1.2 Prüfkörper der additiven Prüfgruppen

Bei den Prüfkörpern der additiv hergestellten Prüfgruppen wurde die Prüfkörper- (Schienen-) Basis aus dem dreidimensional druckbaren Kunstharz Freeprint splint® 2.0 (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) hergestellt. Die Oberfläche der Prüfkörperbasen wurde unterschiedlich entsprechend der Versuchsreihe konditioniert. Als Reparaturmaterial wurden fünf verschiedene Materialien als Zylinder an die Prüfkörperbasis angefügt. Die Reparaturmaterialien sind im Kapitel 2.3 auf der Seite 37 aufgeführt.

Die Prüfkörper wurden entweder bei 23° C für 24 Stunden trocken oder für 14 Tage in destilliertem Wasser (bei 37° C) gealtert.

Die Versuchsgruppen mit additiv hergestellter Prüfkörper- (Schienen-) Basis und der unterschiedlichen Reparaturmaterialien sind in den nächsten

## Material und Methode

Abbildungen (Abbildung 4 auf der Seite 45, Abbildung 5 auf Seite 46, Abbildung 6 auf Seite 47, Abbildung 7 auf Seite 48 und Abbildung 8 auf der Seite 49) als Übersicht dargestellt.

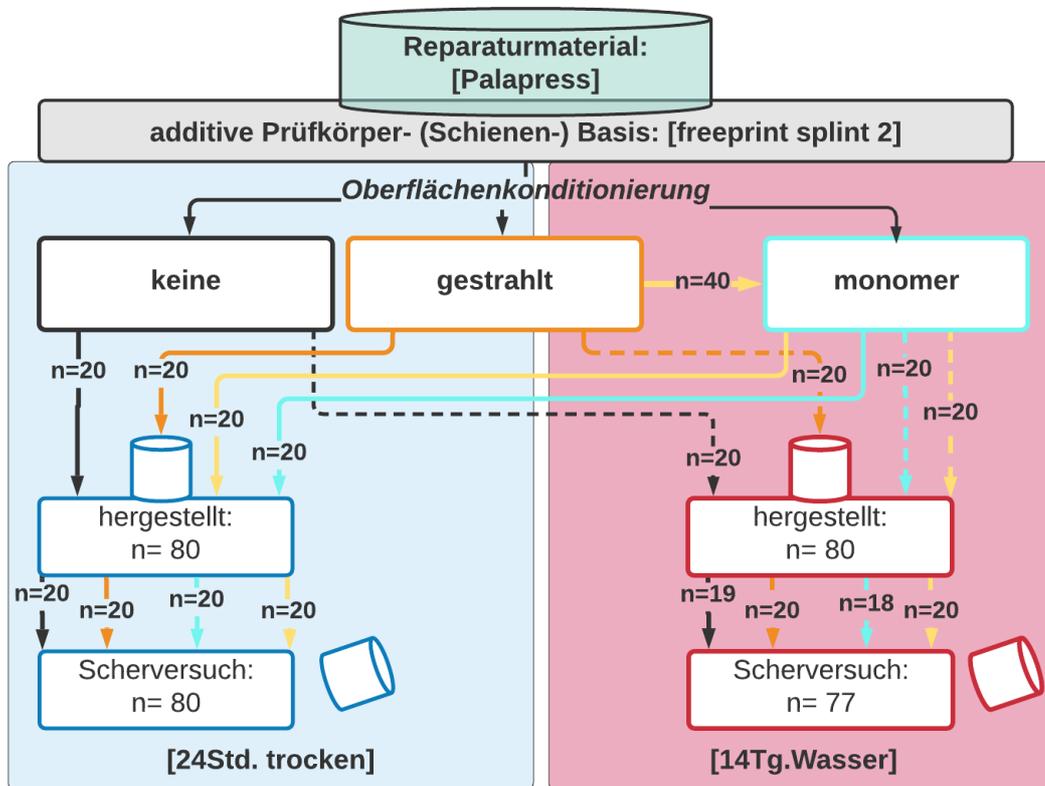


Abbildung 4: Additive Prüfgruppe mit der Prüfkörper- (Schienen-) Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial Palapress®. Die Oberfläche wurde unbehandelt belassen, gestrahlt, mit Monomer benetzt oder die Kombination aus Abstrahlen und Monomer benetzen wurde durchgeführt. Hierfür wurden für die jeweilige Alterungsform (24Std. trocken oder 14Tg. Nass jeweils  $n=20$  Prüfkörperbasen konditioniert. Somit konnten  $n=80$  Prüfkörper bei beiden Alterungsformen hergestellt werden. Zum Scherversuch wurden bei der Trockenalterung alle hergestellten Prüfkörper zugeführt. Bei der Alterungsform [14Tg. Wasser] wurden nur insgesamt  $n=77$  getestet. Bei der Nassalterung und der unbehandelten Prüfreihe konnten nur  $n=19$ , bei der mit Monomer benetzten Prüfreihe nur  $n=18$  getestet werden.

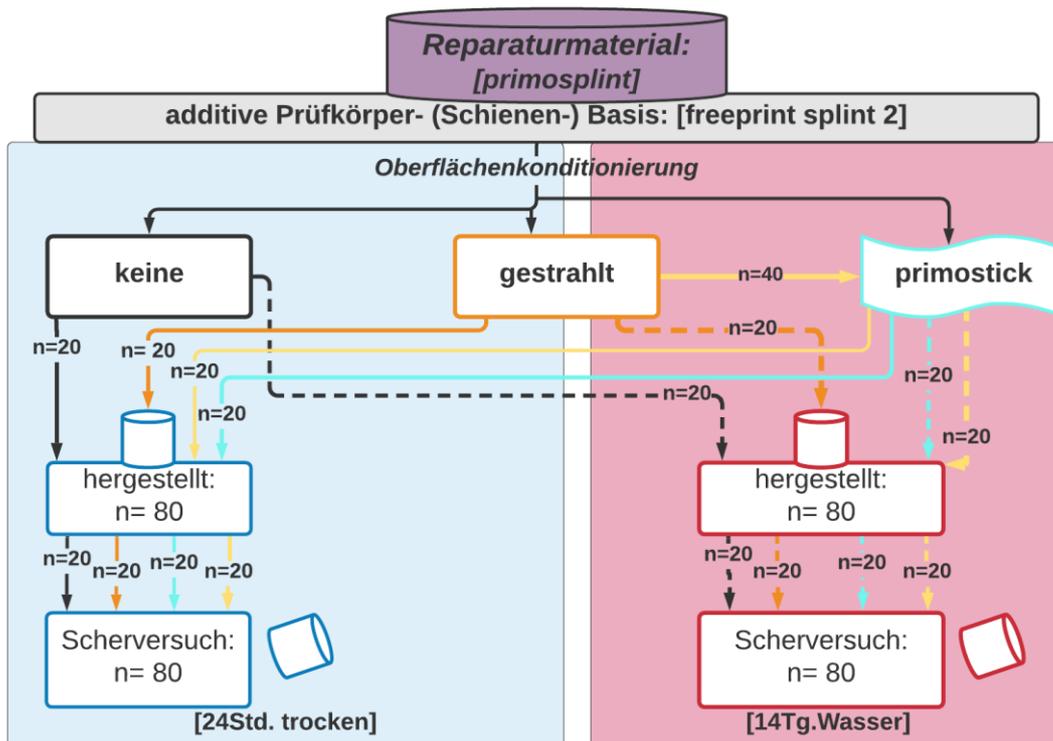


Abbildung 5: Additive Prüfgruppe mit der Prüfkörper- (Schienen-) Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial primosplint®. Die Oberfläche der Prüfkörperbasen wurde unbehandelt belassen, gestrahlt mit dem Haftvermittler primostick® benetzt. Auch wurde bei einer Prüfreihe die Oberfläche erst abgestrahlt und im Anschluss mit primostick® benetzt. Beide Alterungsformen wurden untersucht und für jede Konditionierungsform  $n=20$  Prüfkörper konditioniert. Es wurden  $n=80$  Prüfkörper bei beiden Alterungsformen hergestellt werden. Zum Scherversuch wurden alle hergestellten Prüfkörper erfolgreich zugeführt.

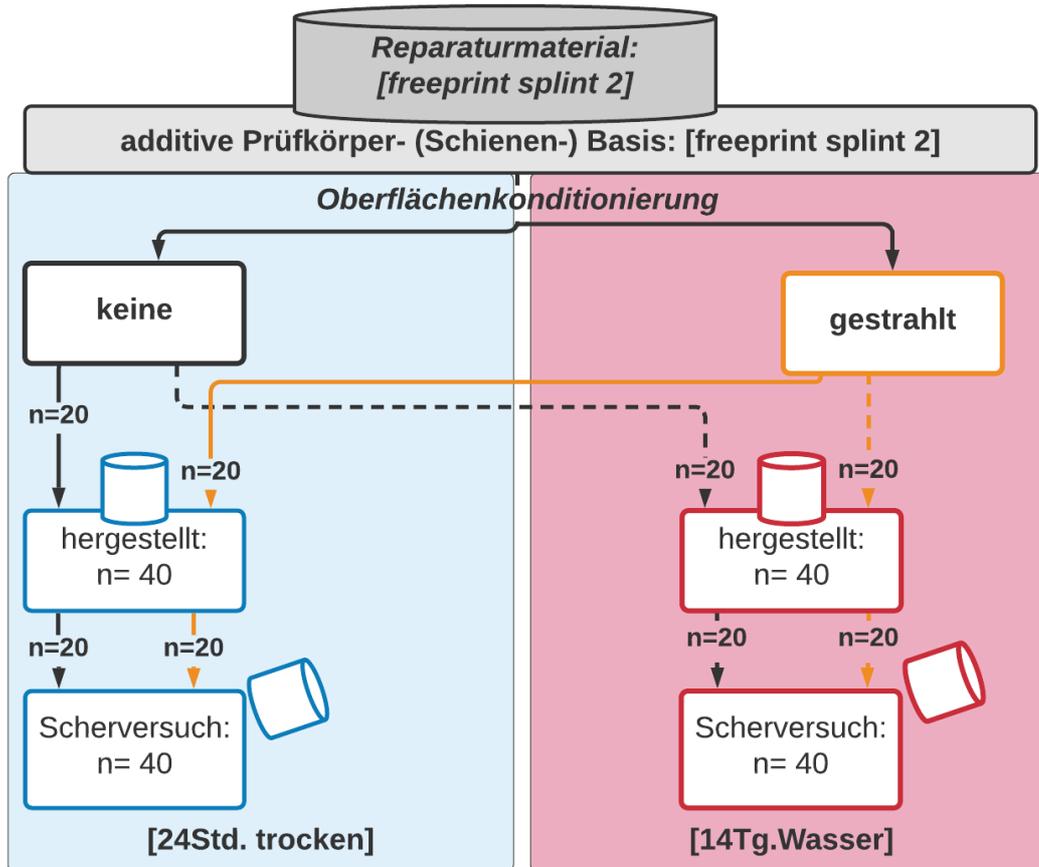


Abbildung 6: Additive Prüfgruppe mit der Prüfkörper- (Schienen-) Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV. Die Oberfläche der Prüfkörperbasen wurde für die jeweilige Alterungsform bei  $n=20$  Prüfkörpern unbehandelt belassen oder bei  $n=20$  Prüfkörpern gestrahlt. Insgesamt wurden  $n=40$  Prüfkörper für jede Alterungsform hergestellt. Zum Scherversuch wurden alle hergestellten Prüfkörper zugeführt.

## Material und Methode

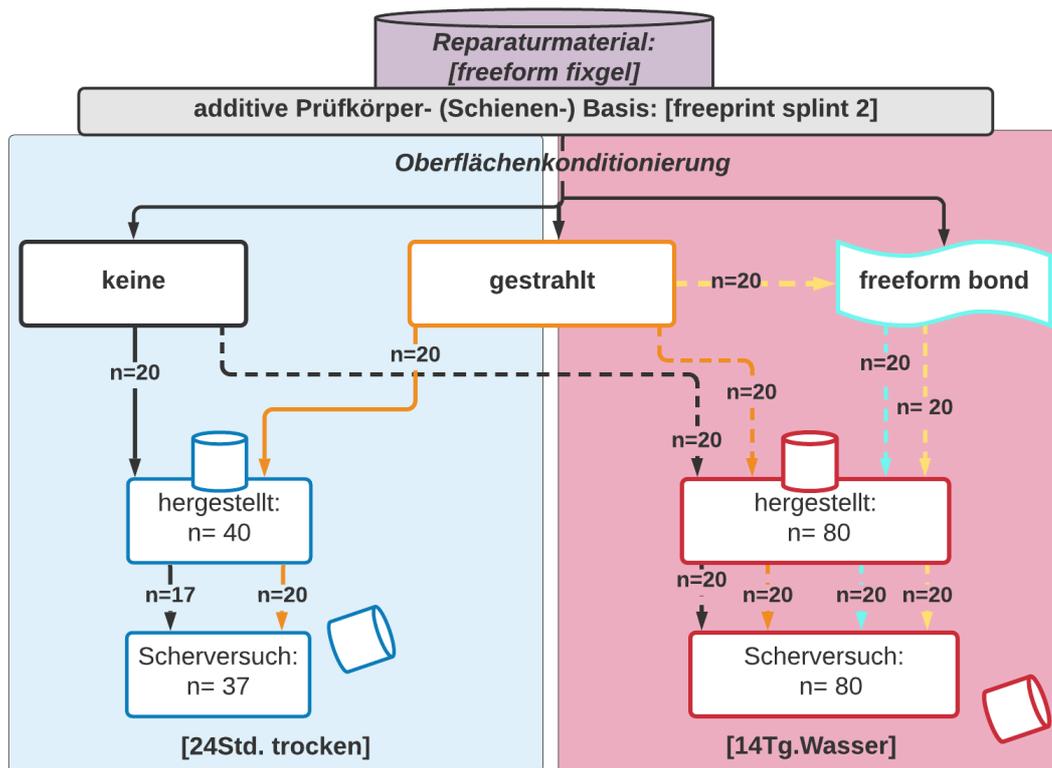


Abbildung 7: Additive Prüfgruppe mit der Prüfkörper- (Schienen-) Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial freeform® fixgel. Die Oberfläche der Prüfkörperbasen wurde bei beiden Alterungsformen bei jeweils  $n=20$  Prüfkörpern unbehandelt belassen oder gestrahlt. Für die Versuchsreihe mit der Alterungsform [14Tg Wasser] wurden weitere  $n=20$  Prüfkörperbasen zuerst abgestrahlt und im Anschluss mit dem Haftvermittler freeform® bond benetzt, welches laut Hersteller nur bei Kontakt mit Wasser indiziert ist. Auch wurde bei der Nassalterung die Oberfläche bei  $n=20$  Prüfkörperbasen nur mit freeform® bond benetzt. Für die Trockenalterung wurden insgesamt  $n=40$  Prüfkörper hergestellt und zum Scherversuch nur  $n=37$  zugeführt. Bei der Prüfreihe mit der unbehandelten Oberfläche konnten drei Prüfkörper nicht getestet werden. Für die Nassalterung wurden  $n=80$  Prüfkörper hergestellt und erfolgreich getestet.

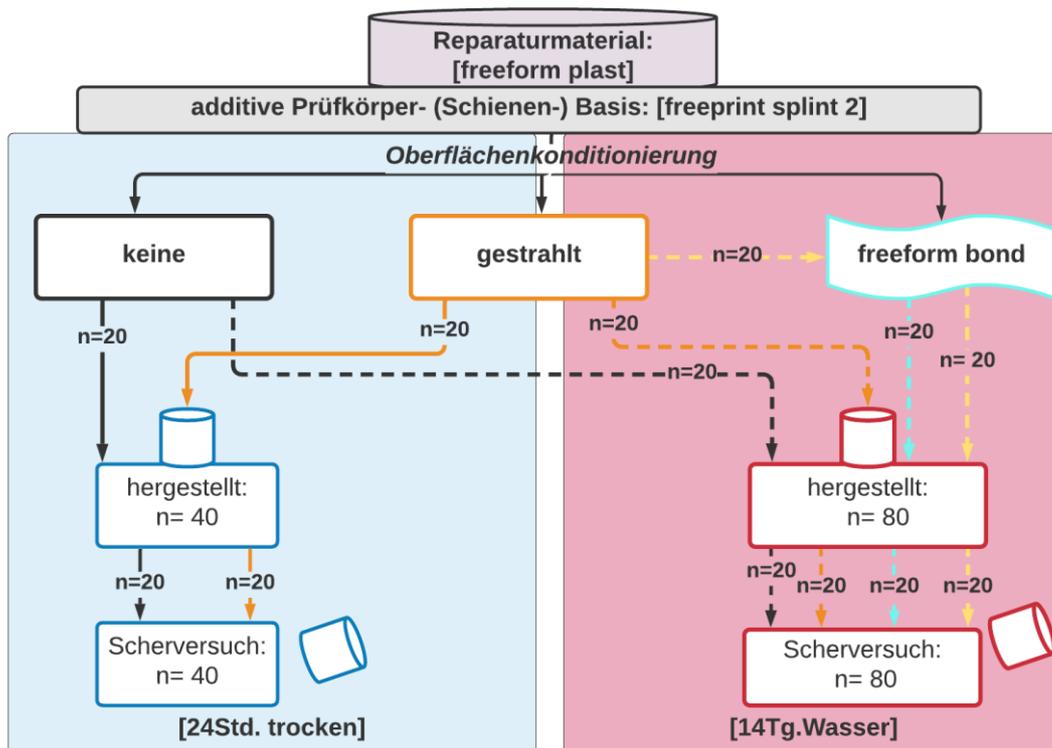


Abbildung 8: Additive Prüfgruppe mit der Prüfkörper- (Schienen-) Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial freeform® plast. Die Oberfläche der Prüfkörperbasen wurde bei beiden Alterungsformen bei jeweils  $n=20$  Prüfkörpern unbehandelt belassen oder gestrahlt. Für die Versuchsreihe mit der Alterungsform [14Tg Wasser] wurden weitere  $n=20$  Prüfkörperbasen zuerst abgestrahlt und im Anschluss mit dem Haftvermittler freeform® bond benetzt, welches laut Hersteller nur bei Kontakt mit Wasser indiziert ist. Auch wurde bei der Nassalterung die Oberfläche bei  $n=20$  Prüfkörperbasen nur mit dem Haftvermittler freeform® bond benetzt. Für die Trockenalterung wurden insgesamt  $n=40$  Prüfkörper hergestellt und zum Scherversuch zugeführt. Für die Nassalterung wurden  $n=80$  Prüfkörper hergestellt und erfolgreich getestet.

Die dreidimensionale Prüfkörper- (Schienen-) Basis- Herstellung sowie die Modifikationen der Alterung und die genaue Durchführung der vorliegenden Studie wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

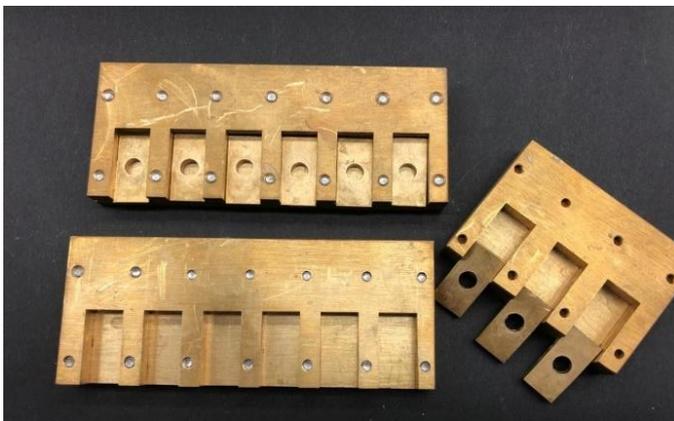
### 2.6.2 Herstellung der Halterungen und Metallplättchen

Für die Herstellung der Zylinder wurden Halterungen aus Messing hergestellt, die der Standardisierung dienten. Zwei große Halterungen (für die Aufnahme

## Material und Methode

---

von sechs Prüfkörperbasen) und eine kleine Halterung (mit drei Aussparungen) wurden hergestellt. Die Aussparungen für die Basis- Aufnahme entsprachen den Dimensionen der Prüfkörperbasis von 20 mm x 10 mm, die Höhe betrug 10 mm, sodass die Prüfkörperbasis und das Metallplättchen für die Zylinderherstellung fixiert werden konnten. Für die Zylinderherstellung wurden Metallplättchen mit einer runden, mittigen Öffnung aus Messing hergestellt. Die mittige Öffnung wurde in die Plättchen gebohrt. Die Bohrung für den Zylinder wies einen Durchmesser von fünf Millimetern bei einer Höhe von 2,5 mm auf. Die Metallplättchen waren 20 mm x 10 mm groß. Die folgende Abbildung (Abbildung 9, Seite 50) zeigt die hergestellten Halterungen aus Messing.



*Abbildung 9: Halterungen aus Messing für die Aufnahme der Prüfkörperbasen. Die drei Halterungen dienen zur Aufnahme der Prüfkörperbasis. In der oberen Halterung sind die Metallplättchen mit der mittigen Bohrung in die Aussparungen eingesetzt. Die Halterung unten wurde ohne Metallplättchen abgebildet, um die Aussparungen besser abzubilden. Rechts ist die kleine Halterung mit Metallplättchen.*

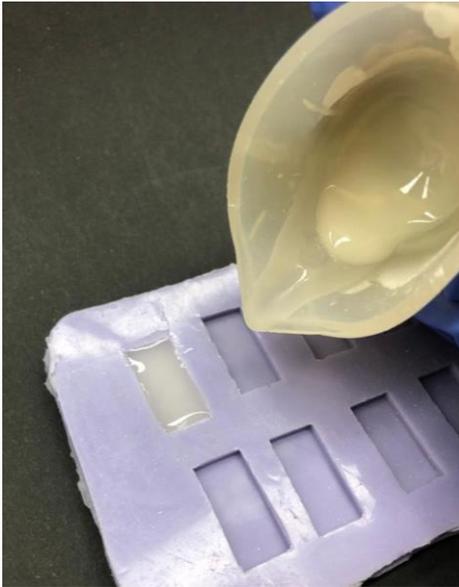
### 2.7 Durchgeführte Versuchsreihen

#### 2.7.1 Basisherstellung der Kontrollgruppe

Bei der Kontrollgruppe bestand die Prüfkörper- (Schiene-) Basis aus Palapress®. Als Reparaturmaterial wurde auch Palapress® verwendet und als Zylinder angefügt. Dabei wurde ein Formteil aus Silikon für die Herstellung der Basis genutzt. Für die Herstellung des Formteils wurden mit Hilfe von CAD und CAM zunächst zehn Prüfkörperbasen mit dem aus der ISO- Norm 10477 (2018) geforderten Maßen konstruiert und additiv mit dem 3D- Drucker hergestellt. Diese wurden auf einer Kunststoffschale in zwei Reihen angeordnet und am Rand punktuell mit Klebewachs fixiert. Danach wurde die Kunststoffschale mit den fixierten Prüfkörperbasen vorsichtig mit flüssigem Silikon (Dubisil® 30, Dreve Dentamid GmbH, Unna, Deutschland; Lot. Nr.: 901659, 002693 Haltbarkeit: 2021-01, 2022-02) aufgefüllt. Nach dem Aushärten des Silikons wurde das Formteil aus der Kunststoffschale entnommen, die gedruckten Prüfkörperbasen wurden entfernt. Feine Silikonfahnen wurden mit einem scharfen Skalpell entfernt. Somit konnte dieses Negativformteil für die konventionelle Herstellung der PMMA- Basis der Kontrollgruppe genutzt werden. In einem Silikon- Anmisch- Becher wurde wie in Kapitel 2.3.1 auf Seite 38 beschrieben PMMA abgewogen und angemischt. Die Negativform für die Herstellung der Basis wurde mit PMMA aufgefüllt und mit einem Spatel glattgestrichen. Die Aushärtung erfolgte im Drucktopf (Dreve, Unna, Deutschland) bei 55° Celsius und zwei bar Druck für 20 Minuten. Insgesamt n= 40 Prüfkörperbasen wurden aus PMMA hergestellt. Davon wurden n= 20 Prüfkörperbasen nach der Herstellung für 24 Std. bei 23° C trocken gelagert. Weitere n= 20 Prüfkörperbasen wurden für 14 Tage in destilliertem Wasser im Brutschrank (Heraeus Instruments, Bad Grund, Deutschland) bei 37° C gealtert. Nach diesen zwei Alterungsformen wurde die Oberfläche der PMMA- Prüfkörperbasen konditioniert. Bei der Kontrollgruppe wurde als Goldstandard die Oberfläche gestrahlt und mit Monomer benetzt. Dabei wurde die Konditionierung der Oberfläche auf die gleiche Art und Weise durchgeführt wie bei den additiv hergestellten Basen. In den folgenden Kapiteln wird die

Vorgehensweise der Alterung und Zylinderherstellung mit den Reparaturmaterialien näher erklärt.

Die nachstehende Abbildung (Abbildung 10, Seite 52) zeigt die Herstellung der konventionellen Prüfkörperbasen aus Palapress®.



*Abbildung 10: Herstellung der konventionellen Prüfkörper- (Schiene-) Basis aus Palapress® mit Hilfe eines Formteils. Dargestellt ist die Negativform aus Silikon mit den entsprechenden Aussparungen für die Prüfkörper- (Schiene-) Basis. Dieses Silikon- Formteil wurde für die Herstellung der Prüfkörper- (Schiene-) Basen aus Palapress® verwendet. Dabei wurde der an- gemischte Kunststoff in die Form gefüllt und im Anschluss im Drucktopf auspolymerisiert. In der Abbildung befindet sich im Silikon- Anmisch- Becher das PMMA im noch nicht auspolymerisierten und plastischen Zustand. Eine Aussparung ist bereits aufgefüllt mit PMMA. In die zweite Aussparung wird der Kunststoff gefüllt.*

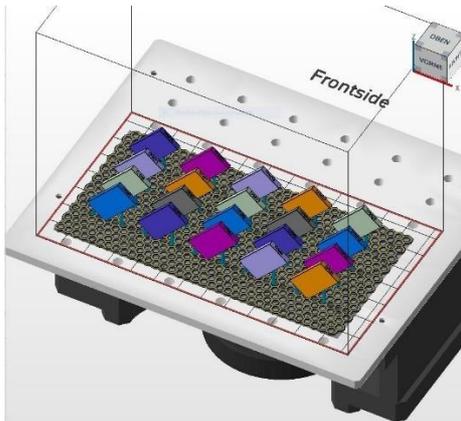
### 2.7.2 Basisherstellung der additiven Prüfgruppe

In Anlehnung an die ISO- Norm 10477 (2018) wurde für die additiv hergestellten Versuchsgruppen virtuell am Computer mit einer entsprechenden Software die Prüfkörperbasis konstruiert. Für die Planung der Basen wurde die Software (Autodesk® Fusion 360, Autodesk Inc., Farnborough, Hampshire, England) verwendet. Bei der digitalen Konstruktion wurden die geforderten

Parameter aus der ISO- Norm 10477 übernommen. Die CAD Konstruktion wurde 20 Mal digital dupliert. Bei der Verteilung auf der Bauplattform wurden fünf Prüfkörperbasen in der Länge und vier in der Breite aufgestellt und entsprechend der Reihenfolge nummeriert. Anhand dieser Anordnung und Nummerierung hatte jede Prüfkörperbasis in den verschiedenen Versuchsreihen die gleiche Position auf der Bauplattform des Druckers.

An jede Prüfkörperbasis wurden vier Stützkonstruktionen hinzugefügt. Diese Stützkonstruktionen oder auch sogenannte Supportstrukturen sind für den Materialaufbau während dem Druckvorgang notwendig. Die Prüfkörperbasen wurden dabei bei einem 45°Winkel zur der Bauplattform ausgerichtet. Dieser Winkel entspricht der Schienenausrichtung beim 3D- Druck im hauseigenen Zahntechnischen Labor. Ein 45 °Winkel wurde als Druckparameter ausgewählt, da Studien belegen, dass die Genauigkeit der gedruckten Objekte bei dieser Anordnung am höchsten ist [110]. Als Material für die 3D- gedruckte Prüfkörper-Basis wurde das druckbare Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV verwendet. Für jede Versuchsgruppe wurden n= 20 Prüfkörper- (Schienen-) Basen statt der geforderten fünf Prüfkörperbasen virtuell konstruiert, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu unterstützen. Nachdem das Computer-unterstützte Design (das sogenannte „Computer aided design“ (CAD)) abgeschlossen worden war, konnten die so generierten STL- Daten an den 3D-Drucker von Rapid Shape D30 II mit Hilfe eines Datenspeichergeräts (Stick) übermittelt werden. Die Materialwanne wurde im Anschluss mit dem Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV befüllt und in die vorgesehene Vorrichtung im 3D- Drucker angebracht. Für den Druckvorgang wurde eine Auflösung von 50 µm verwendet. Der Druck für eine Versuchsreihe mit n= 20 Prüfkörper- (Schienen-) Basen dauerte ca. 45 Minuten. Nach dem Druckvorgang wurden diese Prüfkörper- (Schienen-) Basen nach Herstellerangaben im sogenannten „post-processing“ wie beschrieben in Kapitel 2.3.2 auf Seite 38 nachbearbeitet. Mit diesem Vorgehen wurden insgesamt n= 640 Prüfkörper- (Schienen-) Basen für die additiven Prüfgruppen gedruckt. Im Anschluss an die Basisherstellung wurden diese entsprechend der einzelnen Versuchsreihen gealtert.

Die nächste Abbildung (Abbildung 11, Seite 54) zeigt die digitale Ausrichtung der additiven Prüfkörper- (Schienen-) Basen auf der Bauplattform. Auch ist ein Bild (Abbildung 12, Seite 54) nach dem 3D- Druck einer Prüfgruppe (vor dem Nachbearbeitungsprozess) dargestellt.



*Abbildung 11: Virtuelle Ausrichtung der Prüfkörper- (Schienen-) Basen auf der Bauplattform einer additiven Prüfgruppe mit der Software Autodesk® Fusion 360.  $n=20$  Prüfkörper- (Schienen-) Basen sind auf der Bauplattform (graue, wabenähnliche Struktur) verteilt und im 45° Winkel ausgerichtet. Die Bezeichnung „Frontside“ zeigt die Vorderseite der Bauplattform, auf diese man im 3D- Drucker aus dem Kontrollfenster blicken kann. Der Würfel oben rechts in der Ecke ist eine Orientierungshilfe für die Ausrichtung.*



*Abbildung 12: Hochgefahrte Bauplattform direkt nach dem 3D- Druck mit den Prüfkörper- (Schienen-) Basen im 3D- Drucker Rapid Shape D30 II. Die Prüfkörper- (Schienen-) Basen hängen nach dem Druck von der Bauplattform herunter. Die Stützkonstruktionen sind als kleine Verbindungen an der Bauplattform zu erkennen.*

### 2.7.3 Alterung #1 der Prüfkörperbasis

Die aus der ISO-Norm DIN EN ISO 10477 geforderte Alterung wurde modifiziert. Entsprechend der Zielformulierung wurden zwei verschiedene Alterungsformen untersucht:

- 24 Stunden trocken, bei 23° C: [24Std. trocken]
- 14 Tage Alterung in destilliertem Wasser, bei 37° C [14Tg. Wasser].

Bei der Kontrollgruppe aus PMMA wurden jeweils n= 20 Prüfkörperbasen der trockenen Alterung zugeführt. Weitere n= 20 Prüfkörperbasen wurden nass gealtert.

Bei der additiv hergestellten Versuchsreihe wurden insgesamt n= 280 Prüfkörperbasen der trockenen Alterung zugeführt. Die restlichen n= 340 Prüfkörperbasen wurden der nass gelagerten Alterung zugeführt.

Die trockene Alterung erfolgte bei 23° C für 24 Stunden. Dabei wurden jeweils n= 20 Prüfkörperbasen in schwarzen, lichtgeschützten Flüssigprobenbeuteln (Whirl- Pak® schwarz, HT83.1, Carl Roth GmbH & Co. KG, Karlsruhe, Deutschland) gelagert, um einen möglichen Einfluss der Lichtexposition auszuschließen. Auch wurde auf diese Weise die trockene Alterung der Alterung in Wasser, im Licht- Geschützten Brutschrank angepasst.

Die nass gelagerten Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurden für 14 Tage in destilliertem Wasser (H<sub>2</sub>O dest.) bei 37° C gealtert. Jeweils n= 20 Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurden in eine Petrischale gelegt und mit destilliertem Wasser randvoll gefüllt. Die Petrischalen wurden mit entsprechenden Glasdeckeln verschlossen und in einen Brutschrank (B6030, Heraeus Instruments, Bad Grund, Deutschland) gelegt. Jeden Tag erfolgte eine Sichtkontrolle der Prüfkörperbasen hinsichtlich der Benetzung mit Wasser. Es wurde darauf geachtet, dass die Prüfkörperbasen vollständig vom Medium benetzt wurden.

### 2.7.4 Oberflächenkonditionierung

Unmittelbar nach diesem Alterungsprozesses (Alterung #1) wurde die Oberfläche der Prüfkörperbasen konditioniert. Die in Wasser gealterten Prüfkörper wurden mit einem sanften Luftstrahl für 60 Sek. getrocknet.

Folgende Oberflächenkonditionierungen wurden untersucht, um eine mögliche Beeinflussung der Verbundfestigkeit zu ermitteln:

- keine
- gestrahlt (die Oberfläche wurde mit Aluminiumoxid Edelkorund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) mit einer Korngröße von 125  $\mu\text{m}$ , bei drei Bar Druck für 10 Sekunden gestrahlt)
- monomer (die Oberfläche wurde mit Monomer benetzt)
- gestrahlt + monomer (die Oberfläche wurde gestrahlt mit  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Korngröße 125  $\mu\text{m}$ , 3 Bar Druck für 10 Sekunden) und für 30 Sekunden mit Monomer benetzt)
- je nach verwendetem Reparaturmaterial wurde der entsprechende Haftvermittler mit und ohne Abstrahlen mit Aluminiumoxid Edelkorund (Korngröße 125  $\mu\text{m}$ , 3 Bar Druck für 10 Sekunden) verwendet.

Die Entscheidung der unterschiedlichen Vorbehandlungsmethoden wurde im Vorfeld aus der klinischen Fragestellung abgeleitet, die Herstellerempfehlungen wurden in die Studie miteinbezogen.

### 2.7.4.1 Oberflächenkonditionierungen der additive Prüfgruppen

Eine Übersicht der Oberflächenkonditionierung der additiv hergestellten Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurde für beide Alterungsformen erstellt und mit den folgenden zwei Abbildungen (Abbildung 13, Seite 57 und Abbildung 14, Seite 58) dargestellt. Dabei steht in der ersten Bahn die Prüfkörperbasis (Bezeichnung [freeprint splint 2]), die zur Alterung #1 (graue bahn) führt. Die Trockenalterung (blau) wurde als [24Std. trocken] bezeichnet, die Nassalterung (rot) als [14Tg. Wasser]. Danach ist die Art der Oberflächenkonditionierung (Bezeichnungen [keine], [gestrahlt], [monomer], [primostick] und [freeform bond]) aufgeführt. Dieser Bahn folgen die verwendeten Reparaturmaterialien (dargestellt als Zylinder). Die Prüfkörper werden danach der Alterung #2 (grau) und zum Scherversuch (gelb) zugeführt. Die Anzahl (n) der Prüfkörper wird je nach Art der Konditionierung mit unterschiedlichen Pfeilen abgebildet (grün für [keine], orange für [gestrahlt], türkis für [monomer], [primostick], [freeform bond] und gelb für die Kombination aus Strahlen und Haftvermittler/ Monomer.

## Material und Methode

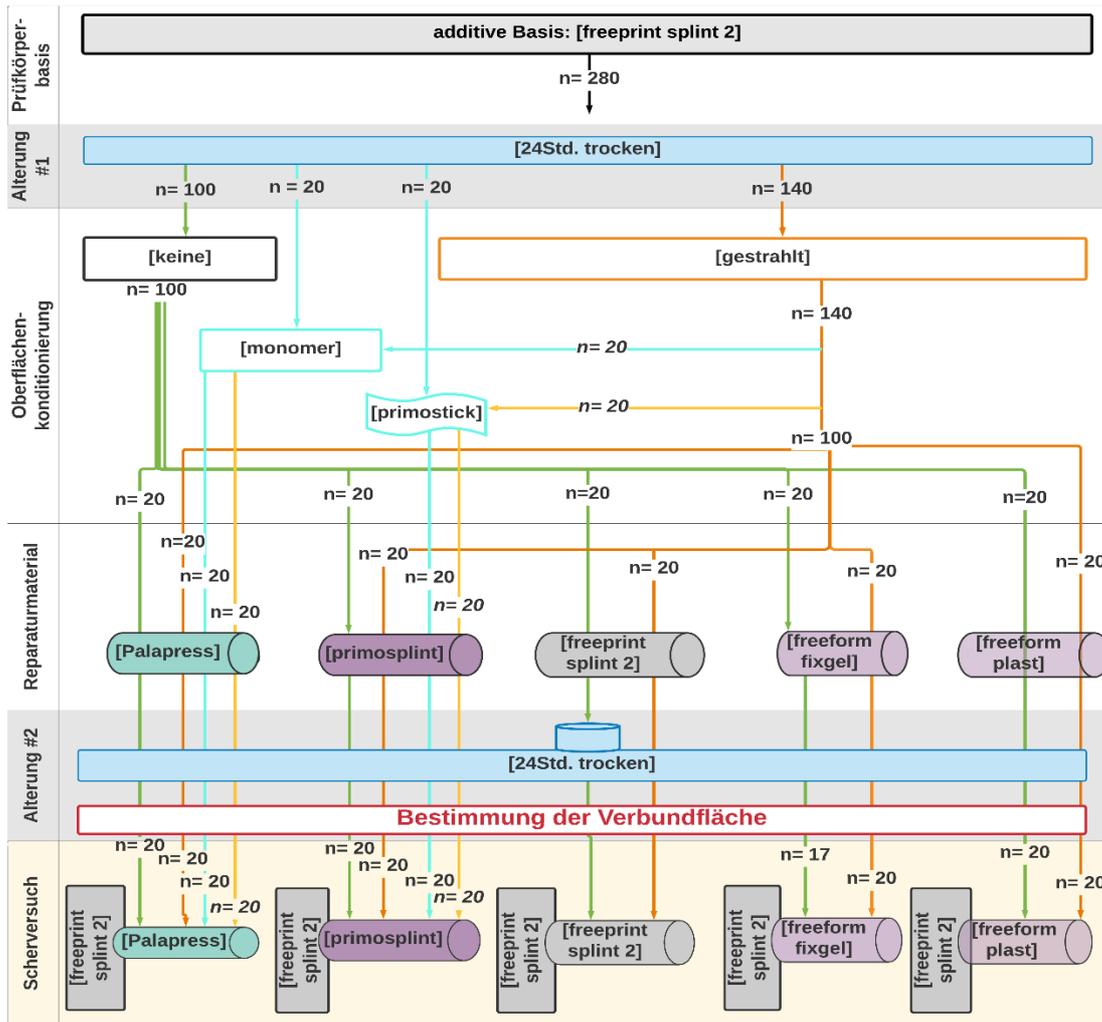


Abbildung 13: Oberflächenkonditionierungen der additiven Prüfgruppen bei der Alterung [24Std. trocken]. Die einzelnen Bahnen führen die Versuchsschritte von oben nach unten auf. Die Anzahl (n) bei den entsprechenden Schritten sind in den jeweiligen Pfeilen. Die erste Bahn zeigt die Prüfkörperbasis mit n=280. In der folgenden Bahn sind die Oberflächenkonditionierungen [keine], [gestraht], [monomer] und [primostick] aufgeführt. Je nach Art der Konditionierung haben die Pfeile unterschiedliche Farben. Die Reparaturmaterialien werden als Zylinder dargestellt. Nach der Alterung #2 wurde die Verbundfläche bestimmt und die Prüfkörper zum Scherversuch zugeführt.

## Material und Methode

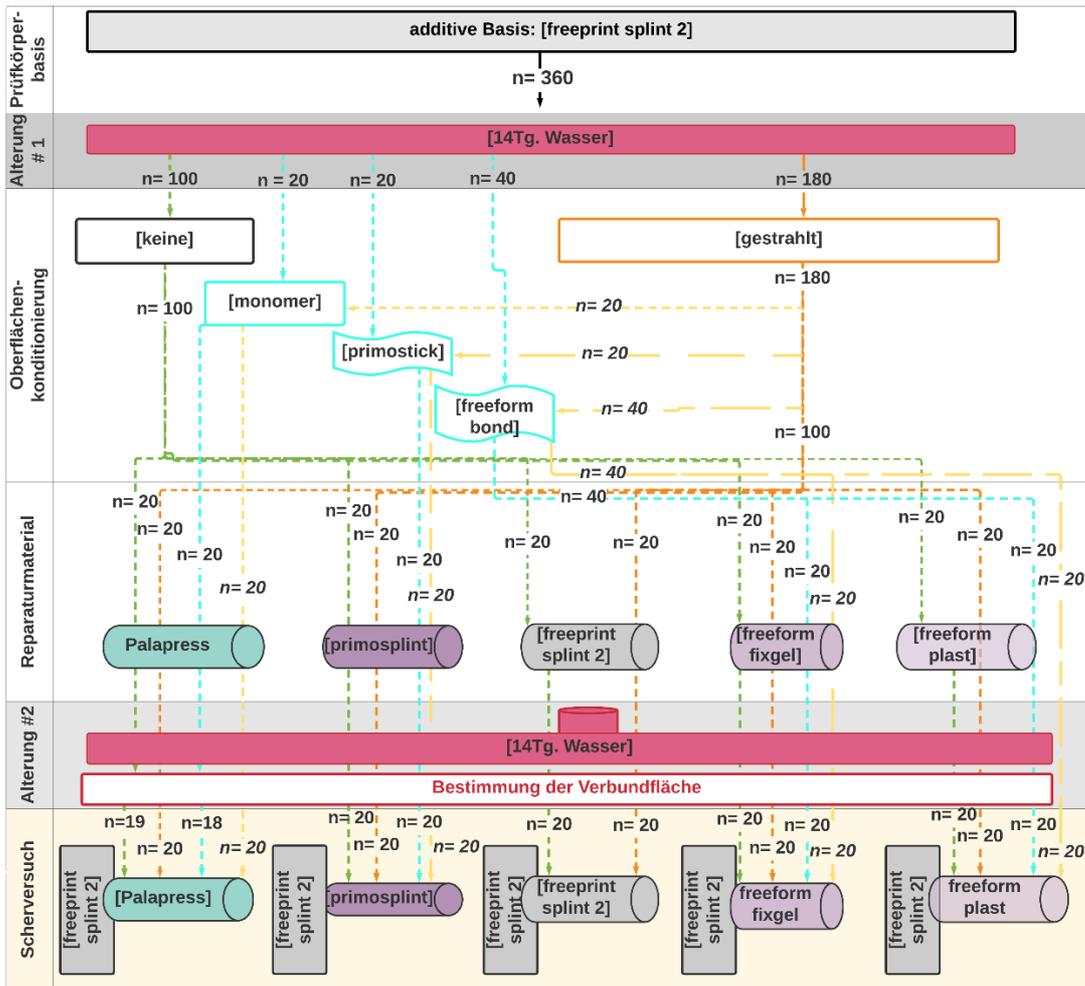


Abbildung 14: Oberflächenkonditionierungen der additiven Prüfgruppen bei der Alterung [14Tg. Wasser]. Die erste Bahn zeigt die Prüfkörperbasis mit  $n=360$ . In der folgenden Bahn sind die Oberflächenkonditionierungen [keine], [gestraht], [monomer] und [primostick] aufgeführt. Bei der Alterung in Wasser wurde der Haftvermittler [freeform bond] zusätzlich untersucht. Die Anzahl ( $n$ ), der für jede Art der Konditionierung zugeführten Prüfkörper, steht in den jeweiligen Pfeilen. Die Reparaturmaterialien werden wiederholt als Zylinder dargestellt. Nach der Alterung #2 wurde die Verbundfläche bestimmt und die Prüfkörper zum Scherversuch zugeführt.

### 2.7.4.2 unbehandelte Oberfläche: [keine]

Die Oberfläche von n= 100 Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurde nach der trockenen Alterung unbehandelt belassen. Auch wurden insgesamt n= 100 Prüfkörper- (Schienen-) Basen nach der Alterung in destilliertem Wasser ohne Oberflächenkonditionierung der folgenden Zylinderherstellung zugeführt. Dabei wurden für jedes Reparaturmaterial n= 20 Prüfkörperbasen zugeordnet. Nach Anfügen der Reparaturmaterialien wurden die Prüfkörper der Alterung #2 zugeführt.

### 2.7.4.3 Strahlen: [gestrahlt]

Um das Bestrahlen der Oberfläche zu standardisieren, wurde eine Schablone digital am Computer konstruiert und mit Hilfe des 3D- Druckers von Rapid Shape, D30 II (Rapid Shape GmbH; Generative Production Systems, Heimsheim, Deutschland) gedruckt. Dabei wurden die Längen- und Breitenverhältnisse der Prüfkörperbasen von 20 mm x 10 mm x 2 mm aus der ISO- Norm 10477 (2018) übernommen. Auch wurde die Öffnung für die Zylinderherstellung übernommen. Der Durchmesser der runden Öffnung entsprach der des Zylinders mit einem Durchmesser von fünf Millimetern. Mit der Planungssoftware (Autodesk® Fusion 360, Autodesk Inc., Farnborough, Hampshire, England) wurden insgesamt fünf Schablonen virtuell geplant und additiv gedruckt. Als Material wurde ein flexibles dreidimensional druckbares Material (Photopolymer Resin Flexible, Formlabs, Inc., Somerville, Massachusetts, USA) verwendet. Diese Schablone wurde vor dem Strahlen auf die Prüfkörperbasis bündig positioniert und mit einer Klemme fixiert. Somit entsprach die mittige Öffnung der Schablone der Position der angefügten Zylinder.

Für das Strahlen wurde das Sandstrahlgeräte P-G 400 (Harnisch- Rieht GmbH & Co., Winterbach, Deutschland) verwendet. Als Medium wurde ein Aluminiumoxid Edelkorund (Cobra Strahlmittel, Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) verwendet. Die Korngröße betrug 125 µm. Die Prüfkörper- (Schienen-) Basen mit fixiertem Formteil/ Schablone wurde mit einem Abstand von fünf Millimetern zur Düse positioniert. Dieser Abstand konnte durch einen

## Material und Methode

Zahnstocher standardisiert werden. Dieser wurde zunächst an die Düse des Strahlgeräts mit einem Klebeband fixiert und danach auf eine Länge von drei Millimetern (ab der Düsenöffnung) abgemessen und gekürzt. Somit ergab die Höhe der Schablone von zwei Millimetern und die Länge des Zahnstochers von drei Millimetern einen Abstand der Düse zur gestrahlten Oberfläche von fünf Millimetern. Eine Stoppuhr wurde auf 10 Sekunden eingestellt. Die freie Oberfläche konnte somit mit Aluminiumoxid Edelkorund mit drei bar Druck gestrahlt werden. Dabei wurden die Prüfkörperbasen vertikal zur Düse hin positioniert. Die Düse wurde beim Vorgang im Uhrzeigersinn bewegt. Die folgende schematische Darstellung (Abbildung 15 auf Seite 60) zeigt den Vorgang des Strahlens.

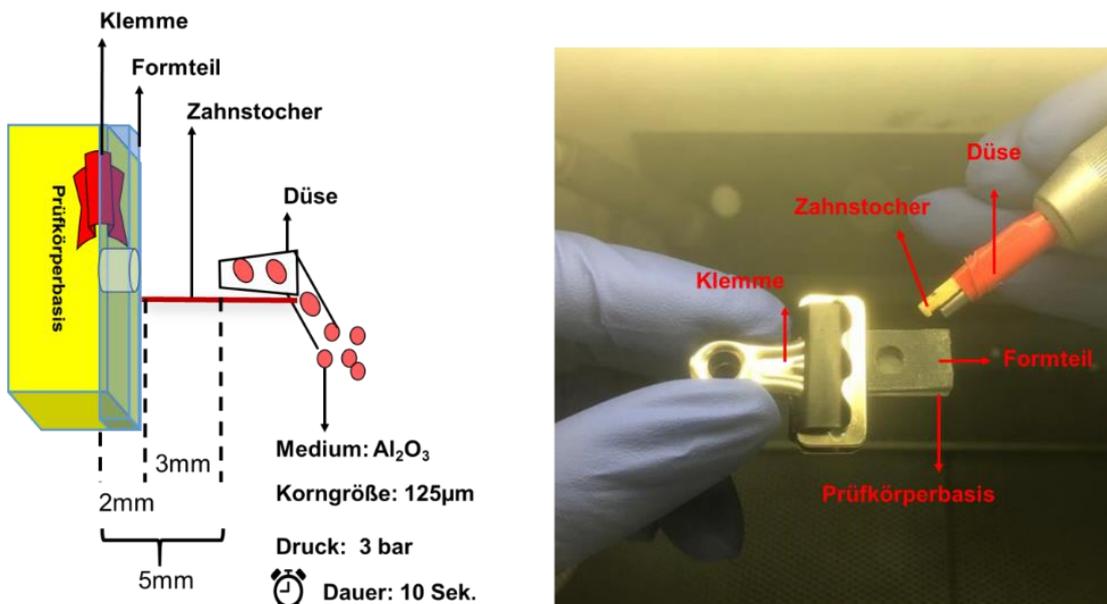
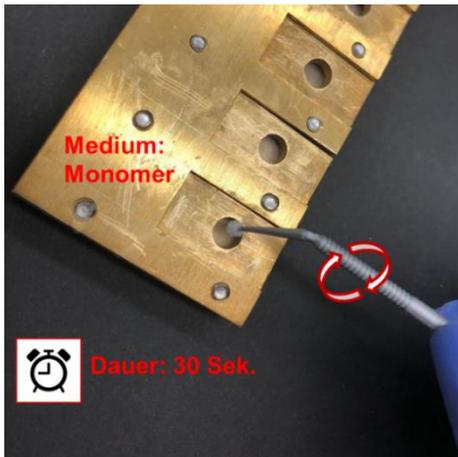


Abbildung 15: Darstellung zum Strahlen der Oberfläche der Prüfkörper- (Schienen-) Basis. Links schematisch, rechts mit einer fotografischen Abbildung. Die Darstellung links zeigt die gedruckte Prüfkörper- (Schienen-) Basis in Gelb. Das Formteil/ die Schablone (blau) mit der mittigen runden Öffnung wurde auf die Prüfkörperbasis mit einer Klemme fixiert. Die Schablone hatte eine Höhe von 2 mm. An die Düse wurde ein Zahnstocher mit Klebeband fixiert und ab der Düsenöffnung auf 3 mm gekürzt. Das Ende des Zahnstochers wurde beim Strahlen an die Schablone in Kontakt gebracht. Das Strahlen erfolgte durch die Öffnung bei 3 bar Druck mit Aluminiumoxid Edelkorund (Korngröße: 125  $\mu\text{m}$ ) für 10 Sekunden.

Das Strahlen der Oberfläche wurde bei allen verwendeten Reparaturmaterialien durchgeführt. Dabei wurde die Oberfläche von insgesamt n= 320 Prüfkörperbasen gestrahlt. Davon waren n= 140 Prüfkörperbasen für 24 Std. trocken gelagert und n= 180 Prüfkörperbasen für 14 Tg. in destilliertem Wasser gelagert. Die Differenz ergibt sich aus der Fragestellung der Studie. Die Hersteller des freeform® kit` s empfehlen das Strahlen und im Anschluss das Benetzen der angerauten Oberfläche mit dem Haftvermittler freeform® bond nur bei bereits benutzten Schienen. Daher wurde in dieser Studie diese Form der Konditionierung [gestrahlt + freeform bond] nur bei der in Wasser gealterten Gruppe angewendet. Nach dieser Oberflächenkonditionierung wurden die Reparaturmaterialien angefügt.

#### 2.7.4.4 Monomer- Benetzung: [monomer]

Die Konditionierung der Oberfläche mit Monomer- Flüssigkeit wurde für die Gruppe mit dem Reparaturmaterial aus Palapress® verwendet. Hierfür wurde ein Dental- Einmal- Applikator (REF 88957 Silber, Omnibrush, OMNIDENT Dental- Handelsgesellschaft mbH, Rodgau, Deutschland) in Monomer von Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) getränkt. Mit diesem Einmal- Applikator auch „Microbrush“ genannt wurde die Oberfläche der Prüfkörper- (Schienen-) Basis für 30 Sekunden eingerieben. Dabei wurde der Applikator leicht im Uhrzeigersinn bewegt. Für die Standardisierung wurde zuvor die Prüfkörperbasis in die Halterung zur Fixierung gelegt. Das entsprechende Metallplättchen für die Zylinderherstellung wurde auf die Prüfkörperbasis gelegt und fixiert. Somit entsprach die benetzte Oberfläche der Oberfläche, auf die der Zylinder später angefügt wurde. Die Dauer der Benetzung betrug 30 Sekunden. Die Monomer- Benetzung ist in der Abbildung 16 auf Seite 62 dargestellt.



*Abbildung 16: Darstellung der Monomer- Benetzung der Prüfkörper- (Schienen-) Basis mit einem Einmal- Applikator. Die Prüfkörperbasis wurde zur Fixierung in die Halterung aus Messing gelegt. Auf die Prüfkörperbasis wurde ein Metallplättchen mit der mittigen Bohrung gelegt. Die Benetzung mit Monomer- Flüssigkeit erfolgte im Uhrzeigersinn für 30 Sekunden.*

Die Oberflächenkonditionierung mit Monomer wurde bei insgesamt  $n=40$  Prüfkörperbasen durchgeführt. Davon waren  $n=20$  Prüfkörperbasen für 24 Std. trocken gelagert und  $n=20$  für 14 Tage in destilliertem Wasser (siehe Kapitel 2.7.3). Im Anschluss wurden an diesen Prüfkörpern Zylinder aus PMMA angefügt.

#### 2.7.4.5 Strahlen und Monomer- Benetzung: [gestrahlt + monomer]

In dieser Gruppe wurden die Prüfkörperbasen zuerst, wie in Kapitel (2.7.4.3, Seite 59) beschrieben, gestrahlt und im Anschluss mit Monomer (siehe Kapitel 2.7.4.4, Seite 61) benetzt. Diese Art der Oberflächenkonditionierung wurde für das Reparaturmaterial aus PMMA bei den additiv hergestellten Prüfkörperbasen und der konventionell hergestellten Kontrollgruppe durchgeführt. Bei den additiv hergestellten, 3D- gedruckten Basen wurde die Oberfläche von insgesamt  $n=40$  Prüfkörperbasen gestrahlt und mit Monomer benetzt. Davon war die Hälfte für 24 Std. bei  $23^{\circ}\text{C}$  trocken gelagert, die andere Hälfte für 14 Tage in destilliertem Wasser (bei  $37^{\circ}\text{C}$ ). Auch wurden bei der Kontrollgruppe  $n=20$  Prüfkörperbasen nach der Oberflächenkonditionierung zu den jeweiligen Alterungsformen zugeführt.

### 2.7.4.6 Haftvermittler primostick®: [primostick]

Das primostick® wurde für das Reparaturmaterial primosplint® verwendet. Insgesamt n= 40 additiv hergestellte Prüfkörperbasen wurden hierfür verwendet. Jeweils n= 20 Prüfkörperbasen wurden nach der Alterung für 24 Std. trocken oder für 14 Tage in Wasserlagerung (H<sub>2</sub>O dest.) zur Fixierung in die Halterung eingesetzt. Das Metallplättchen mit der mittigen Bohrung wurde auf die Prüfkörperbasen gelegt. Danach wurde primostick® in einer lichtgeschützten Box auf einen Applikator gegeben. Die freie Oberfläche der Basis wurde mit diesem Applikator für 30 Sekunden eingerieben. Im Anschluss wurde der Haftvermittler durch die Öffnung des Metallplättchens mit einem Lichthärtegerät (Elipar™ TriLight Lichthärtegerät; 3M ESPE AG Dental Products, Seefeld Deutschland) mit einer Wellenlänge von 400 nm für zwei Minuten lichtgehärtet.

### 2.7.4.7 Strahlen und primostick®: [gestrahlt + primostick]

Auch wurde die Kombination aus Strahlen und Auftragen von primostick® untersucht. Diese Form der Oberflächenkonditionierung wurde bei der Gruppe verwendet, die im Anschluss mit dem Reparaturmaterial primosplint® bearbeitet wurde. Jeweils n= 20 Prüfkörperbasen wurden aus beiden Alterungsformen wie in Kapitel 2.7.4.3 auf Seite 59 gestrahlt und im Anschluss wie oben beschrieben mit dem Haftvermittler primostick® konditioniert.

### 2.7.4.8 Haftvermittler freeform® bond: [freeform bond]

Nach Herstellerangaben ist das Auftragen von freeform® bond als Haftvermittler notwendig, wenn das gedruckte Objekt Kontakt mit feuchtem Milieu hatte. Daher wurde das freeform® bond nur bei der Gruppe verwendet, die für 14 Tage in destilliertem Wasser gealtert wurde. Dieser Haftvermittler wurde in den entsprechenden Versuchsreihen für das Reparaturmaterial freeform® fixgel oder freeform® plast verwendet. Das Auftragen erfolgte analog wie in Kapitel 2.7.4.6 (Seite 63) beschrieben nur mit dem Unterschied, dass hier der Haftvermittler freeform® bond nach dem Einreiben für 30 Sekunden für weitere 30 Sekunden einwirkte. Danach wurden die Zylinder aus freeform® fixgel oder

freeform® plast hergestellt. Die Auspolymerisation erfolgte gemeinsam. Dieses Vorgehen erfolgte nach Empfehlung des Herstellers Detax.

### 2.7.4.9 Strahlen und freeform® bond: [gestrahlt + freeform bond]

Die Prüfkörper-(Schiene-) Basen wurden zunächst gestrahlt (siehe Kapitel 2.7.4.3 auf Seite 59) und im Anschluss wurde der Haftvermittler freeform® bond wie oben beschrieben aufgetragen.

### 2.7.5 Zylinderherstellung mit den Reparaturmaterialien

Nach den unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen wurden die entsprechenden Reparaturmaterialien an die Prüfkörper- (Schiene-) Basen angefügt.

Bei der Kontrollgruppe (Basis aus PMMA) wurde als Reparaturmaterial ebenfalls PMMA verwendet.

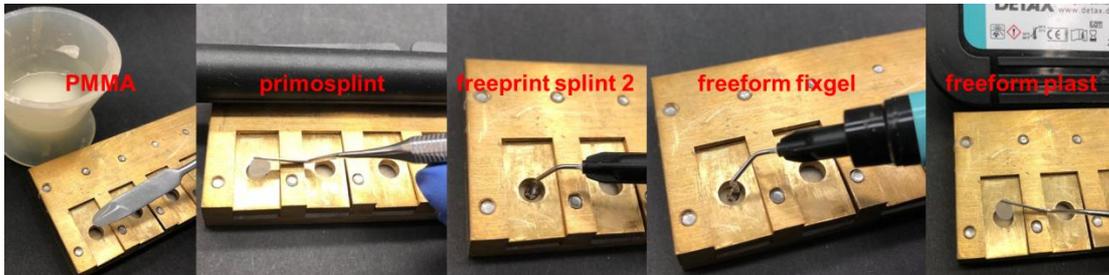
Bei den additiv gedruckten Prüfkörperbasen aus freeprint® splint 2.0 UV wurden folgende Reparaturmaterialien verwendet:

- Palapress® klar
- primosplint®
- freeprint® splint 2.0 UV
- freeform® fixgel
- freeform® plast.

Diese Materialien wurden mit Hilfe der Halterungen aus Messing auf die Prüfkörperbasen angefügt. Die Halterung diente wiederholt dazu, die Prüfkörperbasen in der nummerierten Reihenfolge zu fixieren. Die Prüfkörperbasen wurden hierfür in die dafür vorgesehenen Öffnungen hineingelegt. Für die Zylinderherstellung wurden die Metallplättchen mit der mittigen Bohrung (mit einem Durchmesser von 5 mm und einer Höhe von 2,5 mm) verwendet. Diese Metallplättchen wurden auf die Prüfkörperbasen gelegt. Die Halterung fixierte dabei nicht nur die Prüfkörperbasen, sondern auch das Metallplättchen mit der mittigen Öffnung. Durch diese Öffnung des Metallplättchens wurde das jeweilige Reparaturmaterial nach Herstellerangaben

appliziert und ausgehärtet. Im Anschluss wurde das Metallplättchen entfernt und die Prüfkörper wurden aus der Halterung entnommen.

In der Abbildung 17 (Seite 65) ist eine Halterung mit eingesetzten Prüfkörperbasen dargestellt.



*Abbildung 17: Herstellung und Anfügen der einzelnen Zylinder mit den verschiedenen Reparaturmaterialien auf die Prüfkörper- (Schienen-) Basis. Dargestellt ist von links nach rechts die Zylinderherstellung mit den unterschiedlichen Reparaturmaterialien. Dabei ist als erstes das Reparaturmaterial [Palapress] dargestellt. Die weiteren Reparaturmaterialien [primosplint], [freeprint splint 2], [freeform fixgel] und [freeform plast] sind der Reihe nach, von links nach rechts aufgeführt.*

### 2.7.5.1 Reparaturmaterial Palapress®, klar (PMMA)

Das PMMA wurde nach Herstellerangaben wie in Kapitel 2.7.1, auf Seite 51 beschrieben in einem Silikonbecher gemischt. Nach Erreichen der plastischen Phase wurde mit Hilfe eines Zement-Anmisch-Spatels eine kleine Menge durch die mittige Bohrung des Metallplättchens eingebracht und an der Oberfläche glatt ausgestrichen. Im Anschluss wurde die Halterung mit den Prüfkörperbasen, die mit Palapress®- Zylinder versehen wurden, in einen Drucktopf (Dreve, Unna, Deutschland) gelegt. Die Polymerisation erfolgte bei einer Wassertemperatur von 55° C bei zwei bar Druck für 20 Minuten.

### 2.7.5.2 Reparaturmaterial primosplint®

Das Reparaturmaterial primosplint® wurde mit Hilfe eines Heidemannspatels aus der lichtgeschützten Box in kleinen Mengen entnommen. Aufgrund der knetbaren Konsistenz konnte das Material durch die Öffnung des Metallplättchens durchgedrückt und an der Oberfläche glatt ausgestrichen

werden. Nach der Applikation wurde das Material mit einem Lichthärtegerät (Elipar™ TriLight Lichthärtegerät; 3M ESPE AG Dental Products, Seefeld Deutschland) für 60 Sekunden ausgehärtet. Die Prüfkörper wurden aus der Halterung entnommen, die Metallplättchen entfernt und für die Endpolymerisation nach Herstellerangaben in einem UV-A- Lichthärtegerät (Speed Labolight, Hager & Werken GmbH & Co KG, Duisburg, Germany) für zehn Minuten ausgehärtet.

### 2.7.5.3 Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV

Das druckbare Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV wurde in dieser Studie experimentell auch als Reparaturmaterial verwendet. Aus den Vorversuchen wurde ermittelt, dass eine Lichthärtung mit einem Lichthärtegerät (Elipar™ TriLight Lichthärtegerät; 3M ESPE AG Dental Products, Seefeld Deutschland) möglich war. Das Material wurde in eine Licht- geschützte Spritze aufgezogen und durch die Bohrung des Metallplättchens appliziert. Da das Material sehr flüssig war, wurde während der Applikation einer geringen Schicht von 1 ml eine erste Lichthärtung für 20 Sekunden durchgeführt. Weiteres Material wurde bis zur Oberfläche des Metallplättchens aufgefüllt und für weitere 40 Sekunden auspolymerisiert. Die initiale Lichthärtung erfolgte mit einer Wellenlänge von 400 nm für insgesamt 60 Sekunden mit der Elipar™ TriLight. Um die vollständige Aushärtung zu gewährleisten, wurde nach der Zylinderherstellung, das Metallplättchen entfernt und die Prüfkörper aus der Halterung entnommen. Der Nachbearbeitungsprozess wurde entsprechend der Herstellerangaben nach der Zylinderherstellung durchgeführt (siehe Kapitel 2.3.2 ab Seite 38).

### 2.7.5.4 Reparaturmaterial freeform® fixgel

Das freeform® fixgel wird vom Hersteller bereits in vorgefertigten Applikationsspritzen geliefert. Durch die mittige Bohrung der Metallplättchen wurde das Material auf die Prüfkörperbasis appliziert. Die Oberfläche des Zylinders wurde glattgestrichen. Danach erfolgte die Aushärtung mit einem Lichthärtegerät (Elipar™ TriLight) für 60 Sekunden. Im Anschluss wurden die Prüfkörper aus der Form herausgenommen und die Metallplättchen entfernt.

Eine weitere Aushärtung erfolgte für zehn Minuten in einem UV-A-Lichthärtegerät (Speed Labolight, Hager & Werken GmbH & Co KG, Duisburg, Germany).

### 2.7.5.5 Reparaturmaterial freeform® plast

Das Reparaturmaterial freeform® plast wurde mit einem Heidemannspatel aus der Licht- geschützten Box entnommen. Durch die knetbare Konsistenz konnte das Material durch die mittige Bohrung des Metallplättchens gepresst werden. Die Oberfläche wurde mit dem Spatel glattgestrichen. Die initiale Lichthärtung erfolgte für 60 Sekunden mit dem Lichthärtegerät Elipar™ TriLight. Danach wurden die Prüfkörper aus der Halterung entnommen und ohne Metallplättchen in einem UV-A- Lichthärtegerät (Speed Labolight) für zehn Minuten weiter ausgehärtet.

### 2.7.6 Alterung #2 der Prüfkörper

Nach der Zylinderherstellung mit den Reparaturmaterialien wurden die so fertiggestellten Prüfkörper erneut der gleichen Alterung zugeführt, die sie vor der Oberflächenkonditionierung durchgeführt hatten. Die Alterung erfolgte wiederholt für:

- 24 Stunden trocken, bei 23° C oder für [24Std. trocken]
- 14 Tage in destilliertem Wasser, bei 37° C. [14Tg. Wasser].

Die Vorgehensweise entsprach der Alterung #1 wie in Kapitel 2.7.3 auf Seite 55 beschrieben.

### 2.7.7 Vermessung der Verbundfläche

Um die Verbundfläche zu bestimmen, wurde vor dem Scherversuch, nach der Alterung #2 jeder Prüfkörper unter einem Makroskop WILD M400 (Wild, Heerburg, Schweiz) mit einer 20-fachen Vergrößerung fotografiert. Diese makroskopische Fotodokumentation erfolgte unmittelbar nach der Alterung #2 der Prüfkörper. Dabei wurde der Zylinder mittig in das Bildfeld orientiert und zur Fotolinse ausgerichtet. Mit Hilfe dieser fotografischen Dokumentation wurden die Zylinder vermessen. Dies erfolgte mit der Software Datinf® Measure Version 2.2 (Datinf GmbH, Tübingen, Deutschland). Dabei wurde im ersten Schritt das entsprechende Bild in der Software geöffnet. Mit einer Bildaufnahme eines Lineals, ebenso mit einer 20-fachen Vergrößerung, konnte der Maßstab in der Software kalibriert werden. Hierfür wurde mit dem Bild des Lineals ein Millimeter abgemessen und entsprechend der Pixelanzahl kalibriert. Im zweiten Schritt wurde jeder einzelne Zylinder drei Mal vermessen. Den Flächeninhalt des Zylinders berechnete und zeigte das Programm automatisch an.

Diese so ermittelten Daten wurden in der Software Excel (Version 2010, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) gespeichert. Für die Berechnung der Durchschnittswerte (in mm<sup>2</sup>) wurden diese Daten in eine Datenbank der Statistiksoftware JMP, Version 14 (SAS, Cary, USA) aus der Excel Datei importiert. Der Durchschnitt aus den drei Messungen wurde berechnet. Anhand dieser ermittelten Durchschnittswerte der Verbundfläche konnte im weiteren Verlauf die Verbundfestigkeit berechnet werden.

In Abbildung 18 (Seite 69) wird die Vermessung eines Zylinders dargestellt.

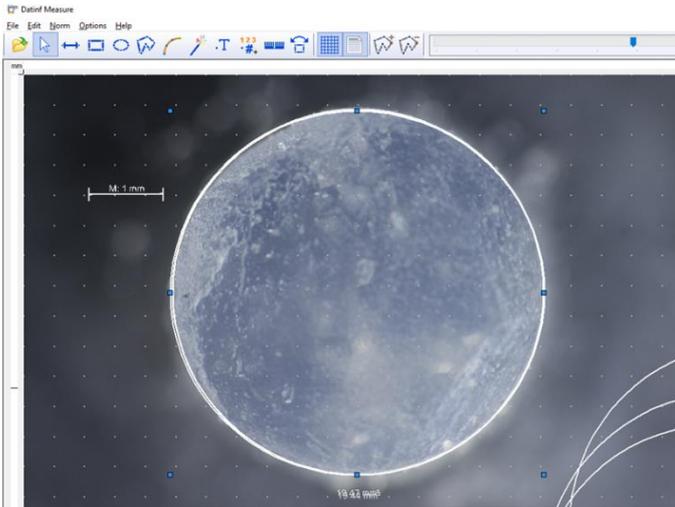


Abbildung 18: Vermessung eines Zylinders in Datinf® Measure Version 2.2. Das Bild der 20-fachen Vergrößerung eines Prüfkörpers wurde in die Software geladen. Nach der Kalibrierung mit einem Lineal des Maßstabes (oben links in der Abbildung ist die Kalibriernorm (M) mit 1 mm dargestellt) erfolgte die Vermessung der Zylinder. Pro Prüfgruppe wurden jeweils drei Vermessungen durchgeführt. Das Programm berechnete daraus automatisch den Flächeninhalt des Zylinders.

### 2.7.8 Scherversuch

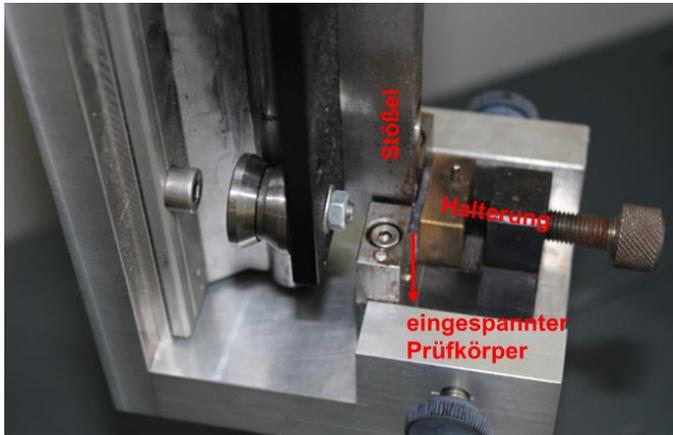
Nach der makroskopischen Fotodokumentation der Prüfkörper erfolgte direkt im Anschluss die Überprüfung der Verbundfestigkeit mit Hilfe des Scherversuchs. Hierfür wurde als Prüfmaschine die Schervorrichtung Zwick Z010/ TN2A (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) genutzt. Dabei wurde der Prüfkörper in die Schervorrichtung so eingespannt, dass der Stößel von der Seite auf den Zylinder auftraf. Der Prüfkörper wurde in die spezielle Haltevorrichtung so eingestellt und festgeschraubt, dass der Zylinder frei in der Halterung eingestellt war. Der Stößel konnte hiermit ungehindert auf den Zylinder treffen und diesen parallel zur Prüfkörper- Oberfläche abscheren. Der Stößel wurde entsprechend der ISO- Norm 10477 (2018) mit folgenden Parametern eingestellt:

- Abstand von 0,5 mm zum Prüfkörper
- Vorschubgeschwindigkeit von einem Millimeter pro Minute.

Während dieses Vorgangs wurde die Kraft gemessen, die bis zum Abscheren des Zylinders notwendig war. Die Daten wurden mit der Prüfsoftware testXpert

V12.0 (Version 12, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) tabellarisch festgehalten.

Die nächste Abbildung 19 (Seite 70) zeigt die Schervorrichtung.



*Abbildung 19: Schervorrichtung Zwick Z010/ TN2A mit eingespanntem Prüfkörper. Der Zylinder wurde auf dieser Abbildung bereits mit dem Stößel von der Basis abgeschert. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug dabei ein Millimeter pro Minute. Der Stößel wurde mit 0,5 mm Abstand zum Prüfkörper eingestellt.*

### 2.7.9 Bruchflächenanalyse

Die abgescherten Prüfkörper wurden erneut mit dem Makroskop bei einer 20-fachen Vergrößerung betrachtet. Die Bruchflächen wurden analysiert. Drei verschiedene Bruchmuster konnten auftreten:

- Kohäsiver Bruch: die Frakturfläche verlief vollständig im Kunstharz der 3D gedruckten Prüfkörper-(Schienen) Basis.
- Adhäsiver Bruch: die Frakturfläche verlief zwischen beiden Werkstoffen. Das hieß, dass die Frakturfläche der Verbundfläche entsprach.
- Mischbruch: die Frakturfläche enthielt sowohl Anteile, die adhäsiv gebrochen waren, als auch Anteile, die kohäsiv gebrochen waren.

Die Daten wurden für jeden Prüfkörper in eine Excel Tabelle eingegeben und dann wiederholt in eine JMP Datenbank importiert. Die Bruchflächenanalyse wurde mit Hilfe von Diagrammen dargestellt, indem die Anzahl der aufgetretenen Bruchmuster aufgezeigt wurde.

### 2.7.10 Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM)

Um Vergleiche über die unterschiedlich vorbehandelten Oberflächen machen zu können, wurden mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops REM LEO 1430 (Carl Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland) Aufnahmen erstellt. Hierfür wurde aus jeder Untergruppe eine Prüfkörperbasis ausgewählt, welche entsprechend konditioniert wurde. Diese wurden besputtet (gold-palladium- Pulver, SCD005, Bal-Tec GmbH, Schalksmühle, Deutschland) und im Bereich der konditionierten Oberfläche mit folgenden Vergrößerungen untersucht:

- 100-fach, 1000-fach, 2500-fach und 5000-fach.

Die Aufnahmen wurden fotografiert und als Dateien in PDF- Version gespeichert. Im Ergebnisteil wurden die Abbildungen der 2500-fachen Vergrößerung dargestellt. Die Kontrollgruppe und additive Versuchsreihe mit der gleichen Oberflächenkonditionierung wurden zusätzlich mit der 1000-fachen Vergrößerung dargestellt.

### 2.7.11 Oberflächenbeschaffenheit

Die Oberflächenbeschaffenheit der Prüfkörperbasis wurde nach der Konditionierung zusätzlich mit der Rauheitsmessung untersucht. Somit konnten untereinander Vergleiche gemacht werden. Mit Hilfe dieser Rauheitsmessung konnten in der Auswertung Aussagen über den Einfluss der unterschiedlichen Verfahren auf die Rauheit und Wellentiefe gemacht werden. Hierfür wurden jeweils drei Prüfkörperbasen aus jeder Versuchsreihe mit dem Perthometer S6P (Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland) vermessen. Die Tastspitze wurde dabei über die Oberfläche der Prüfkörperbasis gefahren. Dabei erfasst die Tastspitze elektronisch die vertikalen Lageverschiebungen und gibt diese ungefiltert als das Primärprofil wieder. Das Primärprofil (P-Profil) wurde dann durch einen Profilter in Welligkeit (das W-Profil) und Rauheit (R-Profil) getrennt. Um das Rauheitsprofil zu ermitteln, wurde vom Primärprofil das Welligkeitsprofil abgezogen.

Die Grenzwellenlänge stellt die Wellenlänge dar, bei welcher eine Welligkeit in Rauheit übergeht. Die Tastspitze hatte an der Spitze einen Durchmesser von 1,25 µm. Das Messfeld wurde in der Mitte des Prüfkörpers mit den

Dimensionen 3 mm x 3 mm festgelegt. Die Messgeschwindigkeit betrug 0,5 mm pro Sekunde. Pro Messfeld wurden n= 121 Profile gemessen, der Abstand zwischen den einzelnen Profilen lag bei 25 µm. Die gemessenen Daten wurden von der Software Perthometer Concept, Version 7.1 (Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland) gespeichert.

Die so ermittelten Daten wurden mit einer weiteren Software Mountainsmap® Universal (Version 7.3, DigitalSurf, Besancon, France) analysiert. Der Gaußfilter wurde auf 0,6 mm eingestellt und das Primärprofil wurde in das R-Profil und W-Profil getrennt. Die so erhaltenen Daten der Rauheit und Welligkeit wurden in einer Excel- Datei abgespeichert. Die statistische Auswertung der pro Prüfgruppe n= 121 gemessenen Profilwerte wurde mit JMP 14 (SAS, Cary, USA) durchgeführt. Die Minimal-/ Maximalwerte und der Mittelwert wurden für jede Alterungsform angegeben. Mit der Software Mountainsmap® Universal wurden auch mit den Daten entsprechende Abbildungen erstellt, welche die Rauheit der Oberfläche dreidimensional wiedergeben. Auch wurde das Rauheitsprofil des mittleren Rauheitsprofils graphisch dargestellt. Um eine Verzerrung des Rauheitsprofils zu vermeiden, wurden die Koordinaten nicht bei jeder Gruppe gleich beschriftet.

Die y- Achse der Prüfgruppe mit der additiv hergestellten Prüfkörperbasis, mit unbehandelter Oberfläche [keine] in Wasserlagerung unterscheidet sich von den anderen Gruppen. Auch ist die y- Achse der additiven Prüfgruppen mit der Oberflächenkonditionierung mit Monomer und Wasserlagerung anders skaliert, um eine Verzerrung des Rauheitsprofils zu vermeiden.

### 2.8 Statistische Auswertung

Die Dokumentierung der Rohdaten der Vermessung der Zylinder, der Kraftmessung beim Scherversuch sowie der Bruchflächenanalyse und der Messungen zur Oberflächenbeschaffenheit erfolgte mit der Software Microsoft Excel Version 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA). Mit Hilfe der Daten der Verbundfläche und der Last beim Bruch konnte die Verbundfestigkeit anhand der folgenden Formel berechnet werden:

- Verbundfestigkeit =  $\frac{F}{A}$

Dabei ist:

- die Verbundfestigkeit in Megapascal (MPa) angegeben,
- F ist die Last, die beim Bruch in Newton gemessen wurde, und
- A die Verbundfläche, angegeben in Quadratmillimetern.

Mit Hilfe der Software JMP, Version 14 (SAS, Cary, USA) wurde die statistische Auswertung durchgeführt. Die statistische Auswertung erfolgte deskriptiv und analytisch.

Deskriptiv sind Lage- und Streuparameter beschrieben worden. Auch wurden Minimal- / Maximal- und der Mittelwert berechnet. Der Median sowie das untere und obere Konfidenzniveau bei 95% wurden angegeben. Die einzelnen Prüfgruppen wurden dann auf die Normalverteilung überprüft. Hierfür wurde der Shapiro- Wilk Test angewendet. Dieser testet die Normalverteilung auf einem Signifikanzniveau von 0,05.

Folgende Annahmen wurden aus dem Shapiro- Wilk Test angenommen:

- Lag ein Wert < 0,05 vor, so war der Shapiro- Wilk Test signifikant und die Materialgruppe war nicht normalverteilt.
- Lag ein Wert > 0,05 vor, wies auf eine Normalverteilung hin.

Die Überschneidungen der Konfidenzintervalle auf dem 95% Niveau gaben dabei eine statistische Signifikanz an:

- Zeigten die Konfidenzintervalle keine Überschneidung auf, so lag ein statistisch signifikanter Unterschied vor. Die Nullhypothese wurde abgelehnt, die Alternativhypothese angenommen.
- Zeigten die Konfidenzintervalle eine geringe Überschneidung auf, so wurden Tendenzen beschrieben.
- Bei einer Überschneidung der Konfidenzintervalle lag kein statistisch signifikanter Unterschied vor, die Nullhypothese wurde nicht abgelehnt.

In Ergänzung dazu wurden die p- Werte herangezogen. Bei der Interpretation mit den p- Werten wurden folgende Aussagen getroffen:

## Material und Methode

---

- Lag ein p- Wert  $< 0,01$  vor, so waren die Unterschiede statistisch hoch signifikant, die Nullhypothese wurde abgelehnt und die Alternativhypothese wurde angenommen.
- Lag der p- Wert  $< 0,05$ , so waren die Unterschiede statistisch signifikant, die Nullhypothese wurde abgelehnt, die Alternativhypothese angenommen.
- Bei p- Werten  $> 0,05$  waren die Unterschiede/ Effekte statistisch nicht signifikant. Die Nullhypothese wurde nicht abgelehnt.

Lag eine Normalverteilung vor, so wurden die einzelnen Effekte mit Hilfe der parametrischen Methode, dem Student's t- Test verglichen und somit der p- Wert berechnet. Wenn jedoch die Testung der Normalverteilung keine Normalverteilung aufzeigte, wurde die statistische Analyse mit nicht-parametrischen Methoden, der Wilcoxon- Methode durchgeführt.

Bei der analytischen Statistik diente die Verbundfestigkeit als Zielgröße. Die Einflussvariablen waren die verschiedenen Materialien, die verschiedenen Prozesse der Alterung sowie die Konditionierung der Oberflächen vor dem Reparaturprozess.

Folgende Analysen sind durchgeführt worden:

- deskriptiv: mit Hilfe von Box- Plots und
- analytisch: die Verbundfestigkeit als Zielvariable wurde unter folgenden Einflussvariablen untersucht: Konditionierung und Alterung.

Grafisch werden die Verbundfestigkeitswerte als Boxplots-Whiskers wiedergegeben. Innerhalb der Box finden sich die Werte zwischen dem unteren und oberen Quartil. Der Medianwert ist durch die Linie innerhalb der Box gekennzeichnet. Die Whiskers markieren die Werte unterhalb und oberhalb der Quartile. Zusätzlich geben violette Linien noch die 10%, 25%, 75% und 90% Quartile an. Die Datenpunkte sind nicht verzerrt dargestellt. Bei der analytischen Statistik werden als grüne Linien die unteren und oberen Konfidenzintervalle wiedergegeben, um gleich optisch mögliche Überschneidungen erkennen zu können.

## Material und Methode

Dabei lagen die Werte der Verbundfestigkeit (in MPa angegeben) auf der y-Achse. Auf der x-Achse wurde entweder die Art der Oberflächenkonditionierung angegeben oder die Alterungsform. Die Skalierung zeigt für alle Prüfgruppen Werte zwischen 0 MPa und 36 MPa, um die Vergleichbarkeit schnell sichtbar zu machen. Die horizontale graue Linie zeigte den gemeinsamen Mittelwert der untersuchten Prüfgruppen dar.

Die nachstehende Abbildung 20 (Seite 75) der Box-Plots führt eine beispielhafte Graphik zur Erklärung der dargestellten Elemente aus der statistischen Auswertung auf.

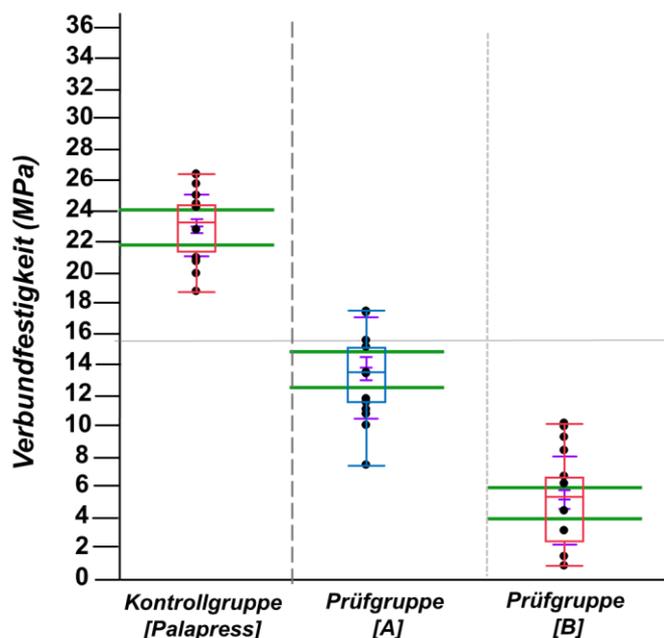


Abbildung 20: Beispiel- Darstellung der statistischen Auswertung mit Box- Plots. Die Verbundfestigkeit (MPa) auf der y- Achse ist in Abhängigkeit der unterschiedlichen Prüfgruppen auf der x- Achse dargestellt. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist mit blauen Box- Plots, die Alterungsform [14Tg. Wasser] mit Roten Box- Plots dargestellt. Die Konfidenzintervalle sind als grüne horizontale Linien abgebildet. Die einzelnen Ergebnisse der Verbundfestigkeit (MPa) sind als Punkte ergänzt. Violette Linien innerhalb der Box- Plots stehen für die 10%-, 25%-, 75%- und 90%- Quartilen. Der gemeinsame Mittelwert aller Verteilungen wird mit der horizontalen grauen Linie dargestellt. Die [Kontrollgruppe Palapress] ist links angeordnet, getrennt mit einer gestrichelten Linie von den additiven Prüfgruppen. Die trockene Alterungsform wird durch eine weitere graue gestrichelte Linie von der Alterung in Wasser optisch getrennt.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 konventionelle Prüfgruppe: Kontrollgruppe Palapress®

#### 3.1.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

##### 3.1.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Alle n= 20 hergestellten Prüfkörper konnten erfolgreich der Testung zur Untersuchung der Verbundfestigkeit zugeführt werden.

Dabei lagen alle Werte der Verbundfestigkeit bei der Kontrollgruppe, die 24Std. trocken gelagert wurde, mit einem Ausreißer zwischen 21,06 MPa und 31,83 MPa. Mit einem Mittelwert von 25,18 MPa war der Box-Plot normalverteilt. Der Median lag bei 24,93 MPa.

- [24Std. trocken]: Shapiro-Wilk Test: 0,6159

Werte siehe Tabelle 10, Seite 203 im Anhang.

##### 3.1.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Alle n= 20 Prüfkörper konnten der Testung zugeführt werden. Die Werte der Verbundfestigkeit lagen zwischen 19,30 MPa und 26,91 MPa. Der Ausreißer lag mit einem Wert von 19,30 MPa im unteren Bereich der Messungen innerhalb dieser Gruppe. Der Median lag bei 23,81 MPa. Der Box-Plot war wie eine Normalverteilung auf:

- [14Tg. Wasser]: Shapiro-Wilk Test: 0,5072

Werte siehe Tabelle 11, Seite 203 im Anhang.

#### 3.1.2 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung

Die Abbildung 21 (Seite 77) zeigt die Box- Plots beider Alterungsformen im Vergleich.

## Ergebnisse

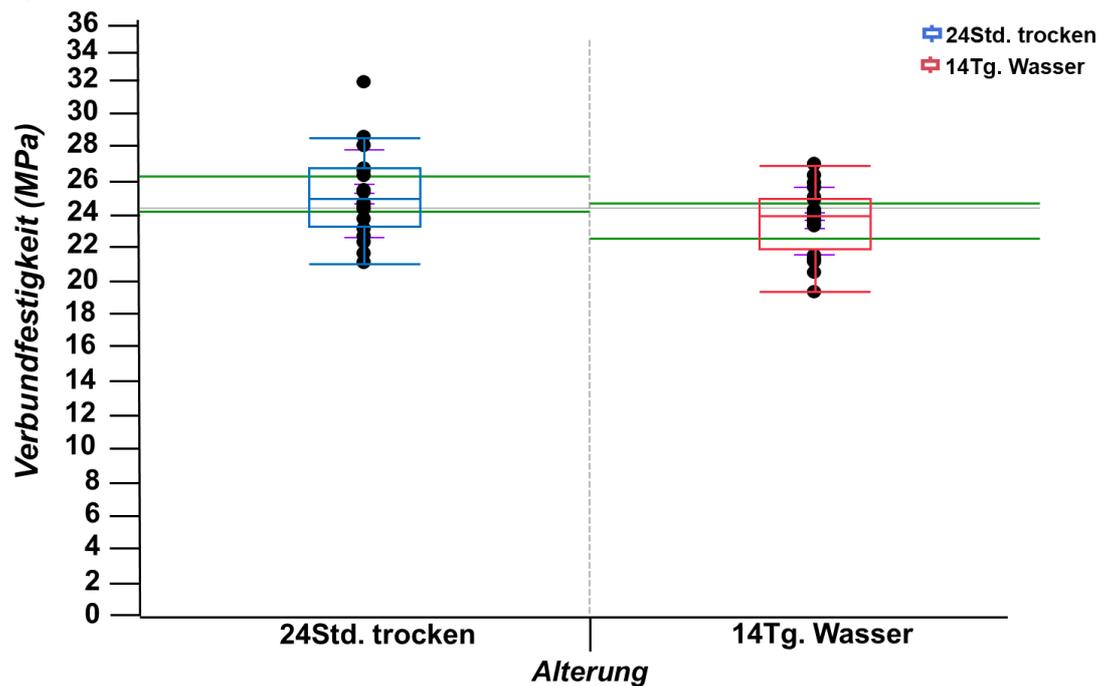


Abbildung 21: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der der konventionellen Kontrollgruppe (Prüfkörperbasis und Reparaturmaterial aus Palapress) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Alterungsformen [24Std. trocken] und [14Tg. Wasser], bei der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer]. Aus der Abbildung ist die geringe Überschneidung der Konfidenzintervalle zu erkennen. Die trockene Alterungsform [24Std. trocken] war in der Tendenz besser als die in Wasser gelagerte Prüfgruppe.

Die Verbundfestigkeitswerte der trockenen Alterungsform waren in der Tendenz derjenigen der Nassalterung leicht überlegen. Eine statistische Signifikanz lag nicht vor.

P- Wert siehe Tabelle 12, Seite 204 im Anhang.

## 3.2 Reparaturmaterial: Palapress® auf additiver Basis

### 3.2.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

Bei beiden Alterungsformen lag eine Normalverteilung vor. Der Shapiro Wilk W Test wurde für  $H_0$  nicht abgelehnt, daher wurde die Auswertung mit der parametrischen Methode (Each Pair Student's t- Test) durchgeführt.

#### 3.2.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Insgesamt  $n=80$  Prüfkörper wurden der Testung der Verbundfestigkeit zugeführt.

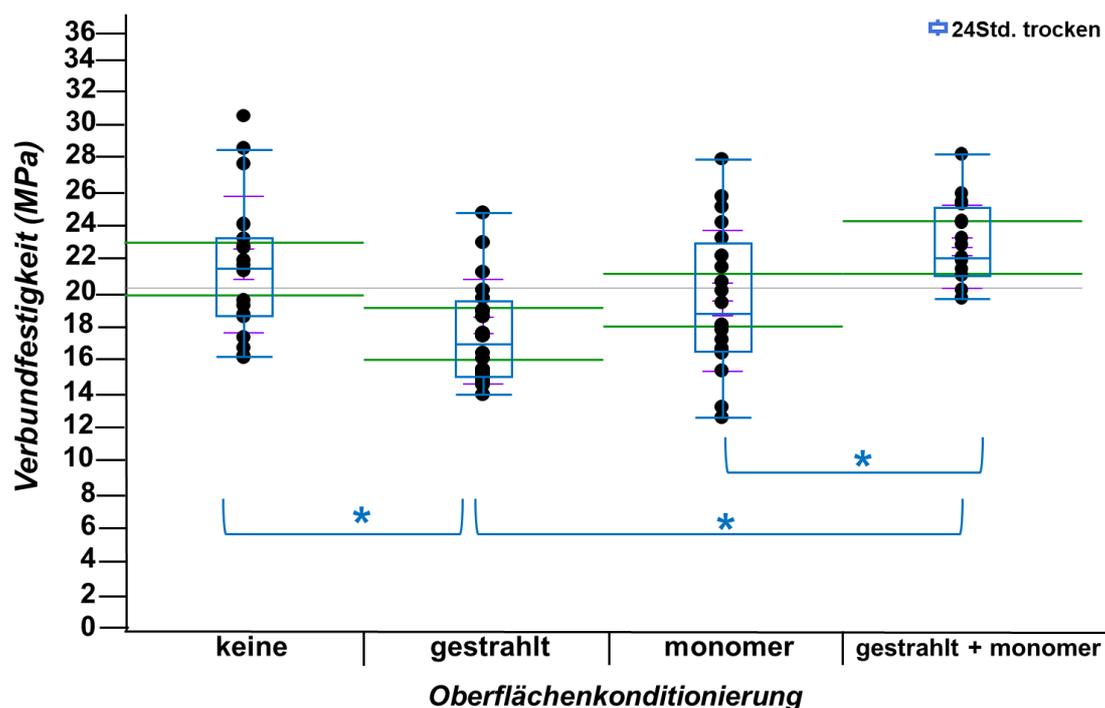


Abbildung 22: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress], bei der Alterungsform [24Std. trocken]. Die unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen wurden miteinander verglichen. Keine Überschneidung zeigten die Konfidenzintervalle zwischen [keine] und [gestrahlt], zwischen [gestrahlt] und [gestrahlt + monomer] sowie zwischen [monomer] und [gestrahlt + monomer]. Diese Prüfgruppen unterschieden sich statistisch signifikant. Diese statistischen Signifikanzen wurden mit blauen Klammern mit Stern abgebildet.

## Ergebnisse

---

Alle Box- Plots zeigten eine Normalverteilung auf. Die Testung der Normalverteilung bei den einzelnen Gruppen war wie folgt:

- [24Std. trocken] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,1642
- [24Std. trocken] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,0659
- [24Std. trocken] + [monomer]: Shapiro-Wilk Test: 0,8441
- [24Std. trocken] + [gestrahlt + monomer]: Shapiro-Wilk Test: 0,1561.

In der Gruppe der Trockenalterung des additiven Schienenmaterials freeprint splint® 2.0 UV mit dem Reparaturmaterial Palapress® zeigten die Verbundfestigkeitswerte in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung Unterschiede auf. Die Konditionierung mit Abstrahlen erreichte die geringsten Werte (Median 16,90 MPa). Die Verbundfestigkeitswerte konnten durch die Verwendung von Monomer (Median 18,72 MPa) und besonders durch Abstrahlen in Kombination mit Monomer (Median 22,00 MPa) gesteigert werden. Eine statistische Signifikanz lag insbesondere zwischen der Gruppe nur mit Abstrahlen und derjenigen der Kombination von Abstrahlen mit Monomer vor. Hier zeigten die Konfidenzintervalle deutlich keine Überschneidungen vor. Dieses Ergebnis konnte auch an den p- Werten abgelesen werden.

Lage- und Streuparameter siehe Tabelle 13, Seite 204 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 14, Seite 205 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.2.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Nicht alle hergestellten Prüfkörper konnten der Testung zur Verbundfestigkeit zugeführt werden. Bei der Gruppe [monomer] wurden n= 18 von n= 20 Prüfkörpern zugeführt. Bei diesen löste sich der Zylinder bereits beim Einspannen in die Testmaschine von der additiv hergestellten Prüfkörperbasis.

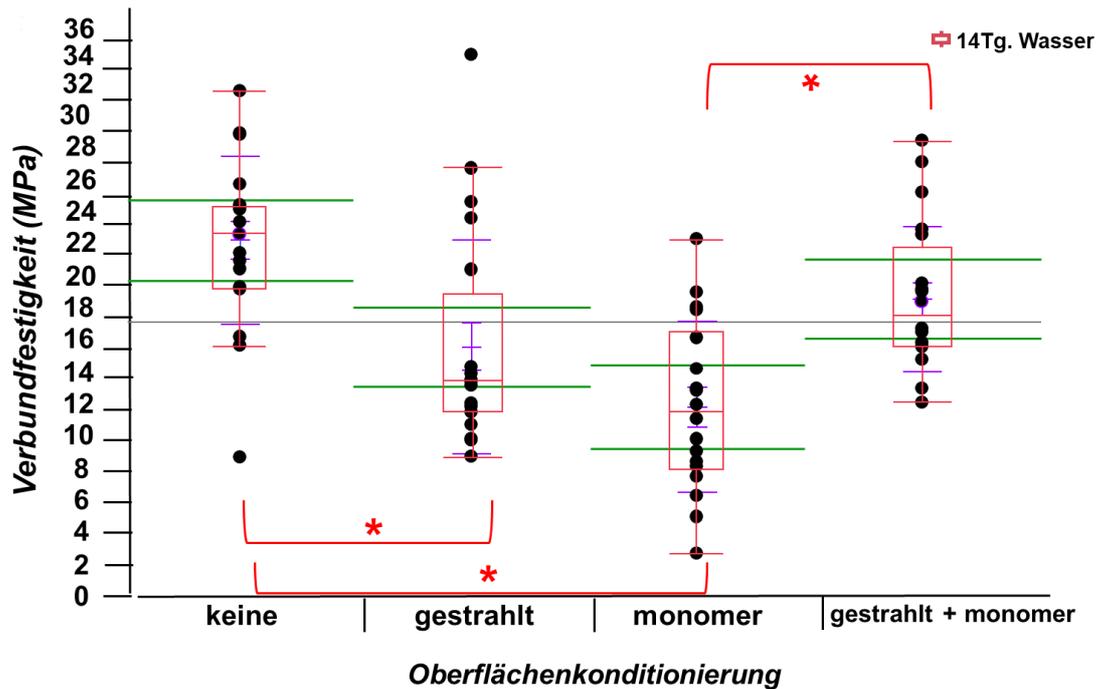


Abbildung 23: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress], bei der Alterungsform [14Tg. Wasser]. Die unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen wurden miteinander verglichen. Die unbehandelte Oberfläche [keine] erreichte statistisch signifikant besser Werte als [gestrahlt] und [monomer]. Mit einer geringen Überschneidung der Konfidenzintervalle zwischen den Gruppen [keine] und [gestrahlt + monomer], erreichte die Oberflächenkonditionierung [keine] in der Tendenz bessere Verbundfestigkeitswerte. Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] erreichte in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte als die Oberflächenkonditionierung [monomer]. Die statistisch signifikanten Unterschiede wurden mit roten Klammern mit Stern abgebildet.

Die Testung der Normalverteilung zeigte folgende Werte:

- [14Tg. Wasser] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,4853
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,0657

## Ergebnisse

---

- [14Tg. Wasser] + [monomer]: Shapiro-Wilk Test: 0,9530
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt + monomer]: Shapiro-Wilk Test: 0,0974.

Insgesamt betrachtet führte die Nassalterung zu niedrigeren Verbundfestigkeitswerten zwischen einem Median von 11,86 MPa und 18,10 MPa bei allen verschiedenen Konditionierungsformen, mit Ausnahme der Prüfgruppe, in der keine Konditionierung durchgeführt wurde. Hier lag ein Median von 23,40 MPa vor. Die Verbreiterung des Konfidenzintervalls bei allen Gruppen gegenüber der Trockenalterung zeigt, dass durch die Nassalterung mehr Unsicherheiten beim Verbund zwischen dem Schienen- und Reparaturmaterial aufgetreten waren. Den geringsten Verbundfestigkeitswert erreichte die Konditionierung mit Monomer (Median 11,86 MPa). Auch konnte die Verbundfestigkeit hier zwischen der Konditionierung allein mit Abstrahlen und derjenigen von Abstrahlen und Monomer benetzen eine Steigerung bewirken.

Lage- und Streuparameter siehe Tabelle 15, Seite 205 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 16, Seite 206 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.2.2 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung

#### 3.2.2.1 Oberflächenkonditionierung: keine

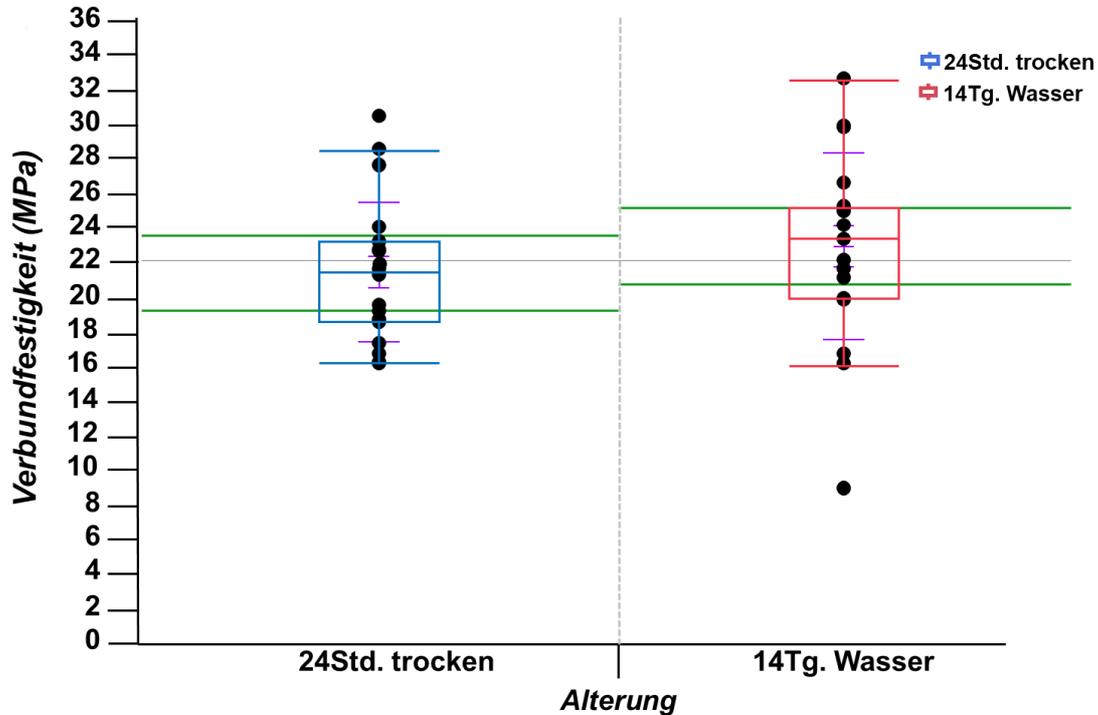


Abbildung 24: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress], mit der unbehandelten Oberfläche [keine]. Die 95%- Konfidenzintervalle zeigten eine eindeutige Überschneidung. Es bestand kein statistisch signifikanter Unterschied.

Die Konfidenzintervalle beider Box- Plots zeigten eine breite Überschneidung auf. Die Unterschiede zwischen den Alterungsformen waren statistisch nicht signifikant. Bei der unbehandelten Oberfläche zeigte die Nassalterung geringfügig höhere Werte als die Trockenalterung. Die Konfidenzintervalle waren ähnlich breit, allerdings zeigte die Nassalterung größere Ausreißer sowohl in geringere als auch höhere Werte.

P- Wert siehe Tabelle 17 Seite 206 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.2.2.2 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt

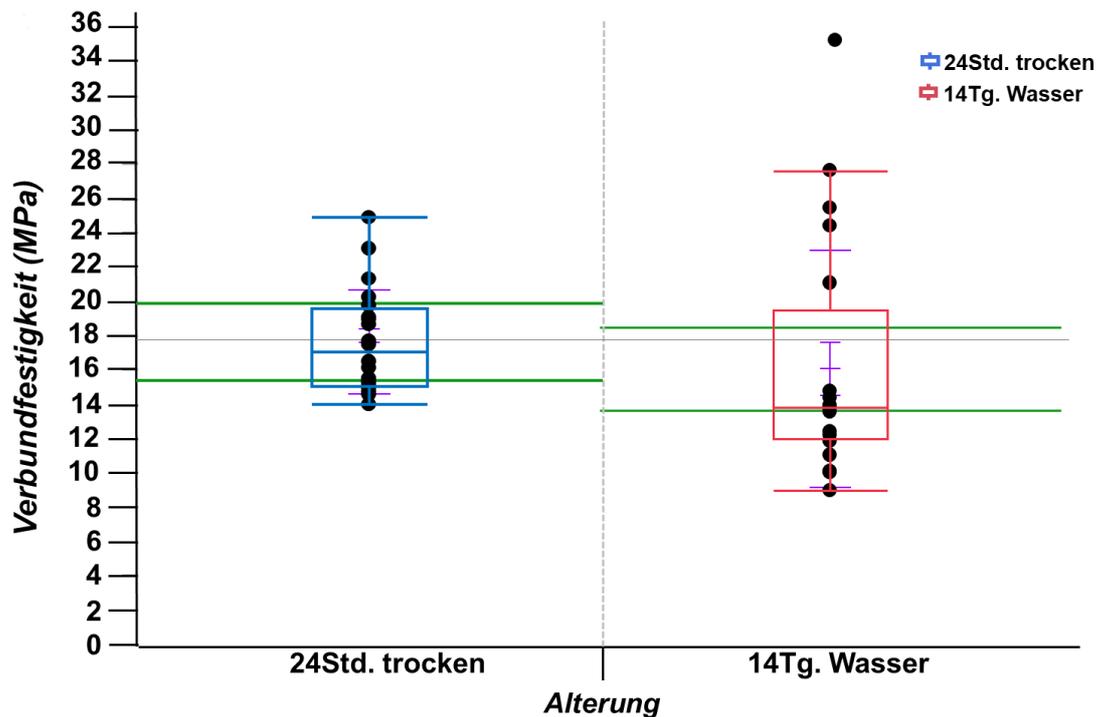


Abbildung 25: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress], mit der gestrahlten Oberfläche [gestrahlt]. Die 95%- Konfidenzintervalle zeigten eine eindeutige Überschneidung. Es bestand kein statistisch signifikanter Unterschied.

Der Box- Plot der Trockenalterung zeigte höhere Verbundfestigkeitswerte. Der Median lag bei der trockenen Alterung bei 16,90 MPa. Hier war das Konfidenzintervall geringfügig schmaler als bei der Nassalterung und zeigte daher stabilere Werte. Bei der Nassalterung lag der Median bei 13,86 MPa mit einer breiteren Streuung der Werte. Beide Alterungsformen zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede auf.

P- Wert siehe

Tabelle 17 Seite 206 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.2.2.3 Oberflächenkonditionierung: monomer

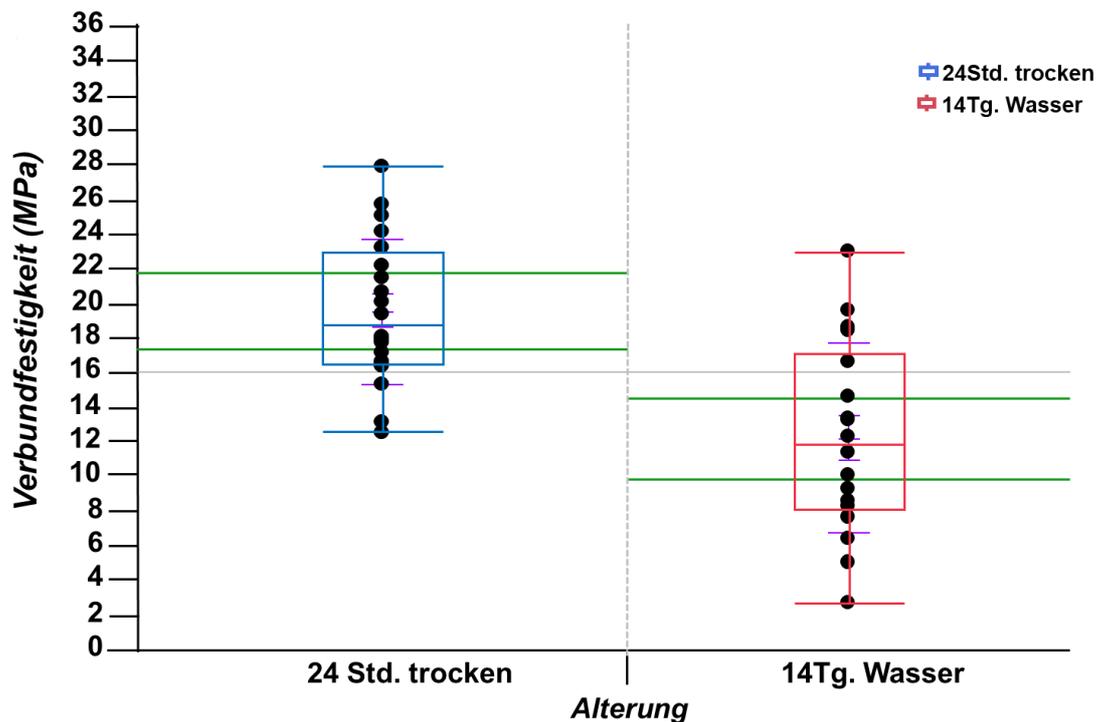


Abbildung 26: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress], mit der Oberflächenkonditionierung [monomer]. Die Betrachtung der Konfidenzintervalle zeigte keine Überschneidung. Die Alterung [24Std. trocken] war statistisch hoch signifikant besser.

Auch hier zeigte die Nassalterung eine breitere Streuung der Werte auf und erreichte schlechtere Verbundfestigkeitswerte als die Trockenalterung. Der Median der Nassalterung lag bei 11,86 MPa. Die Trockenalterung zeigte statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte (Median 18,72 MPa) mit einem entsprechend hoch signifikanten p- Wert.

P- Wert siehe

Tabelle 17, Seite 206 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.2.2.4 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt + monomer

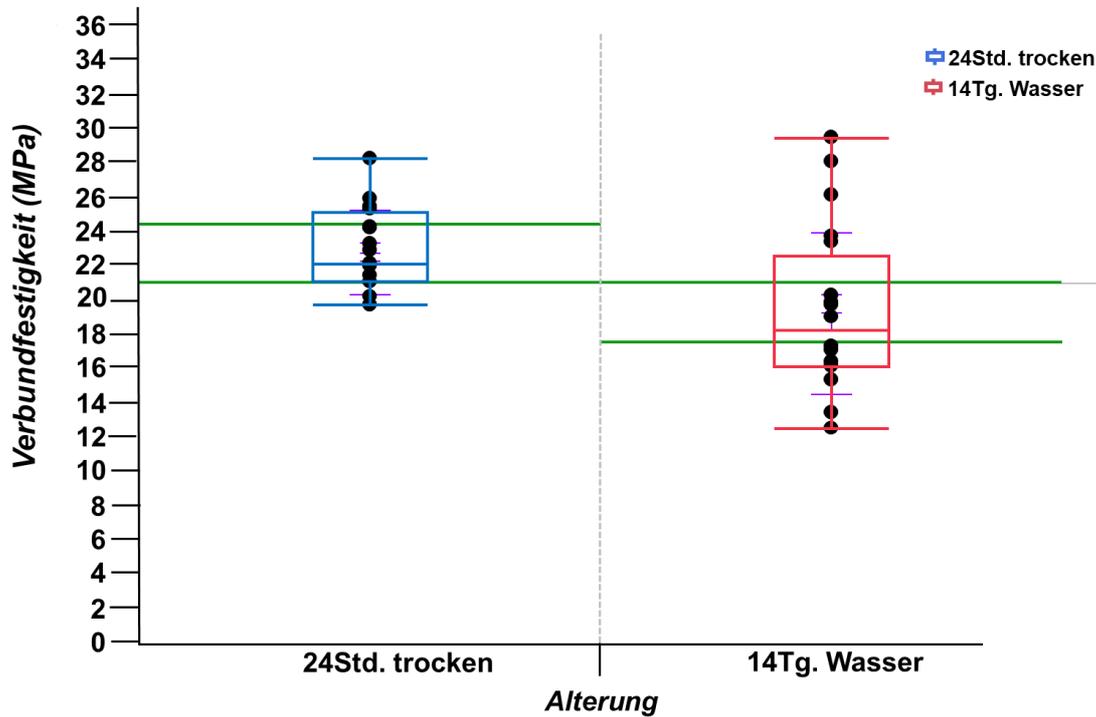


Abbildung 27: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress], mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + [monomer]. Die Betrachtung der Konfidenzintervalle zeigte knapp eine Überschneidung. Die Alterung [24Std. trocken] war in der Tendenz besser.

Die Trockenalterung zeigte in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte. Die Nassalterung zeigte wieder eine größere Streuung. Das untere Konfidenzintervall der Alterungsform [24Std. trocken] zeigte eine Überschneidung mit dem oberen Konfidenzintervall der Alterungsform [14Tg. Wasser].

P- Wert siehe

Tabelle 17, Seite 206 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.2.3 Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten Kontrollgruppe

Die nächste Abbildung 28 (Seite 86) zeigt eine Übersicht aller Box- Plots.

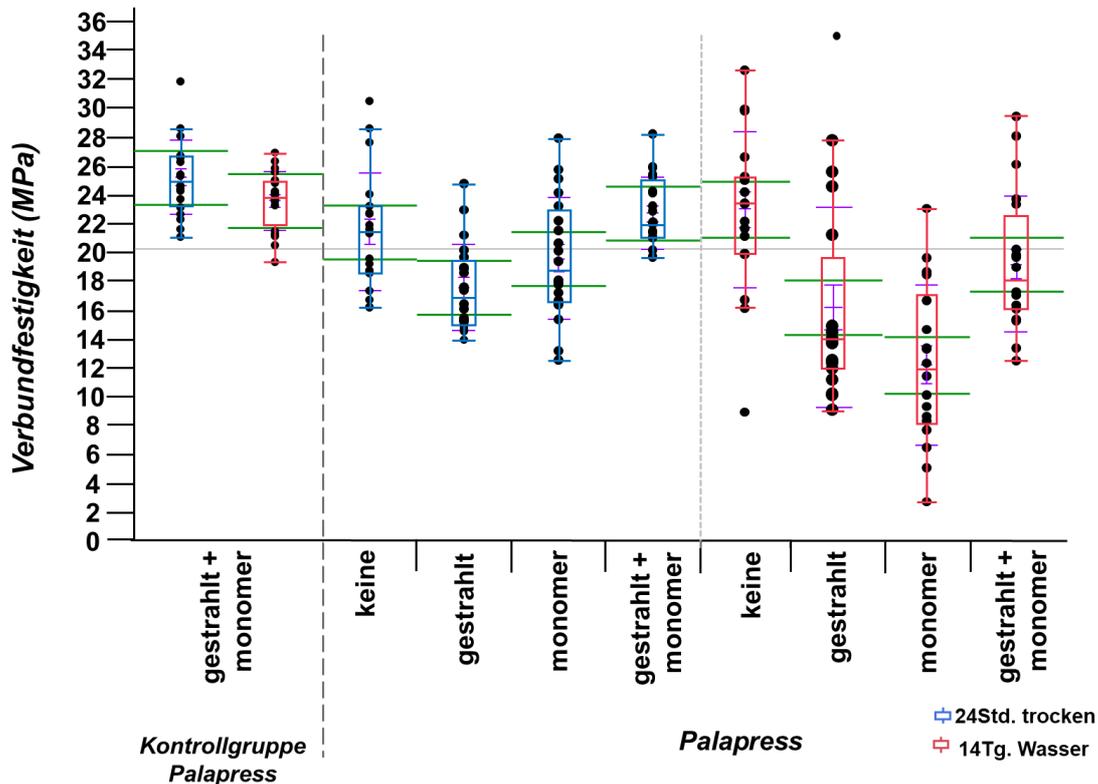


Abbildung 28: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] & der additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [Palapress].

Beide Alterungsformen, sowie die Oberflächenkonditionierungen wurden verglichen. Die Konfidenzintervalle der Kontrollgruppe selbst zeigten mit einer Überschneidung keine signifikanten Unterschiede. Die Nassalterung führt bei der additiven Prüfgruppe mit dem Schienenmaterial [freeprint splint 2] und dem Reparaturmaterial [Palapress] im Vergleich zum Goldstandard (Schienenmaterial und Reparaturmaterial aus Palapress®) unabhängig von der Konditionierung zu größeren Streuungen der Verbundfestigkeitswerte. Diese sind bei den drei Konditionierungen Abstrahlen, Monomer und deren Kombination immer unterhalb vom Goldstandard der PMMA Materialien. Dieser Effekt ist bei der Trockenalterung weniger deutlich zu erkennen. Hier werden Verbundfestigkeitswerte im ähnlichen Bereich wie beim Goldstandard erzielt.

Die Analyse der Konfidenzintervalle der Kontrollgruppe im Vergleich zum Reparaturmaterial [Palapress] auf additiver Schienenbasis zeigte einige statistisch signifikante Unterschiede. Hier wiesen die Konfidenzintervalle keine Überschneidungen auf. Die Testung der Normalverteilung war bei allen Box-Plots normal verteilt. Daher wurde die Varianzanalyse mit der parametrischen Methode (Each Pair Student's t- Test) ergänzt. Auch zeigten einige Vergleiche Überschneidungen der Konfidenzintervalle, mit keinen statistisch signifikanten Unterschieden auf. Vor allem die Nassalterung zeigte im Vergleich zur konventionellen Kontrollgruppe, sowie gegenüber der Trockenalterung statistisch signifikant schlechtere Werte bei der Konditionierung mit Abstrahlen und Monomer und deren Kombination. Die unbehandelte Oberfläche zeigte bei der Nassalterung vergleichbare Werte wie bei der Trockenalterung. Die Prüfgruppen die trocken gealtert wurden erreichten Verbundfestigkeitswerte ähnlich der konventionellen Kontrollgruppe.

P- Werte siehe Tabelle 18, Seite 207 im Anhang.

### **3.3 Reparaturmaterial: primosplint® auf additiver Basis**

Insgesamt n= 160 Prüfkörper wurden hergestellt und zur Testung der Verbundfestigkeit zugeführt.

#### 3.3.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

Nicht alle Oberflächenkonditionierungen waren bei der Alterung [24Std. trocken] normalverteilt. Die Prüfgruppe mit dem Haftvermittler [primostick] war nicht normal verteilt. Bei der Alterungsform [14Tg. Wasser] hingegen wies alle Gruppen eine Normalverteilung auf.

##### 3.3.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Insgesamt n= 80 Prüfkörper wurden hergestellt und der Verbundfestigkeitsuntersuchung zugeführt.

## Ergebnisse

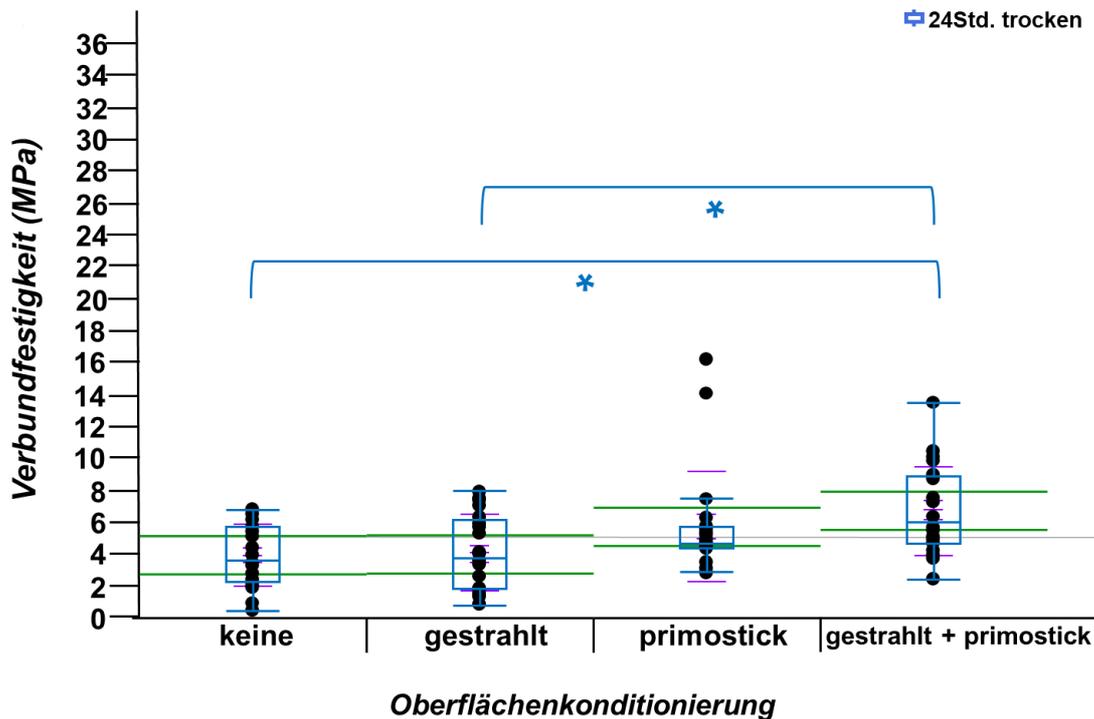


Abbildung 29: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [primosplint], bei der Alterungsform [24Std. trocken].

Der Vergleichbarkeit der absoluten Verbundfestigkeitswerte sämtlicher verschiedener Oberflächenkonditionierungen wurde versucht, in Rechnung zu tragen. Daher wurde die Skalierung der y- Achse immer gleich gewählt. Lediglich die Konditionierung aus Abstrahlen und Verwenden Haftvermittlers primostick® führte zu in der Tendenz zu einer leichten Erhöhung der Verbundfestigkeitswerte. Gegenüber der unbehandelten Prüfgruppe war dieser Effekt sogar statistisch signifikant.

Die Testung der Normalverteilung mit Hilfe des Shapiro Wilk W Tests zeigte folgende Werte:

- [24Std. trocken] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,3145
- [24Std. trocken] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,0817
- [24Std. trocken] + [primostick]: Shapiro-Wilk Test:< 0,001
- [24Std. trocken] + [gestrahlt + primostick]: Shapiro-Wilk Test: 0,3799

Der Box- Plot der Gruppe [keine] zeigte eine Normalverteilung auf. Mit einem Median von 3,67 MPa erreichte diese Gruppe die geringsten Verbundfestigkeitswerte. Auch zeigten die Konditionierungen mit Abstrahlen

## Ergebnisse

(Median 3,76 MPa), dem Haftvermittler primostick® (Median 4,69 MPa), sowie die Kombination aus Strahlen und primostick® (Median 5,96 MPa) deutlich geringere Verbundfestigkeitswerte. Bei der Verwendung vom Reparaturmaterial primosplint® auf der additiven Prüfkörper- (Schienen-) Basis konnte maximal die Kombination von Abstrahlen und Verwendung des Haftvermittlers primostick® in der Tendenz zu einer Erhöhung der Verbundfestigkeitswerte führen (Median 5,96 MPa). Ergänzend wurden die p- Werte mit der nicht-parametrischen Methode (Wilcoxon- Test) untersucht.

Streu- und Lageparameter, siehe Tabelle 19, Seite 208 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 20, Seite 208 im Anhang.

### 3.3.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Alle n= 80 hergestellten Prüfkörper konnten der Testung erfolgreich zugeführt werden.

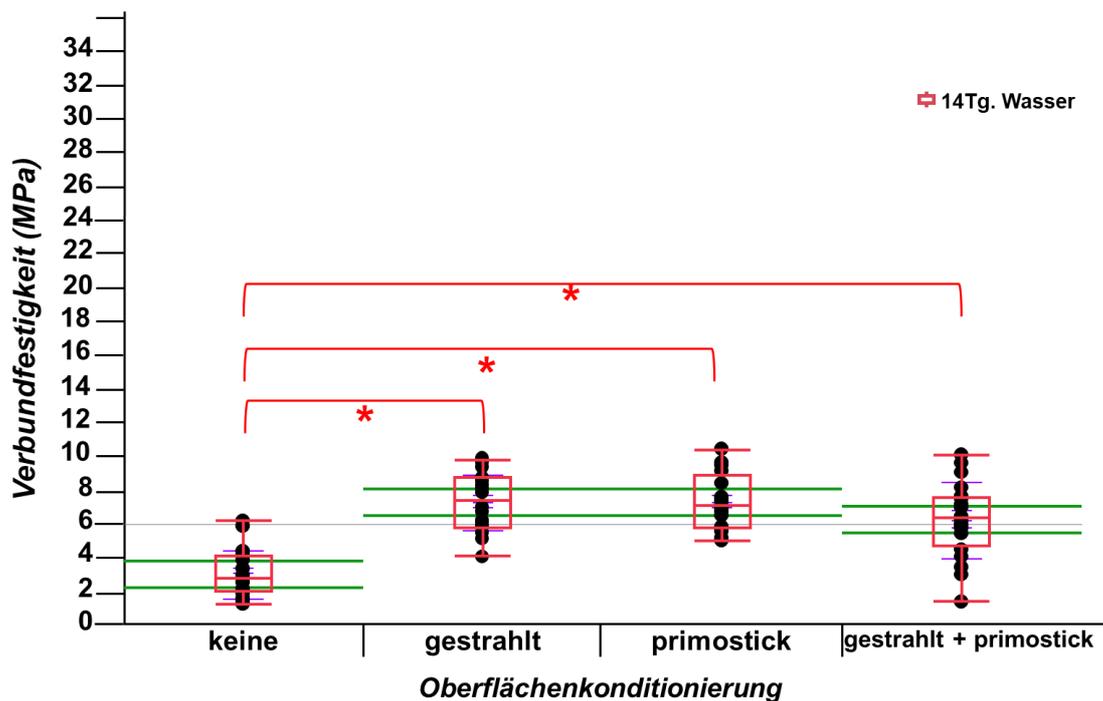


Abbildung 30: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [primosplint], Alterung [14Tg. Wasser]. Die Nassalterung führte im Vergleich zur Trockenalterung zu einer leichten Verbesserung der Werte. Jede Art der o.g. Oberflächenkonditionierungen führte zu statistisch signifikant höheren Verbundfestigkeitswerten, als die Oberfläche unbehandelt zu lassen.

## Ergebnisse

---

Alle vier Box- Plots zeigen eine Normalverteilung auf, daher wurde die Varianzanalyse mit der parametrischen Methode (Each Pair Student`s t- Test) ergänzend durchgeführt:

- [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,1095
- [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,3318
- [primostick]: Shapiro-Wilk Test: 0,3449
- [gestrahlt + primostick]: Shapiro-Wilk Test: 0,9506.

Im Vergleich zur trocken gealterten Gruppe führte die Alterungsform [14Tg. Wasser] zu einer leichten Erhöhung der Verbundfestigkeitswerte.

Der Box- Plot der Prüfgruppe mit der unbehandelten Oberfläche wies mit einem Median von 2,68 MPa gegenüber den konditionierten Oberflächen den statistisch signifikant geringsten Verbundfestigkeitswert auf. Der Median der Gruppe [gestrahlt] lag bei 7,36 MPa. Der Haftvermittler [primostick] erreichte einen Median von 7,05 MPa. Die Gruppe [gestrahlt + primostick] erreichte einen Median von 6,30 MPa. Die Konfidenzintervalle der konditionierten Prüfgruppen zeigten untereinander keine statistisch signifikanten Effekte.

Streu- und Lageparameter siehe Tabelle 21, Seite 209 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 22, Seite 209 im Anhang.

### 3.3.2 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung

Die Testung der Normalverteilung zeigte lediglich bei der Gruppe [primostick] keine Normalverteilung, daher wurde bei dieser Gruppe mit der nicht-parametrischen Methode ausgewertet. Bei allen anderen Gruppen wurde der Each Pair Student`s t –Test verwendet.

### 3.3.2.1 Oberflächenkonditionierung: keine

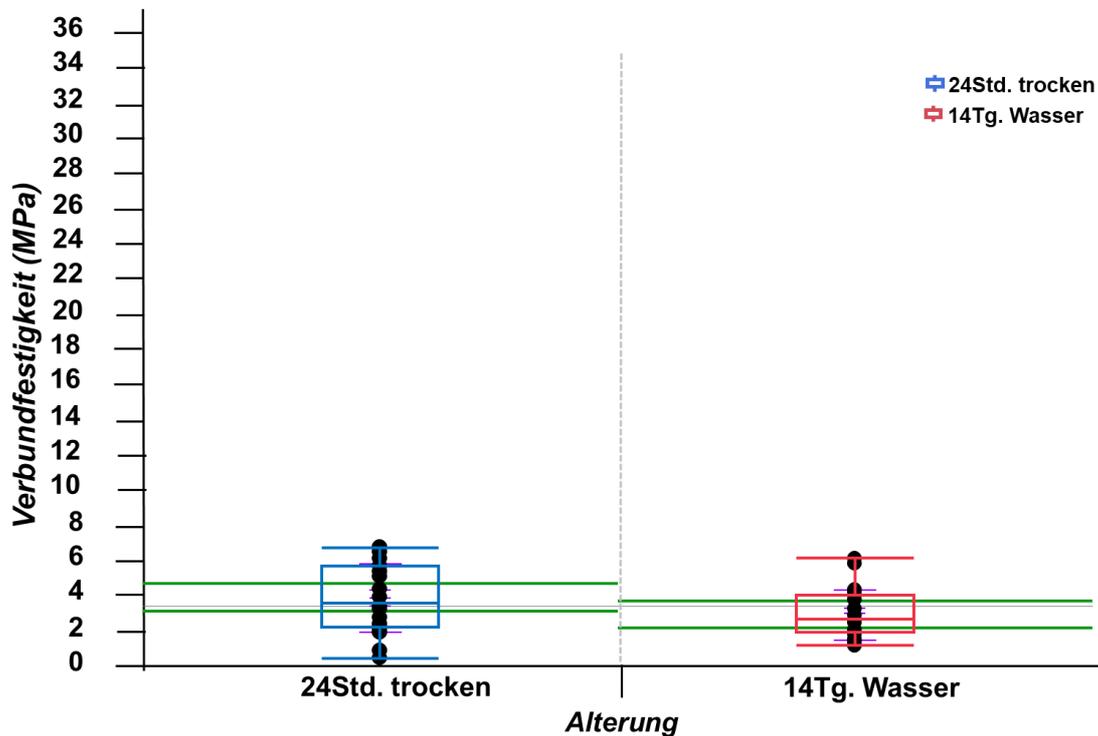


Abbildung 31: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [primosplint], mit der unbehandelten Oberfläche [keine]. Die Alterungsformen zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Die trockene Alterungsform zeigte bei der unbehandelten Oberfläche leicht höhere Verbundfestigkeitswerte. Dieser Effekt war statistisch nicht signifikant. Die Konfidenzintervalle zwischen beiden Alterungsformen zeigten eine Überschneidung auf und waren ähnlich breit. Die Werte der Trockenalterung zeigten Streuungen zwischen einem Minimalwert von 0,44 MPa bis maximal 6,76 MPa. Die Nassalterung 1,16 MPa (Minimalwert) bis 6,11 MPa (Maximalwert). Die Unterschiede waren statistisch nicht signifikant:

P- Wert siehe Tabelle 23, Seite 210 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.3.2.2 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt

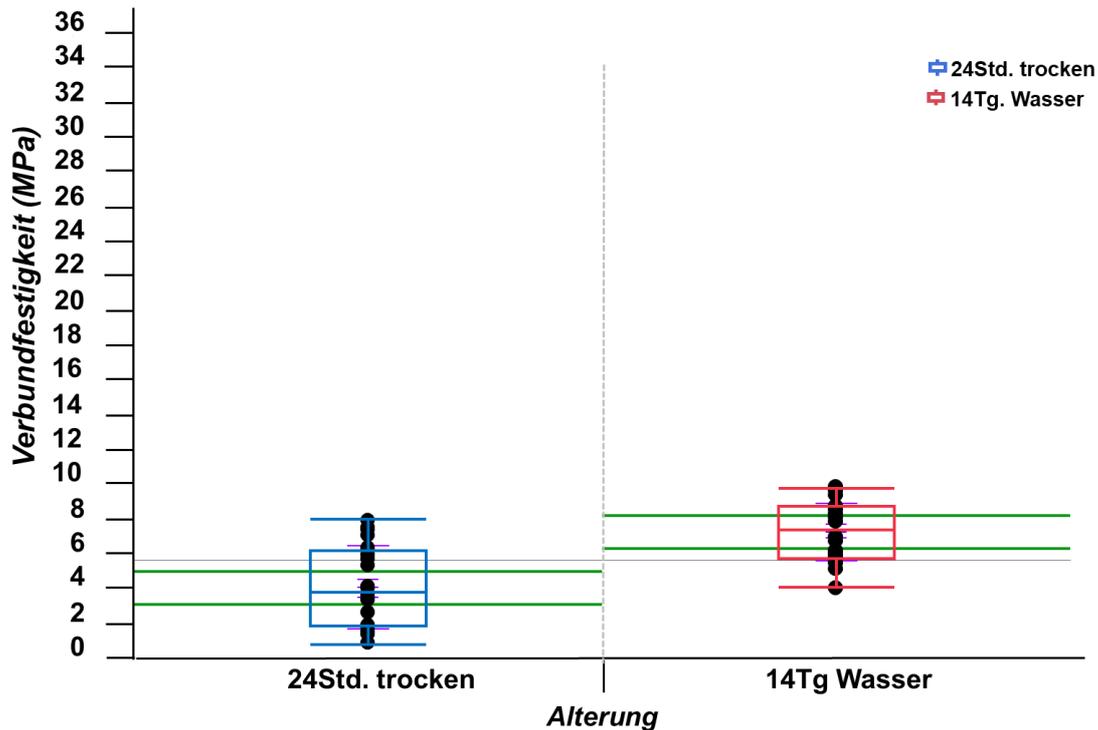


Abbildung 32: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [primosplint], mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt]. Die Alterungsform [14Tg. Wasser] war statistisch hoch signifikant besser.

Die Konfidenzintervalle zwischen den Alterungsformen wiesen keine Überschneidung auf und waren ähnlich breit. Die Konditionierung mit Abstrahlen erreichte höhere Verbundfestigkeitswerte als die unbehandelte Oberfläche. Dabei erreichte die Nassalterung höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber der Trockenalterung. Die Streuung der einzelnen Werte war bei beiden Gruppen homogen. Dabei erreichte die trocken gealterte Prüfgruppe einen Median von 3,76 MPa und die Nassalterung einen Median von 7,36 MPa. P- Wert siehe Tabelle 23, Seite 210 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.3.2.3 Oberflächenkonditionierung: primostick

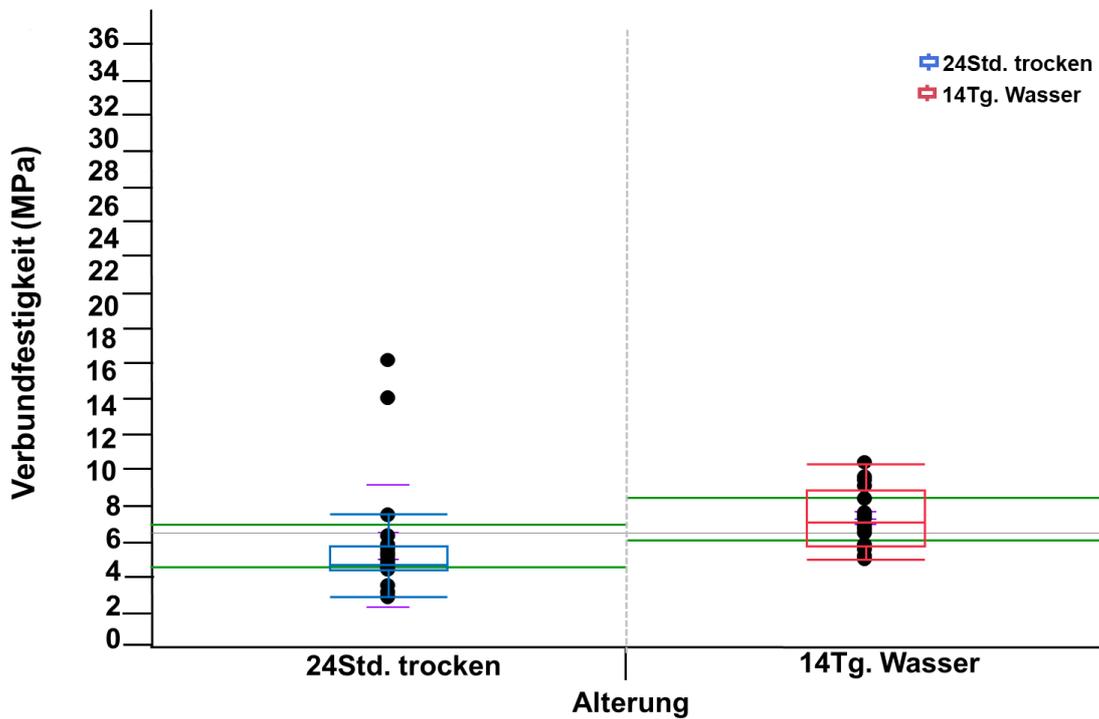


Abbildung 33: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [primosplint], mit der Oberflächenkonditionierung [primostick]. Die Nassalterung zeigte in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte.

Die Analyse der Konfidenzintervalle zeigte eine geringe Überschneidung auf. Die Nassalterung erreichte in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte und eine homogenere Streuung der Ergebnisse. Der Median lag hier bei 7,05 MPa. Die Werte bewegten sich bei der Nassalterung zwischen 4,96 MPa (Minimalwerte) und 10,38 MPa (Maximalwert). Die Trockenalterung zeigte einen Ausreißer beim Maximalwert von 16,15 MPa, dabei betrug der Minimalwert 2,79 MPa.

P- Wert siehe Tabelle 23, Seite 210 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.3.2.4 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt + primostick

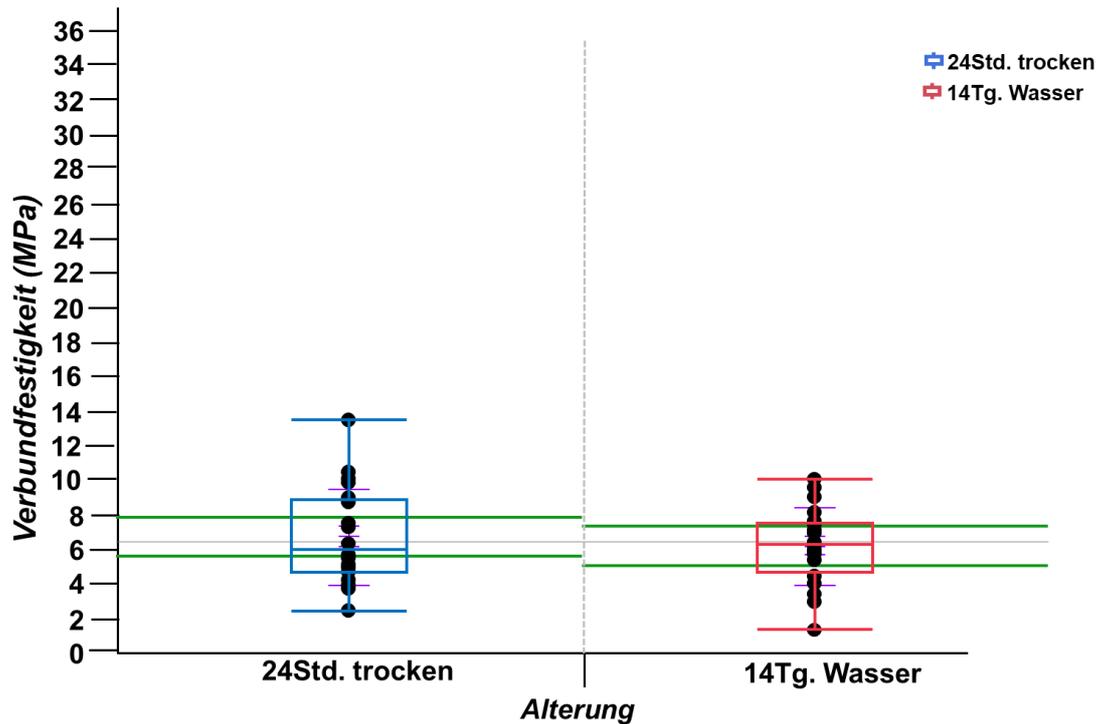


Abbildung 34: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [primosplint], mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + primostick]. Zwischen den Alterungsformen lagen keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Die Verbundfestigkeitswerte der Kombination aus Abstrahlen und Verwendung des Haftvermittlers primostick® erreichte statistisch signifikant bessere Werte als die unbehandelte Oberfläche. Allerdings lag dieser Effekt gegenüber dem Nutzen des Haftvermittlers allein oder nur Abstrahlen lediglich in der Tendenz vor.

P- Wert siehe Tabelle 23, Seite 210 im Anhang.

### 3.3.3 Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten Kontrollgruppe

Alle Prüfgruppen des Reparaturmaterials [primosplint] wurden mit der konventionell hergestellten Kontrollgruppe verglichen.

## Ergebnisse

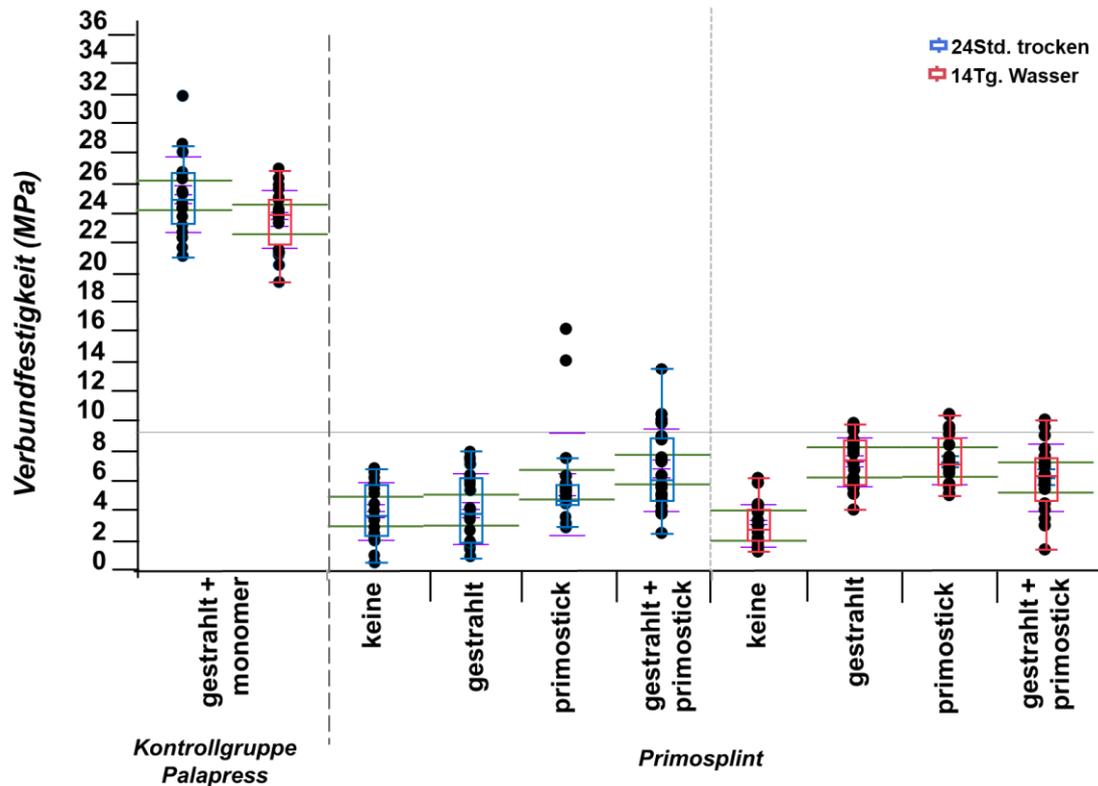


Abbildung 35: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich mit den additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [primosplint]. In der Übersicht der Verbundfestigkeitswerte zeigte der Goldstandard mit der konventionell hergestellten Schienenbasis und dem Reparaturmaterial PMMA signifikant bessere Verbundfestigkeitswerte als die Prüfgruppe mit additiver Schienenbasis aus freeprint® splint und primosplint® als Reparaturmaterial. Die Nassalterung zeigte dabei keinen signifikanten Effekt gegenüber der Trockenalterung.

Die Testung der Normalverteilung war bei der Gruppe [24Std. trocken]+[primostick] nicht normal verteilt. Daher wurde die Varianzanalyse mit der nicht- parametrischen Methode (Wilcoxon- Test) durchgeführt.

Die Verbundfestigkeitswerte zum Goldstandard konventionell hergestellte Schienenbasis, mit konventionellem PMMA im Vergleich zum additiven Schienenmaterial (freeprint® splint) mit dem lichthärtenden Reparaturmaterial aus primosplint® fallen unabhängig jeder Konditionierung abfallende Verbundfestigkeitswerte um 18,97 MPa bis 21,26 MPa bei der Trockenalterung. Sowie gegenüber der Nassalterung abfallende Werte um 16,45 MPa bis

## Ergebnisse

---

21,13 MPa. Die Nassalterung führte zu keiner weiteren deutlichen Verminderung der Werte.

P-Werte siehe Tabelle 24, Seite 211 im Anhang.

## 3.4 Reparaturmaterial: freeprint® splint 2.0 UV auf additiver Basis

Sowohl die Prüfkörper- (Schienen-) Basis als auch das Reparaturmaterial bestanden aus dem additiven Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV. Die Oberfläche der Prüfkörperbasis wurde entweder unbehandelt belassen oder abgestrahlt.

### 3.4.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

#### 3.4.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Alle n= 40 hergestellten Prüfkörper konnten der Testung erfolgreich zugeführt werden.

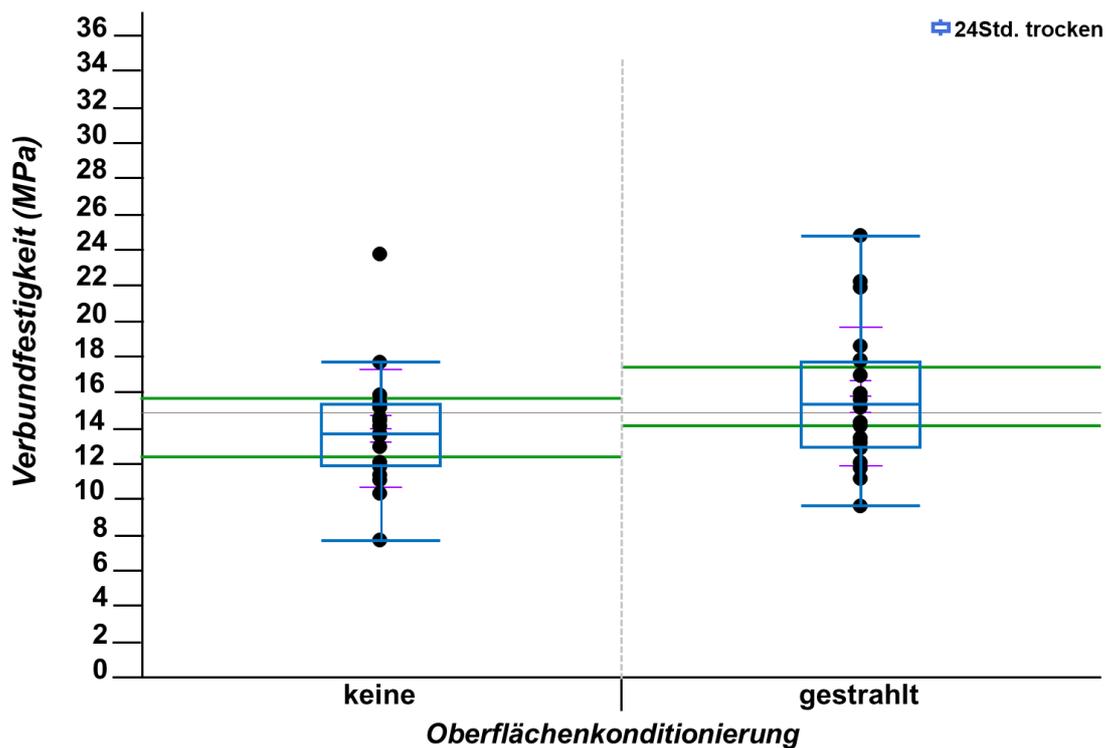


Abbildung 36: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeprint splint 2], bei der Alterungsform [24Std. trocken]. Die Unterschiede zwischen Abstrahlen und der unbehandelten Oberfläche waren statistisch nicht signifikant.

## Ergebnisse

Beide Box- Plots zeigten eine Normalverteilung mit folgenden Ergebnissen:

- [24Std. trocken] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,1084
- [24Std. trocken] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,4850.

Die Werte der Verbundfestigkeit bei der Prüfgruppe mit unbehandelter Oberfläche lagen zwischen 7,66 MPa und 23,70 MPa mit einem Ausreißer. Der Median lag bei 13,69 MPa. Die Werte der Gruppe mit Abstrahlen bewegten sich zwischen 9,56 MPa und 24,76 MPa und der Median lag bei 15,32 MPa. Das Abstrahlen führte zu keinem statistisch signifikanten positiven Effekt, mit Überschneidung der Konfidenzintervalle.

Streu- und Lageparameter, siehe Tabelle 25, Seite 212 im Anhang.

P- Wert siehe Tabelle 26, Seite 212.

### 3.4.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

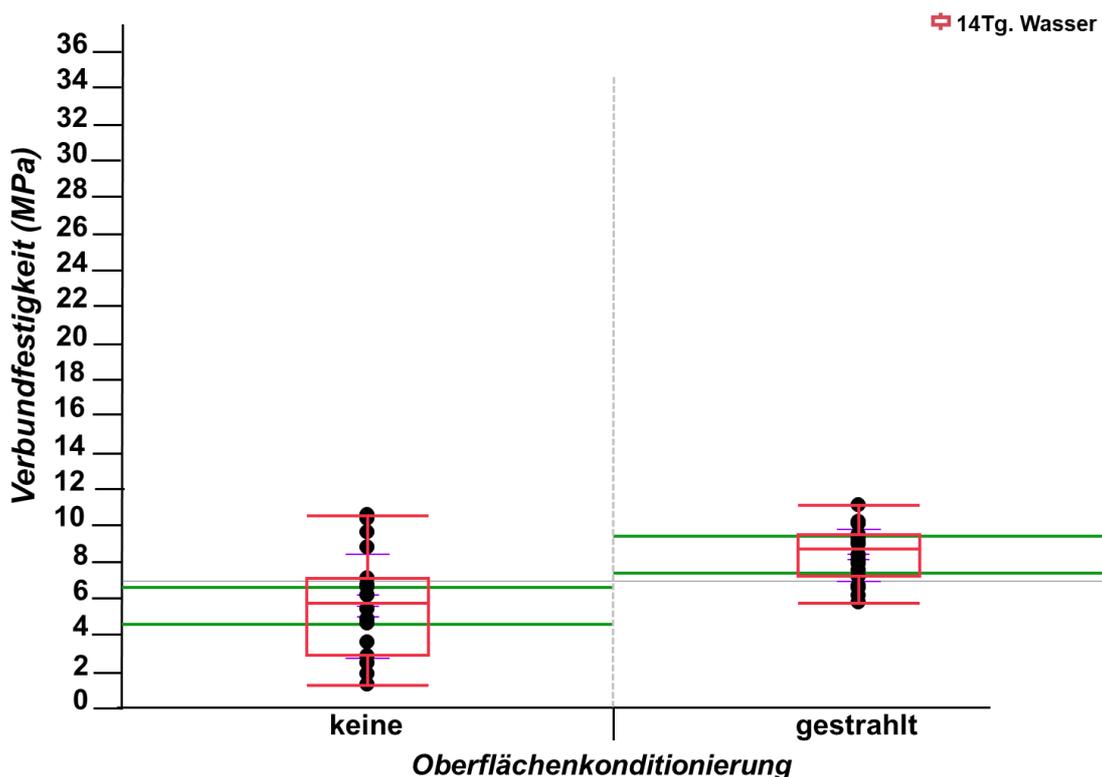


Abbildung 37: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials ebenso aus [freeprint splint 2], bei der Alterungsform [14Tg. Wasser]. Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] war statistisch hoch signifikant besser als die Prüfgruppe mit der unbehandelten Oberfläche.

## Ergebnisse

Bei beiden Gruppen lag eine Normalverteilung vor:

- [14Tg. Wasser] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,3297
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,7586.

Die Nassalterung zeigte im Vergleich zur Trockenalterung niedrigere Werte. Dabei erreichte die Oberfläche, die abgestrahlt wurde, signifikant besseren Verbundfestigkeitswerte, mit einer geringen Streuung der Werte. Der Median bei der unbehandelten Oberfläche lag bei 5,75 MPa im Vergleich zur gestrahlten Oberfläche bei einem Median von 8,63 MPa.

Streu- und Lageparameter siehe Tabelle 27, Seite 213 im Anhang.

P- Wert siehe Tabelle 28, Seite 213 im Anhang.

### 3.4.2 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung

#### 3.4.2.1 Oberflächenkonditionierung: keine

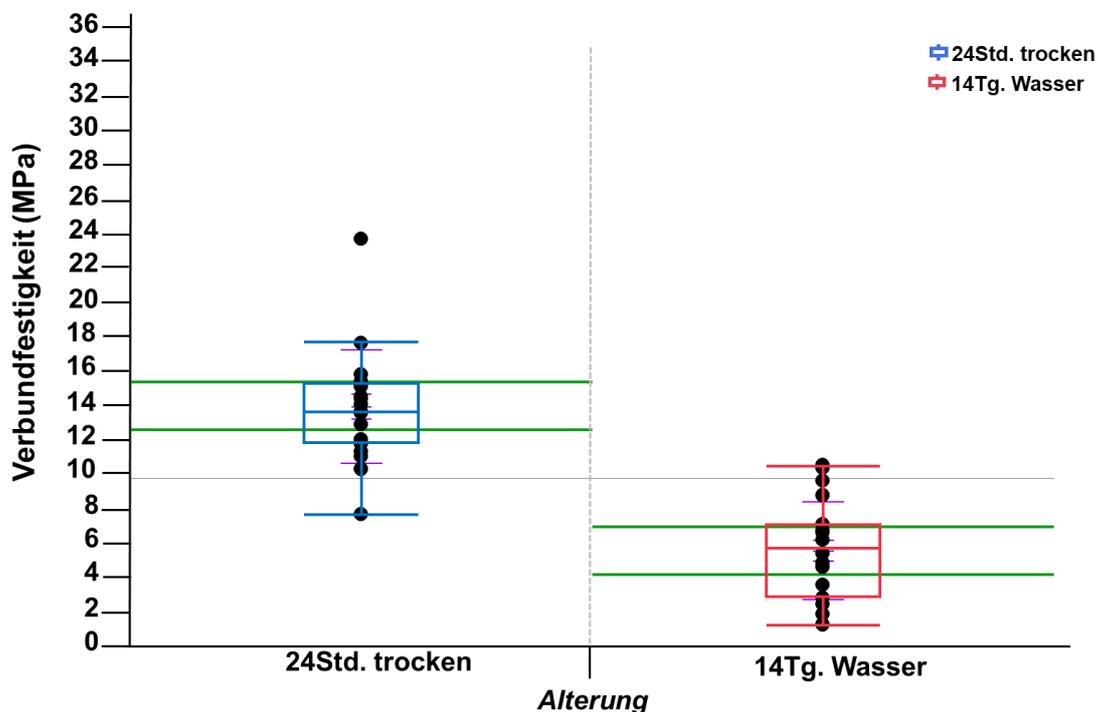


Abbildung 38: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeprint splint 2] mit der unbehandelten Oberfläche [keine]. Die Alterungsform [24Std. trocken] erreichte statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte (MPa) als [14Tg. Wasser].

## Ergebnisse

Die Trockenalterung erreichte statistisch hoch signifikant bessere Verbundfestigkeitswerte als die Nassalterung. Dabei waren die Konfidenzintervalle ähnlich breit, die Trockenalterung wies mit einem Ausreißer eine größere Streuung auf. Der Median lag bei der Trockenalterung bei 13,69 MPa, im Vergleich dazu der Median der Nassalterung bei 5,75 MPa. P- Wert siehe Tabelle 29, Seite 214 im Anhang.

### 3.4.2.2 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt

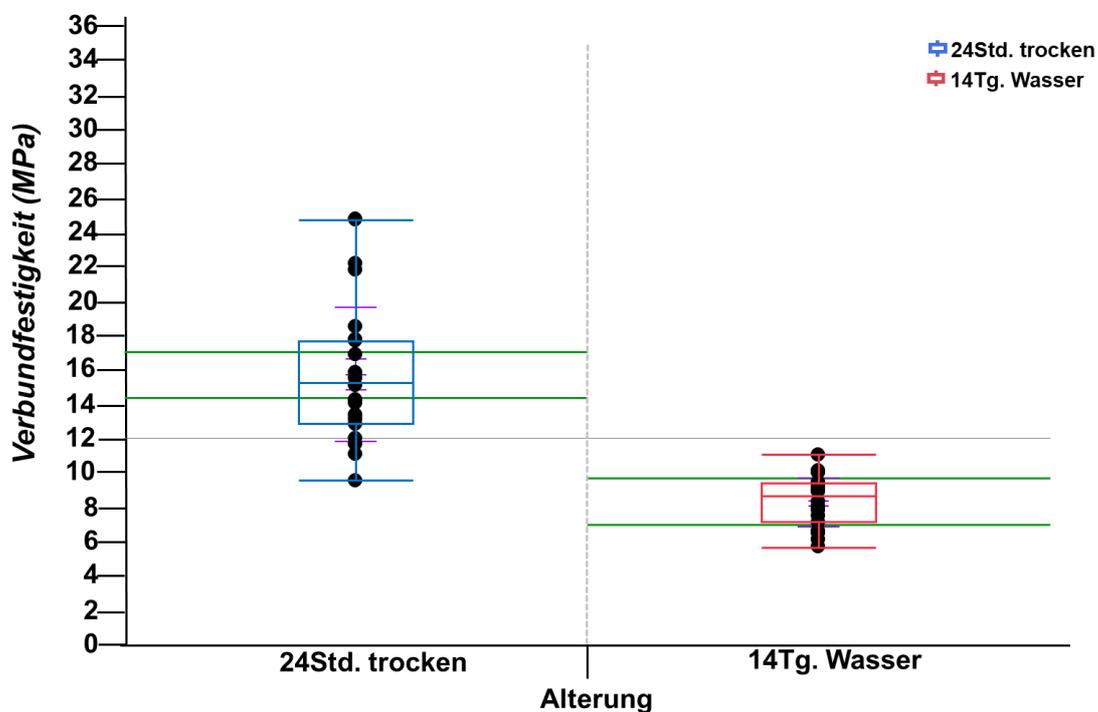


Abbildung 39: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeprint splint 2], bei der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt]. Die Alterungsform [24Std. trocken] erreichte statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte (MPa).

Das Abstrahlen führte gegenüber der unbehandelten Oberfläche zu einer Erhöhung der Verbundfestigkeitswerte. Hier erreichte wiederholt die Trockenalterung mit einem Median von 15,32 MPa signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte als die Nassalterung (Median 8,63 MPa). Der Box- Plot

## Ergebnisse

der Nassalterung zeigte eine homogenere Streuung der Werte, bei beiden Prüfgruppen waren die Konfidenzintervalle ähnlich breit.

P- Wert siehe Tabelle 29, Seite 214 im Anhang.

### 3.4.3 Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten Kontrollgruppe

Die folgende Auswertung führt alle Gruppen des Reparaturmaterials [freeprint splint 2] und der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress] auf.

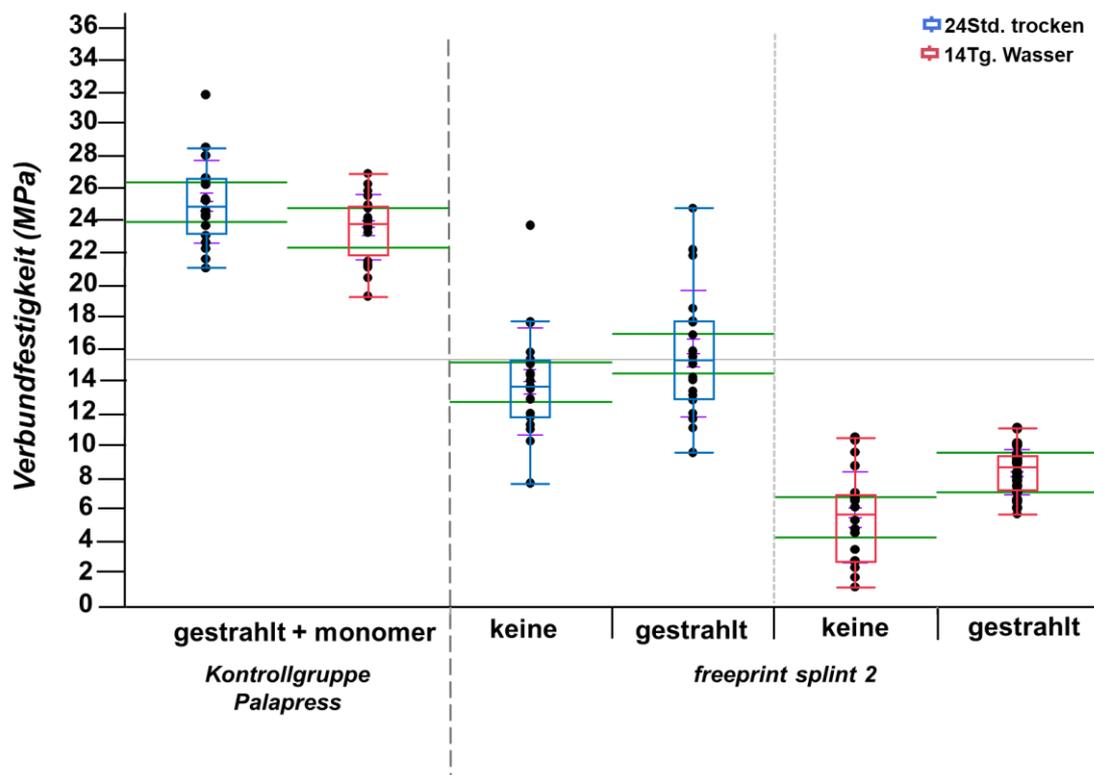


Abbildung 40: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich mit den additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeprint splint 2]. Der Goldstandard aus konventionell hergestellter Prüfkörper- (Schiene-) Basis aus PMMA und Reparaturmaterial PMMA zeigte keine Überschneidung mit den Konfidenzintervallen des Reparaturmaterials [freeprint splint 2], auf additiv hergestellter Prüfkörperbasis ebenso aus [freeprint splint 2] auf. Die Nassalterung erreichte dabei signifikant schlechtere Verbundfestigkeitswerte. Ein Strahlen der Oberfläche führe nur bei der Nassalterung zu einer leicht signifikanten Erhöhung der Werte.

In der Zusammenschau sämtlicher Verbundfestigkeitswerte zwischen dem Goldstandard (Basis aus PMMA und Reparaturmaterial aus PMMA) und der Prüfgruppe mit additivem Schienenmaterial und Reparaturmaterial aus freeprint® splint 2.0 UV ist ein signifikanter Abfall der Werte, um 9,61 MPa bis 11,26 MPa bei der Trockenalterung und um 15,18 MPa bis 18,06 MPa bei der Nassalterung festzustellen. Unabhängig von der Konditionierung waren die Verbundfestigkeitswerte der Nassalterung statistisch signifikant schlechter als die trockene Alterungsform. Das Abstrahlen der Oberfläche hatte bei der Trockenalterung keinen signifikant positiven Effekt, jedoch bei der Nassalterung gegenüber der unbehandelten Oberfläche. Die Box- Plots der trocken gealterten Prüfgruppen führten zu einer größeren Streuung der einzelnen Werte als die Nassalterung und die konventionell hergestellte Kontrollgruppe.

P- Werte siehe Tabelle 30, Seite 214 im Anhang.

### **3.5 Reparaturmaterial: freeform® fixgel auf additiver Basis**

#### 3.5.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

Insgesamt wurden n= 120 Prüfkörper hergestellt. Nach Herstellerangaben ist die Verwendung des Haftvermittlers nur bei Wasserkontakt indiziert.

##### 3.5.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Bei der Alterung [24Std. trocken] wurden n= 40 Prüfkörper hergestellt. Zur Testung der Verbundfestigkeit lösten sich bei der Gruppe [keine] drei Zylinder vor dem Scherversuch von der Basis.

## Ergebnisse

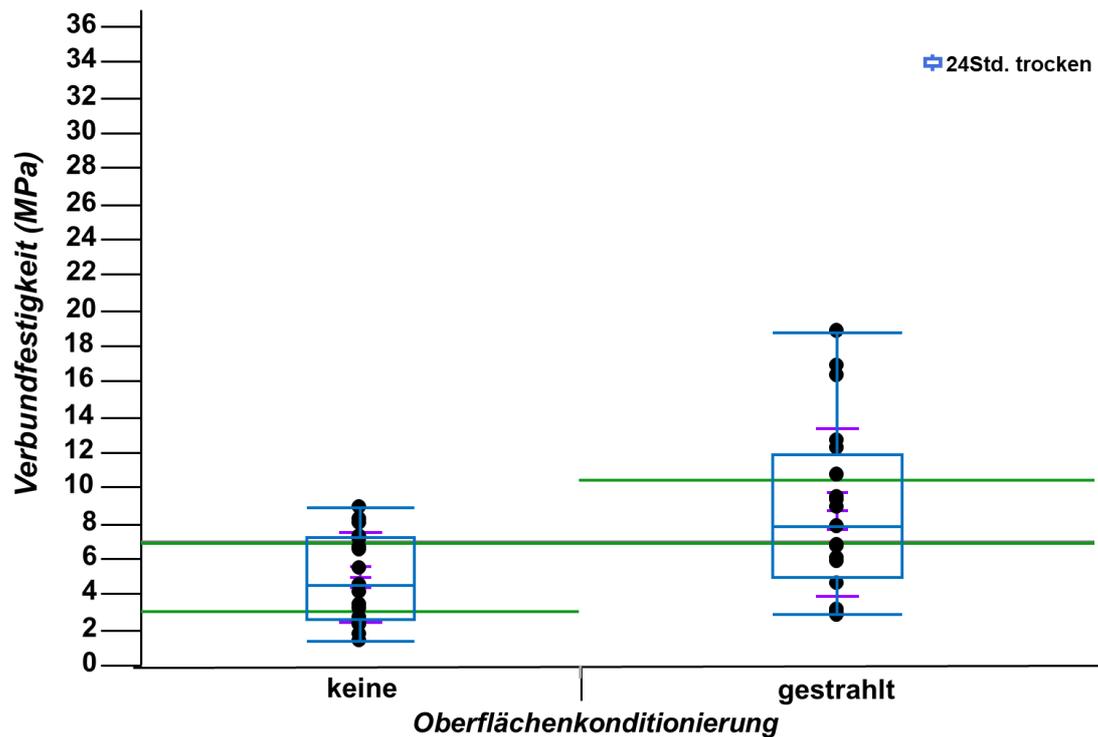


Abbildung 41: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform fixgel], bei der Alterungsform [24Std. trocken]. Entsprechend der Herstellerangaben wurde bei der Trockenalterung nur abgestrahlt. Dabei zeigte das Abstrahlen gegenüber der unbehandelten Oberfläche in der Tendenz bessere Werte.

Der Shapiro Wilk W- Test zeigte folgende Werte für die Normalverteilung:

- [24Std. trocken] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,2105
- [24Std. trocken] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,1219.

Bei der unbehandelten lag der Median bei 4,52 MPa. Bei der gestrahlten Oberfläche lag der Medianwert bei 7,84 MPa, der Box- Plot wies drei Ausreiser und einen Maximalwert von 18,82 MPa auf. Daher waren die Werte der Prüfgruppe mit abgestrahlter Oberfläche inhomogener.

Die Betrachtung der oberen- und unteren 95%- Konfidenzintervalle zeigte eine knappe Überschneidung. Das Abstrahlen hatte in der Tendenz einen positiven Effekt auf die Verbundfestigkeit.

Streu- und Lageparameter siehe Tabelle 31, Seite 215 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 32, Seite 215 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.5.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Nach Herstellerempfehlung wurde der Haftvermittler freeform® bond als eine weitere Konditionierungsmethode allein oder in Kombination mit Abstrahlen untersucht.

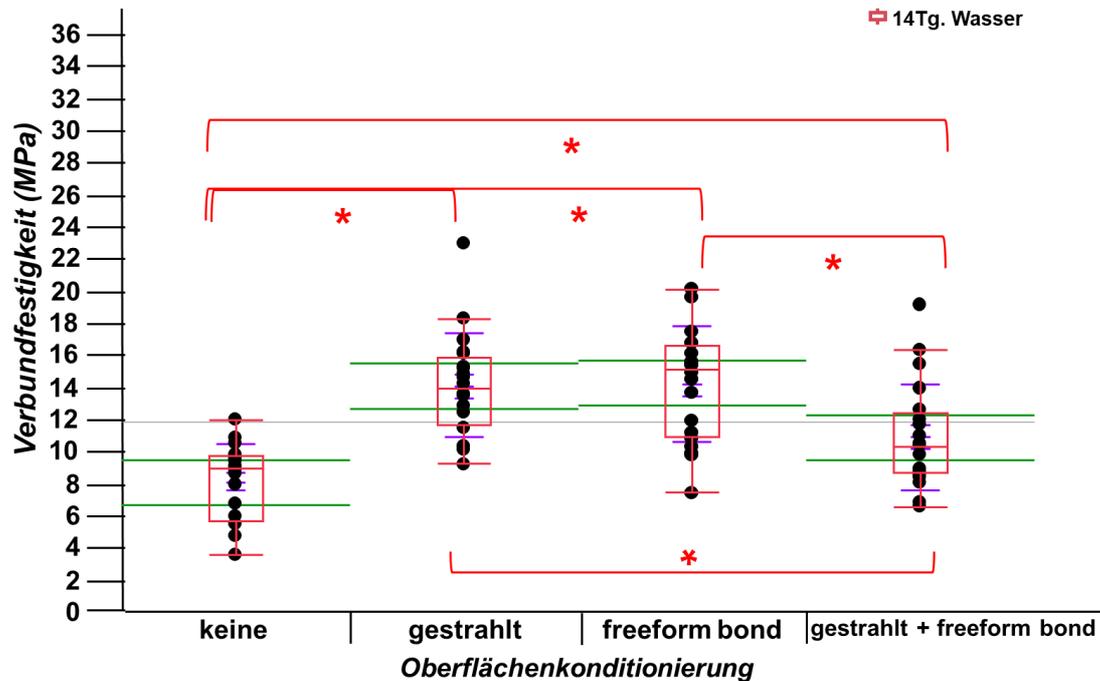


Abbildung 42: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform fixgel], bei der Alterungsform [14Tg. Wasser]. Entsprechend der Herstellerempfehlung wurde der Haftvermittler [freeform bond] allein und in Kombination mit Abstrahlen verwendet. Jede Konditionierungsform aus Abstrahlen und Anwenden des Haftvermittlers erreichte signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte als die unbehandelte Oberfläche. Dabei lagen keine Unterschiede zwischen nur Abstrahlen und dem Haftvermittler vor. Deren Kombination wies zudem signifikant schlechtere Werte als nur zu Strahlen oder nur den Haftvermittler zu verwenden und erreichte gegenüber der unbehandelten Oberfläche nur in der Tendenz höhere Werte.

Der Shapiro Wilk W Test zeigte bei allen Gruppen eine Normalverteilung:

- [14Tg. Wasser] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,1694
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,2592
- [14Tg. Wasser] + [freeform bond]: Shapiro-Wilk Test: 0,4834
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt + freeform bond]: Shapiro-Wilk Test: 0,1027.

## Ergebnisse

---

Die Konfidenzintervalle aller Prüfgruppen waren ähnlich breit. Vor allem der Box- Plot der Prüfgruppe mit dem Haftvermittler zeigte eine gewisse Streuung der einzelnen Werte. Die Gruppe mit der unbehandelten Oberfläche erreichte die geringsten Verbundfestigkeitswerte mit einem Median von 8,95 MPa. Das Abstrahlen führte zu einem Median von 13,93 MPa. Der Haftvermittler freeform® bond führte zu einem Median von 15,15 MPa. Die Kombination aus Verwenden des Haftvermittlers freeform® bond und Abstrahlen führte zu einer signifikanten Verschlechterung der Werte mit einem Median von 10,39 MPa gegenüber nur Abstrahlen oder nur den Haftvermittler anzuwenden.

Streu- und Lageparameter siehe Tabelle 33, Seite 216 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 34, Seite 216 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.5.2 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung

#### 3.5.2.1 Oberflächenkonditionierung: keine

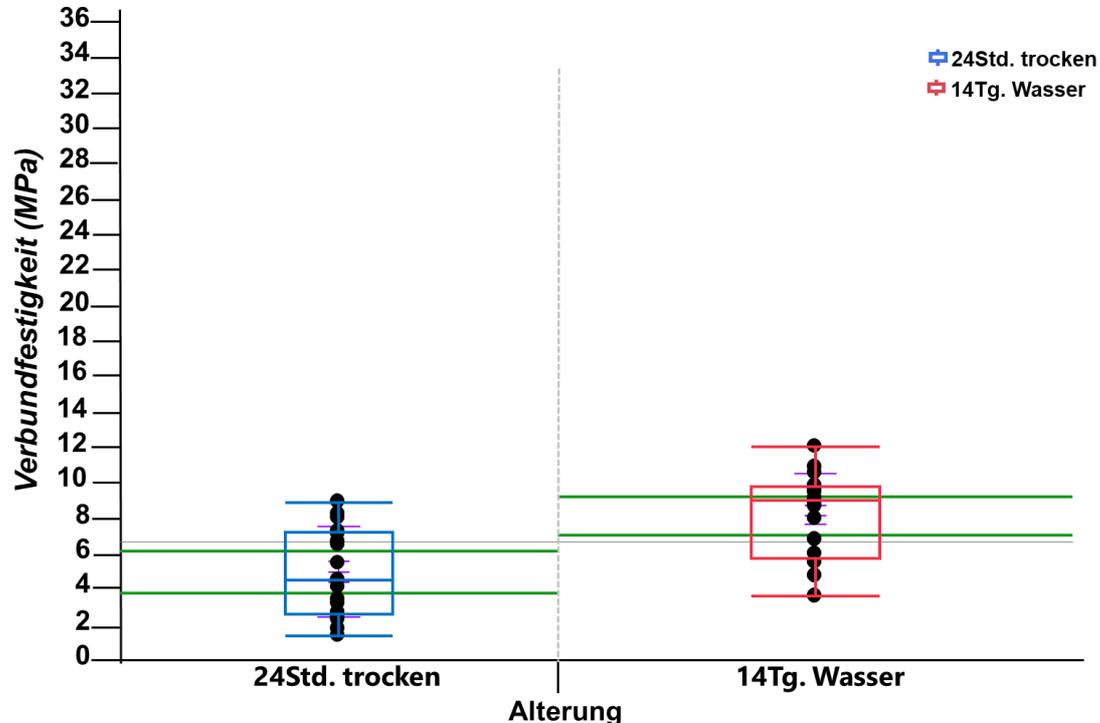


Abbildung 43: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform fixgel], bei der Oberflächenkonditionierung [keine]. Beide Alterungsformen wurden verglichen. Die Nassalterung erreichte statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte (MPa).

Beide Prüfgruppen mit der unbehandelten Oberfläche zeigten ähnlich breite Konfidenzintervalle und eine homogene Streuung der einzelnen Verbundfestigkeitswerte. Statistisch signifikant höhere Werte erreichte die Nassalterung mit einem Median von 8,95 MPa gegenüber der Trockenalterung mit einem deutlich geringeren Median von 4,52 MPa.

P- Werte siehe Tabelle 35, Seite 217 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.5.2.2 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt

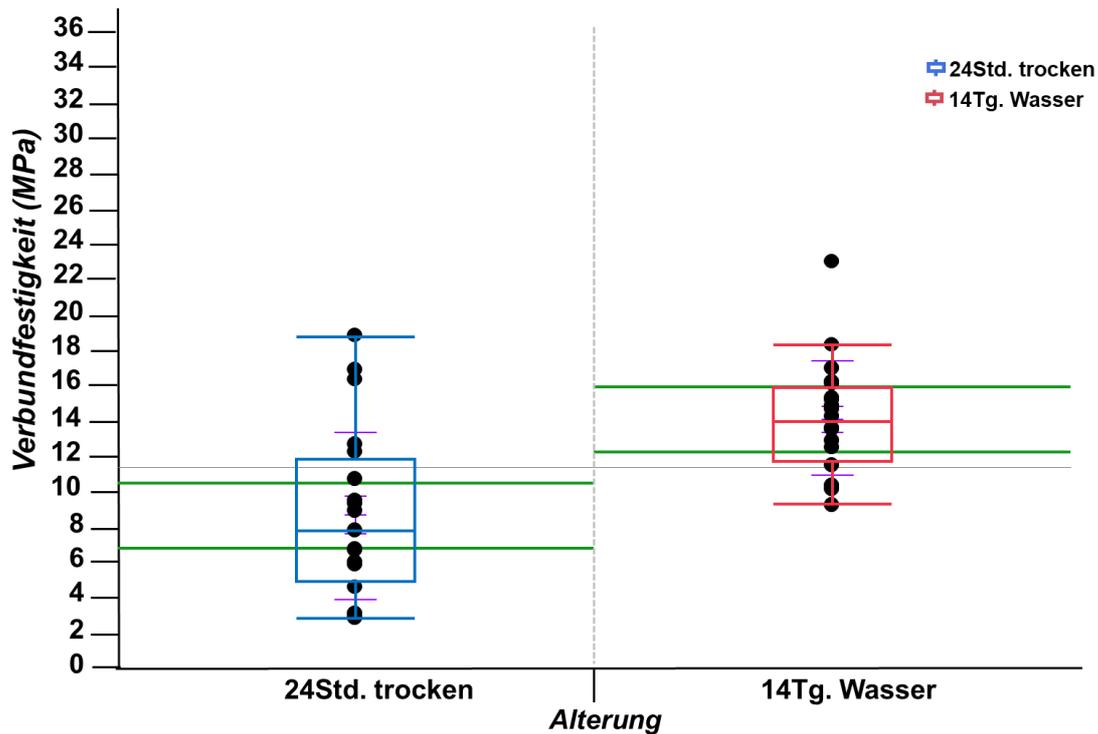


Abbildung 44: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform fixgel], bei der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt]. Die Alterungsform [14Tg. Wasser] erreichte statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte (MPa).

Der Box- Plot der gestrahlten Oberfläche bei der Trockenalterung zeigte eine breitere Streuung der Werte gegenüber der Nassalterung. Die Nassalterung erreichte mit einem Median von 13,93 MPa statistisch signifikant höheren Verbundfestigkeitswerten als die Trockenalterung (Median 7,84 MPa).

Die Konfidenzintervalle zeigten keine Überschneidung auf.

P- Werte siehe Tabelle 35, Seite 217 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.5.3 Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten Kontrollgruppe

Alle Gruppen des Reparaturmaterials freeform® fixgel wurden mit der [Kontrollgruppe Palapress] verglichen.

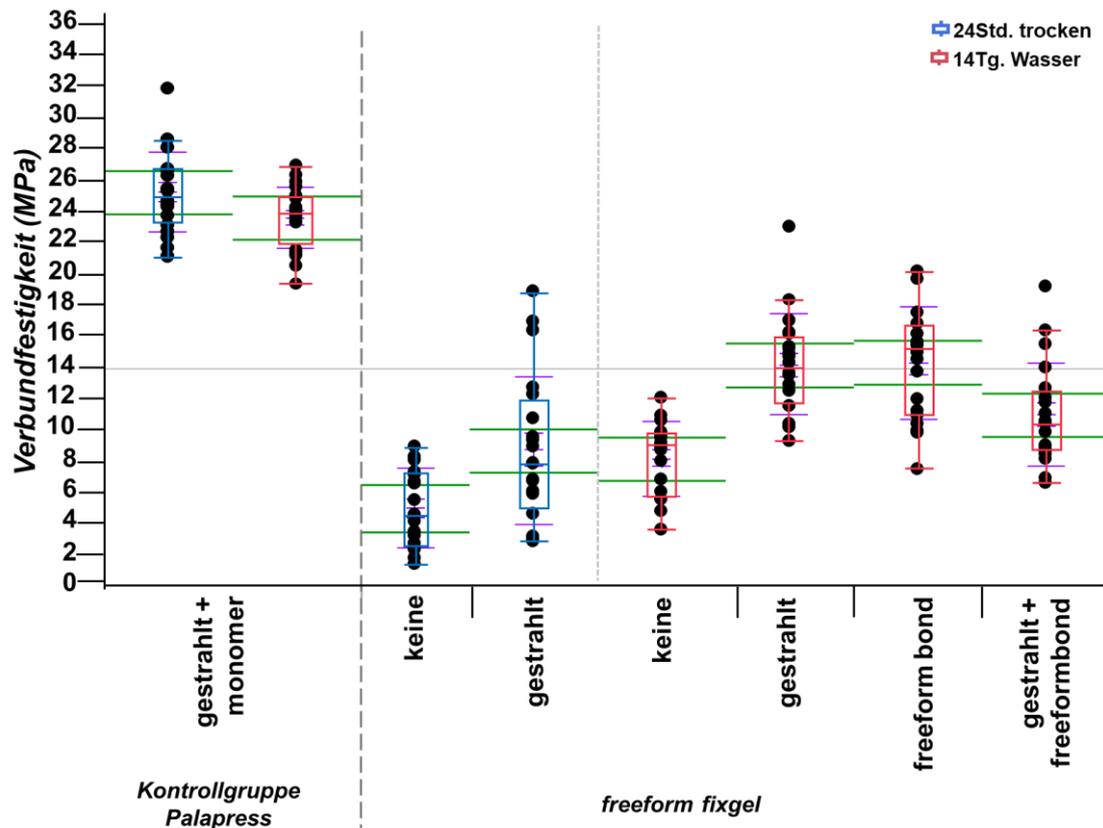


Abbildung 45: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich mit den additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform fixgel]. Die Prüfgruppen aus additiver Basis und dem Reparaturmaterial freeform® fixgel erreichten unabhängig jeder Konditionierung und Alterung signifikant schlechtere Werte als der konventionell hergestellte Goldstandard (Basis und Reparaturmaterial aus PMMA). Bei der Nassalterung wurde entsprechend der Herstellerangaben der Haftvermittler zusätzlich untersucht und in der Abbildung ergänzt. Die Nassalterung erreicht im Vergleich zur Trockenalterung signifikant höhere Werte.

Der Goldstandard erreichte in der Zusammenfassung gegenüber der additiven Prüfgruppe mit der Schienenbasis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem lichthärtenden Reparaturmaterial freeform® fixgel signifikant bessere

Verbundfestigkeitswerte, die homogener gestreut waren. Vor allem die Box-Plots der Gruppen mit gestrahlter Oberfläche zeigten eine große Streuung. Die Konfidenzintervalle der konventionellen Kontrollgruppe waren schmäler als die der additiven Prüfgruppen. Bei beiden Alterungsformen erreichte die Prüfgruppe mit der unbehandelten Oberfläche die geringsten Verbundfestigkeitswerte. Das Abstrahlen führte zu einem statistisch signifikant positiven Effekt auf den Haftverbund. Die Anwendung des Haftvermittlers freeform® bond (Median 15,15 MPa) hatte keinen signifikanten Effekt bei der Nassalterung. Die Kombination aus Abstrahlen und Anwenden des Haftvermittlers führte sogar zu einer signifikanten Verschlechterung des Haftverbundes (Median 10,39 MPa).

P- Werte siehe Tabelle 36, Seite 217 im Anhang.

### **3.6 Reparaturmaterial: freeform® plast auf additiver Basis**

Bei der Verwendung des lichthärtenden Reparaturmaterials freeform® plast auf additiver Schienenbasis wurde entsprechend der Herstellerempfehlung der Haftvermittler freeform® bond nur bei der Nassalterung angewendet.

#### 3.6.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

##### 3.6.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Alle n= 40 Prüfkörper konnten der Testung der Verbundfestigkeit zugeführt werden.

## Ergebnisse

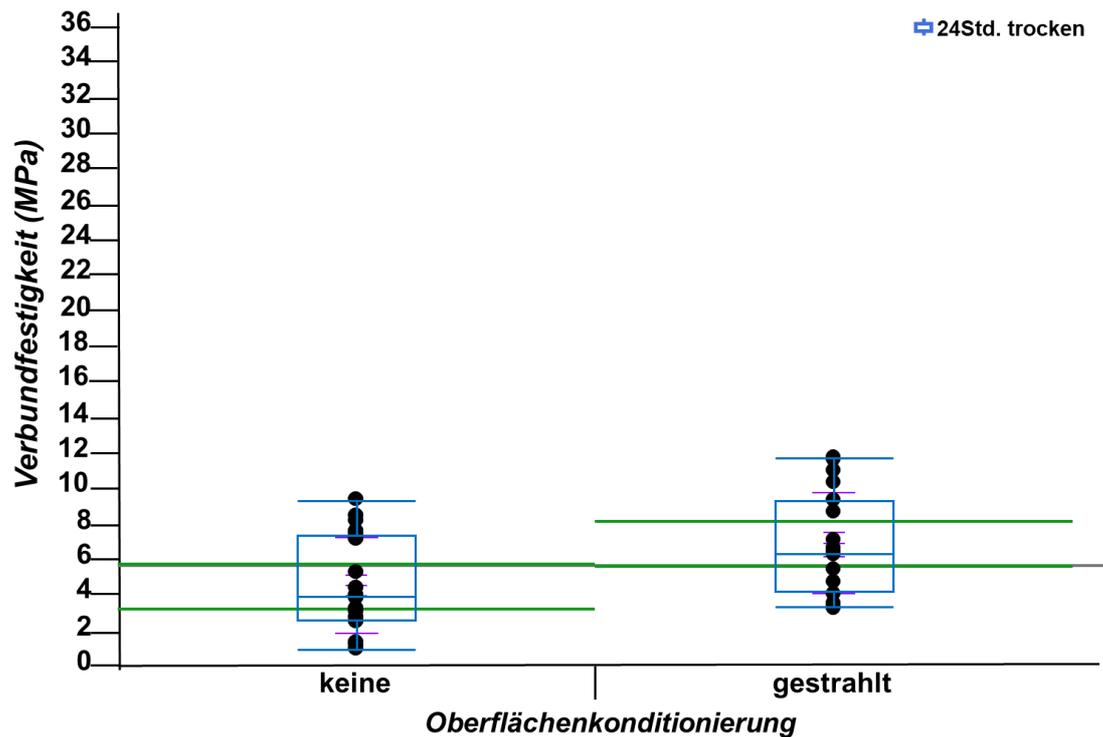


Abbildung 46: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform plast], bei der Alterungsform [24Std. trocken]. Die y-Achse wurde wie bei allen anderen Gruppen auch gleich skaliert. Die unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen wurden miteinander verglichen. Das Abstrahlen führte zu einer Tendenzverbesserung der Werte gegenüber der unbehandelten Oberfläche.

Beide Box-Plots waren normalverteilt. Der Shapiro-Wilk-W-Test lieferte folgende Goodness-of-Fit-Werte:

- [24Std. trocken] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,0966
- [24Std. trocken] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,0786.

Die Trockenalterung zeigte bei der Verwendung des Reparaturmaterials freeform® plast Verbundfestigkeitswerte, die im Vergleich gegenüber den anderen Reparaturmaterialien in geringeren Wertebereichen liegen. Wie bei allen Darstellungen wurde die Skalierung der y-Achse auch bei diesen Gruppen gleich gewählt. Dabei zeigte das obere Konfidenzintervall der unbehandelten Oberfläche mit dem unteren Konfidenzintervall der gestrahlten Gruppe eine Überschneidung. Das Abstrahlen der Oberfläche erreichte mit einem Median

## Ergebnisse

von 6,36 MPa in der Tendenz höhere Werte als die unbehandelte Oberfläche mit einem Median von 3,90 MPa.

Streu- und Lageparameter siehe Tabelle 37, Seite 218 im Anhang.

P- Wert siehe Tabelle 38, Seite 218 im Anhang.

### 3.6.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Alle n= 80 hergestellten Prüfkörper wurden erfolgreich der Testung der Verbundfestigkeit zugeführt. Der Haftvermittler freeform® bond wurde ergänzend untersucht.

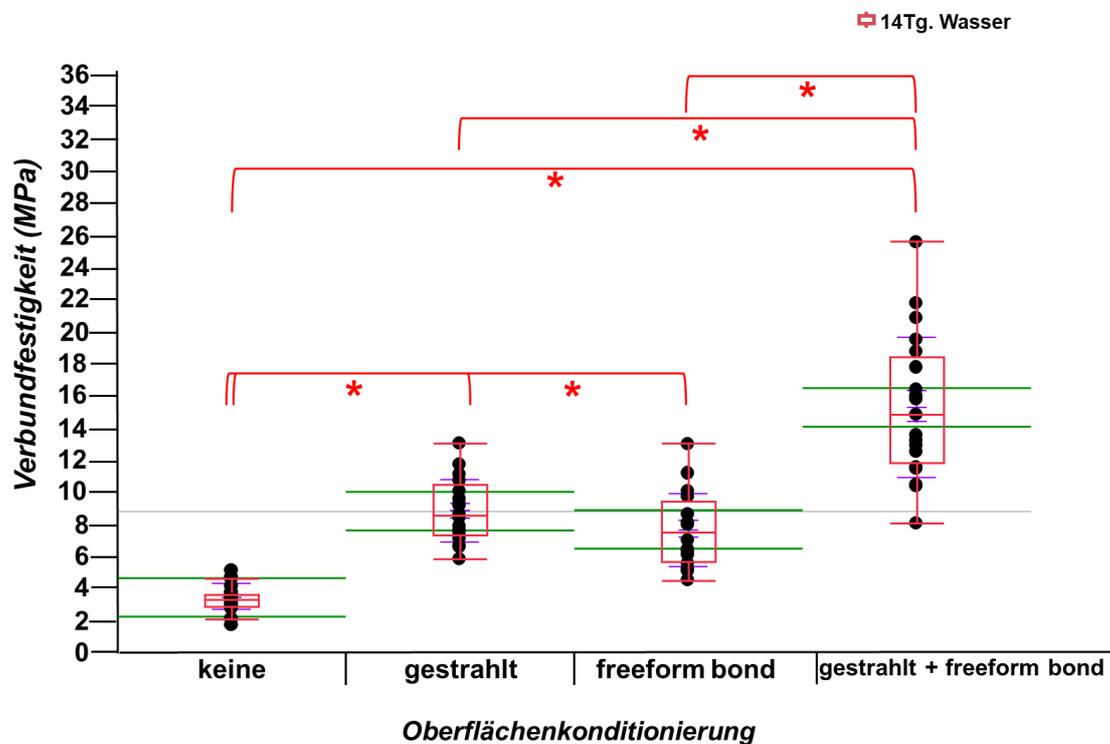


Abbildung 47: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der Prüfgruppen mit der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform plast], bei der Alterungsform [14Tg. Wasser]. Entsprechend der Herstellerangaben wurde hier der Haftvermittler mit und ohne Abstrahlen untersucht. Die unbehandelte Oberfläche zeigte signifikant schlechtere Werte gegenüber allen anderen Gruppen. Das Abstrahlen allein oder die Anwendung des Haftvermittlers freeform® bond allein machten keinen signifikanten Unterschied. Die Kombination aus Abstrahlen und freeform® bond erreichte die signifikant besten Werte.

## Ergebnisse

---

Die Testung der Normalverteilung mit dem Shapiro Wilk W Test zeigte bei allen Gruppen eine Normalverteilung:

- [14Tg. Wasser] + [keine]: Shapiro-Wilk Test: 0,7975
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt]: Shapiro-Wilk Test: 0,5231
- [14Tg. Wasser] + [freeform bond]: Shapiro-Wilk Test: 0,4527
- [14Tg. Wasser] + [gestrahlt + freeform bond]: Shapiro-Wilk Test: 0,7851.

Die statistische Auswertung erfolgte daher mit der parametrischen Methode (Each Pair Student`s t- Test).

Der Box- Plot der unbehandelten Oberfläche erreichte signifikant schlechtere Verbundfestigkeitswerte bei der Nassalterung als jede Konditionierungsform und zeigte einen Minimalwert von 1,72 MPa und einen Maximalwert von 5,14 MPa. Der Median lag bei der unbehandelten Oberfläche bei 3,48 MPa Die Gruppe mit der abgestrahlten Oberfläche erreichte einen Median von 8,51 MPa. Die Oberflächenkonditionierung mit dem Haftvermittler [freeform bond] erreichte mit einem Median von 7,51 MPa sogar in der Tendenz geringere Werte als die gestrahlte Prüfgruppe. Die Kombination aus Abstrahlen und Anwendung des Haftvermittlers zeigte Verbundfestigkeitswerte zwischen 8,06 MPa und 25,58 MPa. Der Median lag bei 14,88 MPa und war signifikant höher als alle andern Prüfgruppen.

Streu- und Lageparameter siehe Tabelle 39, Seite 219 im Anhang.

P- Werte siehe Tabelle 40, Seite 219 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.6.2 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Alterung

#### 3.6.2.1 Oberflächenkonditionierung: keine

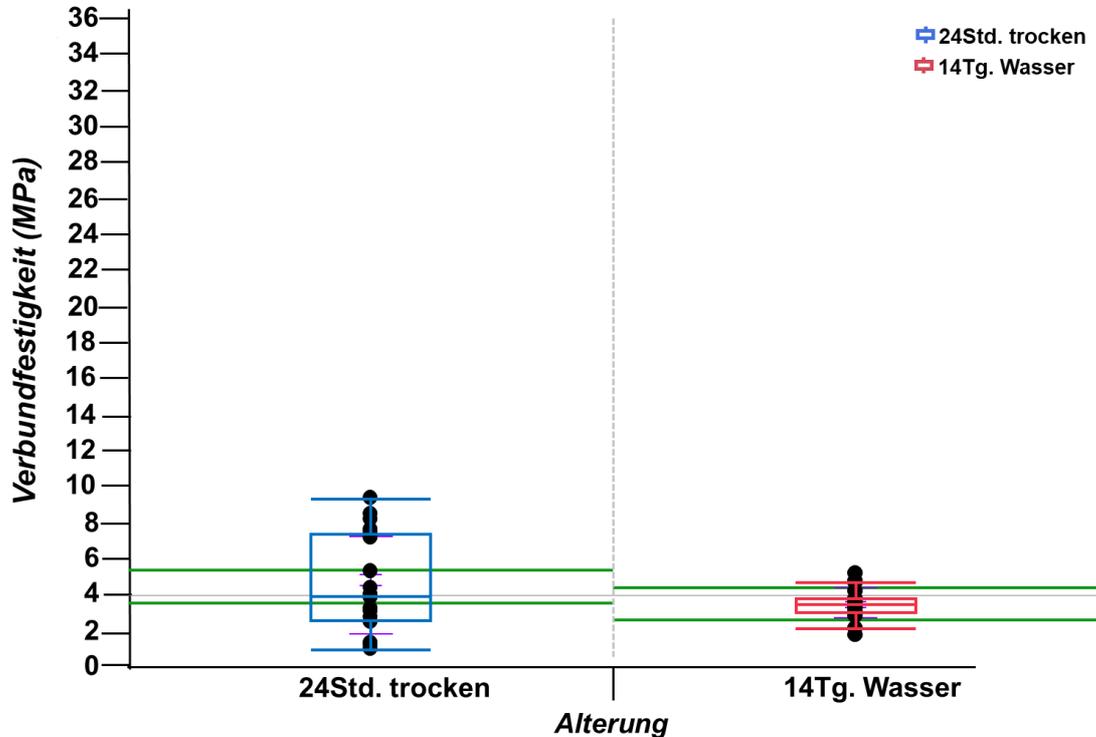


Abbildung 48: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform plast], bei der Oberflächenkonditionierung [keine]. Die Nassalterung zeigte keine signifikant niedrigeren Verbundfestigkeitswerte.

Der Box- Plot der Trockenalterung erreichte Verbundfestigkeitswerte mit einer breiteren Streuung. Die Konfidenzintervalle beider Gruppen waren ähnlich breit. Diese zeigten eine Überschneidung auf, dabei war die Trockenalterung mit einem Median von 3,90 MPa nicht signifikant besser als die Nassalterung (Median 3,48 MPa).

P- Wert siehe Tabelle 41, Seite 220 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.6.2.2 Oberflächenkonditionierung: gestrahlt

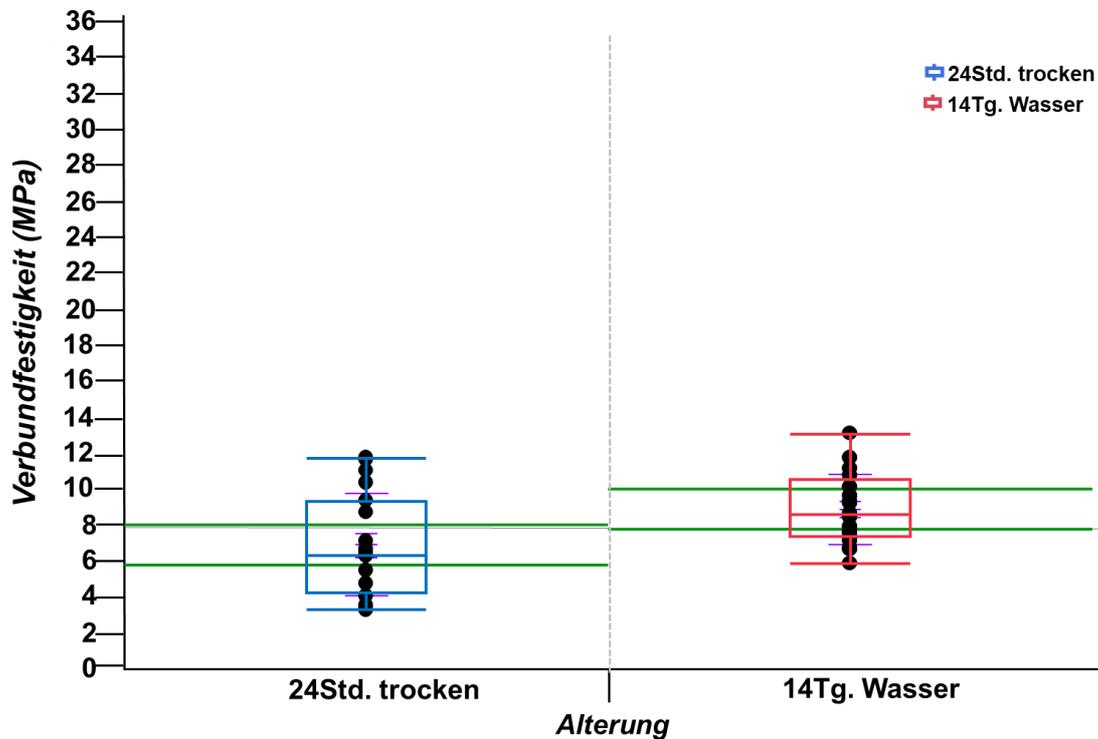


Abbildung 49: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der trockenen und in Wasser gealterten Prüfgruppen mit der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform plast] bei der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt]. Das Abstrahlen führte bei der Nassalterung zu in der Tendenz besseren Werten als die trockene Alterungsform.

Im Vergleich zur unbehandelten Oberfläche zeigten die abgestrahlten Prüfgruppen höhere Verbundfestigkeitswerte mit ähnlichen Konfidenzintervallen und ähnlicher Streuung. Der oberer Konfidenzintervall der Trockenalterung zeigte eine Überschneidung mit dem unteren Konfidenzintervall der Nassalterung. Daher war die Nassalterung (Median 8,51 MPa) in der Tendenz besser als die trockene Alterungsform (Median 6,36 MPa).

P- Wert siehe Tabelle 41, Seite 220 im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.6.3 Alle Prüfgruppen gegenüber der konventionell hergestellten Kontrollgruppe

Alle Gruppen des Reparaturmaterials freeform® plast wurden mit der individuell und konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] verglichen. Alle Box-Plots waren normal verteilt, daher wurde ergänzend zur statistischen Auswertung der p- Wert mit Hilfe der parametrischen Methode (Each Pair Student`s t- Test) berechnet.

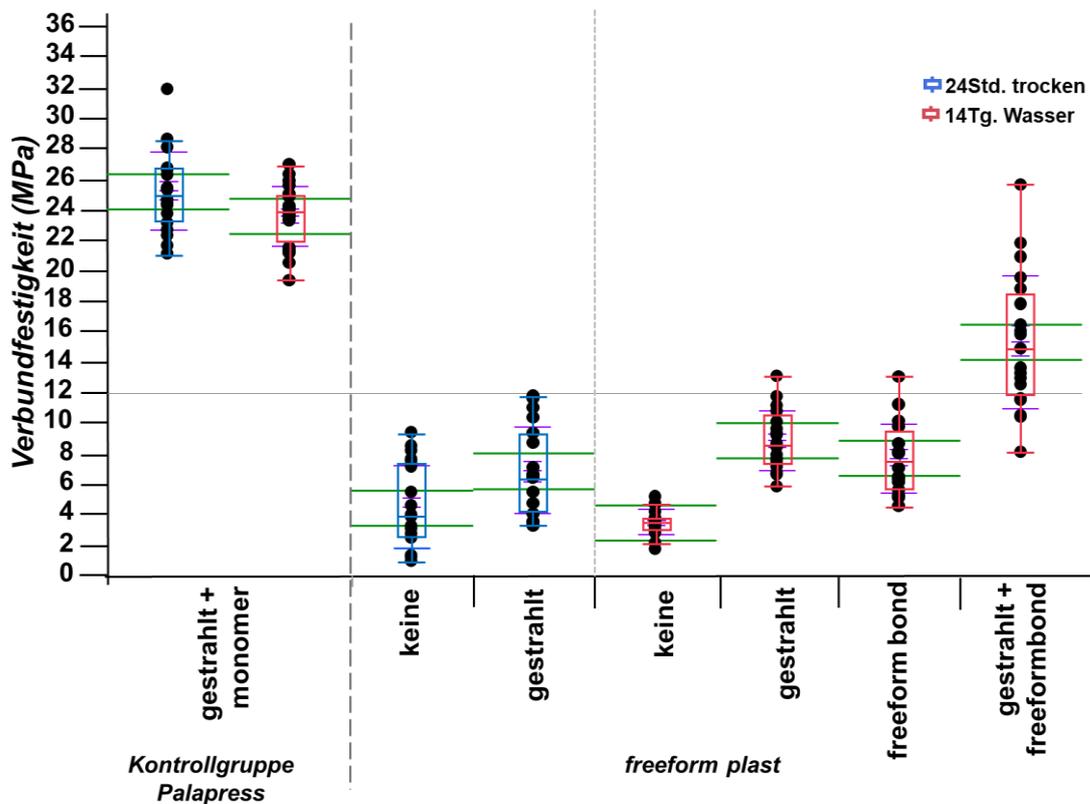


Abbildung 50: Verbundfestigkeitswerte (MPa) der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich mit den additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und des Reparaturmaterials [freeform plast]. Entsprechend der Herstellerangaben wurde der Haftvermittler nur bei der Nassalterung angewendet. Der Goldstandard (konventionell hergestellte Kontrollgruppe aus PMMA- Basis und Reparaturmaterial PMMA) erreichte signifikant höhere Werte als die additiven Prüfgruppen mit dem Reparaturmaterial freeform® plast. Lediglich die nass gealterte Prüfgruppe mit der Kombination aus Strahlen und Anwendung des Haftvermittlers führte zu signifikant höchsten Werten im Vergleich zu den restlichen additiven Gruppen. Bei der Trockenalterung führte das Abstrahlen nur zu in der Tendenz besseren Verbundfestigkeitswerten.

In der Zusammenstellung mit der konventionell hergestellten Kontrollgruppe als Goldstandard und der additiven Prüfgruppen mit dem Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV und dem lichthärtendem Reparaturmaterial freeform® plast erreichte der Goldstandard statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte jeder Konditionierung und Alterung der additiv hergestellten Prüfgruppen. Unabhängig der Alterung erreichte die Prüfgruppe mit der unbehandelten Oberfläche die signifikant geringsten Werte. Das Abstrahlen führte im Gegensatz zur unbehandelten Oberfläche bei der Trockenalterung (Median 6,36 MPa) in der Tendenz zu einer Verbesserung und bei der Nassalterung zu einer signifikanten Verbesserung des Haftverbundes. Bei der Nassalterung machte es keinen signifikanten Unterschied die Oberfläche nur abzustrahlen (Median 8,51 MPa) oder nur den Haftvermittler freeform® bond (Median 7,51 MPa) anzuwenden. Deren Kombination führte zu einer signifikanten Verbesserung im Vergleich zu allen anderen additiven Prüfgruppen (Median 14,88 MPa).

P- Werte siehe Tabelle 42, Seite 220 im Anhang.

### **3.7 alle additiven Prüfgruppen gegenüber der konventionellen Kontrollgruppe**

Alle Prüfgruppen wurden in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung untersucht. Dabei wurden die Alterungsformen getrennt betrachtet.

#### 3.7.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

##### 3.7.1.1 Alterung: 24Std. trocken

Alle untersuchten Gruppen der Alterungsform [24Std. trocken] wurden untereinander verglichen. Alle additiven Prüfgruppen waren bis auf [primostick] beim Reparaturmaterial primosplint® normal verteilt. Die nächste Abbildung zeigt alle Ergebnisse der Alterung [24Std. trocken]. Die Gesamtanzahl der

## Ergebnisse

hergestellten Prüfkörper betrug  $n=300$ . Zur Testung der Verbundfestigkeit wurden  $n=297$  zugeführt, da bei der Gruppe [freeform fixgel] mit der unbehandelten Oberfläche sich drei Zylinder vor der Testung von der Prüfkörperbasis lösten.

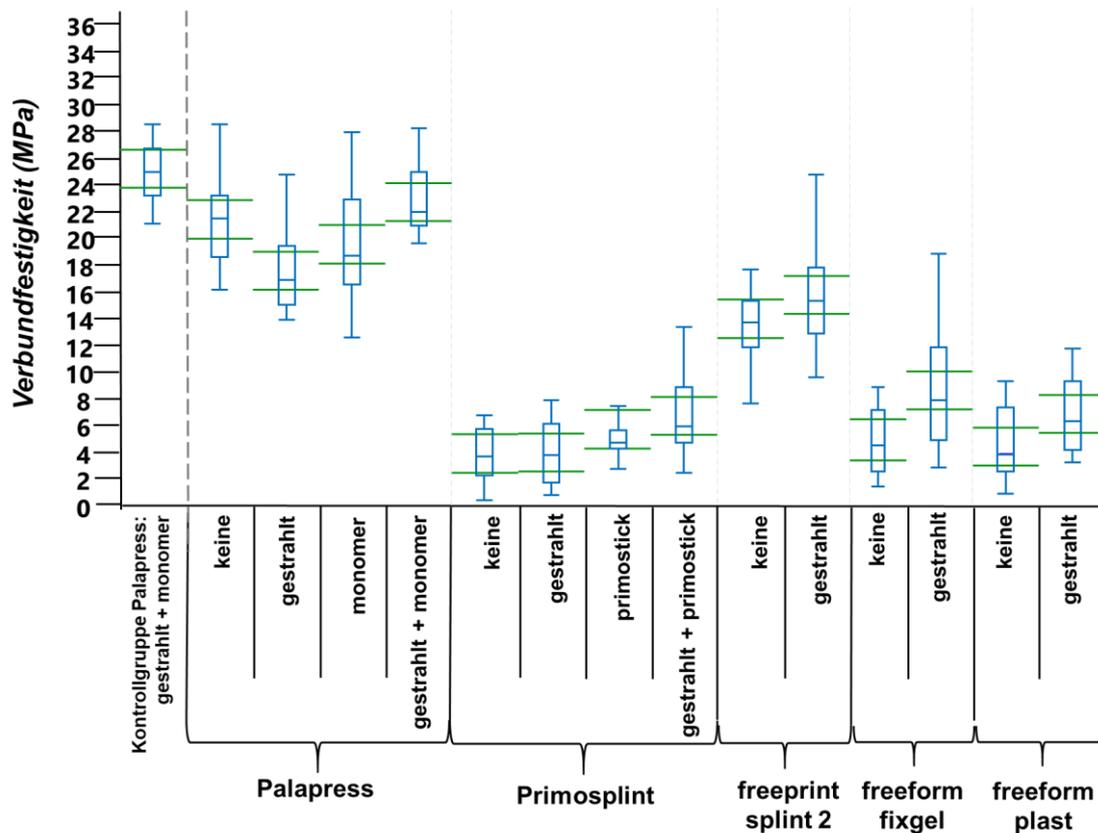


Abbildung 51: Ergebnisse der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich mit den additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D-gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und aller Reparaturmaterialien, bei der Alterungsform [24Std. trocken]. In der Gesamtdarstellung der Trockenalterung wird gezeigt, dass der Goldstandard (konventionelle Schienenbasis und Reparaturmaterial PMMA) statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte zeigt. Die Verbundfestigkeitswerte der Prüfgruppe mit dem additiven Schienenmaterial aus freeprint® splint 2.0 UV und dem konventionellen Reparaturmaterial aus PMMA erreichte bei jeder Konditionierung gegenüber den anderen additiven Prüfgruppen die statistisch signifikant höchsten Werte. Dieser Gruppe folgte die additive Prüfgruppe, in der sowohl die Basis als auch das Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV verwendet wurde. Am schlechtesten schnitten die lichterhärtenden Reparaturmaterialien primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast.

## Ergebnisse

---

Die Mittelwerte aller Gruppen wurden in absteigender Reihenfolge sortiert. Dabei ergab sich folgende Reihung:

[Kontrollgruppe Palapress]+[gestrahlt + monomer] >  
[Palapress]+[gestrahlt + monomer] > [Palapress]+[keine] >  
[Palapress]+[monomer] > [Palapress]+[gestrahlt] >  
[freeprint splint 2]+[gestrahlt] > [freeprint splint 2]+[keine] >  
[freeform fixgel]+[gestrahlt] > [freeform plast]+[gestrahlt] >  
[primosplint]+[gestrahlt + primostick] > [primosplint]+[primostick] >  
[freeform fixgel]+[keine] > [freeform plast]+[keine] >  
[primosplint]+[gestrahlt] > [primosplint]+[keine].

Die Gesamtdarstellung aller Prüfgruppen, die trocken gealtert wurden zeigt, dass der Goldstandard mit der konventionell hergestellten Schienenbasis aus PMMA und des Reparaturmaterials PMMA, dass lediglich das Reparaturmaterial PMMA auf additiver Schienenbasis (aus freeprint® splint 2.0 UV) gering abfallende Verbundfestigkeitswerte aufzeigte. Alle anderen Reparaturmaterialien wiesen auf additiver Schienenbasis stark abfallende Werte (von 9,61 MPa bis 21,57 MPa) auf. Vor allem die Lichtpolymerisate primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast mit unbehandelter Oberfläche erreichten im Vergleich Goldstandard stark abfallende Werte (von 20,41 MPa bis 21,26 MPa). Betrachtet man den Effekt der unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen, so erreichte die Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial freeform® fixgel mit Abstrahlen einen statistisch signifikant positiven Effekt auf die Verbundfestigkeitswerte gegenüber der unbehandelten Oberfläche mit dem gleichen Reparaturmaterial. Bei allen anderen Gruppen lagen nur Tendenzen oder keine signifikanten Effekte innerhalb der eigenen Prüfgruppe vor.

Die Prüfgruppe bestehend aus dem Schienen- und Reparaturmaterial aus freeprint® splint 2.0 UV erreichte unabhängig von der Oberflächenkonditionierung statistisch signifikant bessere Werte als die Lichtpolymerisate primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast.

## Ergebnisse

### 3.7.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Die Gesamtanzahl der hergestellten Prüfkörper betrug  $n = 380$ , zur Testung der Verbundfestigkeit wurden  $n = 377$  Prüfkörper zugeführt. Der Haftvermittler freeform® bond mit und ohne Abstrahlen wurde untersucht.

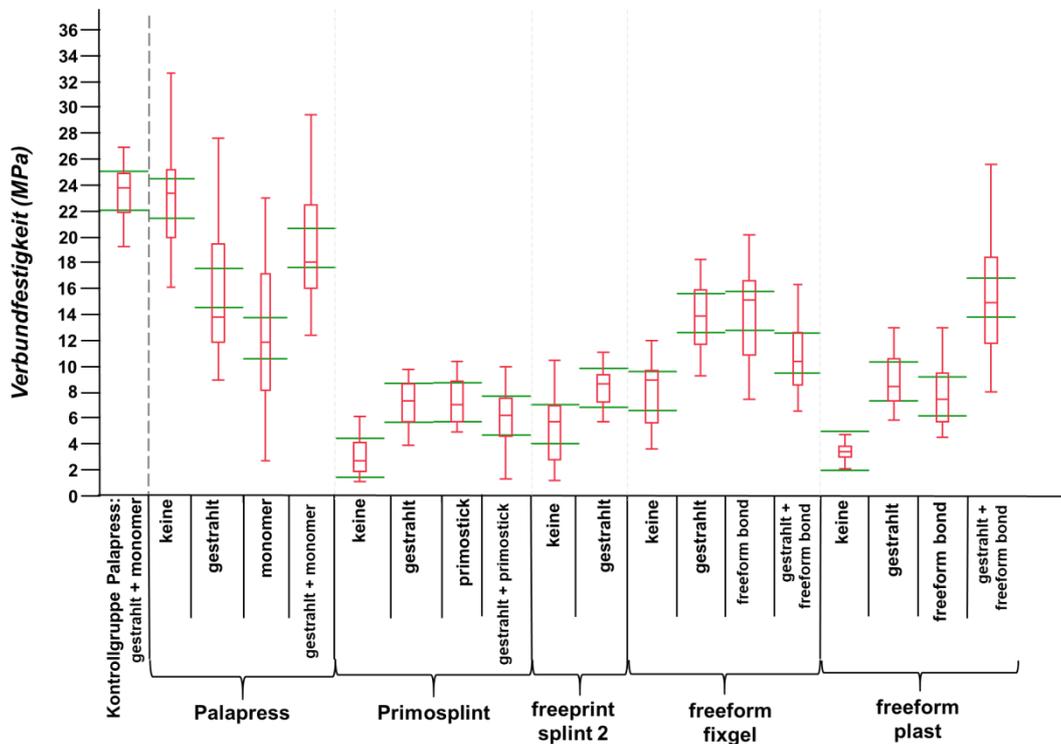


Abbildung 52: Ergebnisse der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich mit den additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und aller Reparaturmaterialien, bei der Alterungsform [14Tg. Wasser]. In der Gesamtdarstellung der Nassalterung wird gezeigt, dass der Goldstandard (konventionelle Schienenbasis und Reparaturmaterial PMMA) statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte zeigt, außer bei der unbehandelten additiven Oberfläche aus freeprint® splint 2.0 UV mit dem konventionellen Reparaturmaterial PMMA. Die Verbundfestigkeitswerte der Prüfgruppe mit dem additiven Schienenmaterial aus freeprint® splint 2.0 UV mit dem konventionellen Reparaturmaterial Palapress® erreichte bei der abgestrahlten und mit Monomer benetzten, sowie bei der unbehandelten Oberfläche gegenüber den anderen additiven Prüfgruppen die statistisch signifikant höchsten Werte. Dieser Gruppe folgte die additive Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial freeform® plast mit der abgestrahlten und mit dem Haftvermittler freeform® bond benetzten Oberfläche. Am schlechtesten schnitt das lighthärtende Reparaturmaterial primosplint® und die Prüfgruppe in welcher Schienenbasis und Reparaturmaterial aus freeprint® splint 2.0 UV bestand.

## Ergebnisse

---

Alle Box- Plots waren normal verteilt. Die Konfidenzintervalle der [Kontrollgruppe Palapress] zeigten nur Überschneidungen mit den Konfidenzintervallen der Gruppe [Palapress]+[keine] auf. Zwischen diesen bestand kein statistisch signifikanter Unterschied. Alle anderen Konfidenzintervalle zeigten mit den Konfidenzintervallen der Kontrollgruppe keine Überschneidungen. Daher war die [Kontrollgruppe Palapress] statistisch signifikant besser als alle anderen Gruppen (bis auf o.g. Gruppe).

Die Mittelwerte wurden absteigenden sortiert, dabei ergab sich folgende Reihenfolge:

[Kontrollgruppe Palapress]+[gestrahlt + monomer] >  
[Palapress]+[keine] > [Palapress]+[gestrahlt + monomer] >  
[Palapress]+[gestrahlt] > [freeform plast]+[gestrahlt + freeform bond] >  
[freeform fixgel]+[freeform bond] > [freeform fixgel]+[gestrahlt] >  
[Palapress]+[monomer] > [freeform fixgel]+[gestrahlt + freeform bond] >  
[freeform plast]+[gestrahlt] > [freeprint splint 2]+[gestrahlt] >  
[freeform fixgel]+[keine] > [freeform plast]+[freeform bond] >  
[primosplint]+[primostick] > [primosplint]+[gestrahlt] >  
[primosplint]+[gestrahlt + primostick] > [freeprint splint 2]+[keine] >  
[freeform plast]+[keine] > [primosplint]+[keine].

Die Gesamtdarstellung bei der Nassalterung zeigt auch die Prüfgruppen bei welcher der Haftvermittler freeform® bond mit und ohne Abstrahlen verwendet wurde.

Der Goldstandard aus konventioneller Schienenbasis aus PMMA und Reparaturmaterial PMMA zeigte gegenüber den additiven Prüfgruppen statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte, außer zur Prüfgruppe mit additiven Schienenbasis und Reparaturmaterial Palapress® bei unbehandelter Oberfläche. In dieser additiven Prüfgruppe hatte die Konditionierung der Oberfläche einen statistisch signifikant negativen Effekt auf den Haftverbund.

Bei den Prüfgruppen mit additiver Schienenbasis aus freeprint® splint 2.0 UV und den Reparaturmaterialien freeform® fixgel und freeform® plast hatte die jegliche Art der Konditionierung einen statistisch signifikanten Effekt auf den

Haftverbund innerhalb der eigenen Prüfgruppe. Bei beiden Reparaturmaterialien machte es keinen signifikanten Unterschied, die Oberfläche nur zu strahlen oder nur den Haftvermittler zu verwenden. Die Kombination aus Abstrahlen und dem Haftvermittler freeform® bond führte beim Reparaturmaterial freeform® fixgel zu statistisch signifikant schlechteren Werten als nur zu Strahlen oder nur den Haftvermittler anzuwenden. Beim Reparaturmaterial freeform® plast erreichte diese Kombination aus Strahlen und Haftvermittler zu einem statistisch signifikant positiven Effekt innerhalb der eigenen Prüfgruppe.

Vergleicht man die Werte der Verbundfestigkeit vom Goldstandard mit denen der additiven Prüfgruppen, so fallen diese von 0,41 MPa bis 21,13 MPa ab. Die konventionelle Prüfgruppe zeigte stabilere Werte als alle anderen Prüfgruppen.

### **3.8 additiven Prüfgruppen mit unbehandelter Oberfläche [keine], gegenüber der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress]**

In dieser Studie wurde bei allen fünf Reparaturmaterialien der additiven Prüfgruppen die Oberfläche unbehandelt belassen [keine]. Dabei wurden beide Alterungsformen [24Std. trocken] und [14Tg. Wasser] untersucht.

#### **3.8.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung**

Bei der Testung der Verbundfestigkeit aller Prüfgruppen wurden insgesamt n= 200 Prüfkörper für die Gruppe ohne Oberflächenkonditionierung hergestellt. Zur Testung der Verbundfestigkeit konnten n= 196 zugeführt werden.

In der folgenden Abbildung sind die Messergebnisse aller additiven Prüfgruppen im Vergleich zur konventionellen Kontrollgruppe als Goldstandard dargestellt.

Bei der Gruppe [freeform fixgel] + [keine] + [24Std. trocken] konnten der Testung der Verbundfestigkeit nur n= 17 von insgesamt n= 20 hergestellten Prüfkörpern zugeführt werden. Bei der Gruppe

## Ergebnisse

[Palapress] + [keine] + [14Tg. Wasser] konnten n= 19 von insgesamt n= 20 hergestellten Prüfkörpern zugeführt werden.

Alle Gruppen der Oberflächenkonditionierung [keine] waren normal verteilt.

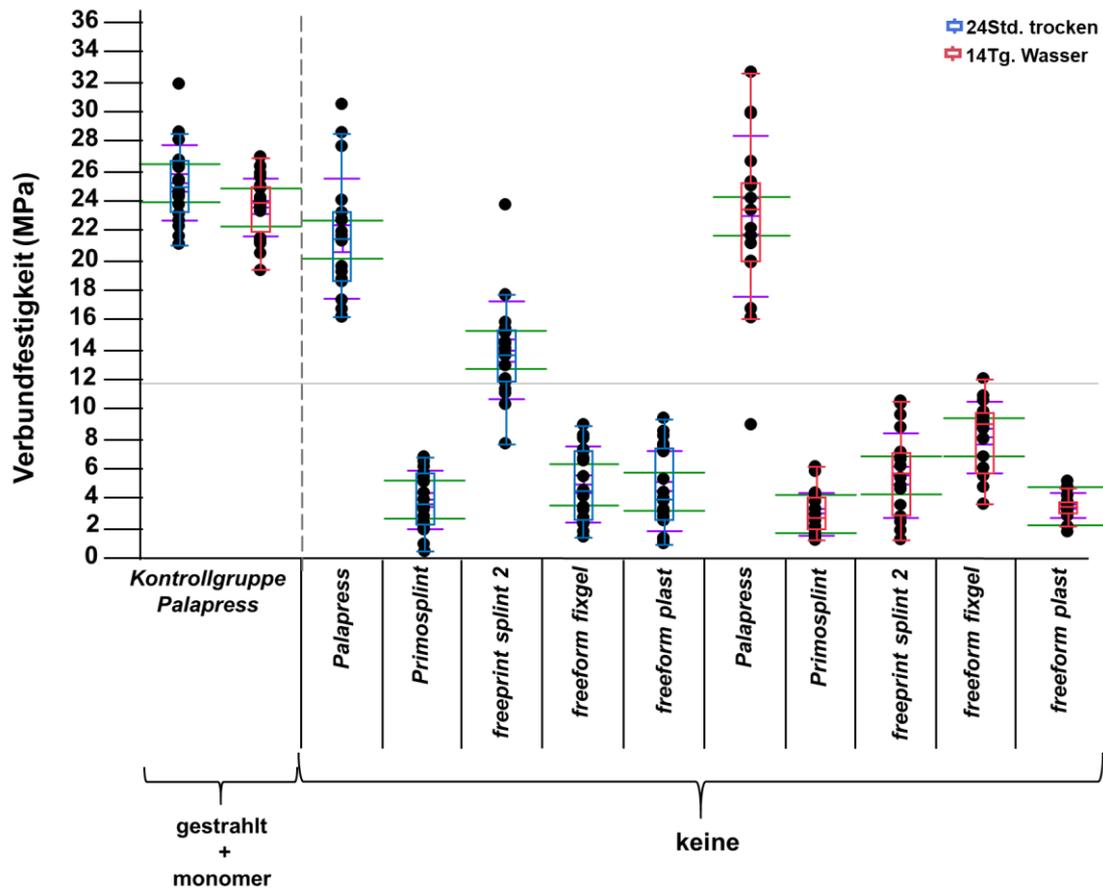


Abbildung 53: Ergebnisse der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] und der additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und aller Reparaturmaterialien. Die Oberfläche bei allen additiven Prüfgruppen war unbehandelt [keine]. Beide Alterungsformen sind abgebildet. Die Gesamtdarstellung zeigt, dass die konventionelle Kontrollgruppe als Goldstandard bei der Trockenalterung statistisch signifikant besser war, gegenüber allen anderen trocken gealterten, additiven Prüfgruppen. Bei der Nassalterung lag jedoch kein statistisch signifikanter Effekt zwischen dem Goldstandard und der Prüfgruppe mit additiver Schienenbasis aus freeprint® splint 2.0 UV mit dem Reparaturmaterial Palapress®. Alle anderen Konfidenzintervalle zeigten im Vergleich zur [Kontrollgruppe Palapress] keine Überschneidungen auf. Beim Vergleich der additiven Prüfgruppen untereinander war das Reparaturmaterial [Palapress] statistisch signifikant besser als alle anderen additiven Prüfgruppen.

## Ergebnisse

---

Die absteigende Sortierung der Mittelwerte zeigte folgende Reihenfolge:

[Kontrollgruppe Palapress]+[24Std. trocken] >  
[Kontrollgruppe Palapress]+[14Tg. Wasser] >  
[Palapress]+[14Tg. Wasser] > [Palapress]+[24Std. trocken] >  
[freeprint splint 2] + [24Std. trocken] >  
[freeform fixgel]+[14Tg. Wasser] > [freeprint splint 2] + [14Tg. Wasser] >  
[freeform fixgel]+[24Std. trocken] > [freeform plast]+[24Std. trocken] >  
[primosplint]+[24Std. trocken] > [freeform plast]+[14Tg. Wasser] >  
[primosplint]+[14Tg. Wasser].

In der Gesamtdarstellung der Prüfgruppen mit unbehandelter Oberfläche erreichte die Prüfgruppe mit additiver Schienenbasis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial Palapress® im Vergleich zu allen anderen additiven Prüfgruppen statistisch signifikant bessere Verbundfestigkeitswerte. Der Goldstandard mit konventioneller Schienenbasis und Reparaturmaterial aus Palapress® zeigte bei der Trockenalterung statistisch signifikant bessere Werte gegenüber allen anderen Prüfgruppen, außer zur nass gealterten additiven Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial Palapress® vor. Hier war die konventionelle Kontrollgruppe nur in der Tendenz besser. Auch lagen zwischen dem Goldstandard und der additiven Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial Palapress® bei der Nassalterung keine statistisch signifikanten Effekte vor. Bei der Trockenalterung fiel der Wert der Verbundfestigkeit bei den additiven Prüfgruppen von einem Median von 21,44 MPa beim Reparaturmaterial Palapress® um 17,77 MPa ab (Median beim Reparaturmaterial primosplint® 3,67 MPa). Bei der Nassalterung waren abfallende Werte von 23,40 MPa (Median bei Palapress®) um 20,72 MPa festzustellen.

### **3.9 additive Prüfgruppen mit Oberflächenkonditionierung [gestrahlt], gegenüber der [Kontrollgruppe Palapress]**

Alle additiven Prüfgruppen mit der abgestrahlten Oberfläche wurden im Vergleich zur konventionellen Kontrollgruppe statistisch untersucht.

## Ergebnisse

### 3.9.1 Verbundfestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenkonditionierung

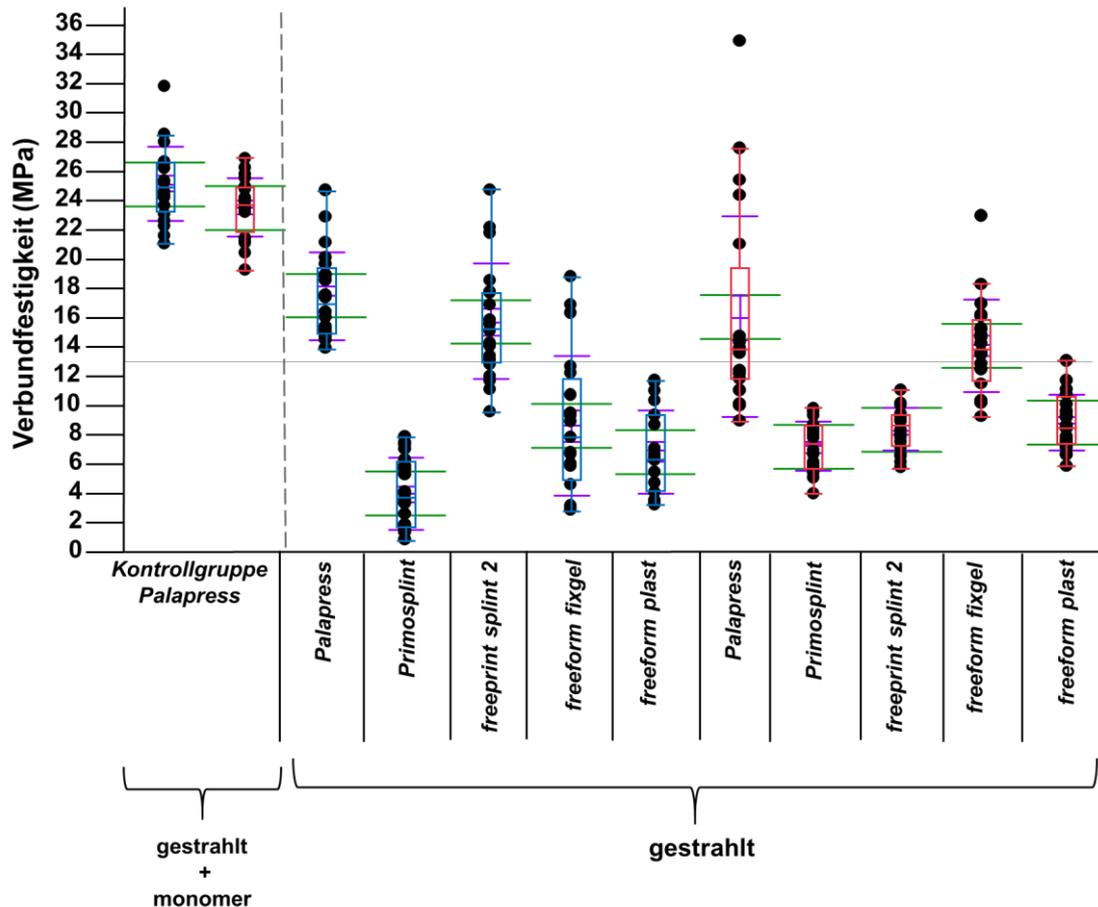


Abbildung 54: Ergebnisse der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] und der additiven Prüfgruppen bestehend aus der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis aus [freeprint splint 2] und aller Reparaturmaterialien. Die Oberfläche bei allen additiven Prüfgruppen wurde [gestrahlt]. Beide Alterungsformen sind abgebildet. Die konventionelle Kontrollgruppe als Goldstandard war statistisch signifikant besser als alle additiven Prüfgruppen, bei der die Oberfläche gestrahlt wurde. Bei den additiven Prüfgruppen zeigte die Verwendung des Reparaturmaterials Palapress®, bei unterschiedlicher Alterung keine signifikanten Unterschiede. Auch zeigte die Verwendung von [freeprint splint 2] auf trocken gealterter Prüfkörperbasis keine signifikanten Unterschiede gegenüber dem Reparaturmaterial [Palapress] beider Alterungsformen. Bei der Nassalterung folgte der additiven Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial aus freeform® fixgel, die Prüfgruppe mit additiver Basis und dem Reparaturmaterial PMMA.

## Ergebnisse

---

Die Mittelwerte der Gruppen wiesen deutliche Unterschiede auf. Die absteigende Sortierung der Mittelwerte zeigte folgende Reihenfolge:

[Kontrollgruppe Palapress]+[24Std. trocken] >  
[Kontrollgruppe Palapress]+[14Tg. Wasser] >  
[Palapress]+[24Std. trocken] > [Palapress]+[14Tg. Wasser] >  
[freeprint splint 2] + [24Std. trocken] >  
[freeform fixgel]+[14Tg. Wasser] > [freeform plast] + [14Tg. Wasser] >  
[freeform fixgel]+[24Std. trocken] > [freeprint splint 2]+[14Tg. Wasser] >  
[primosplint]+[14Tg. Wasser] > [freeform plast]+[24Std. trocken] >  
[primosplint]+[24Std. trocken].

Beim Vergleich aller additiven Prüfgruppen mit abgestrahlter Oberfläche mit der konventionellen Kontrollgruppe erreichte der Goldstandard wiederholt statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte als die additiven Gruppen. Ähnliche Werte vom Goldstandard zeigte die additive Prüfgruppe (Schienenbasis aus freeprint® splint 2.0 UV mit dem Reparaturmaterial Palapress® sowohl bei der Trockenalterung als auch bei der Nassalterung. Der Goldstandard wies hier stabilere Werte auf, vor allem die nass gealterte additive Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial Palapress® zeigte breite Streuungen insbesondere in höhere Bereiche auf. Innerhalb der additiven Prüfgruppen folgte dem Reparaturmaterial PMMA bei der Trockenalterung das Reparaturmaterial freeprint® splint, bei der Nassalterung das Reparaturmaterial freeform® fixgel.

Bei der Trockenalterung fiel der Wert der Verbundfestigkeit bei den additiven Prüfgruppen von einem Median von 16,90 MPa beim Reparaturmaterial Palapress® um 13,54 MPa beim Reparaturmaterial freeform® plast mit einem Median von 6,36 MPa ab. Bei der Nassalterung fielen die Verbundfestigkeitswerte von einem Median von 13,86 MPa bei Palapress® um 6,5 MPa beim Reparaturmaterial primosplint® mit einem Median von 7,36 MPa ab.

## Ergebnisse

### 3.10 additiven Prüfgruppe mit Reparaturmaterial [Palapress] und Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] im Vergleich zur [Kontrollgruppe Palapress]

Die Gruppe mit der 3D- gedruckten Basis und Palapress® als Reparaturmaterial, speziell mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] wurde mit der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] verglichen. Beide Gruppen waren normal verteilt.

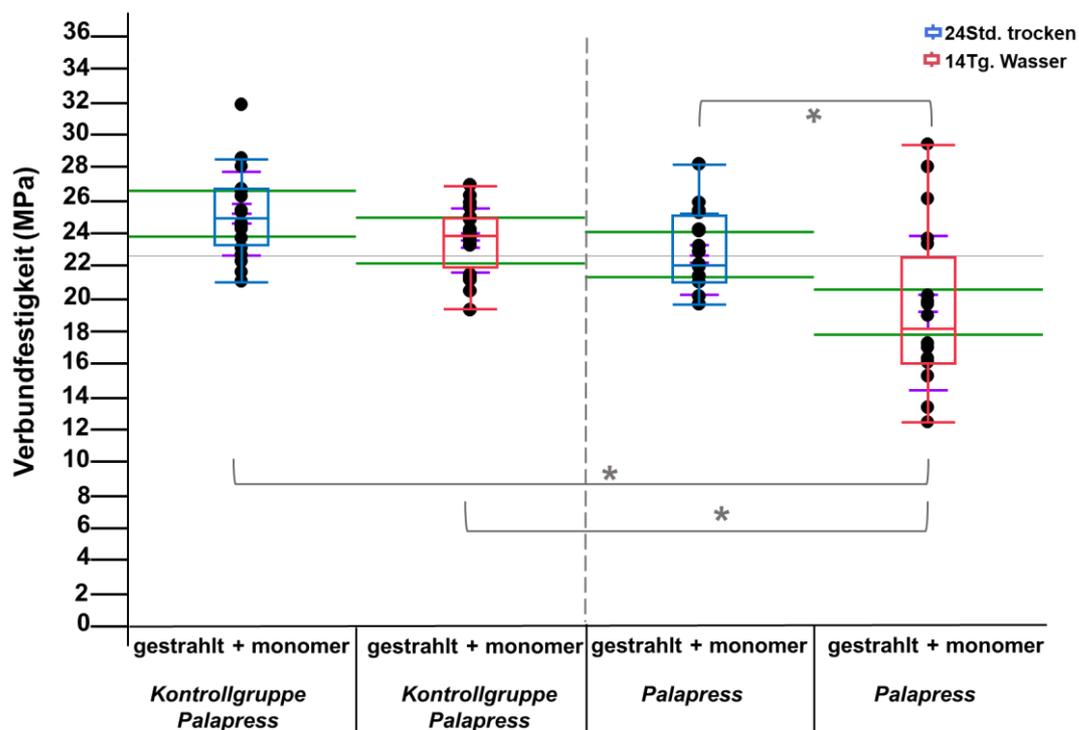


Abbildung 55: Ergebnisse der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich zur additiven Prüfgruppe, mit dem Reparaturmaterial [Palapress] und der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer]. Beide Alterungsformen wurden dargestellt. Die statistisch signifikanten Unterschiede wurden mit grauen Klammern markiert. Beide Alterungsformen der Kontrollgruppe waren statistisch hoch signifikant besser als die additive Prüfgruppe, die für 14Tg. in Wasser gealtert wurde. Die konventionelle Kontrollgruppe als Goldstandard war bei der Trockenalterung in der Tendenz besser als die additive Prüfgruppe. Bei den additiven Prüfgruppen war die Trockenalterung statistisch signifikant besser als die Nassalterung.

## Ergebnisse

---

Der Vergleich der konventionellen Kontrollgruppe als Goldstandard mit der Prüfgruppe aus additiver Schienenbasis aus freeprint® splint und dem Reparaturmaterial PMMA zeigte bei der gleichen Art der Oberflächenkonditionierung aus Abstrahlen und mit Monomer benetzen, dass der Goldstandard bei der Trockenalterung nur in der Tendenz besser war als die trocken gealterte Prüfgruppe. Bei der Nassalterung dagegen erreichte der Goldstandard statistisch hoch signifikant bessere Verbundfestigkeitswerte als die nass gealterte additive Prüfgruppe.

Die konventionelle Kontrollgruppe selbst zeigte bei den unterschiedlichen Alterungsformen keine statistisch signifikanten Unterschiede, mit Überschneidung der Konfidenzintervalle. Die additiven Prüfgruppen war die trocken gealterte Gruppe hoch signifikant besser als die additive Prüfgruppe bei der Nassalterung mit keiner Überschneidung der Konfidenzintervalle.

## 3.11 additive Prüfgruppen im Vergleich zur [Kontrollgruppe Palapress]

Alle Prüfgruppen unterschiedlicher Alterung und für jede Art der Oberflächenkonditionierung wurden verglichen. Die statistische Analyse erfolgte mit Hilfe der Konfidenzintervalle.

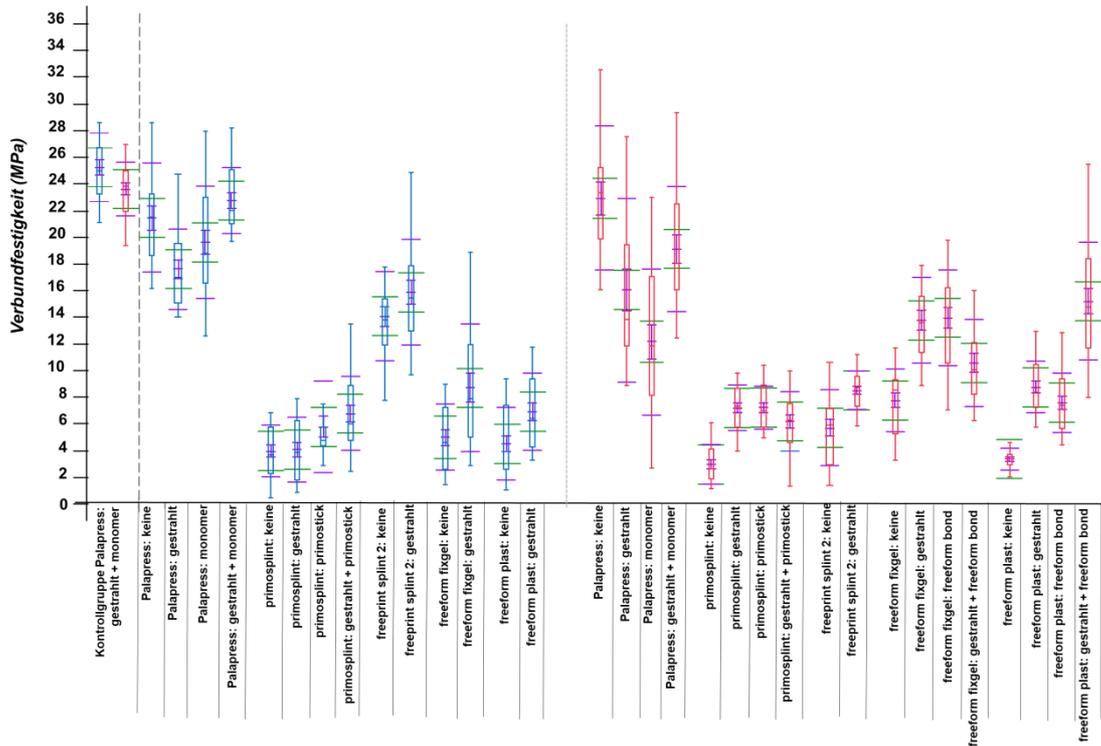


Abbildung 56: Ergebnisse der konventionell hergestellten [Kontrollgruppe Palapress] im Vergleich zu allen additiven Prüfgruppen. Aus der Gesamtdarstellung geht zusammengefasst hervor, dass die [Kontrollgruppe Palapress] beider Alterungsformen statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber den additiven Prüfgruppen mit den Reparaturmaterialien [primosplint], [freeprint splint 2], [freeform fixgel] und [freeform plast] erreichte. Gegenüber der additiven Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial [Palapress]+[gestrahit + monomer] +[14Tg. Wasser] war die konventionelle [Kontrollgruppe Palapress] statistisch signifikant besser. Die additive Prüfgruppe [Palapress]+[keine]+[14Tg. Wasser] erreichte statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte als alle anderen additiven Prüfgruppen. Danach erreichte die Prüfgruppe [Palapress]+[gestrahit + monomer]+[14Tg. Wasser] gegenüber den anderen additiven Prüfgruppen statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte.

## Ergebnisse

---

**Zusammenfassung:** Der Goldstandard selbst zeigte innerhalb beider Alterungsformen keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Die konventionell hergestellte Kontrollgruppe (beider Alterungsformen) erreichte statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte als die Reparaturmaterialien primosplint®, freeprint® splint 2.0 UV, freeform® fixgel und freeform® plast beider Alterungsformen und aller Arten der Oberflächenkonditionierungen. Die konventionelle Kontrollgruppe als Goldstandard war bei der Trockenalterung in der Tendenz besser als die additive Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial Palapress® bei Trockenalterung mit analoger Konditionierung.

Bei Betrachtung der trocken gealterten Prüfgruppen, bei welchen die Schienenbasis additiv hergestellt wurde, zeigte das Reparaturmaterial Palapress® gegenüber primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast unabhängig von deren Oberflächenkonditionierung statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte. Auch wies die Gruppe mit dem Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Basis bei der Trockenalterung statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber der Prüfgruppe [freeprint splint 2] + [keine] + [24Std. trocken].

Keine statistisch signifikanten Unterschiede innerhalb der trocken gealterten und additiven Prüfgruppen lagen zwischen dem Reparaturmaterial Palapress® mit un behandelter Oberfläche, gegenüber der abgestrahlten und mit Monomer benetzen oder nur gestrahlten Gruppe ebenso mit dem Reparaturmaterial Palapress® vor. Auch machte es keinen statistisch signifikanten Unterschied die Oberfläche bei der Trockenalterung nur zu strahlen oder nur mit Monomer zu benetzen. Bei der Trockenalterung lagen auch keine statistisch signifikanten Effekte zwischen den abgestrahlten Oberflächen bei den Gruppen mit den Reparaturmaterialien Palapress® und freeprint® splint 2.0 UV vor.

Bei der statistischen Analyse der Oberflächenkonditionierungsformen innerhalb des Reparaturmaterials primosplint® bei trockener Alterung war die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + primostick] statistisch hoch signifikant besser als die Oberfläche un behandelt zu belassen oder nur zu strahlen. Es zeigten sich jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der

## Ergebnisse

---

unbehandelten Oberfläche gegenüber der nur gestrahlten, oder nur mit dem Haftvermittler primostick® die Oberfläche zu behandeln. Auch lagen keine statistisch signifikanten Unterschiede beim Reparaturmaterial primosplint® bei Trockenalterung zwischen Abstrahlen oder nur den Haftvermittler primostick® zu verwenden. Statistisch nicht signifikant waren auch die Unterschiede zwischen [primostick] und [gestrahlt + primostick].

Innerhalb der trocken gealterten Prüfgruppe mit dem Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV machte die gestrahlte Oberfläche keinen signifikanten Unterschied gegenüber der unbehandelten, additiv hergestellten Prüfkörperbasis, die ebenso aus freeprint® splint 2.0 UV bestand.

Das Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV zeigte innerhalb der trocken gealterten additiv hergestellten Prüfgruppen statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber die Reparaturmaterialien primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast.

Die Varianzanalyse innerhalb der trocken gealterten Prüfgruppe des Reparaturmaterials freeform® fixgel war die gestrahlte Oberfläche statistisch hoch signifikant besser als die unbehandelte Oberfläche.

Der Vergleich der Oberflächenkonditionierungen bei Verwendung des Reparaturmaterials freeform® plast bei der trockenen Alterung zeigte die gestrahlte Oberfläche nur in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte als die unbehandelte Oberfläche.

Der Vergleich zwischen den Reparaturmaterialien freeform® fixgel und freeform® plast bei der trockenen Alterungsform zeigte, dass die gestrahlte Oberfläche des Reparaturmaterials freeform® fixgel gegenüber der gestrahlten Oberfläche von freeform® plast nur in der Tendenz besser war. Bei allen anderen Vergleichen innerhalb der Reparaturmaterialien freeform® fixgel und freeform® plast bestanden zwischen den Oberflächenkonditionierungen bei der Trockenalterung keine statistisch signifikanten Unterschiede.

Bei Betrachtung der additiven Prüfgruppen, die in Wasser gealtert wurden, zeigte die Prüfgruppe [Palapress]+[keine] statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber der Reparaturmaterialien primosplint®,

## Ergebnisse

---

freeprint® splint 2.0 UV, freeform® fixgel und freeform® plast unabhängig von deren Oberflächenkonditionierungsformen.

Auch war die additive Prüfgruppe [Palapress]+[keine]+[14Tg. Wasser] gegenüber jeder Art der Oberflächenkonditionierung bei Verwendung des Reparaturmaterials Palapress® bei der Nassalterung statistisch hoch signifikant besser.

Die additive Prüfgruppe [Palapress]+[gestrahlt + monomer] erreichte bei der Nassalterung statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber der Reparaturmaterialien primosplint®, freeprint® splint 2.0 UV, freeform® fixgel und freeform® plast unabhängig von der Oberflächenkonditionierung der additiv hergestellten Prüfkörperbasis.

Innerhalb der additiven Prüfgruppen mit dem Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial Palapress® machte bei der Nassalterung die Kombination aus Strahlen und Monomer- Benetzung einen statistisch signifikant positiven Effekt auf den Haftverbund als die Oberfläche nur zu strahlen oder nur mit Monomer zu benetzen.

Das Reparaturmaterial primosplint® zeigte innerhalb des Vergleichs der Oberflächenkonditionierungen der eigenen Prüfgruppen, bei der Alterungsform [14Tg. Wasser], dass jede Art der Oberflächenkonditionierung statistisch hoch signifikant besser war, als die Oberfläche der Prüfkörperbasis unbehandelt zu belassen. Dabei lagen jedoch keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen der Konditionierung [gestrahlt], [primostick] und [gestrahlt + primostick].

Innerhalb des Reparaturmaterials freeprint® splint 2.0 UV bei der Alterungsform für 14 Tg. in Wasser erreichte die gestrahlte Oberfläche statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte, als die Prüfkörperbasis unbehandelt zu belassen.

Die Varianzanalyse innerhalb der Prüfgruppe [freeform fixgel]+[14Tg. Wasser] zeigte, dass die gestrahlte Oberfläche statistisch hoch signifikant besser abschnitt als die unbehandelte Oberfläche. Auch war die Oberflächenkonditionierung [freeform bond] statistisch signifikant besser als die unbehandelte Oberfläche. Die Nutzung des Haftvermittlers [freeform bond]

unterschied sich jedoch statistisch nicht signifikant von der rein gestrahlten Prüfkörperoberfläche. Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] war statistisch hoch signifikant besser als [gestrahlt + freeform bond]. Auch zeigte sich die Oberflächenkonditionierung [freeform bond] statistisch hoch signifikant besser als [gestrahlt + freeform bond]. Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + freeform bond] erreichte jedoch nur in der Tendenz höhere Verbundfestigkeiten als die unbehandelte Oberfläche. Das Reparaturmaterial freeform® plast zeigte innerhalb der eigenen Materialgruppe bei der Alterung in Wasser, dass die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + freeform bond] statistisch hoch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte aufzeigte als [keine], [gestrahlt] und [freeform bond]. Zwischen der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] und [gestrahlt + freeform bond] zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede.

### 3.12 Bruchflächenanalyse

Die Bruchflächen wurden in die folgenden Kategorien eingeteilt:

- adhäsiver Bruch (adhäsiv)
- kohäsiver Bruch (kohäsiv)
- Mischbruch (gemischt).

#### Bruchtypen in Abhängigkeit der Alterung

Die nächste Abbildung 57 (Seite 133) zeigt einen Überblick über die Anzahl der jeweiligen Bruchtypen bei der Trockenalterung (blau) und Nassalterung (rot). Bei der Nassalterung ist der Haftvermittler freeform® bond bei den Reparaturmaterialien freeform® fixgel und freeform® plast im Diagramm mitenthalten.

## Ergebnisse

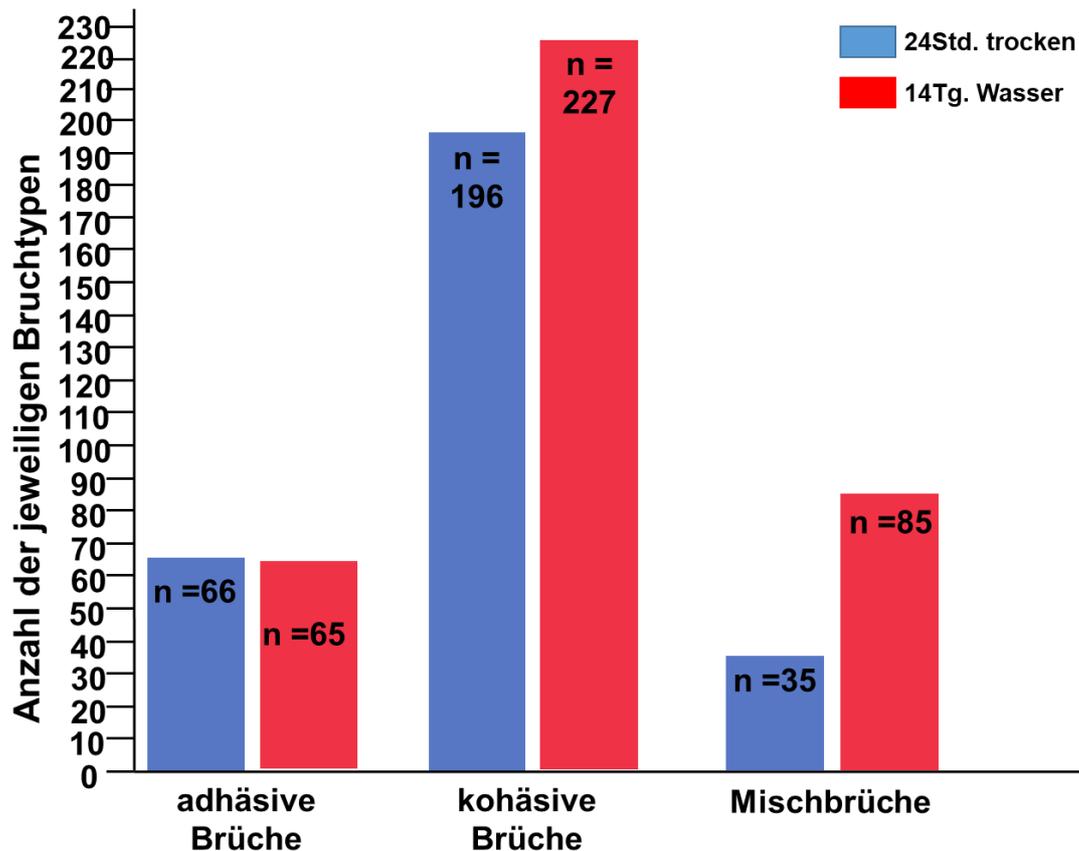


Abbildung 57: Übersicht der Bruchflächenanalyse bei der Alterung [24Std. trocken] in blau. Die roten Balken stehen für die Alterung [14Tg. Wasser]. Auf der y- Achse ist die Anzahl der aufgetretenen Bruchtypen, auf der x- Achse sind die drei Kategorien abgebildet. Bei der Trockenalterung für überwiegt der Anteil der kohäsiven Brüche mit einer Anzahl von  $n = 196$ . Am geringsten traten Mischbrüche mit  $n = 35$  auf. Bei der Alterung für [14Tg. Wasser] überwiegt der Anteil der kohäsiven Brüche mit  $n = 227$ . Am geringsten traten hier adhäsive Brüche mit  $n = 65$  auf. Bei der Nassalterung kamen nach den kohäsiven Bruchtypen vor allem Mischbrüche vor. Bei der Nassalterung wurde der Haftvermittler freeform® bond zusätzlich untersucht.

Die Bruchflächenanalyse bei der Alterung [24Std. trocken] zeigte, dass der Anteil der kohäsiven Bruchtypen mit einer Gesamtanzahl von  $n = 196$  am höchsten war. Bei der konventionellen Kontrollgruppe Palapress®, beim Reparaturmaterial Palapress® und freeprint® splint 2.0 UV auf additiver Basis waren nur kohäsive Bruchtypen festzustellen. Adhäsive Bruchtypen traten insgesamt bei  $n = 66$  abgescherten Prüfkörpern auf. Mischbrüche traten bei insgesamt  $n = 35$  Prüfkörpern auf.

Der Mittelwert der Verbundfestigkeit (MPa) beim adhäsiven Bruch- Typ betrug 4,1031 MPa und beim kohäsiven Bruch- Typ 16,0736 MPa. Mischbrüche traten bei einem Mittelwert der Verbundfestigkeit von 5,5033 MPa auf.

In den zwei Tabellen (Tabelle 43 auf Seite 221 und Tabelle 44 auf Seite 222; im Anhang) sind die aufgetretenen Bruchtypen bei der Trockenalterung in ihrer Häufigkeit aufgelistet.

Auch bei der Alterung für [14Tg. Wasser] trat am häufigsten der kohäsiver Bruch- Typ mit einer Gesamtanzahl von  $n=227$  auf. Bei der konventionellen Kontrollgruppe (Basis und Reparaturmaterial aus Palapress®, sowie bei den additiven Gruppen mit dem Reparaturmaterial Palapress® trat der kohäsive Bruchtyp am häufigsten vor. Mischbrüche traten bei insgesamt  $n=85$  Prüfkörpern auf. Die Prüfgruppe primosplint® zeigte mit  $n=19$  die häufigsten Mischbrüche. Der adhäsive Bruch- Typ trat vor allem beim Reparaturmaterial freeform® plast auf.

Der Mittelwert der Verbundfestigkeit (MPa) des adhäsiven Bruchtyps betrug 4,0371 MPa. Beim kohäsiven Bruch- Typ betrug der Mittelwert der Verbundfestigkeit 14,9479 MPa und beim Mischtyp 6,8805 MPa.

Die zwei Tabellen (Tabelle 45 auf Seite 223 und Tabelle 46 auf Seite 224, im Anhang) zeigen die Ergebnisse bei der Alterung [14Tg. Wasser].

### 3.12.1 Bruchtypen in Abhängigkeit der Konditionierung

Das folgende Diagramm zeigt eine Aufschlüsselung der Bruchtypen bei den unterschiedlichen Konditionierungen bei der Trockenalterung.

## Ergebnisse

### 3.12.1.1 Alterung: 24Std. trocken

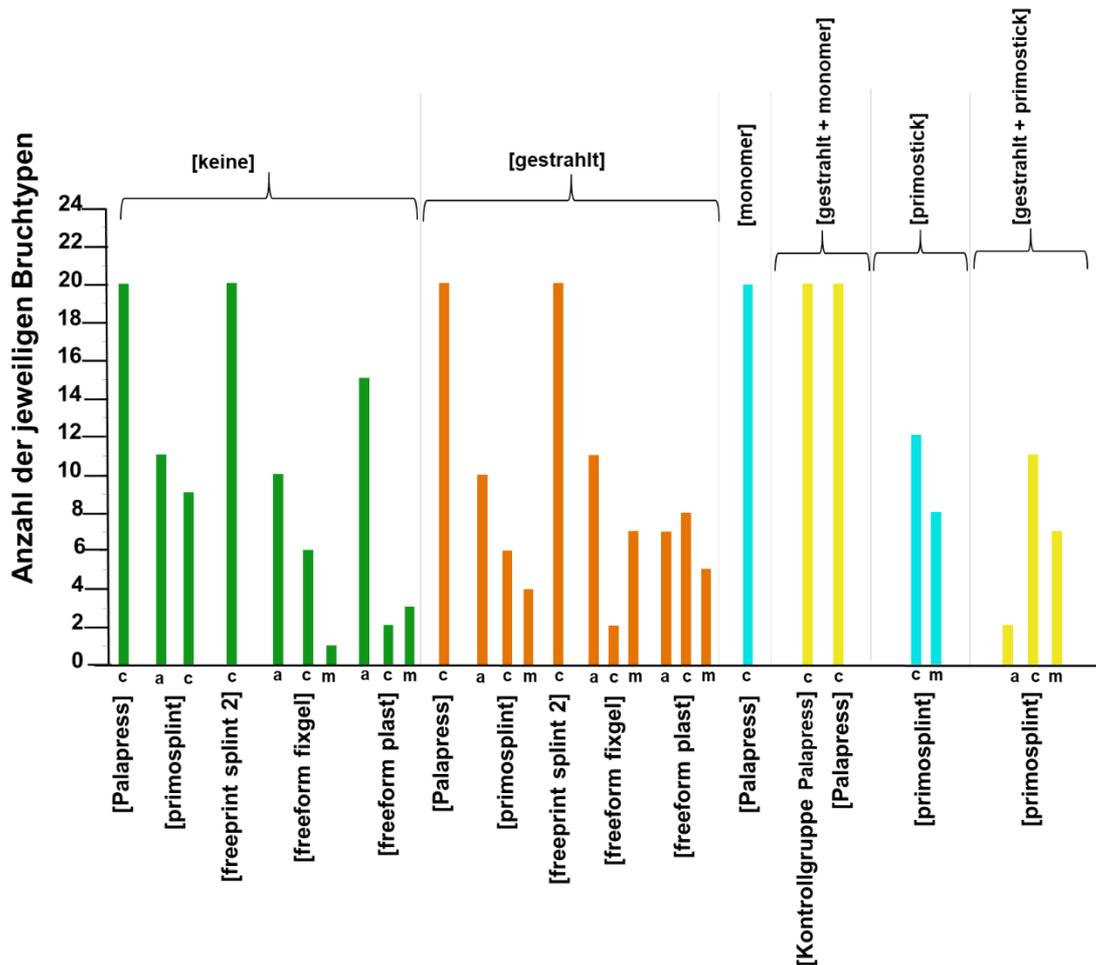


Abbildung 58: Anzahl der Bruchtypen unterschiedlicher Konditionierungsarten bei der Trockenalterung. Jede Art der Oberflächenkonditionierung, sowie die unbehandelte Oberfläche führte beim Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Basis zu  $n=20$  kohäsiven Brüchen. Auch traten beim Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV und der konventionellen Kontrollgruppe nur kohäsive Brüche ( $n=20$ ) auf. Den höchsten Anteil an adhäsiven Brüchen erreichte die unbehandelte Gruppe des Reparaturmaterials freeform® plast auf additiver Basis mit  $n=15$ .

Die Konditionierung der Oberfläche führte unabhängig von der Art der Konditionierung beim Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Basis aus freeprint® splint 2.0 UV bei allen Prüfkörpern mit  $n=20$  zu kohäsiven Brüchen. Auch traten bei der konventionellen Kontrollgruppe als Goldstandard nur kohäsive Brüche auf. Den geringsten Anteil an kohäsiven Brüchen erreichten die Gruppen freeform® fixgel bei der gestrahlten Prüfgruppe mit  $n=2$ , sowie

## Ergebnisse

---

freeform® plast bei der unbehandelten Prüfgruppe mit  $n=2$ . Adhäsive Brüche waren vor allem beim Reparaturmaterial freeform® plast auf additiver Basis mit  $n=15$ , sowie beim Reparaturmaterial primosplint® mit  $n=11$  bei den Gruppen mit unbehandelter Oberfläche festzustellen. Bei den Gruppen mit gestrahlter Oberfläche kamen adhäsive Brüche vor allem bei den Reparaturmaterialien freeform® fixgel mit  $n=11$  und primosplint® mit  $n=10$  vor. Gemischte Bruchtypen waren am häufigsten bei der Gruppe mit dem Reparaturmaterial primosplint® mit dem eigenen Haftvermittler primostick® bei  $n=8$  Prüfkörpern festzustellen.

## Ergebnisse

### 3.12.1.2 Alterung: 14Tg. Wasser

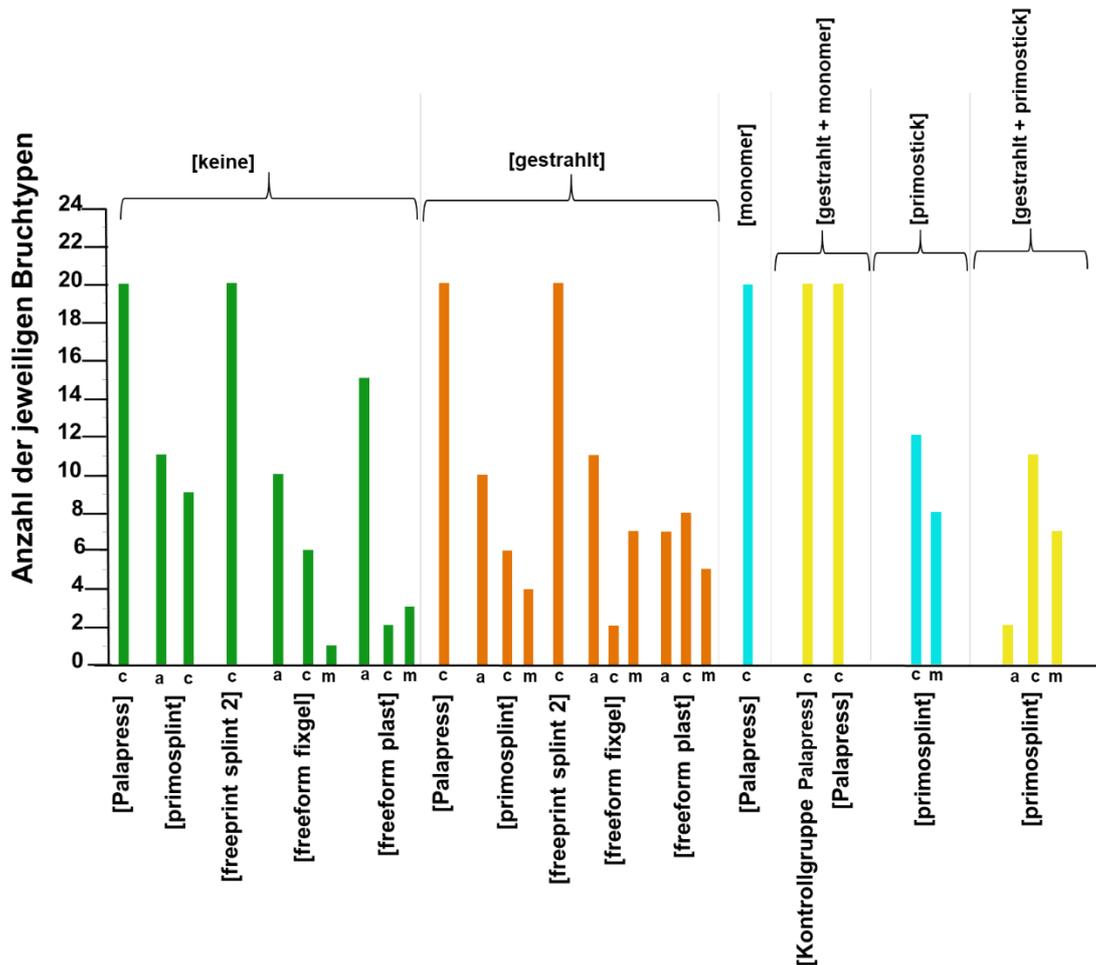


Abbildung 59: Anzahl der Bruchtypen unterschiedlicher Konditionierungsarten bei der Nassalterung. Die konventionelle Kontrollgruppe erreichte auch bei der Nassalterung nur kohäsive Brüche. Auch kamen bei den Prüfkörpern mit additiver Basis und dem Reparaturmaterial Palapress® mit nur abgestrahlter, sowie bei der Gruppe die gestrahlt und mit Monomer benetzt wurde nur kohäsive Brüche vor. Beim Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV traten kohäsive Brüche bei  $n=13$  auf. Mischbrüche traten am häufigsten ( $n=19$ ) bei der abgestrahlten additiven Prüfgruppe mit der Schienenbasis aus freeprint® splint und dem Reparaturmaterial primosplint® auf. Bei der unbehandelten Oberfläche dieser Prüfgruppe waren adhäsive Brüche mit  $n=18$  am häufigsten festzustellen.

Bei der konventionellen Kontrollgruppe traten nur kohäsive Brüche ( $n=20$ ) auf. Bei der Prüfgruppe mit additiver Basis aus freeprint® splint und dem Reparaturmaterial Palapress® führte das Abstrahlen der Oberfläche bei allen Prüfkörpern mit  $n=20$  zu kohäsiven Bruchtypen. Kohäsive Brüche kamen auch

## Ergebnisse

---

in dieser Gruppe mit unbehandelter Oberfläche, bei allen  $n=19$  getesteten Prüfkörpern vor. Das Benetzen der Oberfläche mit Monomer- Flüssigkeit allein führte hier bei  $n=12$  Prüfkörpern zu kohäsiven Brüchen, bei  $n=4$  Prüfkörpern zu gemischten Brüchen und bei  $n=2$  zu adhäsiven Brüchen. Die Kombination aus Abstrahlen und Monomer- Benetzen wiederum führte zu einer Erhöhung der kohäsiven Brüche auf  $n=20$ .

Die abgestrahlte Oberfläche der Prüfgruppe mit Basis und Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV erreichte im Gegensatz zur Trockenalterung, bei der Nassalterung nur bei  $n=13$  zu kohäsiven Brüchen. Bei den restlichen  $n=7$  Prüfkörpern waren gemischte Brüche festzustellen.

Das Abstrahlen der Oberfläche führte beim Reparaturmaterial primosplint® bei  $n=19$  Prüfkörpern zu Mischbrüchen. Bei dieser Prüfgruppe lag der Anteil an Mischbrüchen am höchsten. Der Haftvermittler primostick® führte beim Reparaturmaterial primosplint® auf additiver Basis zu  $n=12$  kohäsiven und  $n=8$  gemischten Bruchtypen. Bei der Kombination aus abstrahlen und Verwendung des Haftvermittlers primostick® verringerte sich die Anzahl an kohäsiven Brüchen auf  $n=9$ . Die Verwendung des Haftvermittlers freeform® bond führte gegenüber der unbehandelten Gruppe mit  $n=2$  Prüfkörpern beim Reparaturmaterial freeform® fixgel zu einer Erhöhung der Anzahl an kohäsiven Brüchen mit  $n=18$ . Das Abstrahlen vor dem Auftragen des Haftvermittlers führte hier zu  $n=19$  kohäsiven Brüchen. Beim Reparaturmaterial freeform® plast auf additiver Basis jedoch führte der Haftvermittler freeform® bond nur bei  $n=4$  Prüfkörpern zu einem kohäsiven Bruchmuster. Hier traten bei  $n=11$  Prüfkörpern gemischte Brüche und bei  $n=5$  Prüfkörpern adhäsive Brüche vor. Die Kombination aus Abstrahlen und Benetzen mit freeform® bond führte wiederum bei allen  $n=20$  getesteten Prüfkörpern zu einem kohäsiven Bruchtyp. Bei der Gruppe mit unbehandelter Oberfläche und dem Reparaturmaterial freeform® plast lag der Anteil an adhäsiven Brüchen mit  $n=19$  am höchsten, gefolgt von primosplint auf unbehandelter Oberfläche ( $n=18$ ). Exemplarisch wurden drei makroskopische Aufnahmen (siehe Abbildung 60, Seite 139) für jeden Bruchtyp aufgeführt.

## Ergebnisse

---

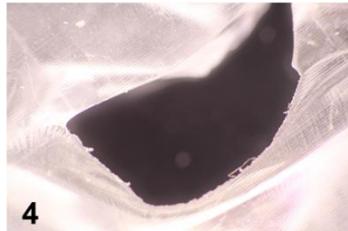
[freeform fixgel] + [keine]



[freeprint splint 2]+[gestrahlt]



[Palapress] + [monomer]



*Abbildung 60: Beispiele der Bruchtypen bei 20-facher Vergrößerung. Die erste Aufnahme links zeigt einen adhäsiven Bruchtyp bei der Gruppe mit dem Reparaturmaterial freeform® fixgel auf unbehandelter Basis aus freeprint® splint 2.0 UV. Die zweite Aufnahme zeigt einen kohäsiven Bruch beim Reparaturmaterial freeprint® splint 2.0 UV auf additiver Basis, die abgestrahlt wurde. Die dritte Aufnahme stellt einen gemischten Bruchtyp mit adhäsiven und kohäsiven Anteilen dar. Diese Aufnahme gehört zur Prüfgruppe mit additiver Basis aus freeprint® splint 2.0 UV, die mit Monomer konditioniert wurde, bevor das Reparaturmaterial Palapress® angefügt wurde. Die vierte Aufnahme zeigt eine Aufnahme der konventionellen Kontrollgruppe. Der Palapress®-Zylinder brach mit großen Anteilen aus der Palapress®-Basis.*

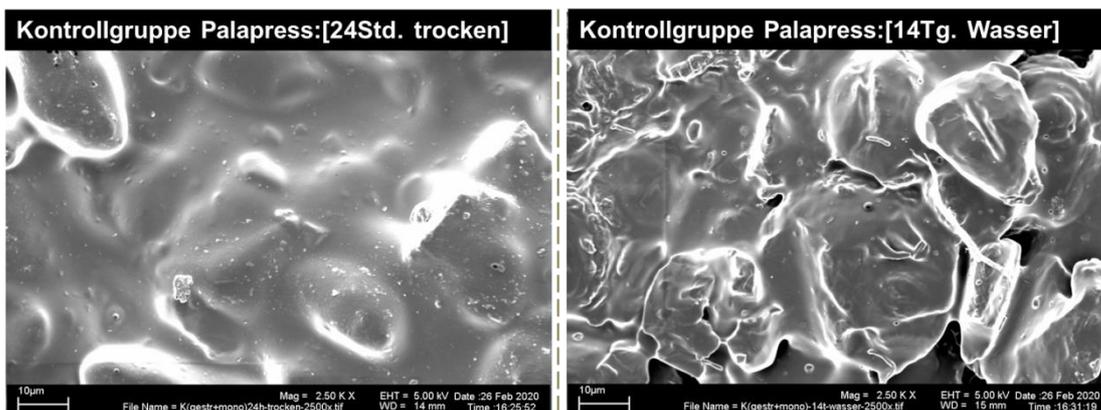
Beim adhäsiven Bruchtyp verläuft der Bruch zwischen der additiven Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial freeform® fixgel. In der Aufnahme sind die Umrisse des Zylinders sowie die Treppenstruktur vom 3D-Druck noch zu erkennen (Abbildung 60, Seite 139, Nr.1). Beim kohäsiven Bruchtyp verläuft der Bruch in der additiven Basis. Die Aufnahme (Abbildung 60, Seite 139, Nr.2) zeigt, dass Anteile aus der Basis herausgebrochen waren. Beim gemischten Bruchtyp (Abbildung 60, Seite 139, Nr.3) sind sowohl adhäsive als auch kohäsive Anteile auf der Grenzfläche zu erkennen. Die letzte Aufnahme (Abbildung 60, Seite 139, Nr.4) zeigt einen kohäsiven Bruch bei der konventionellen Kontrollgruppe bei welcher der Palapress®- Zylinder mitsamt großflächigen Anteilen der Palapress® Basis herausgebrochen war.

### 3.13 Rasterelektronenmikroskopie

Die Oberfläche der Prüfkörper- (Schienen-) Basis wurde mit den Oberflächenkonditionierungsformen für beide Alterungsformen unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Die Abbildungen (Abbildung 61, Seite 140 bis Abbildung 66 Seite 145 zeigen die REM- Aufnahmen bei 2500-facher Vergrößerung. Einige REM- Aufnahmen wurden auch bei 1000-facher Vergrößerung abgebildet.

#### 3.13.1 Oberflächenkonditionierung in Abhängigkeit der Alterung

##### 3.13.1.1 konventionelle Prüfgruppe: [Kontrollgruppe Palapress]



*Abbildung 61: REM- Aufnahmen bei 2500-facher Vergrößerung der [Kontrollgruppe Palapress] mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer]. Links ist die Alterungsform [24Std. trocken] der konventionell hergestellten Kontrollgruppe dargestellt. Rechts die Alterungsform [14Tg. Wasser] dargestellt. Die nasse Alterungsform zeigt stärkere Inhomogenitäten in der Oberfläche auf.*

Die Oberfläche der Kontrollgruppe mit der konventionell hergestellten Basis aus Palapress® (PMMA) zeigte durch die Konditionierung [gestrahlt + monomer] inhomogene Strukturen. Die Alterungsform [14Tg. Wasser] zeigte im Vergleich zur trocken gelagerten Gruppe deutlichere Veränderungen in der Oberflächenstruktur. Die Oberfläche zeigte sich zerklüfteter als bei der trocken gelagerten Gruppe, die runde Strukturveränderungen aufzeigte.

## Ergebnisse

### 3.13.1.2 additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [keine] und [gestrahlt]

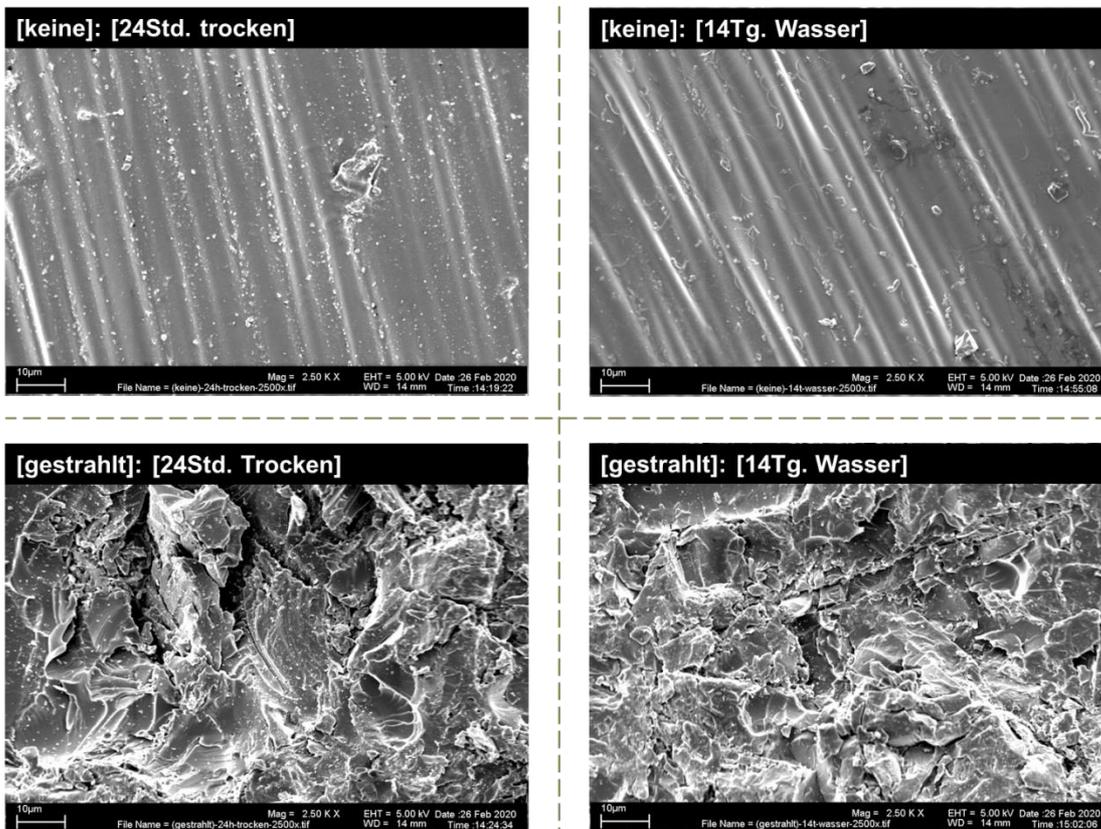


Abbildung 62: REM- Aufnahmen bei 2500-facher Vergrößerung der 3D-gedruckten Basis, mit der Oberflächenkonditionierung [keine] und [gestrahlt]. Die REM- Aufnahmen zeigen die Oberflächenmorphologie der 3D- gedruckten Prüfkörper- (Schienen-) Basis. Die zwei oberen Abbildungen zeigen die Oberflächenkonditionierung [keine]. Die unteren zwei Abbildungen stellen die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] dar. Dabei sind links die Abbildungen der Alterungsform [24Std. trocken] und rechts der Alterungsform [14Tg. Wasser]. Bei beiden Alterungsformen der unbehandelten Oberfläche ist die Treppenstruktur (bedingt durch die einzelnen Druckschichten) zu erkennen. Die gestrahlte Oberfläche zeigt deutliche Veränderungen gegenüber dieser.

Die unbehandelte Oberfläche der 3D- gedruckten Basis zeigte die Treppenstruktur der einzelnen Druckschichten mit geringen Inhomogenitäten. Bei beiden Alterungsformen waren keine eindeutigen Unterschiede zu erkennen. Die gestrahlte Oberfläche zeigte bei beiden Alterungsformen eindeutige Zerklüftungen. Der Vergleich zwischen den gestrahlten Basen beider Alterungsformen jedoch zeigte keine wesentlichen Unterschiede.

## Ergebnisse

### 3.13.1.3 additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [monomer] und [gestrahlt + monomer]

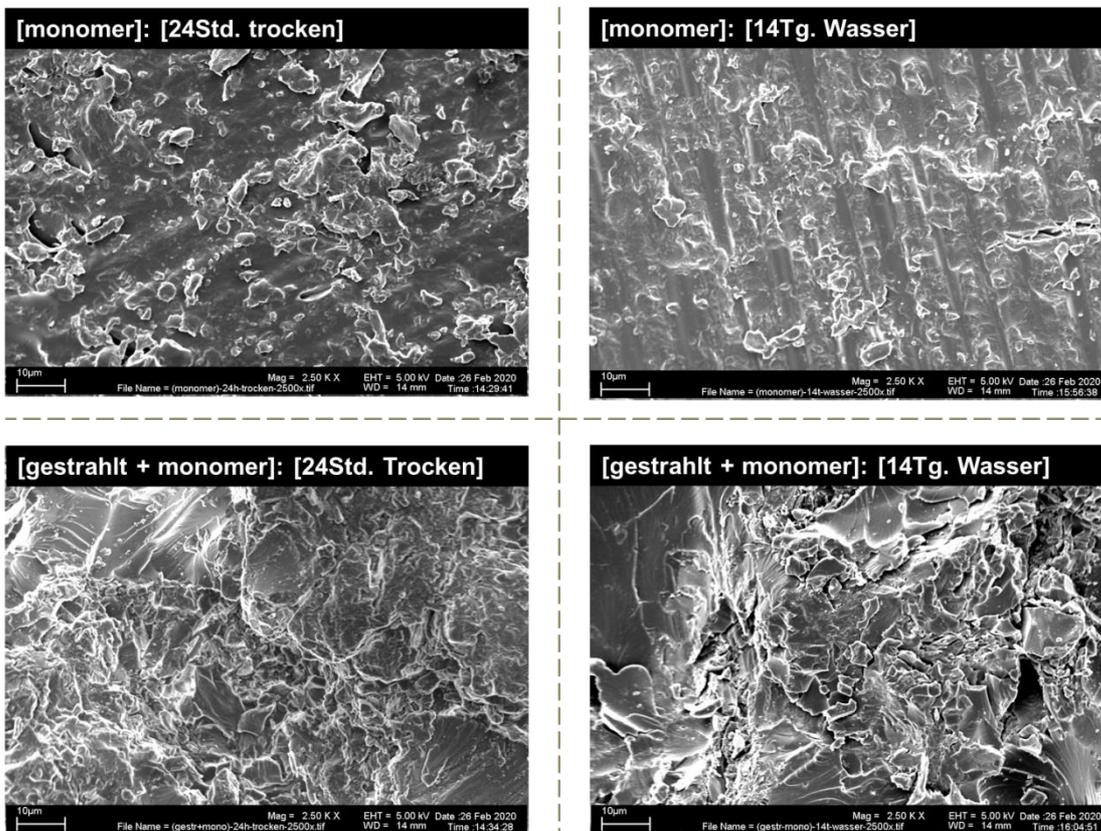


Abbildung 63: REM- Aufnahmen bei 2500-facher Vergrößerung der 3D-gedruckten Basis, mit der Oberflächenkonditionierung [monomer] und [gestrahlt + monomer]. Die Abbildungen zeigen die REM- Aufnahmen der 3D-gedruckten Prüfkörper- (Schiene-) Basis. Die Oberflächenkonditionierung [monomer] wurde durch die zwei Abbildungen oben dargestellt. Die Kombination aus Strahlen und Monomer- Benetzung sind mit Hilfe der zwei unteren Abbildungen dargestellt. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links. Die Alterungsform [14Tg. Wasser] ist rechts abgebildet. Bei [monomer] war die Treppenstruktur noch leicht zu erkennen (v.a. bei der nassen Alterung). Bei der Gruppe [gestrahlt + monomer] waren Zerklüftungen zu erkennen.

Die Oberflächenkonditionierung [monomer] zeigte bei beiden Alterungsformen Inhomogenitäten auf. Die Treppenstruktur war noch leicht zu erkennen. Diese waren bei der nassen Alterungsform stärker ausgeprägt. Im Gegensatz dazu wiesen die Prüfkörperbasen mit der Konditionierung [gestrahlt + monomer] deutliche Veränderungen in der Oberfläche ohne die Treppenstruktur auf. Hier lag zwischen beiden Alterungsformen kein wesentlicher Unterschied vor.

## Ergebnisse

### 3.13.1.4 additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [primostick] und [gestrahlt + primostick]

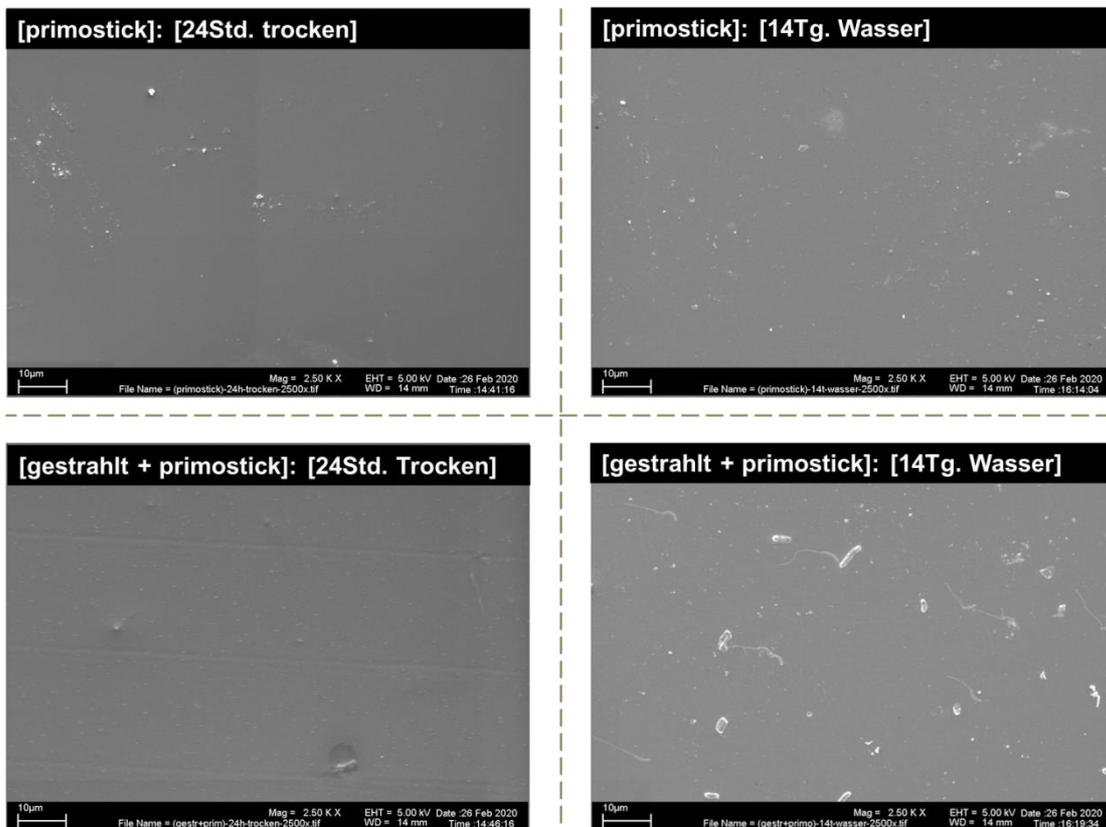


Abbildung 64: REM- Aufnahmen bei 2500-facher Vergrößerung der 3D-gedruckten Basis, mit der Oberflächenkonditionierung [primostick] und [gestrahlt + primostick]. Die Abbildungen zeigen die REM- Aufnahmen der 3D-gedruckten Prüfkörper- (Schiene-) Basis. Die Oberflächenkonditionierung [primostick] wurde durch die zwei Abbildungen oben dargestellt. Die Kombination aus Strahlen und Verwendung des Haftvermittlers [primostick] sind mit Hilfe der zwei unteren Abbildungen dargestellt. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links dargestellt. Die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts aufgeführt. Bei allen Gruppen führte [primostick] zu einer Glättung der Oberfläche.

Die Verwendung des Haftvermittlers [primostick] zeigte bei beiden Alterungsformen eine homogene Oberfläche. Die stufenähnliche Struktur der Druckschichten war nicht mehr erkennbar. Auch zeigte die Kombination aus Strahlen und Verwendung von [primostick] eine homogene Oberfläche ohne stufenähnliche Struktur. Zwischen den Alterungsformen zeigten sich keine Unterschiede.

### 3.13.1.5 additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung: [freeform bond] und [gestrahlt + freeform bond]

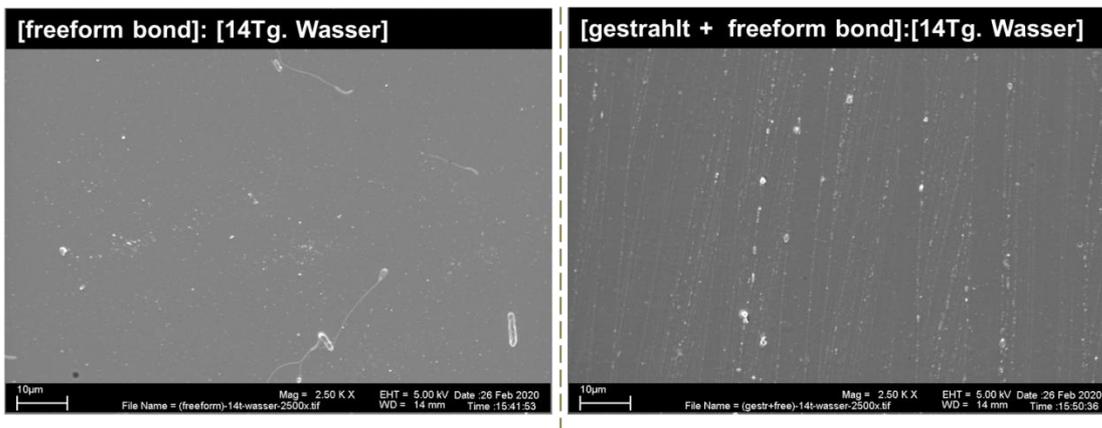


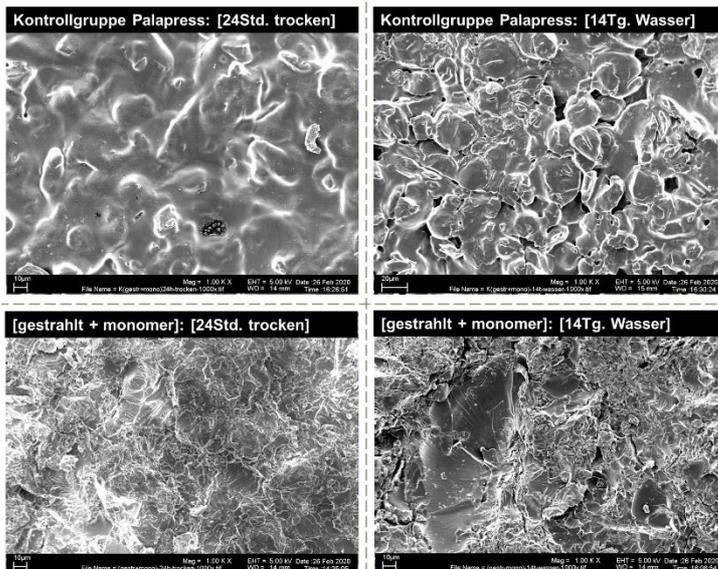
Abbildung 65: REM- Aufnahmen bei 2500-facher Vergrößerung der 3D-gedruckten Basis, mit der Oberflächenkonditionierung [freeform bond] und [gestrahlt + freeform bond]. Die Abbildungen zeigen die REM- Aufnahmen der 3D- gedruckten Prüfkörper- (Schienen-) Basis. Die Oberflächenkonditionierung mit dem Haftvermittler [freeform bond] wurde bei der Alterungsform [14Tg. Wasser] angewendet. Links ist die Nutzung des Haftvermittlers [freeform bond] dargestellt, rechts die Kombination aus Strahlen und Auftragen von [freeform bond]. Das [freeform bond] führte zu einer homogenen Oberflächenstruktur. Die Gruppe [gestrahlt + freeform bond] zeigte dabei geringfügige Inhomogenitäten, bedingt durch den Applikator auf.

Beide Oberflächenkonditionierungen zeigten eine homogene Struktur auf. Die additiv hergestellten Prüfkörperbasen zeigten keine stufenähnliche Struktur mehr auf. Die gestrahlte und mit freeform® bond- benetzte Oberfläche zeigte eine etwas inhomogenere Oberflächenstruktur auf. Es sind linienförmige Veränderungen bedingt durch das Einreiben mit dem Applikator zu erkennen.

## Ergebnisse

### 3.13.2 additive Prüfgruppe mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] im Vergleich zur konventionellen Kontrollgruppe

Die Oberflächenkonditionierung aus Abstrahlen und Monomer- Benetzen wurde für beide Gruppen bei 1000-facher Vergrößerung dargestellt.



*Abbildung 66: REM- Aufnahmen bei 1000-facher Vergrößerung. Die konventionell hergestellte [Kontrollgruppe Palapress] wurde mit den zwei oberen Bildern dargestellt. Die unteren zwei Abbildungen stellen die additiv hergestellte Prüfkörper- (Schienen-) Basis dar. Bei beiden Prüfkörper- (Schienen-) Basen wurde die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] durchgeführt. Links sind die Alterungsformen [24Std. trocken] und rechts [14Tg. Wasser] dargestellt. Die konventionelle Kontrollgruppe zeigte runde Inhomogenitäten in der Oberfläche der Palapress®- Basis auf. Die additive Prüfgruppen zeigten im Vergleich dazu stärkere Zerklüftungen auf.*

Bei der Alterung für [24Std. trocken] wies die additiv hergestellte Basis im Vergleich zur PMMA- Basis eine zerklüftete Oberflächenstruktur auf, die feiner war. Auch war dies bei der nass gealterten Gruppe zu erkennen. Auch hier zeigte die REM- Aufnahme auf der additiv hergestellten Basis feinere Oberflächenveränderungen auf als auf der konventionell hergestellten Basis. Die [Kontrollgruppe Palapress] zeigte bei beiden Alterungsformen eine homogenere Struktur mit körnigen Veränderungen.

### 3.14 Oberflächenbeschaffenheit

Die Oberflächenbeschaffenheit wurde nach den unterschiedlichen Oberflächenkonditionierungen, wie in Kapitel 2.7.11 auf Seite 71 beschrieben, gemessen. Beide Alterungsformen wurden dabei berücksichtigt.

#### 3.14.1 Alterung: 24Std. trocken

Die Untersuchung der Rauheit zeigte bei der Gruppe mit der 3D gedruckten Basis mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] den höchsten  $R_a$ - Mittelwert mit  $5,215 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 1,408$ ). Somit hatte diese Form der Oberflächenkonditionierung die raueste Oberfläche. Die [gestrahlte] Oberfläche der 3D- gedruckten Basis zeigte den zweit höchsten  $R_a$ - Mittelwert von  $4,408 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 1,975$ ). Im Vergleich dazu hatte die [Kontrollgruppe Palapress] mit der konventionell hergestellten Basis einen  $R_a$ - Mittelwert von  $3,401 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 0,591$ ). Die geringste Rauheit der Oberfläche zeigte die additiv hergestellte Basis ohne Oberflächenkonditionierung mit einem  $R_a$ - Mittelwert von  $0,753 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 0,419$ ).

Streu- und Lageparameter des Rauheitsprofils ( $R_a$  –Wert), siehe Tabelle 47 (Seite 225) im Anhang.

Ergänzend dazu wurden auch die Werte der Welligkeit ( $W_a$ ) untersucht.

Die Auswertung der Welligkeit zeigte bei der [Kontrollgruppe Palapress] den höchsten Mittelwert mit  $9,436 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 4,767$ ). Den zweit höchsten Mittelwert die Gruppe mit der 3D gedruckten Basis mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + primostick]. Hier betrug der Mittelwert  $9,229 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 5,269$ ). Die Oberflächenkonditionierung [primostick] mit der 3D- gedruckten Basis zeigte einen Mittelwert von  $4,040 \mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm 1,155$ ).

Streu- und Lageparameter der Welligkeit ( $W_a$ ) siehe Tabelle 48 (Seite 225) im Anhang.

Die Wellentiefe aller Prüfgruppen wurde ergänzend untersucht. Die Wellentiefe ( $W_t$ -Wert) gibt die Summe der Höhen der größten Profilspitze und die Tiefe des größten Profiltals an. Die höchste Wellentiefe zeigte die [Kontrollgruppe Palapress] mit einem  $W_t$ -Mittelwert von 9,218  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  3,861). Danach folgte die Gruppe der 3D- gedruckten Basis mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + primostick] mit einem  $W_t$ -Mittelwert von 8,883  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  7,424). An dritter Stelle lag die Gruppe mit der additiv hergestellten Basis mit der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] mit einem  $W_t$ -Mittelwert von 8,727  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  4,044). Die geringste Wellentiefe zeigte die Gruppe mit der additiv hergestellten Basis ohne Oberflächenkonditionierung mit einem  $W_t$ -Mittelwert von 0,927  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  0,507).

Streu- und Lageparameter der Wellentiefe ( $W_t$ ) siehe Tabelle 49 (Seite 226) im Anhang.

### 3.14.2 Alterung: 14Tg. Wasser

Auch wurden die Rauheit, Welligkeit und die Wellentiefe der Prüfkörperbasis, die in Wasser gelagert wurden, gemessen.

Den höchsten  $R_a$ -Mittelwert zeigte die Gruppe mit der 3D- gedruckten Basis bei der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] mit 5,847  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  1,492). Somit hatte diese Gruppe die raueste Oberfläche im Vergleich zu allen anderen. Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] zeigte die zweit raueste Oberfläche mit 5,771  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  1,010) auf der 3D- gedruckten Basis. Die [Kontrollgruppe Palapress] wies einen  $R_a$ -Mittelwert von 3,626  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  0,792). Den geringsten Wert zeigte die Gruppe [primostick] auf der additiv gedruckten Basis mit einem Wert von 0,267  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  0,222).

Streu- und Lageparameter der Rauheit ( $R_a$ -Werte) siehe Tabelle 50 (Seite 227) im Anhang.

## Ergebnisse

---

Den höchsten Mittelwert der Welligkeit wies die additiv hergestellte Basis, deren Oberflächen zuerst gestrahlt und danach mit primostick® konditioniert wurde, mit 13,110  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  10,032) auf. Die [Kontrollgruppe Palapress] zeigte einen Mittelwert von 8,130  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  6,786) auf. Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] auf der 3D- gedruckten Prüfkörperbasis erreichte die dritt- höchsten Mittelwert der Welligkeit mit einem  $W_a$ - Wert von 6,705  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  3,739). Den kleinsten Mittelwert der Welligkeit zeigte die Applikation von [monomer] auf der 3D- gedruckter Basis. Hier lag ein  $W_a$ - Wert von 0,733  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  0,673) vor.

Streu- und Lageparameter der Welligkeit ( $W_a$ -Werte) siehe Tabelle 51 (Seite 228) im Anhang.

Den höchsten  $W_t$  – Mittelwert mit 15,815  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  21,627) wies die 3D- gedruckte Basis mit der Konditionierung [gestrahlt + primostick] auf. Die Gruppe [gestrahlt + monomer] auf der additiv hergestellten Basis folgte mit einem  $W_t$ - Mittelwert von 14,669  $\mu\text{m}$  Std. Abw.:  $\pm$  5,764). Die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt] auf der additiv hergestellten Basis wies einen Mittelwert der Wellentiefe von 13,564  $\mu\text{m}$  Std. Abw.:  $\pm$  6,259) auf. Den kleinsten Wert der Wellentiefe mit 0,747  $\mu\text{m}$  Std. Abw.:  $\pm$  0,333) zeigte die Konditionierung mit Monomer der additiv hergestellten Basis. Die [Kontrollgruppe Palapress] wies einen  $W_t$  – Mittelwert von 11,852  $\mu\text{m}$  (Std. Abw.:  $\pm$  7,048) auf.

Streu- und Lageparameter der Wellentiefe ( $W_t$ ) siehe Tabelle 52 (Seite 229) im Anhang.

## Ergebnisse

### 3.14.3 Visualisierung Oberflächenbeschaffenheit

Die Daten aus der Rauheitsmessung wurden zur Veranschaulichung dreidimensional visualisiert und in Abhängigkeit der Alterung gegenübergestellt. Auch wurden der arithmetischer Mittenrauwert  $R_a$ , als Profil dargestellt.

#### 3.14.3.1 konventionelle Prüfgruppe: [Kontrollgruppe Palapress]

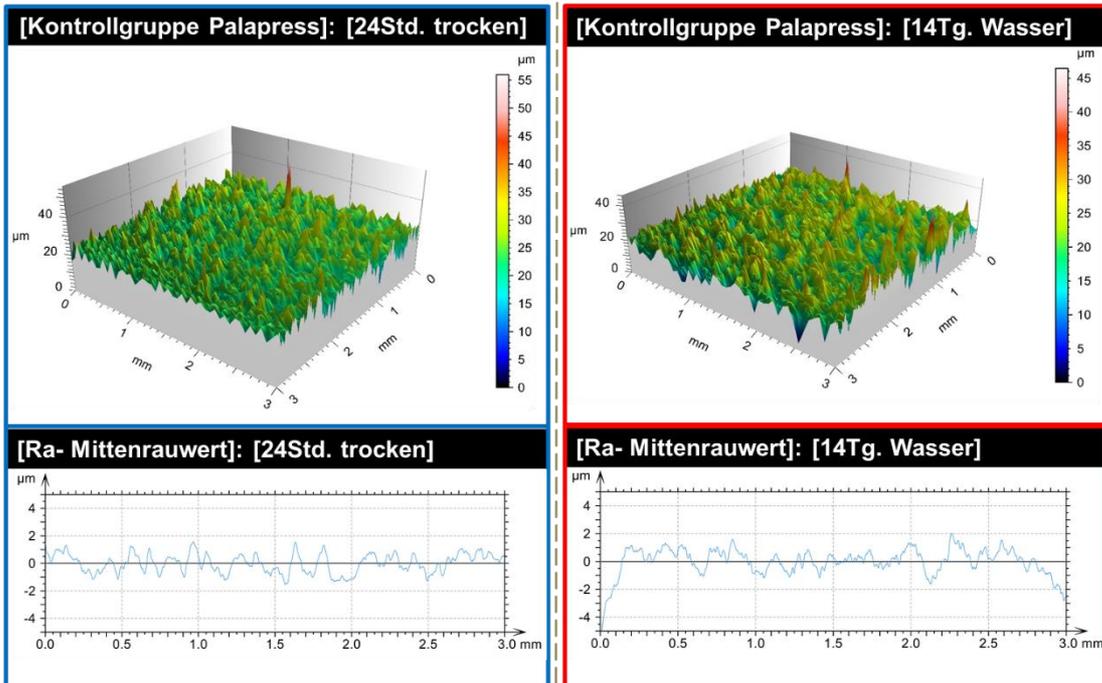


Abbildung 67: 3D- Visualisierung der  $R_a$ - Mittenrauwerte, sowie Darstellung des  $R_a$ - Profils für die [Kontrollgruppe Palapress]. Die Oberfläche wurde gestrahlt und mit Monomer benetzt. Direkt rechts neben der jeweiligen Darstellung ist die Farbcodierung der Scala in  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Die Profile zeigen die  $R_a$ - Mittenrauwerte. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts abgebildet. Beide Gruppen zeigten im Vergleich zueinander keine größeren Unterschiede auf.

Die 3D- Darstellung zeigte bei beiden Alterungsformen keine Unterschiede auf. Beide Oberflächen wiesen homogene Zerklüftungen auf. Auch die Profilkurven waren ähnlich. Der  $R_a$ - Mittenrauwert für die Alterungsform [24Std. trocken] betrug  $3,401 \mu\text{m}$ , bei der Alterungsform [14Tg. Wasser]  $3,626 \mu\text{m}$ .

## 3.14.3.2 additive Prüfgruppen

### 3.14.3.2.1 Oberflächenkonditionierung: [keine]

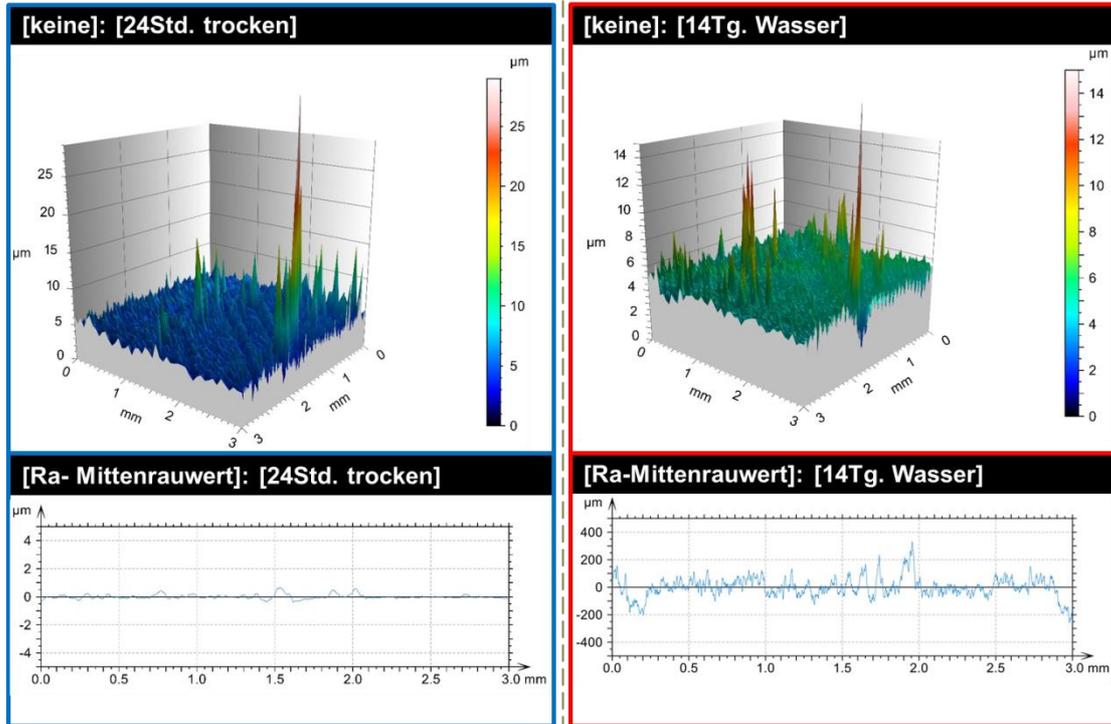


Abbildung 68: 3D- Visualisierung der  $R_a$ - Mittenrauwerte für die unbehandelte Oberfläche [keine], sowie Darstellung des  $R_a$ - Profils der additiven Prüfgruppe. Rechts neben der jeweiligen Darstellung ist die Farbcodierung der Scala in  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Die unteren Graphiken zeigen das Profil der  $R_a$ - Mittenrauwerte. Die y- Achse ist anders skaliert, um Verzerrungen zu vermeiden. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links abgebildet, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts. Beide Gruppen zeigten nur geringe Unterschiede auf.

Die Auswertung der  $R_a$ -Mittenrauwerte zeigte bei der Alterungsform für [24Std. trocken] einen  $R_a$ -Mittelwert von  $0,753 \mu\text{m}$ , im Vergleich dazu lag der  $R_a$ -Mittelwert der Alterungsform [14Tg. Wasser] bei  $0,696 \mu\text{m}$ . Beide Alterungsformen zeigten in der Oberflächen-Topografie daher nur geringe Unterschiede in der Beschaffenheit. Bei beiden war diese uneben und zerklüftet.

## Ergebnisse

### 3.14.3.2.2 Oberflächenkonditionierung: [gestrahlt]

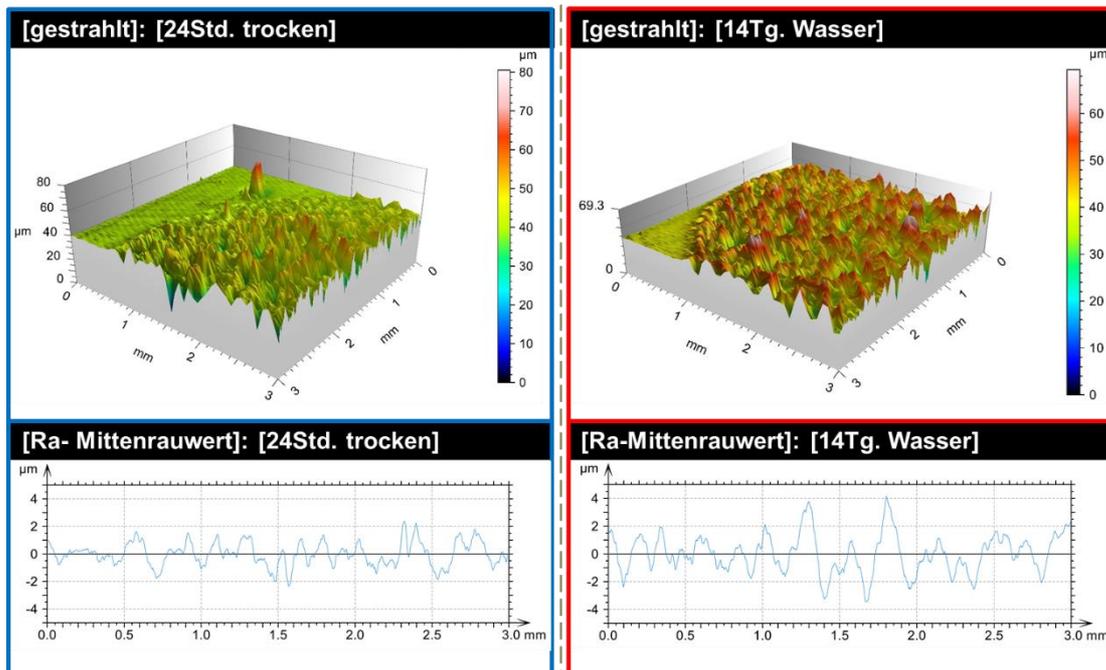


Abbildung 69: 3D- Visualisierung der  $R_a$ - Mittenrauwerte für die Oberflächenkonditionierung [gestrahlt], sowie Darstellung des  $R_a$ - Profils der additiven Prüfgruppe. Rechts neben der jeweiligen Darstellung ist die Farbcodierung der Scala in  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Die unteren Graphiken zeigen das Profil der  $R_a$ - Mittenrauwerte. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links abgebildet, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts. Beide Gruppen zeigten Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit auf. Die Nassalterung war rauer und zerklüfteter.

Bei der Trockenalterung betrug der  $R_a$ -Mittelwert  $4,408 \mu\text{m}$  und bei der Nassalterung  $5,847 \mu\text{m}$ . Die Oberfläche der Alterungsform [14Tg. Wasser] war somit rauer als die trocken gelagerte Gruppe. Dies ist auch aus der 3D-Visualisierung zu erkennen, da die Nassalterung eine unebenere Oberfläche mit mehr Zerklüftungen aufwies. Diese Zerklüftungen waren relativ homogen im Gegensatz zur unbehandelten Oberfläche.

## 3.14.3.2.3 Oberflächenkonditionierung: [monomer]

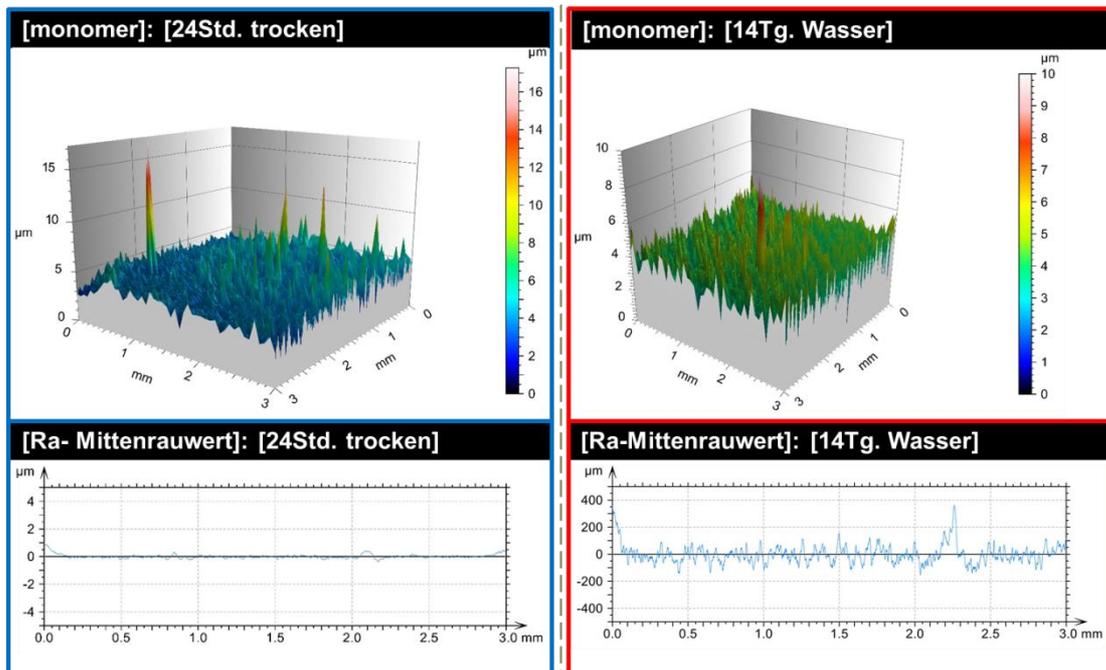


Abbildung 70: 3D- Visualisierung der Ra- Mittenrauwerte für die Oberflächenkonditionierung [monomer], sowie Darstellung des Ra- Profils der additiven Prüfgruppe. Rechts neben der jeweiligen Darstellung ist die Farbcodierung der Scala in µm aufgeführt. Die unteren Graphiken zeigen das Profil der Ra- Mittenrauwerte, die y-Achse ist hier anders skaliert, um Verzerrungen zu vermeiden. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links abgebildet, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts. Die Trockenalterung führte zu einer raueren Oberfläche. Auch waren hier mehr Zerklüftungen zu erkennen.

Beide Abbildungen zeigten in der dreidimensionalen Darstellung deutliche Zerklüftungen auf. Die trocken gealterte Gruppe wies mit einem Ra-Mittelwert von 0,915 µm eine rauere Oberfläche als die für 14 Tg. in H<sub>2</sub>O dest. gealterte Gruppe. Hier betrug der Ra-Mittelwert 0,496 µm. Die Zerklüftungen erscheinen inhomogener, mit Ausreisern gegenüber der abgestrahlten Oberfläche.

## Ergebnisse

### 3.14.3.2.4 Oberflächenkonditionierung: [gestrahlt + monomer]

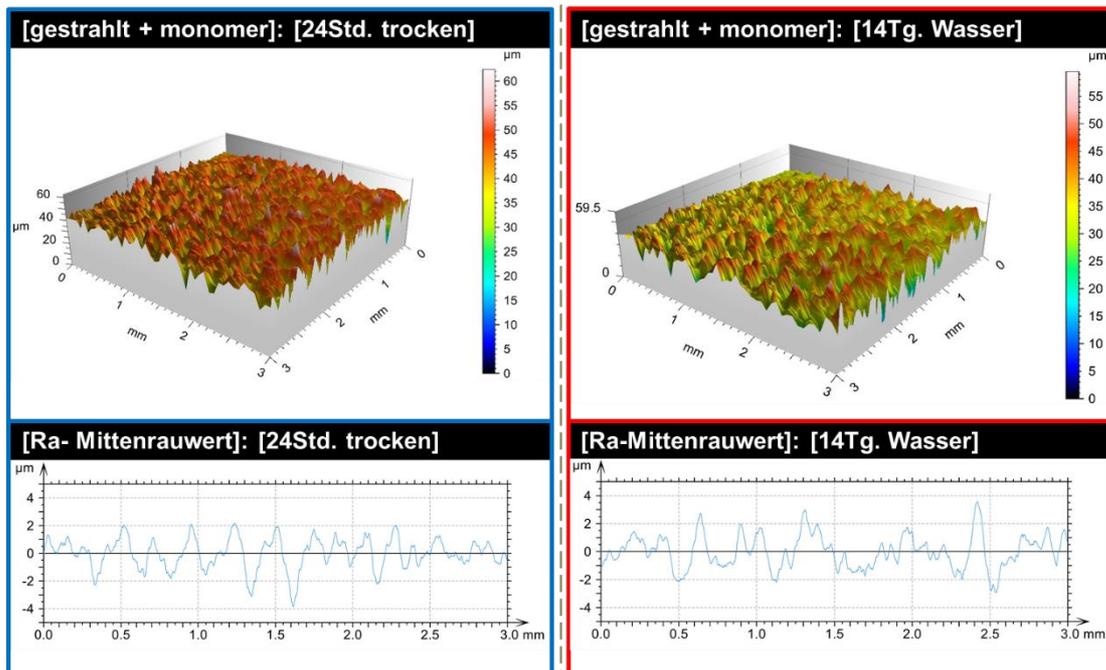


Abbildung 71: 3D- Visualisierung der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer], sowie Darstellung des  $R_a$ - Profils der additiven Prüfgruppe. Rechts neben der jeweiligen Darstellung ist die Farbcodierung der Scala in  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Die unteren Graphiken zeigen das Profil der  $R_a$ -Mittenrauwerte. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links abgebildet, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts. Beide Gruppen zeigten keine Unterschiede mit einer relativ homogen strukturierten Oberfläche auf.

Die Oberflächenbeschaffenheit zeigte hinsichtlich der Rauheit bei beiden Alterungsformen kaum Unterschiede auf. Die Alterungsform [24Std. trocken] erreichte einen  $R_a$ -Mittelwert von  $5,215 \mu\text{m}$ , die Alterungsform [14Tg. Wasser]  $5,771 \mu\text{m}$ . Die Visualisierung zeigt bei beiden Gruppen eine homogen strukturierte Oberflächenbeschaffenheit.

## 3.14.3.2.5 Oberflächenkonditionierung [primostick]

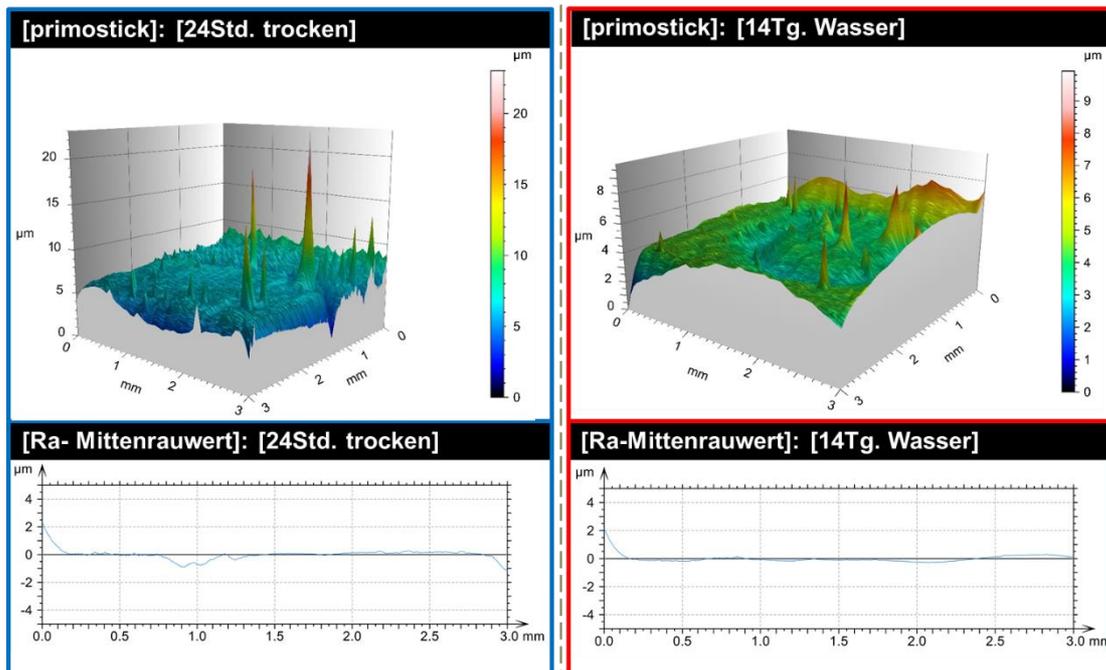


Abbildung 72: 3D- Visualisierung der der Oberflächenkonditionierung [primostick], sowie Darstellung des  $R_a$ - Profils der additiven Prüfgruppe. Rechts neben der jeweiligen Darstellung ist die Farbcodierung der Scala in  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Die unteren Graphiken zeigen das Profil der  $R_a$ - Mittenrauwerte. Die Alterungsform [24Std. trocken] ist links abgebildet, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts. Die Trockenalterung wies eine rauere Oberfläche auf.

Die Konditionierung der Oberfläche mit dem Haftvermittler primostick® zeigte bei beiden Alterungsformen Unterschiede. Die Oberfläche der für [24Std. trocken] gealterten Gruppe war mit einem  $R_a$ -Mittelwert von 1,063  $\mu\text{m}$  rauer als die Nassalterung. Hier lag der  $R_a$ -Mittelwert bei 0,267  $\mu\text{m}$ . Bei beiden Gruppen sind Flächen mit wenig Struktur, die von einigen Zerklüftungen unterbrochen werden zu erkennen.

## Ergebnisse

### 3.14.3.2.6 Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + primostick]

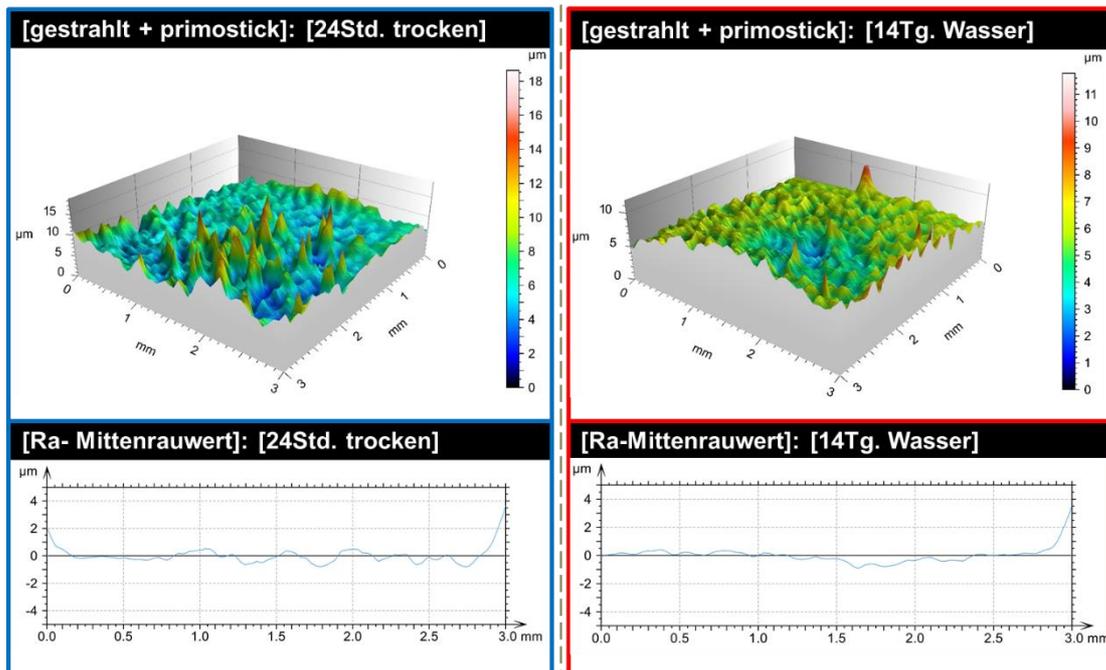


Abbildung 73: 3D- Visualisierung der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + primostick], sowie Darstellung des  $R_a$ - Profils der additiven Prüfgruppe. Die unteren Graphiken zeigen das Profil der  $R_a$ - Mittenrauwerte. Die Alterungsform für [24Std. trocken] ist links abgebildet, die Alterungsform [14Tg. Wasser] rechts. Die Farbcodierung der 3D- Darstellung ist jeweils mit den Skalen rechts neben den Darstellungen aufgeschlüsselt. Die Abbildungen, sowie auch die Profilkurven zeigten geringe Unterschiede in der Rauheit zwischen beiden Alterungsformen auf. Die Oberfläche ist homogen strukturiert.

Der Vergleich beider Alterungsformen bei der Konditionierung der Oberfläche der additiv hergestellten Basis zeigte geringe Unterschiede auf. Die Prüfkörperbasen wurden nach der Alterung#1 zunächst gestrahlt, danach erfolgte das Auftragen des Haftvermittlers primostick®. Die Rauheitsmessung ergab bei der Alterung für [24Std. trocken] einen  $R_a$ -Mittelwert von  $1,867\mu\text{m}$ , bei der Alterung [14Tg. Wasser] einen  $R_a$ -Mittelwert von  $1,421\mu\text{m}$ . Die trockene Alterungsform wies somit eine rauere Oberflächenbeschaffenheit auf. Die 3D-Visualisierung zeigte hier auch eine leicht stärker strukturierte Oberfläche auf. Bei beiden Alterungsformen war jedoch die Strukturierung relativ homogen.

## Ergebnisse

### 3.14.3.2.7 Oberflächenkonditionierung [freeform bond] und [gestrahlt + freeform bond]

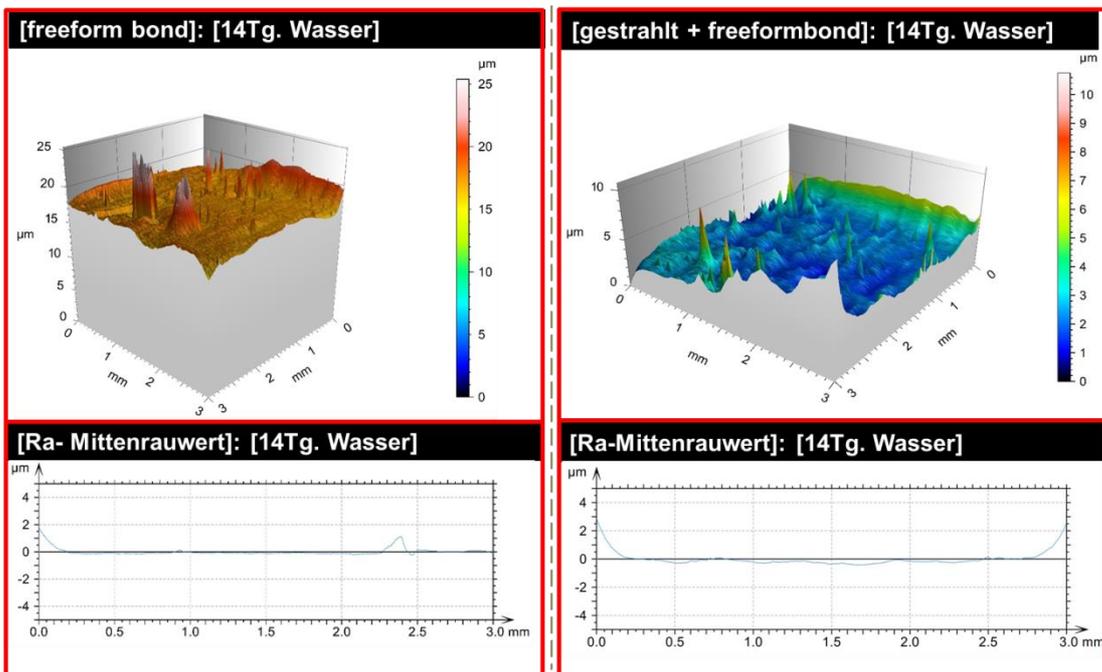


Abbildung 74: 3D- Visualisierung der Oberflächenkonditionierung [freeform bond] und [gestrahlt + freeform bond], sowie Darstellung des  $R_a$ -Profils der additiven Prüfgruppe. Die Abbildung links stellt die Oberflächenrauigkeit der Konditionierung mit dem Haftvermittler freeform® bond dar. Rechts ist die Kombination aus Abstrahlen und Auftragen von freeform® bond. Die Profilkurven der jeweiligen  $R_a$ -Mittelrauwerte sind unterhalb der entsprechenden 3D- Darstellung. Die Farbcodierung ist mit der Scala, die jeweils rechts neben der Darstellung aufgeführt ist, aufgeschlüsselt. Beide Prüfgruppen wurden für 14Tg. in Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$  dest.), bei  $37^\circ\text{C}$  gealtert. Es zeigten sich geringe Unterschiede zwischen beiden Konditionierungsarten auf.

Die Konditionierung der additiven Prüfkörper- (Schienen-) Basis allein mit dem Haftvermittler freeform® bond zeigte einen  $R_a$ -Mittelwert mit  $0,567\ \mu\text{m}$  auf. Die Oberfläche, die zuerst abgestrahlt wurde und danach der Haftvermittler aufgetragen wurde, zeigte einen höheren  $R_a$ -Mittelwert von  $0,735\ \mu\text{m}$  auf. Die Oberfläche war bei dieser Kombination aus Abstrahlen und freeform® bond-Auftragen, über die gemessene Fläche verteilt, unebener.

### 4 Diskussion

#### 4.1 Ziel der vorliegenden Studie

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Verbundfestigkeit von unterschiedlichen Reparaturmaterialien auf dreidimensional gedrucktem, additiv hergestelltem Schienenmaterial zu testen. Als Schienenmaterial wurde das Freeprint® splint 2.0 UV (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) verwendet. Als Reparaturmaterialien wurden das Autopolymerisat Palapress® (PMMA), drei verschiedene Lichtpolymerisate wie das primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast untersucht. Auch wurde das dreidimensional druckbare Schienenmaterial Freeprint® splint 2.0 UV selbst als Reparaturmaterial experimentell eingesetzt und untersucht.

Dabei wurde in den entsprechenden Versuchsreihen der Einfluss von der Oberflächenkonditionierung der Prüfkörperbasis überprüft. Auch wurde der Einfluss einer trockenen und Wasserlagerung untersucht.

Ein Vergleich mit vorangegangenen Versuchen mit der ähnlichen Fragestellung konnte nur bedingt erfolgen, da die aktuelle wissenschaftliche Studienlage nur wenige Untersuchungen dazu liefert. Eine Literaturrecherche in der Literaturdatenbank PubMed.gov lieferte (zuletzt abgerufen am: 29.09.2020) mit den Stichworten „3D splint material shear bond strength“ lediglich ein Suchergebnis. Ähnliche Versuchsreihen zur Untersuchung mechanischer Eigenschaften von dreidimensional gedruckten Prothesenmaterialien lieferte bei der Literaturrecherche mit den Stichworten „3D printing materials shear bond strength“ vier weitere Ergebnisse (zuletzt aufgerufen am: 29.09.2020).

Eine zu dieser Studie vergleichbare Untersuchung zur Reparaturfähigkeit von additiven Schienenmaterialien wurde von Perea- Lowery und Vallittu (2019) durchgeführt. Hier wurden Einzelbeobachtungen zur Verbundfestigkeit gemacht. Dabei wurden Verbundfestigkeitswerte zwischen 0 MPa bis ca. 19 MPa gemessen. Die Konditionierungsverfahren (Abstrahlen, chemischer Haftverbund) waren ähnlich, jedoch wurden wenige Materialien untersucht, die Methoden wie z.B. beim 3D- Druck waren unterschiedlich. Die konventionell

hergestellte Kontrollgruppe zeigte in der Studie von Perea- Lowery und Vallittu homogenere Verbundfestigkeitswerte als die additive Prüfgruppe [104]. Diese Beobachtung ist übertragbar zu den vorliegenden Ergebnissen dieser Studie, da hier die konventionelle Kontrollgruppe stabilere Werte erreichte und die additiven Prüfgruppen eine große Schwankungsbreite aufwiesen.

Die weiteren Suchergebnisse bezogen sich auf 3D- druckbare Materialien, die sich für die Herstellung von Provisorien oder 3D- gedruckten Prothesen eignen. Bezüglich der Verbundfestigkeit zwischen 3D- gedruckten provisorischen Materialien und konventionellem PMMA zeigten Albahri et al. in ihrer Untersuchung, dass sich die unterschiedlichen Reparaturmaterialien (wie das PMMA, Protemp Plus und Filtek Bulk Fill) in der Verbundfestigkeit statistisch nicht signifikant voneinander unterschieden [111]. Zur Beurteilung der Verbundfestigkeit (in Newton) führten sie dabei einen Scherversuch durch. Dabei erreichte das PMMA- Reparaturmaterial eine Verbundfestigkeit von 102,19 Newton [111]. Vergleicht man diesen Wert mit den Verbundfestigkeitswerten in dieser Studie (in MPa), so weichen diese stark ab, allerdings war die Verbundfläche in der Studie von Albahri et. al größer, die Methodik und Materialien (3D- druckbares provisorisches Material) sind nicht vergleichbar.

Lim und Shin zeigten in ihrer Untersuchung zur Verbundfestigkeit zwischen einem 3D- druckbaren provisorischen Material und zwei konventionellen provisorischen Materialien, dass unterschiedliche Oberflächenkonditionierungen wie das Abstrahlen, Monomer- Benetzung und die Kombination aus beiden, keinen signifikanten Effekt auf die Verbundfestigkeit hatten, die unterschiedlichen Reparaturmaterialien jedoch sich statistisch signifikant unterschieden. Sie erreichten dabei Verbundfestigkeitswerte zwischen 1,45 MPa bis 2,77 MPa [112]. Im Vergleich zur vorliegenden Studie sind diese Ergebnisse deutlich geringer, allerdings unterschieden sich hier die verwendeten Materialien zur vorliegenden Studie. Eine weitere Studie untersuchte ebenso die Verbundfestigkeit von 3D- druckbaren provisorischen Materialien mit lichthärtenden Kunststoffen und erreichte Verbundfestigkeitswerte zwischen 23,18 MPa bis 33,29 MPa [113].

Auch diese Ergebnisse sind aufgrund der Auswahl an Materialien nur bedingt vergleichbar mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie. Die Reparaturfähigkeit von einem 3-D druckbaren Prothesenmaterial wurde in einer Untersuchung von Li et al. untersucht. In der Studie wurde ein 3D- druckbares Prothesenmaterial mit dem gleichen Material repariert. Die Methodik war zur vorliegenden Studie vergleichbar. Die Untersuchung zeigte Verbundfestigkeitswerte zwischen 6,67 MPa und 17,32 MPa [114]. Auch in der vorliegenden Studie wurde der Haftverbund zwischen dem 3D- druckbaren Schienenmaterial mit dem gleichen Schienenmaterial selbst untersucht, die in dieser Prüfreihe erreichten Werte zwischen 5,75 MPa und 15,32 MPa sind mit der o.g. Studie vergleichbar.

### **4.2 Auswahl der durchgeführten Methode**

Die vorliegende Studie wurde in Anlehnung die DIN EN ISO- Norm 10477 der Zahnheilkunde für Kronen- und Brückenkunststoffe durchgeführt. Zum Zeitpunkt dieser Studie gab es hinsichtlich der Verbundfestigkeit von Reparaturmaterialien an additiv hergestellte Schienen keine entsprechende ISO- Norm. Auch gibt es in der DIN EN ISO- Norm 20795 -2 (2013) für kieferorthopädische Kunststoffe und Copolymerisate keine definierten Prüfverfahren zur Testung der Verbundfestigkeit von Polymerisaten an konventionell hergestellte Schienen.

Bei der Auswahl und Durchführen der Testverfahren sollten auch klinische Aspekte herangezogen werden. Aufbisschienen werden vor allem zur Therapie bei kranio-mandibulären Dysfunktionen eingesetzt und sind unterschiedlichen Kräften und Verschleißmechanismen (wie in den Kapiteln 1.1.3 auf Seite 16 und 1.5 auf Seite 29 beschrieben) ausgesetzt.

Klinisch gesehen sind Kräfte, die am häufigsten zum Versagen des Haftverbundes zwischen zwei Werkstoffen führen, Scherkräfte [109]. Nach Sarac et al. und Qaw et al. ist die Messung des Haftverbundes mit Hilfe des Scherversuchs eine akzeptable Methode, da sie die Kraft des Verbundes, die

auf die Kontaktfläche auftrifft, misst und Kaukräfte gegen diese Verbundstelle eine Kraft ausüben [115], [116].

Bislang gibt es nur Studien zum Haftverbund zwischen Metallen und Verblendkunststoffen (Verbundfestigkeitswerte mit einem Mittelwert von 19,29 MPa gemessen) [117] und kieferorthopädischen Brackets mit Befestigungskunststoffen. Die Verbundfestigkeitswerte zwischen Brackets und Befestigungskunststoffen werden zwischen 4 MPa - 7,8 MPa für geeignet eingestuft, um Schmelzausrisse zu vermeiden. Einige Studien zeigten hier Mittelwerte bis 15,6 MPa [118], [119]. Diese Werte sind in Bezug auf die klinischen Anforderungen an Aufbissschienen nicht übertragbar, da okklusale Aufbissschienen, die vor allem zur Therapie bei Parafunktionen eingesetzt werden, enormen Kaukräften stand halten müssen [120].

Auch wurde in einer weiteren Studie die Verbundfestigkeit zwischen Kunststoffzähnen und einer CAD/ CAM gefrästen Prothesenbasis mit einem Scherversuch durchgeführt. Hier wurden Verbundfestigkeitswerte zwischen 9,12 MPa bis 16,62 MPa gemessen [121]. In Bezug auf die vorliegende Studie sind die o.g. erreichten Verbundfestigkeitswerte nicht übertragbar, da hier andere Werkstoffe und das subtraktive Herstellungsverfahren untersucht wurden.

### 4.2.1 Basisherstellung

#### 4.2.1.1 konventionelle Kontrollgruppe Palapress

Die Herstellung der Prüfkörperbasis mit Palapress® klar erfolgte mit konventionellen zahntechnischen Methoden, mit der Anteigtechnik und Polymerisation im Drucktopf.

Eine Untersuchung von Rossiwal et al. überprüfte die mechanischen Eigenschaften von kieferorthopädischen Kunststoffen, die entweder durch die Anteig- Methode oder durch das Pulver- Streuverfahren hergestellt wurden [122]. Aus dieser Studie ging hervor, dass die Biegefestigkeit bei der Anteig- Methode höher war als beim Pulver- Streu- Verfahren, daher wurde in der vorliegenden Versuchsreihe dieses Herstellungsverfahren angewandt.

Das Palapress® als Autopolymerisat wurde verwendet, da die Dimensionsstabilität bei diesen höher ist. Bohnenkamp untersuchte die lineare Dimensionsstabilität von fünf verschiedenen Schienenherstellungsmethoden und wies auf, dass die lineare Dimensionsstabilität von Herstellungsmethoden mit Autopolymerisaten höher war als bei der Schienenherstellung mit Heißpolymerisaten und mit der Tiefziehfolientechnik [39].

### 4.2.1.2 additive Prüfgruppe freeprint splint 2.0 UV

Bei der Herstellung der additiv hergestellten Prüfkörperbasen wurde in dieser Studie das Freeprint® splint 2.0 UV der Firma Detax (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) verwendet. Dieses dreidimensional druckbare Schienenmaterial ist für das Drucken mit DLP- Druckern von Rapidshape DII-Serien geeignet [123]. Nach einem Praxisbericht bzw. einem Erfahrungsbericht der Firma Detax (zuletzt aufgerufen am 30.09.2020) über dreidimensional gedruckte Schienen können mit Hilfe der Reparaturmaterialien freeform® fixgel und freeform® plast nachträgliche Korrekturen durchgeführt werden [124]. Bei anderen aktuell auf dem Markt verfügbaren 3D- druckbaren Schienenmaterialien lagen zum Zeitpunkt dieser Studie keine Reparatur-Empfehlungen oder -Materialien der Hersteller vor.

#### 4.2.1.2.1 3D- Drucker

In dieser Studie wurde ein DLP- Drucker mit einer Maskenbelichtung verwendet. Der 3D- Drucker D30 II von Rapid Shape hat eine Lichtquelle mit ultravioletten Leuchtdioden (im englischen auch „light- emitting diodes“ (LED` s) genannt). Eine Studie von Park et al. zeigte, dass die Verwendung eines DLP- Druckers mit UV- LED` s keinen signifikanten Unterschied in der Genauigkeit gegenüber einem DLP- Drucker mit einer reinen UV- Lichtquelle hatte [125].

Bezüglich der Genauigkeit der gedruckten Objekte mit unterschiedlichen Druckverfahren zeigte eine Untersuchung von Kim et al., dass die Präzision von dentalen Modellen bei der Maskenbelichtung (DLP- Verfahren) und das sogenannte Poly- Jet- Verfahren präziser waren als beim SLA- Verfahren und Schmelzverfahren [126].

Auch zeigte eine Studie, dass das DLP- Verfahren zeitlich effizienter ist. Durch den 3D-Druck und Aushärtung einer ganzen Schicht ist es zeitlich gesehen, effizienter als beim SLA- Verfahren, welches punktuell polymerisiert [76].

### 4.2.1.2.2 Anordnung des Druckobjekts

In dieser Untersuchung wurden die Prüfkörperbasen im 45°-Winkel zur Bauplattform ausgerichtet. Unkovskiy et al. zeigten in einer Studie mit einem SLA- Drucker, dass eine 45°- Anordnung des Druckobjekts zu einer besseren Genauigkeit führte als eine 0°- oder 90°- Anordnung. Auch zeigten die Druckobjekte mit einem 45°-Winkel zur Bauplattform eine höhere Standhaftigkeit gegenüber axialer Belastung im Gegensatz zu Druckobjekten, die eine senkrechte Druckschicht zur Druckorientierung hatten [110]. Daher wurden die additiven Prüfkörper (Schienen-) Basen in dieser Studie mit einem 45°- Winkel zur Bauplattform angeordnet.

### 4.2.1.2.3 Schichtdicke

In der vorliegenden Studie wurde für die Druckauflösung eine Schichtdicke von 50 µm ausgewählt. Eine Untersuchung zeigte, dass die Auswahl der Schichtdicke keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der dreidimensional gedruckten Objekte hatte [127]. Untersucht wurden dabei Schichtdicken von 25 µm, 50 µm und 100 µm mit verschiedenen 3D- Druckern. Auch zeigte diese Studie, dass Abweichungen in der Genauigkeit der Druckobjekte im Schnitt kleiner als 0,25 mm waren und somit klinisch akzeptabel für die Herstellung von kieferorthopädischen Apparaturen sind. Die Genauigkeit von dreidimensional gedruckten Modellen wurde in einer weiteren Studie von Zhang et al. untersucht. Hier wurden unter anderem drei verschiedene DLP- Drucker und ein SLA- Drucker untersucht. Die Schichtdicken variierten zwischen 20 µm bis 100 µm. Aus der Studie ging hervor, dass eine Schichtdicke von 50 µm beim DLP- Verfahren die optimale Schichtdicke ist [76].

Bei der lichtsensitiven Polymerisation der einzelnen Schichten spielen auch weitere Faktoren wie die Sauerstoff- Inhibitionsschicht eine Rolle. Eine

Untersuchung zum Polymerisationsgrad und der Sauerstoff- Inhibitionsschicht zeigte, dass bei einer Schichtdicke von 50 µm die Druckdauer einer Schicht lang genug dauert (ca. 10 Sekunden), sodass die Oberfläche der gedruckten Schicht mit Sauerstoffmolekülen aufgefüllt werden kann und daraus resultierend eine klebrige und unpolymertierte Oberfläche für die nächste Schicht bereitstellt wird [72]. In der Summe kommt es daher zu einem höheren Polymerisationsgrad zwischen den einzelnen Schichten, was mit weiteren Studien zu belegen ist [128].

Des Weiteren spielt die Schichtdicke eine Rolle bei der Dauer des Druckverfahrens. In einigen Studien wird aufgewiesen, dass höhere Schichtdicken zu einer Verlängerung des Druckvorgangs führen [127], [76].

Aufgrund der oben genannten Faktoren wurden bei dieser Studie die Prüfkörper- (Schienen-) Basen mit einer Schichtdicke von 50 µm gedruckt.

#### 4.2.1.2.4 Nachbearbeitungsprozess

Nach dem dreidimensionalen Druck der Prüfkörperbasen erfolgte die Nachbearbeitung dieser nach Herstellerangaben. Die Prüfkörper- (Schienen) Basen wurden in einem Ultraschallbad mit einer 98%- Isopropanollösung für drei Minuten zweimal gereinigt. Danach erfolgte das Nachbelichten der gedruckten Objekte mit einem Lichthärtegerät, (Otoflash G171, NK- OPTIK, Baierbrunn, Deutschland) mit 2x 2000 Xenonlichtblitzen unter stickstoffgeschützter Atmosphäre. In einer Studie wurden drei verschiedenen Lichthärtegeräte, die für das Nachbelichten von dreidimensional druckbaren Schienenmaterialien (u.a. das Freeprint® splint Schienenmaterial von Detax) untersucht. Die Prüfkörper, die im Lichthärtegerät Otoflash G171 (Xenonlichtblitze unter stickstoffgeschützter Gasatmosphäre) und in der LC-3D-Print Box (UV- Lichtquelle) zeigten eine höhere Martens- Härte als das andere verwendete Lichthärtegerät [81]. Die Martens- Härte wird durch eine Härteprüfung eines festen Werkstoffes bestimmt, bei welcher mit einem pyramidenförmigen Eindringkörper der Prüfkörper belastet wird [129]. Dass unterschiedliche Lichthärtegeräte bei der Durchführung der Nachbelichtung einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften additiv hergestellter

Objekte haben, zeigte auch eine Studie von Reymus et al., mit der Untersuchung der Bruchlast von 3D- gedruckten provisorischen Materialien [96].

### 4.2.2 Alterung # 1

Aufgrund dessen, dass Aufbissschienen in der Regel nachts getragen werden, sind diese keinen starken Temperaturschwankungen ausgesetzt. Daher wurde das Thermocycling- Verfahren, wie es in der ISO- Norm 10477 vorgegeben wird, nicht durchgeführt. Die Untersuchungsmethode wurde bezüglich der Alterung entsprechend der Fragestellung modifiziert.

Um die Verbundfestigkeit von Reparaturmaterialien auf noch ungetragenen Schienen zu untersuchen, wurde in dieser Studie eine Prüfgruppe bei 24 Std. trocken (bei 23° C) gealtert. Die Alterung der Prüfkörperbasis für 14 Tg in destilliertem Wasser bei 37° Celsius wurde durchgeführt, um die Situation einer bereits getragenen Schiene, die einer Korrektur bedarf, zu simulieren.

Bereits 1987 führten Schulte et al. eine Kausimulationsstudie durch, welche die Verschleißfestigkeit von Aufbissschienen aus PMMA und Isosit® untersuchten, dabei wurde eine Prüfkörperalterung im Wasserbad mit demineralisiertem Wasser bei 37° C durchgeführt. Die Autoren postulieren, dass die künstliche Alterung zwar nicht der klinischen Alterung entspricht, jedoch keine wesentlichen Unterschiede zwischen Speichel und entionisiertem Wasser zu erwarten sind [130]. In Bezug auf den Verschleiß stellten sie fest, dass das Isosit®- Material einen geringen Volumenverlust (durch Verschleiß verursacht) aufzeigte, als das PMMA- Schienenmaterial [130].

In einer Untersuchung mit additiv hergestellten Schienenmaterialien wurde der Effekt der Alterung und der Nachbelichtung untersucht, dabei wurden die Schienen bei 37° C destilliertem Wasser ebenso für 14 und 28 Tage gealtert. Die Ergebnisse zeigten, dass die künstliche Alterung 3D- gedruckter Schienenmaterialien einen höheren negativen Einfluss auf die Martens- Härte hatten als die gefräste Kontrollgruppe [81].

In einer anderen Studie wurden subtraktiv hergestellte Prüfkörper in unterschiedlichen Medien wie künstlicher und physiologischer Speichel, destilliertes Wasser und Natriumchlorid- Lösung alle auf 37° C temperiert untersucht. Die Oberflächenrauigkeit, die Löslichkeit und die Wasseraufnahme wurden nach einem Tag bis hin zu 180 Tagen untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass das Medium auf die Oberflächenrauigkeit und die Wasseraufnahme keinen Einfluss hatten. Die geringste Löslichkeit trat bei destilliertem Wasser auf [131].

Wenn auch in den o.g. Studien andere Werkstoffe untersucht wurden, so sind die Aussagen bezüglich der künstlichen Alterung auch auf diese Studie übertragbar, da diese Studien keinen signifikanten Unterschied zwischen einem künstlichen Alterungsprozess in destilliertem Wasser und einer Alterung im Speichel aufzeigten. Welchen Einfluss unterschiedliche Medien auf die Alterung von 3D- gedruckten (Schienen-) Materialien haben, sind zum aktuellen Zeitpunkt nicht ausreichend untersucht und sind von klinischer Relevanz.

### 4.2.3 Oberflächenkonditionierung

#### 4.2.3.1 Strahlen der Prüfkörperbasis

Beim Strahlen der Prüfkörperbasen der additiv hergestellten Prüfgruppe wurde durch die individuelle Konstruktion des Sandstrahlers darauf geachtet, dass die Technik standardisiert wurde. Das Anrauen von Kunststoffoberflächen ist eine in der Zahntechnik weit verbreitete und empfohlene Methode, um die Oberfläche zu vergrößern [132].

Bei einer Untersuchung von Akin et al. wurde die Oberfläche von einem Prothesenmaterial mit 120 µm Aluminiumoxid gestrahlt, jedoch betrug in dieser Studie der Abstand zur gestrahlten Oberfläche zehn Millimeter. Dabei wurde der Haftverbund von Kunststoffzähnen an Heißpolymerisaten untersucht. Die Ergebnisse zeigten dass das Strahlen zu einer signifikanten Verbesserung gegenüber der unbehandelten Oberfläche führte [133]. Diese Verbesserung durch das Strahlen der Oberfläche wurde in der vorliegenden Studie nicht immer erreicht. Beim Reparaturmaterial primosplint® machte das Strahlen der

Oberfläche gegenüber der unbehandelten Oberfläche keinen signifikanten Unterschied auf die Verbundfestigkeit. Zum Zeitpunkt dieser Studie gibt es bezüglich der mechanischen Oberflächenkonditionierung mit Strahlen auf adhäsiv hergestellten Schienenmaterialien keine vergleichbaren Studien.

### 4.2.3.2 Monomer- Benetzung der Prüfkörperbasis

Nach Sarac et al. kann der Haftverbund zwischen einem Reparaturmaterial und der zur reparierenden Oberfläche durch mechanische oder chemische Konditionierung verbessert werden [115]. Bei der Studie von Sarac et al. wurde die Verbundfestigkeit unterschiedlicher Heißpolymerisate mit einem Autopolymerisat untersucht, dabei wurde analog wie bei dieser Studie die Oberfläche unter anderem für 30 Sek. mit Monomer konditioniert, was dazu führte, dass die Verbundfestigkeit statistisch signifikant besser war als die unbehandelte Oberfläche.

Perea- Lowery und Vallittu untersuchten die Verbundfestigkeit von autopolymerisierendem PMMA auf additiv hergestelltem Schienenmaterial und zeigte, dass eine chemische Behandlung mit Monomer für drei Minuten gegenüber der unbehandelten Oberfläche keinen statistisch signifikanten Unterschied machte [104].

Die ausgewerteten Ergebnisse in der vorliegenden Studie zeigten, dass die unbehandelte Oberfläche der additiv hergestellten Basis gegenüber der Monomer- benetzten Oberfläche bei der trockenen Alterungsform in der Tendenz, bei der nassen Alterung sogar statistisch signifikant besser waren.

### 4.2.3.3 Strahlen + Monomer- Benetzung der konventionellen und additiven Prüfkörperbasis

Bei den Prüfkörperbasen, an die Zylinder aus PMMA angefügt wurde, erfolgte eine Oberflächenkonditionierung mit Strahlen, im Anschluss eine Monomer-Applikation (MMA haltigen Flüssigkeit) (wie beschrieben in Kapitel 2.7.4.5. auf Seite 62). Auch zu dieser angewandten Methode gibt es keine vergleichbaren Studien mit additiv oder konventionell hergestellten (Schienen-) Materialien.

### 4.2.3.4 Anwendung primostick® auf der Prüfkörperbasis

Der MMA- haltige Haftvermittler primostick® wurde bei der Anwendung vom lichthärtendem primosplint®- Material verwendet. Der Hersteller von primosplint® empfiehlt bei der Anwendung von diesem zuvor den Haftvermittler aufzutragen und auszuhärten [134]. Die Firma Dentaforum empfiehlt bei Reparaturen eines lichthärtenden Kunststoffes mit dem gleichen Material oder mit PMMA die Anwendung von primostick® [135]. Curtis et al. [136] zeigten in einer Untersuchung mit einem Haftvermittler (Triad bonding agent), dass die Verwendung von diesem Haftvermittler zu statistisch signifikant höheren Verbundfestigkeitswerten zwischen einem Heiß- und einem Lichtpolymerisat führte.

In der vorliegenden Studie verbesserte das primostick® bei der trockenen Alterungsform den Haftverbund nur in der Tendenz besser. Bei der Alterung für 14 Tage in dest. Wasser zeigte der Haftvermittler auch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte, als die Oberfläche unbehandelt zu belassen.

### 4.2.3.5 Anwendung Freeform® bond auf der Prüfkörperbasis

Der Haftvermittler freeform® bond wird von der Firma Detax zur Anwendung empfohlen, wenn bereits getragene Schienen repariert werden sollen [137]. In dieser Studie wurde freeform® bond appliziert, wenn das Reparaturmaterial freeform® fixgel oder freeform® plast verwendet wurde. Das freeform® bond ist ebenso wie das primostick® ein lichthärtender und MMA- haltiger Haftvermittler für das freeform kit (bestehend aus freeform® fixgel und freeform® plast). Der Hersteller empfiehlt die Anwendung von freeform® bond bei bereits fertiggestellten, älteren Schienen. Daher wurde in dieser Studie nur bei den in Wasser gelagerten additiv hergestellten Prüfkörperbasen dieser Haftvermittler angewendet und experimentell mit der unbehandelten und nass gealterten Prüfgruppe verglichen.

### 4.2.3.6 Strahlen + Anwendung von Haftvermittlern

Analog wie bei der Oberflächenkonditionierung [gestrahlt + monomer] wurde die Auswirkung des Strahlens und im Anschluss die Anwendung von den jeweiligen Haftvermittlern (primostick® und freeform® bond).

### 4.2.4 Zylinderherstellung mit den Reparaturmaterialien

#### 4.2.4.1 Reparaturmaterial: Palapress®

Vergleicht man die Verbundfestigkeitswerte des Reparaturmaterials PMMA auf der additiven Schienenbasis, die in dieser Studie zwischen 17,56 MPa und 22,97 MPa liegen, so sind diese Ergebnisse am ehesten mit den Verbundfestigkeitswerten aus der Untersuchung von Perea- Lowery und Vallittu vergleichbar. Hier wurden Verbundfestigkeitswerte zwischen einem additiven Schienenmaterial und PMMA von ca. 10 MPa bis ca. 19 MPa gemessen [104].

#### 4.2.4.2 Reparaturmaterial: primosplint®

Durch die knetbare Konsistenz war es beim Anfügen einfach in der Anwendung.

Curtis und Eggleston zeigten in ihren Studien Ergebnisse zur Verbundfestigkeit von Lichtpolymerisaten und Heißpolymerisaten. Dabei zeigte die Studie von Curtis et al., dass bei der Verwendung von einem Lichtpolymerisat Verbundfestigkeitswerte zwischen 5,8 MPa bis 23,5 MPa (Mittelwerte) erreicht wurden. Dabei lagen die geringeren Werte bei der Gruppe ohne Haftvermittler vor [136]. Vergleicht man diese o.g. Verbundfestigkeitswerte (Mittelwerte) mit dem Reparaturmaterial [primosplint] aus dieser Studie, die zwischen 2,96 MPa (ohne Oberflächenkonditionierung) und 7,25 MPa (mit Haftvermittler) schwanken, so liegen die Verbundfestigkeitswerte von primosplint® auf additiver Prüfkörperbasis darunter.

#### 4.2.4.3 Reparaturmaterial: Freeprint® splint 2.0 UV

Das druckbare Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV selbst wurde auch als Reparaturmaterial verwendet. Das Material ist entsprechend für den additiven

Druck sehr dünnfließend. Daher wurde es mit Hilfe einer individuell modifizierten Kanüle appliziert. Dabei erfolgte die Applikation in zwei Schichten (wie Beschrieben in Kapitel 2.7.5.3. auf Seite 66). Um die Biokompatibilität und vollständige Auspolymerisation des Materials zu gewährleisten, wurde im Anschluss der Nachbearbeitungsprozess nach Herstellerangaben durchgeführt. Daher war der Zeitaufwand bei diesem Reparaturmaterial deutlich höher als bei den anderen Reparaturmaterialien und ist daher im klinischen Alltag in der Umsetzung nicht praktikabel.

Gregory et al. zeigten, dass die Verwendung eines Reparaturmaterials, welche die gleiche chemische Zusammensetzung hatte, wie das Basismaterial, nicht zu besseren Verbundfestigkeitswerten führten als Reparaturmaterialien mit einer anderen chemischen Zusammensetzung [138]. Auch wenn es sich in der Studie von Gregory et al. um Füllungskunststoffe handelte, so trifft die Aussage auf die vorliegende Studie zu, da das Reparaturmaterial [freeprint splint 2] schlechtere Verbundfestigkeitswerte erreichte, als das PMMA.

#### 4.2.4.4 Reparaturmaterialien: Freeform® fixgel und freeform® plast

Wie das primosplint® sind die Reparaturmaterialien freeform® fixgel und freeform® plast lichthärtende Polymerisate.

Bei beiden Reparaturmaterialien bewegten sich die Verbundfestigkeitswerte zwischen 4,45 MPa bis 8,65 MPa bei der trockenen Gruppe und bei der Alterung in Wasser zwischen 3,48 MPa bis 15,32 MPa.

Vergleicht man diese Werte mit anderen Studien, so erreichen Lichtpolymerisate als Reparaturmaterial schlechtere Verbundfestigkeitswerte als Autopolymerisate [109], [139]. Diese Aussage ist auch auf diese Studie bezogen zutreffend, da das autopolymerisierende PMMA in dieser Studie als Reparaturmaterial auf der additiven Schienenbasis statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte (von 17,56 MPa bis 22,97 MPa) erreichte als alle anderen Lichtpolymerisate.

Vergleicht man die hier gemessenen Werte mit einer weiteren Studie, in welcher ein provisorischer Kunststoff mit einem Autopolymerisat und verschiedenen Lichtpolymerisaten repariert wurde, so sind die Ergebnisse zur

vorliegenden Studie ähnlich. Dabei wurde die Verbundfestigkeit wie in dieser Studie mit dem Scherversuch getestet. Das Autopolymerisat (Pulver-Flüssigkeitsgemisch) erreichte einen Mittelwert von 28,4 MPa, die Lichtpolymerisate Verbundfestigkeitswerte zwischen 7,7 MPa bis 12,3 MPa [140].

### 4.2.5 Alterung # 2

Nach Herstellung der Zylinder wurden die unterschiedlichen Prüfgruppen wiederholt einer Alterung zugeführt. Diese erfolgte auf die gleiche Art und Weise wie die erste Alterung (Alterung #1). D.h. die Prüfgruppe, deren Basis für 24 Std. trocken gealtert war, wurde wiederholt einer trockenen Alterung für 24 Std. zugeführt. Die Prüfgruppe, die bei der Alterung # 1 für 14 Tage in dest. Wasser gealtert war, wurde wieder dieser Alterungsform zugeführt.

Die Alterung # 2 wurde durchgeführt, um auch die Reparaturmaterialien auf die Auswirkungen von einer trockenen und nassen Alterung zu untersuchen. Die nasse Alterung sollte die bereits getragenen Aufbisschienen simulieren.

Eine vergleichbare Alterung wurde in der Studie von Perea- Lowery und Vallittu durchgeführt. Hier wurde die Oberfläche der additiv und konventionell hergestellten Prüfkörper- (Schienen-) Basen zunächst konditioniert oder unbehandelt belassen, danach wurde das Reparaturmaterial aus autopolymerisierendem PMMA angefügt und die Prüfkörper wurden gealtert. Dabei wurden diese entweder für 24 Std. trocken bei 23° C oder in dest. Wasser für sieben und 14 Tage bei 37° C gealtert. [104]. Die Ergebnisse aus dieser Studie zeigten, dass die Alterungsform einen signifikanten Unterschied aufwies. Diese Schlussfolgerung ist auf diese Studie nicht zutreffen, da die unterschiedlichen Alterungsformen in der vorliegenden Studie zum Teil keinen signifikanten Unterschied aufzeigten.

### 4.2.6 Vermessung der Verbundfläche

Aus der ISO- Norm 10477 geht hervor, dass die Verbundfläche zweimal gemessen werden sollte. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu verstärken, wurde in dieser Studie die Verbundfläche dreimal gemessen. In dieser Studie

wurden die Zylinder nach dem Abscheren nicht vermessen, da bei vielen Prüfgruppen der Zylinder mit großen Anteilen aus der Basis herausgebrochen sind. Daher war die ehemalige Verbundfläche nicht mehr nachvollziehbar.

### 4.2.7 Scherversuch

In Anlehnung an die ISO- Norm 10477 wurden die geforderten Kriterien zur Durchführung des Abscherversuchs mit einer Geschwindigkeit von einem Millimeter pro Minute und einem Abstand zum Stößel von 0,5 mm wurden eingehalten [103]. Schon 1975 stellten Schmitz und Schulmeyer fest, dass bei der Testung der Verbundfestigkeit, der Abstand des Stößels, d.h. die angreifende Kraft zu Drehmomenten führen. Daher postulierten sie, dass der Abstand des Stößels möglichst nahe an die Verbundfläche einzustellen ist [141]. Der Abscherversuch dient im Allgemeinen zur Messung der Verbundfestigkeit von zwei verschiebenden Materialien oder verschiedener Materialgruppen wie zum Beispiel zwischen zwei keramischen Materialien (Gerüstkeramik und Verblendkeramik) [142].

Die weiteren werkstoffkundlichen Prüfmethode wie zum Beispiel der Biege- oder Zugversuch wurden in dieser Studie nicht durchgeführt, da sie zwar die Festigkeit eines Werkstoffverbundes messen, jedoch keine Aussage über die Verbundfestigkeit von zwei verschiedenen Materialien geben, die zusammengeführt wurden. Die Biegefestigkeit (getestet mit einem Drei- Punkt- Biegeversuch) zum Beispiel wird von der ISO- Norm 20795-2 Zahnheilkunde, Kunststoffe- Teil 2: Kieferorthopädische Kunststoffe vorgegeben. Hier wird die Biegefestigkeit von mindestens 50 MPa vorgeschrieben [30]. Hier wird eine Einzelkraft mittig auf einen Probekörper ausgeübt, bis die Probe zum Bruch kommt. Der Probekörper ist dabei auf zwei Stützen gelagert [27]. Beim Biegeversuch gibt es noch den Ein- Punkt- Biegeversuch (Probekörper ist nur an eine, Ende eingespannt) und den Vier- Punkt Biegeversuch (Probekörper ist wie beim Drei- Punkt- Biegeversuch an beiden Enden auf Auflagen gelagert, jedoch wird dieser mittig durch eine Prüfstampel mit zwei Druckpunkten belastet).

Beim Zugversuch wird ein Probestab an den Schulterköpfen längs in die Zug-Prüfmaschine eingespannt und verlängert, dabei wird von der Test-Maschine der Dehnungsverlauf bei zunehmender Spannung als Spannungs-Dehnungsdiagramm wiedergegeben [27].

Vergleicht man die Verbundfestigkeitswerte der vorliegenden Studie mit anderen Untersuchungen, bei denen auch der Scherversuch nach der DIN ISO-Norm 10477 durchgeführt wurde, so sind die Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Materialien bedingt vergleichbar. So wiesen zum Beispiel Younis et al. auf, dass die Verbundfestigkeitswerte zwischen Polyetheretherketon (PEEK) und einem Verblendkunststoff zwischen 5,38 MPa bis 10,04 MPa lagen [143]. Auch sind die Ergebnisse der Verbundfestigkeit von Younis et a. aufgrund der unterschiedlichen Materialien und Methodik nicht zur vorliegenden Untersuchung übertragbar

### 4.2.8 Bruchflächenanalyse

Um die Bruchtypen zu kategorisieren, wurden die Bruchflächen der Prüfkörperbasis makroskopisch untersucht und eingeteilt. Eine vergleichbare Kategorisierung in adhäsive, kohäsive und gemischte Bruchtypen führten Younis et al. durch. Sie erreichten bei Verbundfestigkeitswerten (Mittelwert) von 5,39 MPa bis zu 10,04 MPa adhäsiven Bruchtypen bei allen Prüfkörpern [143]. Dieser Zusammenhang zwischen den Verbundfestigkeitswerten und den dabei aufgetretenen Bruchtypen ist mit der Bruchflächenanalyse der vorliegenden Studie nicht vergleichbar. Adhäsive Bruchtypen traten in der vorliegenden Untersuchung bei einem Mittelwert von 4,10 MPa [24Std. trocken] und 4,03 MPa [14Tg. Wasser] auf. Kohäsive Brüche waren bei einem Mittelwert von 14,94 MPa [14Tg. Wasser] und 16,07 MPa festzustellen. Klinisch gesehen sind kohäsive Bruchtypen zu bevorzugen, da sie wie hier nicht nur bei höheren Kräften aufgetreten sind, sondern auch alle in der 3D- gedruckten Harzschicht der Schienenbasis auftraten und daher auf einen zuverlässigeren Haftverbund zwischen Basis und Reparaturmaterial hinweisen [112].

### 4.2.9 Oberflächenbeschaffenheit

Dieses Vorgehen wurde in Anlehnung an die Studie von Huettig et al. durchgeführt, in welcher unter anderem die Rauheit von einem konventionellen und einem 3D- druckbaren Schienenmaterial bestimmt wurde. Dabei wurden für die konventionelle Gruppe aus PMMA ein mittlerer  $R_a$ - Wert von  $0,062 \mu\text{m}$  gemessen und  $0,06 \mu\text{m}$  für die additive Gruppe [91]. Allerdings wurde die Oberfläche in der o.g. Studie poliert, daher sind die Ergebnisse mit den Werten aus der vorliegenden Studie für PMMA mit  $3,401 \mu\text{m}$  [24Std. trocken] und  $9,436 \mu\text{m}$  [14Tg. Wasser] nicht vergleichbar, da hier die Oberfläche gestrahlt und mit Monomer benetzt wurde.

## 4.3 Diskussion der Ergebnisse

### 4.3.1 Einordnung der Ergebnisse unter klinischen Aspekten

Die konventionell hergestellte Kontrollgruppe, bestehend aus einer Palapress®-Basis und dem Reparaturmaterial Palapress® diente als Goldstandard. Die Verbundfestigkeitswerte waren im Vergleich zu den additiven Gruppen stabiler und bewegten sich zwischen  $23,81 \text{ MPa}$  (Median bei der Nassalterung) und  $24,93 \text{ MPa}$  (Trockenalterung). Vergleicht man die Ergebnisse der konventionellen Kontrollgruppe mit den additiven Prüfgruppen, so zeigen die additiven Gruppen eine höhere Schwankungsbreite mit deutlich geringeren Verbundfestigkeitswerten. Vor allem die verwendeten Lichtpolymerisate primosplint®, freeform® fixgel und freeform® plast erreichten deutlich schlechtere Werte als die konventionelle Kontrollgruppe. Auch waren die Ergebnisse statistisch signifikant schlechter als die Prüfgruppe mit additiver Basis aus freeprint® splint 2.0 UV und dem Reparaturmaterial Palapress®. Die Nassalterung führte bei dieser Gruppe im Vergleich zum konventionell hergestellten Goldstandard unabhängig von der Konditionierung zu größeren Streuungen der Verbundfestigkeitswerte. Bei den Konditionierungen Abstrahlen, Monomer und deren Kombination lagen die

Verbundfestigkeitswerte immer unterhalb vom Goldstandard, vor allem bei der Trockenalterung.

Aufgrund dessen, dass okklusale Aufbisschienen unterschiedlichen chemischen und mechanischen Kräften ausgesetzt sind, ist der Erfolg einer Reparatur einer digital und dreidimensional hergestellten Schiene im klinischen Alltag ein wichtiger Faktor. Vor allem müssen Aufbisschienen, die zur Therapie bei Bruxismus eingesetzt werden Kräften von über 785 N standhalten [120].

Nishigawa et al. untersuchten in ihrer Studie okklusale Kräfte, die beim bewussten zubeißen und unbewussten parafunktionellen Aktivitäten auftreten können. Hierfür setzten sie okklusale Aufbisschienen, die im Ober- und Unterkiefer eingesetzt wurden ein. In die Schienen aus hartem Kunststoff, wurden Sensoren zur Kraftmessung eingebaut. Sie zeigten, dass beim bewussten Pressen Kräfte von 774,73 N aufgetreten sind und beim nächtlichen Pressen von 414,82 N [12]. In Bezug auf die nächtlichen parafunktionellen Aktivitäten zeigen die erreichten Ergebnisse, dass sie den klinischen Anforderungen nicht entsprechen. Lediglich die konventionell hergestellte Kontrollgruppe kann eine bedingt gute Reparaturfähigkeit aufweisen. Bei den additiven Gruppen ist die Verwendung von Palapress® besser, als Lichtpolymerisate zu verwenden, allerdings sind auch hier die erreichten Ergebnisse klinisch nicht ausreichend. Daher ist bei additiven Aufbissbehelfen, die zu Bruch gehen, die neue dreidimensionale Herstellung die bessere Option, als die vorhandene Schiene zu reparieren.

4.3.1.1 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit der Kontrollgruppe  
Mechanische Eigenschaften von bereits auspolymerisierten Kunststoffen werden nach Takahashi et al. [144] von Wasserlagerung beeinflusst. Sie zeigten in einer Studie, dass die Wassermoleküle als Weichmacher im Kunststoff wirkten und somit die Biegefestigkeit abnahm, jedoch der Effekt statistisch nicht signifikant war. In einer Untersuchung zur Verbundfestigkeit zwischen Heißpolymerisaten und Autopolymerisaten zeigten Azevedo et al., dass die Verbundfestigkeitswerte sich in einer Wasserlagerung nach 90 Tagen nicht signifikant von den Werten vor der Wasserlagerung unterschieden [145].

Dieses Ergebnis ist im Vergleich zur vorliegenden Studie ähnlich, da die Trockenalterung nur in der Tendenz besser war.

In Bezug auf die ähnlichen  $R_a$ -Werte beider Alterungsformen können ähnliche Schlussfolgerungen in Anlehnung an die Studie von Morita et al. gezogen werden. Morita et al. wiesen auf, dass sich die Oberflächenrauigkeit von autopolymerisierenden Kunststoffen bei einer Alterung in einem auf 37° C temperierten Wasserbad, keinen signifikanten Unterschied zwischen einem, drei oder sieben Tagen zeigte [146].

### 4.3.2 Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Prüfkörperbasis

#### 4.3.2.1 Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die Verbundfestigkeit

Die Oberflächenkonditionierung bei der trockenen Alterungsform hatte nicht immer einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Haftverbund.

Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die stufenähnlich strukturierte Oberfläche, die durch den Druckprozess entsteht, zu einem besseren Haftverbund führt als die mikro-retentive Oberfläche der konditionierten Gruppen.

Nach Lagouvardos & Polyzois hat die Kombination aus Strahlen und Monomer-Benetzen einen positiven Effekt auf den Haftverbund, da durch das Strahlen an der Oberfläche zunächst Polymere aufgelöst und Doppelbindungen freigesetzt werden, die wiederum sich mit dem MMA neu verbinden können [147]. Aufgrund dessen, dass das dreidimensional druckbare Schienenmaterial Freeprint® splint 2.0 UV auch Bestandteile aus MMA hat, kann angenommen werden, dass die Oberfläche durch eine Monomer-Benetzung angelöst wird und somit wiederum neue chemische Verbindungen mit den MMA des Autopolymerisats möglich sind, diese chemische Verbindung allerdings signifikant schlechter ist als die mechanische Retention, die zwischen dem Autopolymerisat und der unbehandelten Prüfkörper- (Schienen-) Basis besteht.

### 4.3.2.2 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit

Die konditionierten Prüfkörper- Basen zeigten in der Tendenz oder statistisch signifikant bessere Ergebnisse bei der Trockenalterung als bei der Nassalterung. Daher ist anzunehmen, dass eine Nassalterung (Alterung #1) aus der Polymermatrix der Prüfkörperbasis freie Monomere in das Medium herauslöst und diese daher beim Anfügen von PMMA als Reparaturmaterial keine neuen Verbindungen mehr eingehen können. Eine Studie von Lin et al. untersuchte die Wasserlöslichkeit von einem für den additiven Druck geeigneten Schienenmaterial und PMMA. Die Ergebnisse zeigten, dass beide Materialien sich lösten, jedoch das additive Material geringer (0,11–0,30  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ ) als das PMMA (4,74- 7,44  $\mu\text{g}/\text{mm}^3$ ) [148].

### 4.3.3 Reparaturmaterial primosplint® auf additiver Prüfkörperbasis

#### 4.3.3.1 Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die Verbundfestigkeit

Die Oberflächenkonditionierung mit Abstrahlen und Anwenden des Haftvermittlers primostick® hatte bei dieser Prüfreihe einen statistisch signifikant positiven Effekt auf den Haftverbund gegenüber der unbehandelten Oberfläche. Der hier verwendete Haftvermittler primostick® enthält Bestandteile aus MMA, die Anwendung des Haftvermittlers ist daher vergleichbar mit der Anwendung der Monomerflüssigkeit aus MMA beim Reparaturmaterial Palapress®.

Primosplint® ist ein MMA- freies Material mit einem Foto-Initiator-System. Lichtpolymerisate wie primosplint® sind neben den Auto- und Heißpolymerisaten geeignete Materialien für die Herstellung von Aufbisschienen und weisen vergleichbar gute mechanische Eigenschaften auf [149]. In dieser Studie wurde das lichthärtende Material primosplint® als Reparaturmaterial an die Prüfkörperbasis angefügt, daher können diese guten mechanischen Eigenschaften einer Schiene, die komplett aus primosplint® hergestellt wurde, nicht übertragen werden. Bei der Polymerisation werden aus chemischer Sicht durch die Einwirkung von Licht bestimmter Wellenlänge Radikale freigesetzt, die zu einer Polymerisation führen [150]. Bei der

Lichtpolymerisaten spielt die Materialschichtdicke und die Aushärtungs- Dauer eine Rolle bei der Polymerisation und somit auch bei den mechanischen Eigenschaften. Danesh et al. untersuchten an Zylindern aus primosplint® mit einem Durchmesser von sechs Millimetern die Oberflächenhärte. Ab einer Schichttiefe von neun Millimetern polymerisierten nicht mehr alle hergestellten Prüfkörper und die Härte nahm auf 80% des Anfangswertes bereits nach fünf Millimetern ab [151]. Da die Zylinder in der vorliegenden Studie in der Höhe 2,5 mm und im Durchmesser 5 mm betragen, kann vermutet werden, dass diese möglicherweise nicht vollständig auspolymerisiert sind.

### 4.3.3.2 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit

Einen statistisch signifikanten Effekt auf die Verbundfestigkeit hatte die Alterungsform nur bei der gestrahlten Oberfläche. Die Verbundfestigkeit war hier bei der Nassalterung statistisch signifikant besser als bei der Trockenalterung. Ein Grund hierfür kann der mikromechanische Effekt der Prüfkörperbasis sein. Mahadevan et al. postulierten, dass die Verbesserung des Haftverbundes durch das Strahlen der Oberfläche auf den mikromechanischen Effekt zurück zu führen ist [152]. Die Prüfkörperbasis, die in Wasser gelagert wurde, wies eine rauere Oberfläche auf. Die mit primostick® behandelten Prüfgruppen zeigten nach der Alterung in Wasser in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte. Eine vergleichbare Studie von Razavi et al. zeigte, dass der Haftverbund zwischen Lichtpolymerisaten und unterschiedlichen Prothesenkunststoffen nach einer Alterung in Wasser (48 Std.) statistisch signifikant verbesserte. Möglicherweise können Wassermoleküle zwischen die Polymerketten der Basis diffundieren und so die linearen Polymerketten leicht auseinander drücken. Monomere können hereindringen und sich mit den Polymerketten neu verknüpfen [153].

### 4.3.4 Reparaturmaterial Freeprint® splint 2.0 UV auf additiver Prüfkörperbasis

#### 4.3.4.1 Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die Verbundfestigkeit

Das Strahlen der Prüfkörperbasis zeigte bei der Trockenalterung in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte und bei der Nassalterung statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte. Auch Rauheit und Wellentiefe nahmen zu. Daher kann die mechanische Retention mit tiefen Gruben die Verbundfestigkeit positiv beeinflusst haben. Eine vergleichbare Studie untersuchte die Verbundfestigkeit eines 3D- druckbaren provisorischen Materials und zeigte, dass eine Erhöhung der Oberflächenrauigkeit zu besseren Verbundfestigkeitswerten führte [154].

#### 4.3.4.2 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit

Die trockene Alterungsform zeigte statistisch signifikant bessere Verbundfestigkeitswerte auf als die Nassalterung. In der Studie zur Untersuchung der Verbundfestigkeit zwischen einem 3D- gedruckten Schienenmaterial und einem Autopolymerisat von Perea- Lowery und Vallittu hatte die Alterungsform einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Haftverbund. Hier waren die Werte der Verbundfestigkeit für die trocken gealterte Gruppe auch signifikant besser [104].

### 4.3.5 Reparaturmaterial freeform® fixgel und freeform® plast auf additiver Prüfkörperbasis

#### 4.3.5.1 Einfluss der Oberflächenkonditionierung auf die Verbundfestigkeit

Die Reparaturmaterialien freeform® fixgel und – plast haben keine MMA Bestandteile. Bei beiden Materialien führte jede Art der Oberflächenkonditionierung gegenüber der unbehandelten Oberfläche zu einer statistisch signifikanten Verbesserung der Verbundfestigkeit.

Die rauere Oberfläche mit tieferen Gruben (erhöhte Wellentiefe) führten somit zu einer Verbesserung des Haftverbundes. In den REM Aufnahmen stellte die

gestrahlte Oberfläche sich eher mit runden Oberflächenveränderungen dar. Rodrigues et al. führten in einer Untersuchung auf, dass das Strahlen zu Auflösung von Füllstoffen sogenannten Nanofüllern führt, die runde Gruben hinterlassen [155].

Die Nutzung des Haftvermittlers freeform® bond führte bei beiden Reparaturmaterialien nicht zu einer signifikanten Verbesserung gegenüber der gestrahlten Gruppe, jedoch erwies sich die Applikation statisch signifikant besser als die Oberfläche unbehandelt zu belassen. Vergleichbare Ergebnisse wiesen Qaw et. al auf, sie untersuchten den Effekt der Oberflächenkonditionierung auf den Haftverbund zwischen einem Prothesenmaterial (PMMA) und Reparaturmaterial. Deren Ergebnisse aus der Messung der Verbundfestigkeit zeigten, dass die Applikation eines Haftvermittlers auf MMA- Basis zu signifikant besseren Verbundfestigkeitswerten führte als die unbehandelte Oberfläche [116].

Beim Reparaturmaterial freeform® plast, die in Wasser gealtert wurde, war die Kombination aus Strahlen und Anwenden des Haftvermittlers statistisch signifikant am effektivsten. Auch zeigten Vallittu et. al. vergleichbare Studienergebnisse. Sie wiesen auf, dass das Strahlen und das Anwenden von Haftvermittlern (u.a. auf MMA Basis ) zu einer Verbesserung des Haftverbundes führten [156]. Alkurt et al. wiesen allerdings auf, dass der Haftverbund zwischen einer PMMA- Basis und einem Lichtpolymerisat geringer ist als mit anderen Reparaturmaterialien. Sie gehen davon aus, dass möglicherweise das lichthärtende Material die PMMA- Oberfläche nicht durchdringen kann und es daher zu keiner Adhäsion oder Kohäsion kommt [157]. In der Studie von Alkurt et al. wurde ein visköses, lichthärtendes, MMA freies Material verwendet, welches von der Konsistenz vergleichbar mit freeform® plast ist. Goncalves et al. wiesen auf, dass ein fließfähiges Reparaturmaterial zu höheren Verbundfestigkeitswerten führt als ein visköseres [158]. Im Vergleich zwischen freeform® plast, welches viskös ist und freeform® fixgel, welches eine gelartige Konsistenz hat und fließfähiger ist, erreichte das freeform® fixgel in der Tendenz höhere Verbundfestigkeitswerte.

### 4.3.5.2 Einfluss der Alterung auf die Verbundfestigkeit

Das Reparaturmaterial freeform® fixgel zeigte bei der Nassalterung statistisch signifikant bessere Verbundfestigkeitswerte. Auch erreichte das Reparaturmaterial freeform® plast bei der gestrahlten Oberfläche statistisch signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte bei der Nassalterung. Dieser Effekt ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Wasser in der Prüfkörperbasis die Wärmeentwicklung, bei der neuen Polymerisation mit einem angefügten Material reduziert und somit die Polymerisationsgeschwindigkeit herabgesetzt wird. Daher können mehr freie Monomere weiter in die Prüfkörperbasis diffundieren [159].

### 4.3.6 Schlussfolgerungen

Im eingeschränkten Rahmen der vorliegenden Untersuchung zeigten die Ergebnisse, dass die Prüfgruppen überwiegend, die aus der ISO- Norm 10477 geforderten 5 MPa für die Verbundfestigkeit erreichten. Die Nullhypothese, dass eine Oberflächenkonditionierungen keinen statistisch signifikanten Effekt auf den Haftverbund haben, konnte zum größten Teil widerlegt werden. Bei der Trockenalterung führte eine Konditionierung in der Tendenz zu höheren Verbundfestigkeitswerten. Bei der Nassalterung führte eine Konditionierung zu statistisch signifikant höheren Werten. Die konventionelle Kontrollgruppe wies stabilere Ergebnisse auf. Die additiven Gruppen wiesen große Schwankungsbreiten. Vergleicht man die Verbundfestigkeitswerte mit den wenigen Studien mit 3D- gedruckten Materialien, so liegen diese in ähnlichen Schwankungsbreiten, sind allerdings geringer als bei konventionellen Materialien. Die Ergebnisse der Kontrollgruppe passen nur bedingt den klinischen Anforderungen. Die Verbundfestigkeitswerte der additiven Gruppen sind klinisch nicht ausreichend. Folgende weitere Schlussfolgerungen lassen sich ziehen:

- Der Haftverbund zwischen dem 3D- gedruckten Schienenmaterial freeprint® splint 2.0 UV mit dem Autopolymerisat Palapress® unterliegt gewissen Schwankungen. Dabei hat die Art der Oberflächenkonditionierung und die Nassalterung in einen zum größten Teil negativen Einfluss auf den Haftverbund, somit kann auf die Konditionierung der Oberfläche verzichtet werden.
- Die Werte der Verbundfestigkeit zwischen additiv hergestellter Prüfkörperbasis und Palapress® sind vergleichbar mit der individuell hergestellten Kontrollgruppe (Basis und Reparaturmaterial aus Palapress®). Die Verbundfestigkeit kann im Vergleich zu den anderen verwendeten Reparaturmaterialien als stabil eingestuft werden. Allerdings sind die Verbundfestigkeitswerte unter Berücksichtigung der klinischen Anforderungen nicht ausreichend genug.
- Bei der Verwendung von Lichtpolymerisaten als Reparaturmaterial waren die Verbundfestigkeitswerte der entsprechenden Prüfgruppen vergleichbar.

Allerdings zeigte die Verbindung zu primosplint® schlechtere Verbundfestigkeitswerte. Die Ergebnisse entsprechen für alle drei Reparaturmaterialien (primosplint®, freeform®- fixgel und -plast) auf additiver Schienenbasis aus freeprint® splint 2.0 UV nicht den klinischen Anforderungen.

- Bei der Verwendung von primosplint® verbessert die Oberflächenkonditionierung bei der Trockenalterung durch Abstrahlen und Anwenden des Haftvermittlers primostick® den Haftverbund. Bei der Nassalterung hat jede Art der Konditionierung einen positiven Effekt auf den Haftverbund. Die Alterung selbst hatte jedoch einen geringen Effekt.
- Bei der Verwendung des für den additiven Druck geeigneten Schienenmaterials freeprint® splint 2.0 UV als Reparaturmaterial selbst, zeigten die Ergebnisse große Schwankungen auf. Die Anwendung des Materials als eine „Chair – side“- Verwendung war aufwendig, da das Material eine sehr geringe Viskosität besitzt. Durch den zusätzlich durchgeführten Nachbearbeitungsprozess, um die Biokompatibilität und vollständige Auspolymerisation des Materials zu gewährleisten, war die Anwendungsdauer im Vergleich zu den anderen Gruppen relativ hoch. Ein Abstrahlen der Oberfläche führte hier zu einem besseren Haftverbund. Die Nassalterung führte zu statistisch signifikant schlechteren Werten.
- Die Anwendung des Lichtpolymerisats freeform® fixgel wurde durch das Strahlen der Oberfläche bei beiden Alterungsformen verbessert.
- Das Lichtpolymerisat freeform® plast zeigte bei der Trockenalterung auf additiver Basis bessere Ergebnisse, wenn die Oberfläche gestrahlt wurde. Bei der Nassalterung führte das Abstrahlen und Auftragen des Haftvermittlers freeform® bond zu statistisch signifikant besseren Verbundfestigkeitswerten.
- Das Abstrahlen der Oberfläche zeigte bei allen Gruppen Veränderungen in der Oberflächenbeschaffenheit. Eine rauere Oberfläche führte jedoch nicht immer zu einer Verbesserung der Verbundfestigkeit. Bei der Nassalterung hatte das Strahlen einen signifikant positiven Effekt auf die Verbundfestigkeit. Bei der Gruppe mit dem Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Basis führte das Abstrahlen zu signifikant schlechteren Werten.

### 5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde der Haftverbund zwischen einem additiven Schienenmaterial Freeprint®splint 2.0 UV (DETAX GmbH & Co. KG, Ettlingen Deutschland) und unterschiedlichen Reparaturmaterialien untersucht. Als Reparaturmaterial wurde ein Autopolymerisat Palapress® klar (Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) und drei verschiedene Lichtpolymerisate verwendet. Bei den Lichtpolymerisaten handelte es sich um das primosplint® (primotec, Joachim Mosch e.K, Bad Homburg, Deutschland), das freeform® fixgel und freeform® plast der Firma DETAX. Auch wurde experimentell das Schienenmaterial selbst als Reparaturmaterial verwendet. Die Kontrollgruppe diente als Goldstandard und bestand aus einer individuell hergestellten Prüfkörperbasis aus Palapress® klar. Das Reparaturmaterial bestand ebenfalls aus Palapress® klar.

Die Herstellung der additiven Prüfkörperbasen erfolgte nach der digitalen Konstruktion (das sogenannte CAD) mit dem 3D-Drucker von Rapid Shape, D30 II (Rapid Shape GmbH; Generative Produktion Systems, Heimsheim, Deutschland). Die Basen wurden mit dem DLP Verfahren mit einer 50 µm Schichtdicke gedruckt. Ziel der Studie war es, den Einfluss verschiedener Oberflächenkonditionierungen und der künstlichen Alterung auf den Haftverbund zu untersuchen. Die Prüfkörper wurden dabei entweder bei 23° C für 24 Std. trocken oder für 14 Tg. in H<sub>2</sub>O dest. (bei 37° C) gealtert. Nach der Alterung wurden die Prüfkörperbasen unterschiedlich vorbehandelt. Die Oberfläche wurde entweder mit Aluminiumoxid Edelkorund (125 µm) gestrahlt, mit Monomer oder einem MMA-haltigen Haftvermittler (in den entsprechenden Prüfgruppen) benetzt. Auch wurde die Kombination aus Strahlen und Verwendung eines Haftvermittlers untersucht. Zum besseren Vergleich wurde die Oberfläche auch unbehandelt belassen. Rauheit und Welligkeit der Prüfkörperbasen nach der unterschiedlichen Konditionierung und Alterung wurden mit einem Perthometer S6P (Mahr GmbH, Göttingen, Deutschland) vermessen. Zusätzlich wurden REM-Aufnahmen erstellt. Die Testung der

## Zusammenfassung

---

Verbundfestigkeit erfolgte mit einer Universalprüfmaschine Zwick Z010/ TN2A (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland). Die statistische Auswertung erfolgte bei normal verteilten Gruppen mit dem Student's t- Test, bei nicht normal verteilten Gruppen mit der Wilcoxon- Methode. Die statistische Signifikanz wurde mit den 95%- Konfidenzintervallen geprüft, ergänzend dazu wurden die p- Werte herangezogen.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Reparatur des additiven Schienenmaterials mit dem Autopolymerisat aus PMMA, vergleichbar gute Verbundfestigkeitswerte wie bei der Kontrollgruppe erreichte. Bei fast allen Konditionierungsformen des Reparaturmaterials PMMA wurden nur kohäsive Brüche festgestellt, außer bei der Wasserlagerung. Hier führte die Konditionierung mit Monomer zu adhäsiven- und gemischten Bruchtypen. Die Verwendung von Lichtpolymerisaten führte im Vergleich zu PMMA zu statistisch signifikant geringeren Verbundfestigkeitswerten. Dabei zeigte das freeform® fixgel in der Tendenz bessere Verbundfestigkeitswerte. Die Anwendung des Haftvermittlers primostick® zeigte innerhalb der Lichtpolymerisate nur bei primosplint® in Kombination mit Strahlen einen statistisch signifikanten Effekt gegenüber der unbehandelten Oberfläche. Beim freeform® fixgel war das Strahlen signifikant besser bei beiden Alterungsformen gegenüber der unbehandelten Oberfläche. Beim Reparaturmaterial freeform® plast, erwies sich das Strahlen und Anwenden des Haftvermittlers freeform® bond, bei der Wasserlagerung gegenüber der unbehandelten Oberfläche statistisch signifikant besser. Bei der trocken gealterten Gruppe zeigte die gestrahlte Gruppe signifikant höhere Verbundfestigkeitswerte gegenüber der unbehandelten Oberfläche.

Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass die Verwendung von einem Autopolymerisat als Reparaturmaterial eher zu empfehlen ist, wenn auch hier die erreichten Ergebnisse den klinischen Anforderungen nicht entsprechen. Bei der Verwendung von Lichtpolymerisaten sollte die Oberfläche gestrahlt werden, bei einer Wasserlagerung zusätzlich der jeweilige Haftvermittler verwendet werden.

Bei den vorliegenden Ergebnissen sind die Limitationen dieser Studie zu berücksichtigen.

### 6 Literaturverzeichnis

1. Christidis N, Doepel M, Ekberg E, Ernberg M, Le Bell Y and Nilner M. Effectiveness of a prefabricated occlusal appliance in patients with temporomandibular joint pain: a randomized controlled multicenter study. *J Oral Facial Pain Headache*. 2014;28(2):128-137.
2. LeResche L. Epidemiology of temporomandibular disorders: implications for the investigation of etiologic factors. *Crit Rev Oral Biol Med*. 1997;8(3):291-305.
3. Egermark-Eriksson I. Mandibular dysfunction in children and in individuals with dual bite. *Swed Dent J Suppl*. 1982;10:1-45.
4. Romani V, Di Giorgio R, Castellano M, Barbato E and Galluccio G. Prevalence of craniomandibular disorders in orthodontic pediatric population and possible interactions with anxiety and stress. *Eur J Paediatr Dent*. 2018;19(4):317-323.
5. Egermark-Eriksson I, Carlsson GE, Magnusson T and Thilander B. A longitudinal study on malocclusion in relation to signs and symptoms of craniomandibular disorders in children and adolescents. *Eur J Orthod*. 1990;12(4):399-407.
6. Bourzgui F, Aghoutan H and Diouny S. Craniomandibular disorders and mandibular reference position in orthodontic treatment. *Int J Dent*. 2013;2013(890942):1-6.
7. Koos B, Bechtold TE, Schott T, Axmann D and Godt A. Kraniomandibuläre Dysfunktion- Querschnittsuntersuchung der Prävalenz und deren Befunde im Einzugsbereich Tübingen. *Quintessenz* 2010;61(11):1401-1410.
8. Gonzalez YM, Schiffman E, Gordon SM, Seago B, Truelove EL, Slade G, et al. Development of a brief and effective temporomandibular disorder pain screening questionnaire: reliability and validity. *J Am Dent Assoc*. 2011;142(10):1183-1191.
9. Schiffman EL, Ohrbach R, Truelove EL, Tai F, Anderson GC, Pan W, et al. The Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders. V: methods used to establish and validate revised Axis I diagnostic algorithms. *J Orofac Pain*. 2010;24(1):63-78.
10. Anderson GC, Gonzalez YM, Ohrbach R, Truelove EL, Sommers E, Look JO, et al. The Research Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders. VI: future directions. *J Orofac Pain*. 2010;24(1):79-88.
11. Hugger A, Lange M, Schindler HJ and Türp JC. Begriffsbestimmungen. Funktionsstörung, Dysfunktion, kraniomandibuläre Dysfunktion (CMD), Myoarthropathie des Kausystems (MAP). *Dtsch Zahnärztl Z*. 2016;71:165-166.
12. Nishigawa K, Bando E and Nakano M. Quantitative study of bite force during sleep associated bruxism. *J Oral Rehabil*. 2001;28(5):485-491.
13. Tokiwa O, Park BK, Takezawa Y, Takahashi Y, Sasaguri K and Sato S. Relationship of tooth grinding pattern during sleep bruxism and dental status. *Cranio*. 2008;26(4):287-293.

14. Lobbezoo F, Ahlberg J, Glaros AG, Kato T, Koyano K, Lavigne GJ, et al. Bruxism defined and graded: an international consensus. *J Oral Rehabil.* 2013;40(1):2-4.
15. Türp JC, Komine F and Hugger A. Efficacy of stabilization splints for the management of patients with masticatory muscle pain: a qualitative systematic review. *Clin Oral Investig.* 2004;8(4):179-195.
16. Klasser GD and Greene CS. Oral appliances in the management of temporomandibular disorders. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009;107(2):212-223.
17. Bumann A and Lotzmann U. Therapieprinzipien: Okklusionsschienen. In: Rateitschak KH, Wolf HF, editors. *Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien.* 12 ed. Stuttgart: Thieme Verlag; 2000. p. 306-307.
18. Gray RJ and Davies SJ. Occlusal splints and temporomandibular disorders: why, when, how? *Dent Update.* 2001;28(4):194-199.
19. Lobbezoo F, van der Zaag J, van Selms MK, Hamburger HL and Naeije M. Principles for the management of bruxism. *J Oral Rehabil.* 2008;35(7):509-523.
20. Ramfjord SP and Ash MM. Reflections on the Michigan occlusal splint. *Journal of Oral Rehabilitation.* 1994;21(5):491-500.
21. Meyer G, Schüle H and Bernhardt O. Zahnärztliche Schienentherapie. *Zahnmed up2date.* 2016;10:273-287.
22. Baldissara S, Mascellani SC, Catapano S and Baldissara P. Short-term effects of the Michigan splint on muscular and joint pain. *Minerva Stomatol.* 1998;47(5):235-238.
23. Bumann A and Lotzmann U. Therapieprinzipien: Okklusionsschienen: Repositionsschiene. In: Rateitschak KH, Wolf HF, editors. *Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien.* 12 ed. Stuttgart: Thieme Verlag; 2000. p. 313.
24. Davies SJ and Gray RJ. The pattern of splint usage in the management of two common temporomandibular disorders. Part I: The anterior repositioning splint in the treatment of disc displacement with reduction. *Br Dent J.* 1997;183(6):199-203.
25. Bumann A and Lotzmann U. Therapieprinzipien: Okklusionsschienen: Vertikalisierungsschiene. In: Rateitschak KH, Wolf HF, editors. *Funktionsdiagnostik und Therapieprinzipien.* 12 ed. Stuttgart: Thieme Verlag; 2000. p. 310.
26. Peyton FA. History of resins in dentistry. *Dent Clin North Am.* 1975;19(2):211-222.
27. Franz G. Werkstoffprüfungen, Festigkeit und Belastung. In: Schwenger N, editor. *Zahn- Mund- Kiefer- Heilkunde: Lehrbuch zur Aus- und Fortbildung in 5 Bänden Band 3 Prothetik und Werkstoffkunde* 2. Stuttgart: Thieme Verlag 1982. p. 1-137.
28. Rueggeberg FA. From vulcanite to vinyl, a history of resins in restorative dentistry. *J Prosthet Dent.* 2002;87(4):364-379.
29. Frazer RQ, Byron RT, Osborne PB and West KP. PMMA: an essential material in medicine and dentistry. *J Long Term Eff Med Implants.* 2005;15(6):629-639.
30. DIN EN ISO 20795-2:2013-06

Zahnheilkunde - Kunststoffe - Teil 2: Kieferorthopädische Kunststoffe [Internetseite]. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2013 [letzter Zugriff am: 08. 01. 2021. Abgerufen unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-20795-2/181046932>].

31. Green JI. Prevention and Management of Tooth Wear: The Role of Dental Technology. *Prim Dent J.* 2016;5(3):30-33.
32. Cervino G, Fiorillo L, Herford AS, Laino L, Troiano G, Amoroso G, et al. Alginate Materials and Dental Impression Technique: A Current State of the Art and Application to Dental Practice. *Mar Drugs.* 2018;17(1):1-15.
33. Becker CM, Kaiser DA and Lemm RB. A simplified technique for fabrication fo night guards. *J Prosthet Dent.* 1974;32(5):582-589.
34. Kass CA and Tregaskes JN. Occlusal splint fabrication. *J Prosthet Dent.* 1978;40(4):461-463.
35. Gonçalves TS, de Menezes LM and Silva LE. Residual monomer of autopolymerized acrylic resin according to different manipulation and polishing methods. An in situ evaluation. *Angle Orthod.* 2008;78(4):722-727.
36. Iça RB, Öztürk F, Ates B, Malkoc MA and Kelestemur Ü. Level of residual monomer released from orthodontic acrylic materials. *Angle Orthod.* 2014;84(5):862-867.
37. Choi M, Holden J and Tung F. An alternative technique for fabrication of an occlusal device. *J Prosthodont.* 2008;17(5):423-426.
38. Hartman GE and Swepston JH. Mandibular stabilization prosthesis. *J Prosthet Dent.* 1982;48(2):215-219.
39. Bohnenkamp DM. Dimensional stability of occlusal splints. *J Prosthet Dent.* 1996;75(3):262-268.
40. Baker PS, Haywood VB and Plummer KD. Method for immediate fabrication of an occlusal device. *J Prosthet Dent.* 2007;98(5):411-415.
41. Haddix JE. A simplified technique for occlusal splint fabrication. *J Prosthet Dent.* 1987;57(2):249-251.
42. Scuba JR and McLaughlin JP. Simplified splint construction with light-cured resin. *J Oral Maxillofac Surg.* 1990;48(12):1341-1343.
43. Kim SR, Lee WS, Kim WC, Kim HY and Kim JH. Digitization of dental alginate impression: Three-dimensional evaluation of point cloud. *Dent Mater J.* 2015;34(6):835-840.
44. Richert R, Goujat A, Venet L, Viguie G, Viennot S, Robinson P, et al. Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression. *J Healthc Eng.* 2017;2017:1-9.
45. Suese K. Progress in digital dentistry: The practical use of intraoral scanners. *Dent Mater J.* 2020;39(1):52-56.
46. Ender A and Mehl A. Full arch scans: conventional versus digital impressions-an in-vitro study. *Int J Comput Dent.* 2011;14(1):11-21.
47. Malik J, Rodriguez J, Weisbloom M and Petridis H. Comparison of Accuracy Between a Conventional and Two Digital Intraoral Impression Techniques. *Int J Prosthodont.* 2018;31(2):107-113.
48. Muller P, Ender A, Joda T and Katsoulis J. Impact of digital intraoral scan strategies on the impression accuracy using the TRIOS Pod scanner. *Quintessence Int.* 2016;47(4):343-349.

49. van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012;28(1):3-12.
50. Güth JF, Keul C, Stimmelmayer M, Beuer F and Edelhoff D. Accuracy of digital models obtained by direct and indirect data capturing. *Clin Oral Investig.* 2013;17(4):1201-1208.
51. Dedem P and Türp JC. Digital Michigan splint - from intraoral scanning to plasterless manufacturing. *Int J Comput Dent.* 2016;19(1):63-76.
52. Neal D, Kravitz, Groth C and Shannon T. CAD/CAM Software for Three-Dimensional Printing. *J Clin Orthod.* 2018;52(1):22-27.
53. Wang SM, Li Z, Wang GB, Ye HQ, Liu YS, Tong D, et al. Preliminary clinical application of complete digital workflow of design and manufacturing occlusal splint for sleep bruxism. *Beijing da xue xue bao Yi xue ban= Journal of Peking University Health Sciences.* 2019;51(1):105-110.
54. AlHelal A, Goodacre BJ, Kattadiyil MT and Swamidass R. Errors associated with digital preview of computer-engineered complete dentures and guidelines for reducing them: A technique article. *J Prosthet Dent.* 2018;119(1):17-25.
55. Mahmood DJH, Braian M, Larsson C and Wennerberg A. Production tolerance of conventional and digital workflow in the manufacturing of glass ceramic crowns. *Dent Mater.* 2019;35(3):486-494.
56. Oh KC, Park JM, Shim JS, Kim JH, Kim JE and Kim JH. Assessment of metal sleeve-free 3D-printed implant surgical guides. *Dent Mater.* 2019;35(3):468-476.
57. Macchi A, Carrafiello G, Cacciafesta V and Norcini A. Three-dimensional digital modeling and setup. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;129(5):605-610.
58. Xepapadeas AB, Weise C, Frank K, Spintzyk S, Poets CF, Wiechers C, et al. Technical note on introducing a digital workflow for newborns with craniofacial anomalies based on intraoral scans - part II: 3D printed Tübingen palatal plate prototype for newborns with Robin sequence. *BMC Oral Health.* 2020;20(1):1-7.
59. Unkovskiy A, Spintzyk S, Axmann D, Engel EM, Weber H and Huettig F. Additive Manufacturing: A Comparative Analysis of Dimensional Accuracy and Skin Texture Reproduction of Auricular Prostheses Replicas. *J Prosthodont.* 2019;28(2):460-468.
60. Lauren M and McIntyre F. A new computer-assisted method for design and fabrication of occlusal splints. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2008;133(4):130-135.
61. Edelhoff D, Schweiger J, Prandtner O, Trimpl J, Stimmelmayer M and Güth JF. CAD/CAM splints for the functional and esthetic evaluation of newly defined occlusal dimensions. *Quintessence Int.* 2017;48(3):181-191.
62. Beuer F, Schweiger J and Edelhoff D. Digital dentistry: an overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J.* 2008;204(9):505-511.
63. Li Y, Jia G, Cheng Y and Hu Y. Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study. *Int J Prod Res.* 2016;55(5):1498-1515.

64. Unkovskiy A, Spintzyk S, Brom J, Huettig F and Keutel C. Direct 3D printing of silicone facial prostheses: A preliminary experience in digital workflow. *J Prosthet Dent.* 2018;120(2):303-308.
65. Strub JR, Rekow ED and Witkowski S. Computer-aided design and fabrication of dental restorations: current systems and future possibilities. *J Am Dent Assoc.* 2006;137(9):1289-1296.
66. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V and Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015;219(11):521-529.
67. Liaw CY and Guvendiren M. Current and emerging applications of 3D printing in medicine [Internetseite]. IOP Publishing; 2017 [letzter Zugriff am: 07.06.2020; cited 2020 07.06.2020]. 2017/06/08:[024102]. Abgerufen unter: <http://dx.doi.org/10.1088/1758-5090/aa7279>.
68. Oberoi G, Nitsch S, Edelmayer M, Janjić K, Müller AS and Agis H. 3D Printing—Encompassing the Facets of Dentistry. *Front Bioeng Biotechnol.* 2018;6(172).
69. Keating AP, Knox J, Bibb R and Zhurov AI. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *J Orthod.* 2008;35(3):191-201; discussion 175.
70. Groth C, Kravitz ND, Jones PE, Graham JW and Remond WR. OVERVIEW Three-Dimensional Printing Technology [Internetseite]. JCO Inc.; 2014 [letzter Zugriff am: 07.02.2021. Abgerufen unter: <https://www.jco-online.com/archive/2014/08/475/>].
71. Wong KV and Hernandez A. A review of additive manufacturing. *Int Sch Res Notices.* 2012;2012:1-10.
72. Gojzewski H, Guo Z, Grzelachowska W, Ridwan MG, Hempenius MA, Grijpma DW, et al. Layer-by-Layer Printing of Photopolymers in 3D: How Weak is the Interface? *ACS Appl Mater Interfaces.* 2020;12(7):8908-8914.
73. Revilla-León M and Özcan M. Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *J Prosthodont.* 2019;28(2):146-158.
74. Arcaute K, Mann B and Wicker R. Stereolithography of spatially controlled multi-material bioactive poly(ethylene glycol) scaffolds. *Acta Biomater.* 2010;6(3):1047-1054.
75. Melchels FP, Feijen J and Grijpma DW. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials.* 2010;31(24):6121-6130.
76. Zhang ZC, Li PL, Chu FT and Shen G. Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *J Orofac Orthop.* 2019;80(4):194-204.
77. Lu Y, Mapili G, Suhali G, Chen S and Roy K. A digital micro-mirror device-based system for the microfabrication of complex, spatially patterned tissue engineering scaffolds. *J Biomed Mater Res A.* 2006;77(2):396-405.
78. Kadry H, Wadnap S, Xu C and Ahsan F. Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. *Eur J Pharm Sci.* 2019;135:60-67.
79. Wu D, Zhao Z, Zhang Q, Qi HJ and Fang D. Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing. *Soft Matter.* 2019;15(30):6151-6159.

80. Stansbury JW and Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent Mater.* 2016;32(1):54-64.
81. Reymus M and Stawarczyk B. In vitro study on the influence of postpolymerization and aging on the Martens parameters of 3D-printed occlusal devices. *J Prosthet Dent.* 2021;125(5):817-823.
82. Calzado M, Romero L, Domínguez M and Espinosa MM. Rapid prototyping model for the manufacturing by thermoforming of occlusal splints. *Rapid Prototyp J.* 2015;21(1):56-69.
83. Goyanes A, Buanz AB, Basit AW and Gaisford S. Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets. *Int J Pharm.* 2014;476(1-2):88-92.
84. Goyanes A, Chang H, Sedough D, Hatton GB, Wang J, Buanz A, et al. Fabrication of controlled-release budesonide tablets via desktop (FDM) 3D printing. *Int J Pharm.* 2015;496(2):414-420.
85. Clark EA, Alexander MR, Irvine DJ, Roberts CJ, Wallace MJ, Sharpe S, et al. 3D printing of tablets using inkjet with UV photoinitiation. *Int J Pharm.* 2017;529(1-2):523-530.
86. Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ and Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering.* 2018;143:172-196.
87. Prechtel A, Reymus M, Edelhoff D, Hickel R and Stawarczyk B. Comparison of various 3D printed and milled PAEK materials: Effect of printing direction and artificial aging on Martens parameters. *Dent Mater.* 2020;36(2):197-209.
88. Rodríguez-Hernández AG, Chiodoni A, Bocchini S and Vazquez-Duhalt R. 3D printer waste, a new source of nanoplastic pollutants. *Environ Pollut.* 2020;267:115609.
89. Bours J, Adzima B, Gladwin S, Cabral J and Mau S. Addressing Hazardous Implications of Additive Manufacturing: Complementing Life Cycle Assessment with a Framework for Evaluating Direct Human Health and Environmental Impacts. *J Ind Ecol.* 2017;21(1):25-36.
90. Gardner GD, Dunn WJ and Taloumis L. Wear comparison of thermoplastic materials used for orthodontic retainers. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2003;124(3):294-297.
91. Huettig F, Kustermann A, Kuscu E, Geis-Gerstorfer J and Spintzyk S. Polishability and wear resistance of splint material for oral appliances produced with conventional, subtractive, and additive manufacturing. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2017;75:175-179.
92. Gu H, Ma C, Gu J, Guo J, Yan X, Huang J, et al. An overview of multifunctional epoxy nanocomposites. *J Mater Chem C Mater.* 2016;4(25):5890-5906.
93. Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J and Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering.* 2017;110(1):442-458.
94. Tahayeri A, Morgan M, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, et al. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dent Mater.* 2018;34(2):192-200.
95. Sulaiman TA. Materials in digital dentistry-A review. *J Esthet Restor Dent.* 2020;32(2):171-181.

96. Reymus M, Fabritius R, Keßler A, Hickel R, Edelhoff D and Stawarczyk B. Fracture load of 3D-printed fixed dental prostheses compared with milled and conventionally fabricated ones: the impact of resin material, build direction, post-curing, and artificial aging-an in vitro study. *Clin Oral Investig*. 2020;24(2):701-710.
97. Yap AU and Chua AP. Sleep bruxism: Current knowledge and contemporary management. *J Conserv Dent*. 2016;19(5):383-389.
98. Ré JP, Chossegros C, El Zoghby A, Carlier JF and Orthlieb JD. [Occlusal splint: state of the art]. *Rev Stomatol Chir Maxillofac*. 2009;110(3):145-149.
99. Gibbs CH, Mahan PE, Lundeen HC, Brehnan K, Walsh EK and Holbrook WB. Occlusal forces during chewing and swallowing as measured by sound transmission. *J Prosthet Dent*. 1981;46(4):443-449.
100. Kerr WJ. Appliance breakages. *Br J Orthod*. 1984;11(3):137-142.
101. Casey J, Dunn WJ and Wright E. In vitro wear of various orthotic device materials. *J Prosthet Dent*. 2003;90(5):498-502.
102. DIN EN ISO 20795-1:2013-06  
Zahnheilkunde - Kunststoffe - Teil 1: Prothesenkunststoffe [Internetseite]. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2013 [letzter Zugriff am: 08.01.2021. Abgerufen unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-20795-1/181046915>].
103. DIN ISO 10477 (2018-10) Zahnheilkunde - Polymerbasierte Kronen- und Verblendwerkstoffe [Internetseite]. Berlin: Beuth Verlag GmbH; 2018 [letzter Zugriff am: 08.01.2021. Abgerufen unter: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-10477/332051618>].
104. Perea-Lowery L and Vallittu PK. Resin adjustment of three-dimensional printed thermoset occlusal splints: Bonding properties - Short communication. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2019;95:215-219.
105. Kappert HF, Schreck U, H. P, Barucha A, Erpelding E and Banholzer M. Prüfung von Metall- Kunststoff- Verbundsystemen durch Scher-, Biege- und axialen Zugversuch. *Dtsch Zahnärztl Z*. 1989;44:879-881.
106. Parfitt GJ. The Dynamics of a Tooth in Function. *J Periodontol*. 1961;32(2):102-107.
107. Seaton P. Mechanics of tensile and shear stress generation in fixed partial denture retainers. *J Prosthet Dent*. 1994;71(3):237-244.
108. Peck CC. Biomechanics of occlusion--implications for oral rehabilitation. *J Oral Rehabil*. 2016;43(3):205-214.
109. Mariatos G, Frangou M, Polyzois G and Papadopoulos T. Evaluation of shear bond strength of microwaveable acrylic resins in denture repair: a comparative study. *Acta Odontol Scand*. 2006;64(4):244-248.
110. Unkovskiy A, Bui PH, Schille C, Geis-Gerstorfer J, Huettig F and Spintzyk S. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. *Dent Mater*. 2018;34(12):e324-e333.
111. Albahri R, Yoon H-I, Lee JD, Yoon S and Lee SJ. Shear bond strength of provisional repair materials bonded to 3D printed resin. *J Dent Sci*. 2020.
112. Lim NK and Shin SY. Bonding of conventional provisional resin to 3D printed resin: the role of surface treatments and type of repair resins. *J Adv Prosthodont*. 2020;12(5):322-328.

113. Revilla-León M, Morillo JA, Att W and Özcan M. Chemical Composition, Knoop Hardness, Surface Roughness, and Adhesion Aspects of Additively Manufactured Dental Interim Materials. *J Prosthodont.* 2020;doi:10.1111/jopr.13302. Epub ahead of print.
114. Li P, Krämer-Fernandez P, Klink A, Xu Y and Spintzyk S. Repairability of a 3D printed denture base polymer: Effects of surface treatment and artificial aging on the shear bond strength. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2021;114:104-227.
115. Sarac YS, Sarac D, Kulunk T and Kulunk S. The effect of chemical surface treatments of different denture base resins on the shear bond strength of denture repair. *J Prosthet Dent.* 2005;94(3):259-266.
116. Qaw MS, Abushowmi TH, Almaskin DF, AlZaher ZA, Gad MM, Al-Harbi FA, et al. A Novel Approach to Improve Repair Bond Strength of Repaired Acrylic Resin: An in Vitro Study on the Shear Bond Strength. *J Prosthodont.* 2020;29(4):323-333.
117. Antonopoulou A, Papadopoulos T and Hatzikyriakos A. In vitro evaluation of shear bond strength and mode of failure of the interface between an indirect composite bonded to fiber-reinforced composite substructures. *J Prosthodont.* 2012;21(6):451-459.
118. Jähnig A and Henkel S. Glass ionomer cements as orthodontic bracket adhesives. An in vitro study with 4 glass ionomer cements (GIC) and 2 conventional orthodontic bracket adhesives as the comparative group. *Fortschr Kieferorthop.* 1990;51(4):204-207.
119. Gittner R, Müller-Hartwich R, Engel S and Jost-Brinkmann PG. Shear bond strength and enamel fracture behavior of ceramic brackets Fascination® and Fascination®2. *J Orofac Orthop.* 2012;73(1):49-57.
120. Prpic V, Slacanin I, Schauerl Z, Catic A, Dulcic N and Cimic S. A study of the flexural strength and surface hardness of different materials and technologies for occlusal device fabrication. *J Prosthet Dent.* 2019;121(6):955-959.
121. Klaiber D. Polymethylmethacrylat aus dem Pulver-Flüssigkeits-Verfahren als Bondinginterface in der digitalen Prothesenherstellung: Haftverbund zu industriellen Prothesenzähnen und industriellem Polymethylmethacrylat für CAD/CAM-gefertigte Prothesenbasen [Dissertation]. Tübingen: Eberhard Karls Universität Tübingen; 2019.
122. Rossiwall B, Newesely R and Barrels R. Verarbeitung und Bewertung von KFO- Autopolymerisaten. *Fortschr Kieferorthop.* 1984;45(5):403-413.
123. Detax. EG-Sicherheitsdatenblatt, FREEPRINT splint 2.0 UV. wurde auf Anfrage von der Firma zur Verfügung gestellt am 18.10.2019.
124. Leckel M, Ilani A and Grimm T. Adjustierte Aufbiss-Schienen im 3D Druckverfahren [Internetseite]. 2017 [letzter Zugriff am: 30.09.2020. Abgerufen unter: <https://www.detax.de/de-wAssets/docs/de/Erfahrungsberichte-3D/DETAX-freeprint-Heidelberg-1611.pdf>].
125. Park ME and Shin SY. Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *J Prosthet Dent.* 2018;119(5):e1-e7.

126. Kim SY, Shin YS, Jung HD, Hwang CJ, Baik HS and Cha JY. Precision and trueness of dental models manufactured with different 3-dimensional printing techniques. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2018;153(1):144-153.
127. Favero CS, English JD, Cozad BE, Wirthlin JO, Short MM and Kasper FK. Effect of print layer height and printer type on the accuracy of 3-dimensional printed orthodontic models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2017;152(4):557-565.
128. Reymus M, Lümekemann N and Stawarczyk B. 3D-printed material for temporary restorations: impact of print layer thickness and post-curing method on degree of conversion. *Int J Comput Dent.* 2019;22(3):231-237.
129. Shahdad SA, McCabe JF, Bull S, Rusby S and Wassell RW. Hardness measured with traditional Vickers and Martens hardness methods. *Dent Mater.* 2007;23(9):1079-1085.
130. Schulte JK, Anderson GC, Sakaguchi RL and DeLong R. Wear resistance of isosit and polymethyl methacrylate occlusal splint material. *Dent Mater.* 1987;3(2):82-84.
131. Liebermann A, Wimmer T, Schmidlin PR, Scherer H, Löffler P, Roos M, et al. Physicomechanical characterization of polyetheretherketone and current esthetic dental CAD/CAM polymers after aging in different storage media. *J Prosthet Dent.* 2016;115(3):321-328.
132. Issacson KG, Muir JD and RT R. Removable Orthodontic Appliances. In: Heinemann B, editor. *Removable Orthodontic Appliances.* London: Elsevier Health Sciences; 2002. p. 114-115.
133. Akin H, Kirmali O, Tugut F and Coskun ME. Effects of different surface treatments on the bond strength of acrylic denture teeth to polymethylmethacrylate denture base material. *Photomed Laser Surg.* 2014;32(9):512-516.
134. primotec. primosplint Arbeitsanleitung Lichthärtendes, MMA- und peroxidfreies Composite in Strangform [Internetseite]. [letzter Zugriff am: abgerufen am 30.07.2021. Abgerufen unter: [https://www.primogroup.de/sites/default/files/42\\_primotec\\_primosplint\\_manual\\_deutsch prt16-ps301-de\\_web.pdf](https://www.primogroup.de/sites/default/files/42_primotec_primosplint_manual_deutsch prt16-ps301-de_web.pdf).
135. DENTAURUM. Orthocryl LC Tipps zur Verwendung [Internetseite]. [letzter Zugriff am: 08.01.2021. Abgerufen unter: <https://www.dentaurum.de/files/989-300-61.pdf>.
136. Curtis DA, Eggleston TL, Marshall SJ and Watanabe LG. Shear bond strength of visible-light-cured resin relative to heat-cured resin. *Dent Mater.* 1989;5(5):314-318.
137. Detax. Gebrauchsanweisung Freeform. wurde auf Anfrage von der Firma zur Verfügung gestellt am 23.08.2018
138. Gregory WA, Pounder B and Bakus E. Bond strengths of chemically dissimilar repaired composite resins. *J Prosthet Dent.* 1990;64(6):664-668.
139. Lin CT, Lee SY, Tsai TY, Dong DR and Shih YH. Degradation of repaired denture base materials in simulated oral fluid. *J Oral Rehabil.* 2000;27(3):190-198.
140. Chen HL, Lai YL, Chou IC, Hu CJ and Lee SY. Shear bond strength of provisional restoration materials repaired with light-cured resins. *Oper Dent.* 2008;33(5):508-515.

141. Schmitz KH and Schulmeyer H. Bestimmung der Haftfestigkeit dentaler metallkeramischer Verbundsysteme. *Dental Labor*. 1975;23:1416-1420.
142. Dündar M, Ozcan M, Gökçe B, Cömlekoğlu E, Leite F and Valandro LF. Comparison of two bond strength testing methodologies for bilayered all-ceramics. *Dent Mater*. 2007;23(5):630-636.
143. Younis M, Unkovskiy A, ElAyouti A, Geis-Gerstorfer J and Spintzyk S. The Effect of Various Plasma Gases on the Shear Bond Strength between Unfilled Polyetheretherketone (PEEK) and Veneering Composite Following Artificial Aging. *Materials (Basel)*. 2019;12(9):1-9.
144. Takahashi Y, Chai J and Kawaguchi M. Effect of water sorption on the resistance to plastic deformation of a denture base material relined with four different denture reline materials. *Int J Prosthodont*. 1998;11(1):49-54.
145. Azevedo A, Machado AL, Giampaolo ET, Pavarina AC and Vergani CE. The effect of water immersion on the shear bond strength between chairside reline and denture base acrylic resins. *J Prosthodont*. 2007;16(4):255-262.
146. Morita K, Tsuka H, Kato K and Tsuga K. Effect of polymerization temperature on the properties of autopolymerizing resin. *J Prosthet Dent*. 2018;119(5):840-844.
147. Lagouvardos PE and Polyzois GL. Shear bond strength between composite resin and denture teeth: effect of tooth type and surface treatments. *Int J Prosthodont*. 2003;16(5):499-504.
148. Lin R, Yu CH and Sun J. Mechanical properties and cytotoxicity of three-dimensional printing polycarbonate for occlusal splints. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue*. 2019;28(5):467-471.
149. Danesh G, Lippold C, Mischke KL, Varzideh B, Reinhardt KJ, Dammaschke T, et al. Polymerization characteristics of light- and auto-curing resins for individual splints. *Dent Mater*. 2006;22(5):426-433.
150. Watts DC. Reaction kinetics and mechanics in photo-polymerised networks. *Dent Mater*. 2005;21(1):27-35.
151. Danesh G, Lippold C, Ziebura T, Reinhardt KJ, Schäfer E and Ehmer U. In-vitro investigation on suitability of light-cured resins for interocclusal splints : part II: surface hardness. *J Orofac Orthop*. 2006;67(2):138-147.
152. Mahadevan V, Krishnan M, Krishnan CS, Azhagarasan NS, Sampathkumar J and Ramasubramanian H. Influence of Surface Modifications of Acrylic Resin Teeth on Shear Bond Strength with Denture Base Resin-An In vitro Study. *J Clin Diagn Res*. 2015;9(9):Zc16-Zc21.
153. Razavi R, Khan Z and von Fraunhofer JA. The bond strength of a visible light-cured reline resin to acrylic resin denture base material. *J Prosthet Dent*. 1990;63(4):485-487.
154. Jeong K-W and Kim S-H. Influence of surface treatments and repair materials on the shear bond strength of CAD/CAM provisional restorations. *J Adv Prosthodont*. 2019;11(2):95-104.
155. Rodrigues SA, Jr., Ferracane JL and Della Bona A. Influence of surface treatments on the bond strength of repaired resin composite restorative materials. *Dent Mater*. 2009;25(4):442-451.
156. Vallittu PK, Lassila VP and Lappalainen R. Wetting the repair surface with methyl methacrylate affects the transverse strength of repaired heat-polymerized resin. *J Prosthet Dent*. 1994;72(6):639-643.

## Literaturverzeichnis

---

157. Alkurt M, Yeşil Duymuş Z and Gundogdu M. Effect of repair resin type and surface treatment on the repair strength of heat-polymerized denture base resin. *J Prosthet Dent.* 2014;111(1):71-78.
158. Gonçalves T, Teixeira KN, de Oliveira JMD, Gama LT, Bortolini S and Philippi AG. Surface treatments to improve the repair of acrylic and bis-acryl provisional materials. *Am J Dent.* 2018;31(4):199-204.
159. Minami H, Suzuki S, Minesaki Y, Kurashige H and Tanaka T. In vitro evaluation of the influence of repairing condition of denture base resin on the bonding of autopolymerizing resins. *J Prosthet Dent.* 2004;91(2):164-170.

### 7 Erklärung zum Eigenanteil

Die vorliegende Arbeit wurde in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, unter der Leitung von Priv.-Doz. Dr. Eva Engel angefertigt. Die Durchführung der Versuche erfolgte dabei teilweise in der Sektion für Medizinische Werkstoffkunde und Technologie der Universitätsklinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie des Universitätsklinikums Tübingen, unter der ehemaligen Leitung Herrn Univ. Prof. Emeritus Dr. rer. nat. Dipl. Ing. Jürgen Geis-Gerstorfer, sowie unter der nachfolgenden Leitung durch Prof. Dr. rer. nat. Frank Rupp.

Die Konzeption der Studie mit der Ausarbeitung eines Prüfplanes erfolgte durch mich. Dabei wurde ich von Herrn MSc. Sebastian Spintzyk. und Frau Dr. Andrea Klink beraten.

Die Herstellung der Prüfkörper, sowie die Durchführung der Versuchsreihen erfolgte durch mich. Bei der digitalen Konstruktion wurde ich durch Herrn Eugen Wahl und Pablo- Krämer Fernandez beraten. Die Bedienung der (Ab-) Scher-Maschine erfolgte durch Frau Christine Schille. Die REM- Aufnahmen wurden durch Herrn Ernst Schweizer erstellt.

Die Datenerfassung und statistische Auswertung erfolgten durch mich. Bei der statistischen Auswertung wurde ich vor allem durch Priv.-Doz. Dr. Eva Engel und Priv.-Doz. Dr. Fabian Hüttig angeleitet und beraten.

Ich versichere, das vorliegende Manuskript selbstständig verfasst zu haben und keine weiteren als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Die Anfertigung der englischsprachigen Publikation erfolgte gemeinsam mit den Koautoren Priv.-Doz. Dr. Fabian Hüttig, Dr. Andrea Klink, Pablo Krämer-Fernandez und MSc. Sebastian Spintzyk.

Tübingen, den 03.08.2021

### 8 Veröffentlichung

Teile der vorliegenden Dissertationsschrift wurden bereits in der folgenden Publikation veröffentlicht:

Kuscu E, Klink A, Spintzyk S, Kraemer Fernandez, P, Huettig F - Bonding Interface and Repairability of 3D-Printed Intraoral Splints: Shear Bond Strength to Current Polymers, with and without Ageing, *Materials*, 2021, 14 (14): 3935.

Anhang

**Tabellen aus dem Material- und Methoden- Teil:**

Die erste Zeile in der Tabelle führt das Material auf. In den dunkelgrauen Feldern sind die Überschriften wie die Bezeichnung, Nummern/ Haltbarkeit, chemische Charakterisierungen. Die hellgrauen Felder führen die Bestandteile und die jeweiligen CAS- und EG- Nummern auf.

*Tabelle 1: Zusammensetzung Palapress Flüssigkeit.*

|                                     |                                      |                           |                |
|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                 | Palapress® Flüssigkeit               |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>              | n. a.                                |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>      | K010108; 16.05.2022                  |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b> | Gemische auf Basis von Methacrylaten |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                | <b>CAS-Nr.:</b>                      | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Methyl-methacrylat (MMA)            | 80-62-6                              | >90%                      | 201-297-1      |
| 1,4- Butandiolmethacrylat           | 2082-81-7                            | 0- 5%                     | 218-218-1      |
| Triocylmethylammoniumchlorid        | 5137-55-3                            | <1%                       | 225-896-2      |

*Tabelle 2: Zusammensetzung Palapress Pulver.*

|                                     |  |                           |                |
|-------------------------------------|--|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                 | Palapress® Pulver                                  |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>              | n. a.  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>      | K010048; 07.11.2021                                |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b> | Gemische auf Basis von Methacrylat-Copolymerisaten |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                | <b>CAS-Nr.:</b>                                    | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Methacrylat- Copolymerisate         | 25086-15-1   | 10- 25%                   | n. a.          |

## Anhang

*Tabelle 3: Zusammensetzung additives Schienenmaterial Freeprint splint 2.0 UV*

|  |   |                           |                |
|--|---|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>  | Freeprint ® splint 2.0 UV   |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>                                     | 1113  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>                             | 220405; 2021-04   |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b>                        | -Lichthärtendes<br>Einkomponentenmaterial zur<br>Herstellung von 3D gedruckten<br>Schienen und Schablonen<br>-Mischung auf (Meth) Acrylat Basis |                           |                |
| <b>Lichthärtung:</b>                                       | geeignet für DLP-Drucker mit UV-LED<br>385 nm   |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                                       | <b>CAS-Nr.:</b>   | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Isopropylidenediphenol Peg-2 Dimethacrylat                 | 41637-38-1  | 90-<br><95%               | n. a.          |
| 2-Propensäure, (5- ethyl- 1,3- dioxan- 5- yl)- methylester | 66492-51-1  | 1- <5%                    | n. a.          |
| Diphenyl (2, 4, 6- trimethylbenzoyl) phosphinoxid          | 75980-60-8  | 1- <5%                    | 015-203-00-X   |

## Anhang

*Tabelle 4: Zusammensetzung primosplint.*

|   |  |                           |                |
|---|--|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                                 | primosplint, primotec®                                   |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>                              | 1370110  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>                      | 193138; 2021-08  |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b>                 | Mischung aus Acrylharzen mit Füllstoffen und Initiatoren |                           |                |
| <b>Lichthärtung:</b>                                | -320 nm -400 nm<br>-UV- A- Leuchtmittel                  |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                                | <b>CAS-Nr.:</b>  | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Urethandimethacrylat (UDMA)                         | 72869-86-4   | 20- 50%                   | n. a.          |
| Tricyclodecan Dimethanol Diacrylat (TCDDMDA)        | 42594-17-2   | <20%                      | n. a.          |
| Diphenyl (2 ,4 ,6 - trimethylbenzoyl) -phosphinoxid | 75980-60-8   | <1%                       | 278-355-8      |

*Tabelle 5: Zusammensetzung freeform fixgel*

|   |  |                           |                |
|---|--|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                                 | freeform® fixgel                                       |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>                              | 10340  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>                      | 210801; 2020-08  |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b>                 | Gemisch aus Acryl-/ Methacrylatharzen mit Hilfsstoffen |                           |                |
| <b>Lichthärtung:</b>                                | -320 nm- 400 nm<br>-UV/ UV- A- Leuchtmittel            |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                                | <b>CAS-Nr.:</b>  | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Tetrahydrofurylmethacrylat                          | 2455-24-5  | 5- 25%                    | n. a.          |
| Diphenyl (2, 4, 6 - trimethylbenzoyl) -phosphinoxid | 75980-60-8   | <1%                       | 278-355-8      |

## Anhang

*Tabelle 6: Zusammensetzung freeform plast.*

|   |  |                           |                |
|---|--|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                                 | freeform® plast  |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>                              | 10257  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>                      | 210601; 2020-06  |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b>                 | Gemisch aus Acryl-/ Methacrylatharzen mit Hilfsstoffen |                           |                |
| <b>Lichthärtung:</b>                                | -320 nm- 400 nm<br>-UV/ UV- A- Leuchtmittel            |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                                | <b>CAS-Nr.:</b>  | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Tricyclodecandimethanol-diacrylat                   | 42594-17-2   | 10- <15%                  | 255-901-3      |
| Diphenyl (2, 4, 6 - trimethylbenzoyl) -phosphinoxid | 75980-60-8   | <1%                       | 278-355-8      |

*Tabelle 7: Zusammensetzung Haftvermittler primostick, primotec®*

|   |  |                           |                |
|---|--|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                                 | primostick®                                      |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>                              | 1370120  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>                      | 201202; 2023-03                                  |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b>                 | -Haftvermittler für primosplint<br>-lichthärtend |                           |                |
| <b>Lichthärtung:</b>                                | -n. a.   |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                                | <b>CAS-Nr.:</b>                                  | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Methyl-methacrylat;                                 | 80-62-6  | 20- 60%                   | 201-297-1      |
| Acryliertes Harz                                    | n. a.  | <25%                      | n. a.          |
| 2- Propensäure, Reaktionsprodukte mit Pentaerythrit | 1245638-61-2                                     | <20%                      | 629-850-6      |
| Diphenyl (2, 4, 6- trimethylbenzoyl) -phosphinoxid  | 75980-60-8                                       | <3%                       | 278-355-8      |

## Anhang

*Tabelle 8: Zusammensetzung Haftvermittler freeform bond.*

|   |  |                           |                |
|---|--|---------------------------|----------------|
| <b>Bezeichnung:</b>                               | freeform® bond   |                           |                |
| <b>Materialnummer:</b>                            | 10571.2  |                           |                |
| <b>Lotnummer; Haltbarkeit:</b>                    | 200710; 2019-07  |                           |                |
| <b>Chemische Charakterisierung:</b>               | -Haftvermittler für Reparaturmasse<br>-lichthärtend        |                           |                |
| <b>Lichthärtung:</b>                              | -Aushärtung bei 320 nm- 400 nm<br>-UV/ UV- A- Leuchtmittel |                           |                |
| <b>Bestandteile:</b>                              | <b>CAS-Nr.:</b>  | <b>Anteil in Prozent:</b> | <b>EG-Nr.:</b> |
| Methyl-methacrylat, (MMA);                        |  |                           |                |
| Methyl 2-methylprop-2-enoat;                      | 80-62-6  | 20- 70%                   | 201-297-1      |
| Propensäurederivate                               | n. a.  | 25- 50%                   | n. a.          |
| Aliphatisches Polyestertriurethantriacrylat       | n. a.  | 5- 20%                    |                |
| Vinylester Harz                                   | 55818-57-0   | 1- <5%                    | n. a.          |
| Diphenyl (2, 4, 6-trimethylbenzoyl) -phosphinoxid | 75980-60-8   | 0,1- 5%                   | 278-355-8      |

*Tabelle 9: Eigenschaften und Kennzeichnung 3D- Drucker Rapid Shape D 30 II.*

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>Bezeichnung:</b>      | Rapid Shape D 30 II  |
| <b>Hersteller Firma:</b> | Rapid Shape GmbH; Generative Produktion Systems (Heimsheim, Deutschland) |
| <b>Drucktechnologie:</b> | -Maskenbelichtung, das sogenannte „digital light processing“ (DLP)       |
| <b>Version:</b>          | 2018   |
| <b>Lichtquelle:</b>      | -385 nm UV LED   |
| <b>Seriennummer</b>      | -218R11449A  |

**Tabellen aus dem Ergebnisteil:**

In den ersten Zeilen stehen die Überschriften, sowie die Alterungsform. Die erste Spalte links gibt die Art der Oberflächenkonditionierung an. Werden die Tabellen für die p- Werte dargestellt, so stehen in den ersten Zeilen die durchgeführten Vergleiche auf. In der ersten Spalte links werden immer die Prüfgruppen, mit den höheren Verbundfestigkeitswerten aufgeführt. War der p- Wert statistisch signifikant, so steht hinter dem p- Wert ein Stern (\*). Bei statistisch hoch signifikanten Unterschieden werden drei Sterne aufgeführt (\*\*).

**konventionelle Prüfgruppe: [Kontrollgruppe Palapress]:**

*Tabelle 10: Übersicht konventionellen Kontrollgruppe mit Basis und Reparaturmaterial aus Palapress®. Alterung: [24Std. trocken]*

|                            | Verbundfestigkeit (MPa) |                       |         |                      |           |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|----------------------|-----------|
| Alterung                   | 24Std. trocken          |                       |         |                      |           |
| Oberflächenkonditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum               | Maximum | Mittelwert           | Std. Abw. |
| gestrahlt + monomer        | 20                      | 21,06                 | 31,83   | 25,18                | 2,59      |
|                            | <b>Median</b>           | <b>unterer KI 95%</b> |         | <b>oberer KI 95%</b> |           |
|                            | 24,93                   | 23,97                 |         | 26,40                |           |

*Tabelle 11: Übersicht der konventionellen Kontrollgruppe. Basis und Reparaturmaterial aus Palapress®. Alterung: [14Tg. Wasser]*

|                            | Verbundfestigkeit (MPa) |                       |         |                      |           |
|----------------------------|-------------------------|-----------------------|---------|----------------------|-----------|
| Alterung                   | 14Tg. Wasser            |                       |         |                      |           |
| Oberflächenkonditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum               | Maximum | Mittelwert           | Std. Abw. |
| gestrahlt + monomer        | 20                      | 19,30                 | 26,91   | 23,57                | 2,00      |
|                            | <b>Median</b>           | <b>unterer KI 95%</b> |         | <b>oberer KI 95%</b> |           |
|                            | 23,81                   | 22,63                 |         | 24,51                |           |

## Anhang

*Tabelle 12: p- Werte der konventionellen Kontrollgruppe. Vergleich der Alterungsformen.*

| Prüfgruppe     | konventionelle Kontrollgruppe   |          |
|----------------|---------------------------------|----------|
| Vergleich:     | 24Std. trocken vs. 14Tg. Wasser |          |
| Prüfgruppe     | Prüfgruppe                      | p- Wert: |
| 24Std. trocken | 14Tg. Wasser                    | 0,0336   |

### Reparaturmaterial: Palapress® auf additiver Basis

*Tabelle 13: Übersicht der additiven Gruppe Basis aus freeprint® splint 2.0 UV, Reparaturmaterial Palapress®. Alterung: [24Std. trocken].*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |                 |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|-----------------|--------------|
| Alterung                        | 24Std. trocken          |                |         |                 |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum        | Maximum | Mittel-<br>wert | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 16,14          | 30,46   | 21,41           | 4,06         |
| gestrahlt                       | 20                      | 13,92          | 24,73   | 17,56           | 3,02         |
| monomer                         | 20                      | 12,53          | 27,91   | 19,56           | 4,19         |
| gestrahlt + monomer             | 20                      | 19,64          | 28,20   | 22,70           | 2,47         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95%   |              |
| keine                           | 21,44                   | 19,51          |         | 23,31           |              |
| gestrahlt                       | 16,90                   | 16,14          |         | 18,97           |              |
| monomer                         | 18,72                   | 17,60          |         | 21,52           |              |
| gestrahlt + monomer             | 22,00                   | 21,54          |         | 23,85           |              |

## Anhang

*Tabelle 14: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Basis bei der Alterung [24Std. trocken].*

| Prüfgruppe          |                     | Reparaturmaterial Palapress auf additiver Basis |  |
|---------------------|---------------------|---|--|
| Vergleich:          |                     | Oberflächenkonditionierung bei 24Std. trocken   |  |
| Prüfgruppe          | Prüfgruppe          | p- Wert:  |  |
| keine               | gestrahlt           | 0,0009**  |  |
| gestrahlt + monomer | gestrahlt           | < 0,0001**                                      |  |
| gestrahlt + monomer | monomer             | 0,006**   |  |
| keine               | monomer             | 0,0994  |  |
| keine               | gestrahlt + monomer | 0,2502  |  |
| gestrahlt           | monomer             | 0,0749  |  |

*Tabelle 15: Übersicht der additiven Gruppe. Basis freeprint® splint 2.0 UV, Reparaturmaterial Palapress®. Alterung: [14Tg. Wasser].*

|                            | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |               |           |
|----------------------------|-------------------------|----------------|---------|---------------|-----------|
| Alterung                   | 14Tg. Wasser            |                |         |               |           |
| Oberflächenkonditionierung | Anzahl n                | Minimum        | Maximum | Mittelwert    | Std. Abw. |
| keine                      | 19                      | 8,91           | 32,62   | 22,97         | 5,42      |
| gestrahlt                  | 20                      | 8,95           | 34,97   | 16,08         | 6,91      |
| monomer                    | 18                      | 2,70           | 23,02   | 12,19         | 5,51      |
| gestrahlt + monomer        | 20                      | 12,45          | 29,42   | 19,18         | 4,72      |
| Oberflächenkonditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95% |           |
| keine                      | 23,40                   | 20,36          |         | 25,59         |           |
| gestrahlt                  | 13,86                   | 12,85          |         | 19,32         |           |
| monomer                    | 11,86                   | 9,45           |         | 14,93         |           |
| gestrahlt + monomer        | 18,10                   | 16,97          |         | 21,38         |           |

## Anhang

*Tabelle 16: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial Palapress® auf additiver Basis bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

| Prüfgruppe |                     | Reparaturmaterial Palapress auf additiver Basis |  |
|------------|---------------------|---|--|
| Vergleich: |                     | Oberflächenkonditionierung bei 14Tg. Wasser     |  |
| Prüfgruppe | Prüfgruppe          | p- Wert:  |  |
| keine      | gestrahlt           | 0,0003**  |  |
| keine      | monomer             | < 0,0001**                                      |  |
| monomer    | gestrahlt + monomer | 0,0003**  |  |
| keine      | gestrahlt + monomer | 0,0414  |  |
| gestrahlt  | monomer             | 0,0393  |  |
| gestrahlt  | gestrahlt + monomer | 0,0909  |  |

*Tabelle 17: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [Palapress] auf additiver Basis. Vergleich der Alterungsformen innerhalb einer Konditionierungsform.*

| Prüfgruppe                 |                            | Reparaturmaterial Palapress auf additiver Basis |  |
|----------------------------|----------------------------|---|--|
| Vergleich:                 |                            | 24Std. trocken vs. 14Tg. Wasser                 |  |
| Oberflächenkonditionierung | Oberflächenkonditionierung | p- Wert:  |  |
| keine                      | keine                      |   |  |
| 24Std. trocken             | 14Tg. Wasser               | 0,3147  |  |
| Oberflächenkonditionierung | Oberflächenkonditionierung | p- Wert:  |  |
| gestrahlt                  | gestrahlt                  |   |  |
| 24Std. trocken             | 14Tg. Wasser               | 0,388   |  |
| Oberflächenkonditionierung | Oberflächenkonditionierung | p- Wert:  |  |
| monomer                    | monomer                    |   |  |
| 24Std. trocken             | 14Tg. Wasser               | < 0,0001**                                      |  |
| Oberflächenkonditionierung | Oberflächenkonditionierung | p- Wert:  |  |
| gestrahlt + monomer        | gestrahlt + monomer        |   |  |
| 24Std. trocken             | 14Tg. Wasser               | 0,0053  |  |

## Anhang

*Tabelle 18: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [Palapress] auf additiver Basis mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress].*

| Prüfgruppe                                       | Reparaturmaterial Palapress auf additiver Basis           |            |
|--|---|------------|
| Vergleich:                                       | mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress]        |            |
| Prüfgruppe                                       | Prüfgruppe  | p- Wert:   |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [Palapress] + [keine]+<br>[24Std. trocken]                | 0,0065**   |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [Palapress] + [gestrahlt] +<br>[24Std. trocken]           | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [Palapress] + [monomer] +<br>[24Std. trocken]             | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [Palapress] + [gestrahlt] +<br>[14Tg. Wasser]             | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [Palapress] + [monomer] +<br>[14Tg. Wasser]               | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [Palapress] + [gestrahlt +<br>monomer] + [14Tg. Wasser]   | 0,0016**   |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [Palapress] + [gestrahlt +<br>monomer] + [24Std. trocken] | 0,0716     |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [Palapress] + [keine] +<br>[14Tg. Wasser]                 | 0,6672     |

**Reparaturmaterial: primosplint® auf additiver Basis**

*Tabelle 19: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [primosplint]. Alterung: [24Std. trocken].*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |                 |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|-----------------|--------------|
| Alterung                        | 24Std. trocken          |                |         |                 |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum        | Maximum | Mittel-<br>wert | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 0,44           | 6,76    | 3,92            | 1,97         |
| gestrahlt                       | 20                      | 0,82           | 7,88    | 4,01            | 2,42         |
| primostick                      | 20                      | 2,79           | 16,15   | 5,72            | 3,40         |
| gestrahlt +primostick           | 20                      | 2,41           | 13,44   | 6,73            | 2,79         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95%   |              |
| keine                           | 3,67                    | 3,00           |         | 4,84            |              |
| gestrahlt                       | 3,76                    | 2,88           |         | 5,14            |              |
| primostick                      | 4,69                    | 4,13           |         | 7,32            |              |
| gestrahlt +primostick           | 5,96                    | 5,43           |         | 8,03            |              |

*Tabelle 20: p- Werte Reparaturmaterial [primosplint] auf additiver Basis bei der Alterung [24Std. trocken].*

| Prüfgruppe             | Reparaturmaterial primosplint auf<br>additiver Basis |          |
|------------------------|--|----------|
| Vergleich:             | Oberflächenkonditionierung bei<br>24Std. trocken     |          |
| Prüfgruppe             | Prüfgruppe   | p- Wert: |
| gestrahlt + primostick | keine  | 0,0026*  |
| gestrahlt + primostick | gestrahlt  | 0,0060*  |
| keine                  | gestrahlt  | 0,9892   |
| keine                  | primostick   | 0,1264   |
| gestrahlt              | primostick   | 0,1478   |
| primostick             | gestrahlt + primostick                               | 0,0909   |

## Anhang

*Tabelle 21: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [primosplint]. Alterung: [14Tg. Wasser]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |                 |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|-----------------|--------------|
| Alterung                        | 14Tg. Wasser            |                |         |                 |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum        | Maximum | Mittel-<br>wert | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 1,16           | 6,11    | 2,96            | 1,46         |
| gestrahlt                       | 20                      | 3,98           | 9,81    | 7,22            | 1,70         |
| primostick                      | 20                      | 4,94           | 10,38   | 7,25            | 1,61         |
| gestrahlt +primostick           | 20                      | 1,30           | 10,03   | 6,20            | 2,23         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95%   |              |
| keine                           | 2,68                    | 2,28           |         | 3,65            |              |
| gestrahlt                       | 7,36                    | 6,42           |         | 8,01            |              |
| primostick                      | 7,05                    | 6,50           |         | 8,00            |              |
| gestrahlt +primostick           | 6,30                    | 5,16           |         | 7,25            |              |

*Tabelle 22: p- Werte Reparaturmaterial [primosplint] auf additiver Basis, bei der Alterung 14Tg. Wasser.*

| Prüfgruppe             | Reparaturmaterial primosplint auf<br>additiver Basis |            |
|------------------------|--|------------|
| Vergleich:             | Oberflächenkonditionierung bei<br>14Tg. Wasser       |            |
| Prüfgruppe             | Prüfgruppe   | p- Wert:   |
| gestrahlt              | keine  | < 0,0001** |
| primostick             | keine  | < 0,0001** |
| gestrahlt + primostick | keine  | < 0,0001** |
| gestrahlt              | primostick   | 0,9539     |
| gestrahlt              | gestrahlt + primostick                               | 0,0739     |
| primostick             | gestrahlt + primostick                               | 0,0653     |

## Anhang

*Tabelle 23: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [primosplint] auf additiver Basis. Vergleich der Alterungsformen innerhalb einer Konditionierungsform*

| <b>Prüfgruppe</b>  | <b>Reparaturmaterial primosplint auf additiver Basis</b> |                 |
|--|--|-----------------|
| <b>Vergleich:</b>  | <b>24Std. trocken vs. 14Tg. Wasser</b>                   |                 |
| <b>Oberflächenkonditionierung keine</b>                  | <b>Oberflächenkonditionierung keine</b>                  | <b>p- Wert:</b> |
| 24Std. trocken   | 14Tg. Wasser   | 0,0883          |
| <b>Oberflächenkonditionierung gestrahlt</b>              | <b>Oberflächenkonditionierung gestrahlt</b>              | <b>p- Wert:</b> |
| 14Tg. Wasser   | 24Std. trocken   | < 0,0001**      |
| <b>Oberflächenkonditionierung primostick</b>             | <b>Oberflächenkonditionierung primostick</b>             | <b>p- Wert:</b> |
| 14Tg. Wasser   | 24Std. trocken   | 0,0005          |
| <b>Oberflächenkonditionierung gestrahlt + primostick</b> | <b>Oberflächenkonditionierung gestrahlt + primostick</b> | <b>p- Wert:</b> |
| 14Tg. Wasser   | 24Std. trocken   | 0,5116          |

## Anhang

*Tabelle 24: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [primosplint] auf additiver Basis mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress].*

| <b>Prüfgruppe</b>                             | <b>Reparaturmaterial primosplint auf additiver Basis</b>  |                 |
|---|---|-----------------|
| <b>Vergleich:</b>                             | <b>mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress]</b> |                 |
| <b>Prüfgruppe</b>                             | <b>Prüfgruppe</b>   | <b>p- Wert:</b> |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [24Std. trocken] | [primosplint] + [keine] + [24Std.trocken]                 | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [24Std. trocken] | [primosplint] + [gestrahlt]+ [24Std.trocken]              | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [24Std. trocken] | [primosplint] + [primostick]+ [24Std. trocken]            | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [24Std. trocken] | [primosplint]+[gestrahlt + primostick]+ [24Std. trocken]  | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [14Tg. Wasser]   | [primosplint] + [keine]+ [14Tg. Wasser]                   | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [14Tg. Wasser]   | [primosplint] + [gestrahlt]+ [14Tg. Wasser]               | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [14Tg. Wasser]   | [primosplint] + [primostick]+ [14Tg. Wasser]              | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] + [14Tg. Wasser]   | [primosplint] + [primostick]+ [14Tg. Wasser]              | < 0,0001**      |

## Anhang

### Reparaturmaterial: freeprint® splint 2.0 UV auf additiver Basis.

*Tabelle 25: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [freeprint splint 2]. Alterung: [24Std. trocken]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |               |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Alterung                        | 24Std. trocken          |                |         |               |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl n                | Minimum        | Maximum | Mittelwert    | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 7,66           | 23,70   | 13,99         | 3,31         |
| gestrahlt                       | 20                      | 9,56           | 24,76   | 15,76         | 3,94         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95% |              |
| keine                           | 13,69                   | 12,43          |         | 15,54         |              |
| gestrahlt                       | 15,32                   | 13,91          |         | 17,60         |              |

*Tabelle 26: p- Wert Reparaturmaterial [freeprint splint 2] auf additiver Basis [freeprint splint 2] bei der Alterung [24Std. trocken].*

| Prüfgruppe | Reparaturmaterial freeprint splint 2 auf<br>additiver Basis |          |
|------------|---|----------|
| Vergleich: | Oberflächenkonditionierung bei<br>24Std. trocken            |          |
| Prüfgruppe | Prüfgruppe  | p- Wert: |
| gestrahlt  | keine   | 0,1321   |

## Anhang

*Tabelle 27: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [freeprint splint 2]. Alterung: [14Tg. Wasser]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |               |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Alterung                        | 14Tg Wasser             |                |         |               |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl n                | Minimum        | Maximum | Mittelwert    | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 1,22           | 10,52   | 5,56          | 2,83         |
| gestrahlt                       | 20                      | 5,73           | 11,07   | 8,37          | 1,43         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95% |              |
| keine                           | 5,75                    | 4,24           |         | 6,89          |              |
| gestrahlt                       | 8,63                    | 7,70           |         | 9,04          |              |

*Tabelle 28: p- Wert Reparaturmaterial [freeprint splint 2] auf additiver Basis [freeprint splint 2] bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

| Prüfgruppe | Reparaturmaterial freeprint splint 2 auf<br>additiver Basis |          |
|------------|---|----------|
| Vergleich: | Oberflächenkonditionierung bei<br>14Tg. Wasser              |          |
| Prüfgruppe | Prüfgruppe  | p- Wert: |
| gestrahlt  | keine   | 0,0003** |

## Anhang

*Tabelle 29: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [freeprint splint 2] auf additiver Basis. Vergleich der Alterungsformen innerhalb einer Konditionierungsform*

| Prüfgruppe                                      | Reparaturmaterial freeprint splint 2.0<br>UV auf additiver Basis |                 |
|---|--|-----------------|
| <b>Vergleich:</b>                               | <b>24Std. trocken vs. 14Tg. Wasser</b>                           |                 |
| <b>Oberflächenkonditionierung<br/>keine</b>     | <b>Oberflächenkonditionierung<br/>keine</b>                      | <b>p- Wert:</b> |
| 24Std. trocken                                  | 14Tg. Wasser   | < 0,0001**      |
| <b>Oberflächenkonditionierung<br/>gestrahlt</b> | <b>Oberflächenkonditionierung<br/>gestrahlt</b>                  | <b>p- Wert:</b> |
| 24Std. trocken                                  | 14Tg. Wasser   | < 0,0001**      |

*Tabelle 30: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [freeprint splint 2] auf additiver Basis [freeprint splint 2] mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress].*

| Prüfgruppe                                       | Reparaturmaterial freeprint splint 2 auf<br>additiver Basis   |                 |
|--|---|-----------------|
| <b>Vergleich:</b>                                | <b>mit der konventionellen<br/>[Kontrollgruppe Palapress]</b> |                 |
| <b>Prüfgruppe</b>                                | <b>Prüfgruppe</b>   | <b>p- Wert:</b> |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [freeprint splint 2] + [keine]+<br>[24Std. trocken]           | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [freeprint splint 2]+[gestrahlt]+<br>[24Std. trocken]         | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [freeprint splint 2]+ [keine]+<br>[14Tg. Wasser]              | < 0,0001**      |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [freeprint splint 2]+[gestrahlt]+<br>[14Tg. Wasser]           | < 0,0001**      |

## Anhang

**Reparaturmaterial: freeform® fixgel auf additiver Basis.**

*Tabelle 31: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [freeform fixgel]. Alterung: [24Std. trocken]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |               |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Alterung                        | 24Std. trocken          |                |         |               |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl n                | Minimum        | Maximum | Mittelwert    | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 17                      | 1,38           | 8,91    | 4,93          | 2,49         |
| gestrahlt                       | 20                      | 2,83           | 18,82   | 8,65          | 4,78         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95% |              |
| keine                           | 4,52                    | 3,65           |         | 6,22          |              |
| gestrahlt                       | 7,84                    | 6,41           |         | 10,88         |              |

*Tabelle 32: p- Wert Reparaturmaterial [freeform fixgel] auf additiver Basis bei der Alterung [24Std. trocken].*

| Prüfgruppe | Reparaturmaterial freeform fixgel auf<br>additiver Basis |          |
|------------|--|----------|
| Vergleich: | Oberflächenkonditionierung bei<br>24Std. trocken         |          |
| Prüfgruppe | Prüfgruppe   | p- Wert: |
| gestrahlt  | keine  | 0,0067*  |

## Anhang

*Tabelle 33: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [freeform fixgel]. Alterung: [14Tg. Wasser]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |                 |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|-----------------|--------------|
| Alterung                        | 14Tg Wasser             |                |         |                 |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum        | Maximum | Mittel-<br>wert | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 3,59           | 12,03   | 8,11            | 2,36         |
| gestrahlt                       | 20                      | 9,24           | 22,98   | 14,12           | 3,21         |
| freeform bond                   | 20                      | 7,45           | 20,14   | 14,31           | 3,60         |
| gestrahlt +freeform bond        | 20                      | 6,58           | 19,16   | 10,93           | 3,26         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95%   |              |
| keine                           | 8,95                    | 7,00           |         | 9,21            |              |
| gestrahlt                       | 13,93                   | 12,61          |         | 15,62           |              |
| freeform bond                   | 15,15                   | 12,63          |         | 16,00           |              |
| gestrahlt+ freeform bond        | 10,39                   | 9,40           |         | 12,45           |              |

*Tabelle 34: p- Werte Reparaturmaterial [freeform fixgel] auf additiver Basis [freeprint splint 2] bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

| Prüfgruppe                | Reparaturmaterial freeform fixgel auf<br>additiver Basis |            |
|---------------------------|--|------------|
| Vergleich:                | Oberflächenkonditionierung bei<br>14Tg. Wasser           |            |
| Prüfgruppe                | Prüfgruppe   | p- Wert:   |
| gestrahlt                 | keine  | < 0,0001** |
| gestrahlt                 | gestrahlt + freeform bond                                | 0,0019**   |
| freeform bond             | keine  | < 0,0001** |
| freeform bond             | gestrahlt + freeform bond                                | 0,001**    |
| gestrahlt + freeform bond | keine  | 0,0058     |
| gestrahlt                 | freeform bond  | 0,8433     |

## Anhang

*Tabelle 35: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [freeform fixgel] auf additiver Basis. Vergleich der Alterungsformen innerhalb einer Konditionierungsform*

| Prüfgruppe                                  | Reparaturmaterial freeform fixgel auf additiver Basis |                 |
|---|---|-----------------|
| Vergleich:                                  | 24Std. trocken vs. 14Tg. Wasser                       |                 |
| <b>Oberflächenkonditionierung keine</b>     | <b>Oberflächenkonditionierung keine</b>               | <b>p- Wert:</b> |
| 14Tg. Wasser                                | 24Std. trocken  | 0,0003*         |
| <b>Oberflächenkonditionierung gestrahlt</b> | <b>Oberflächenkonditionierung gestrahlt</b>           | <b>p- Wert:</b> |
| 14Tg. Wasser                                | 24Std. trocken  | < 0,0001**      |

*Tabelle 36: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [freeform fixgel] auf additiver Basis [freeprint splint 2] mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress].*

| Prüfgruppe                                       | Reparaturmaterial freeform fixgel auf additiver Basis            |            |
|--|--|------------|
| Vergleich:                                       | mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress]               |            |
| Prüfgruppe                                       | Prüfgruppe   | p- Wert:   |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [freeform fixgel]+ [keine]+<br>[24Std. trocken]                  | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[24Std. trocken] | [freeform fixgel]+ [gestrahlt]+<br>[24Std. trocken]              | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [freeform fixgel] + [keine]+<br>[14Tg. Wasser]                   | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [freeform fixgel]+ [gestrahlt]+<br>[14Tg. Wasser]                | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [freeform fixgel]+[freeform bond]<br>+[14Tg. Wasser]             | < 0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress] +<br>[14Tg. Wasser]   | [freeform fixgel]+[gestrahlt +<br>freeform bond]+ [14Tg. Wasser] | < 0,0001** |

**Reparaturmaterial: freeform® plast auf additiver Basis.**

*Tabelle 37: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [freeform plast]. Alterung: [24Std. trocken]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |               |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|---------------|--------------|
| Alterung                        | 24Std. trocken          |                |         |               |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl n                | Minimum        | Maximum | Mittelwert    | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 0,95           | 9,35    | 4,45          | 2,70         |
| gestrahlt                       | 20                      | 3,23           | 11,73   | 6,87          | 2,89         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95% |              |
| keine                           | 3,90                    | 3,19           |         | 5,72          |              |
| gestrahlt                       | 6,36                    | 5,52           |         | 8,22          |              |

*Tabelle 38: p- Wert Reparaturmaterial [freeform plast] auf additiver Basis bei der Alterung [24Std. trocken].*

| Prüfgruppe | Reparaturmaterial freeform plast auf<br>additiver Basis |          |
|------------|---|----------|
| Vergleich: | Oberflächenkonditionierung bei<br>24Std. trocken        |          |
| Prüfgruppe | Prüfgruppe  | p- Wert: |
| gestrahlt  | keine   | 0,0095*  |

## Anhang

*Tabelle 39: Übersicht der statistischen Auswertung der additiven Gruppe. Basis: [freeprint splint 2], Reparaturmaterial [freeform plast]. Alterung: [14Tg. Wasser]*

|                                 | Verbundfestigkeit (MPa) |                |         |                 |              |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------|-----------------|--------------|
| Alterung                        | 14Tg Wasser             |                |         |                 |              |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Anzahl<br>n             | Minimum        | Maximum | Mittel-<br>wert | Std.<br>Abw. |
| keine                           | 20                      | 1,72           | 5,14    | 3,48            | 0,82         |
| gestrahlt                       | 20                      | 5,83           | 13,06   | 8,85            | 1,96         |
| freeform bond                   | 20                      | 4,51           | 12,99   | 7,71            | 2,24         |
| gestrahlt + freeform<br>bond    | 20                      | 8,06           | 25,58   | 15,32           | 4,39         |
| Oberflächen-<br>konditionierung | Median                  | unterer KI 95% |         | oberer KI 95%   |              |
| keine                           | 3,48                    | 3,10           |         | 3,87            |              |
| gestrahlt                       | 8,51                    | 7,94           |         | 9,77            |              |
| freeform bond                   | 7,51                    | 6,66           |         | 8,76            |              |
| gestrahlt +freeform bond        | 14,88                   | 13,26          |         | 17,37           |              |

*Tabelle 40: p- Werte Reparaturmaterial [freeform plast] auf additiver Basis bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

| Prüfgruppe                | Reparaturmaterial freeform plast auf<br>additiver Basis |            |
|---------------------------|---|------------|
| Vergleich:                | Oberflächenkonditionierung bei<br>14Tg. Wasser          |            |
| Prüfgruppe                | Prüfgruppe  | p- Wert:   |
| gestrahlt + freeform bond | keine   | < 0,0001** |
| gestrahlt + freeform bond | gestrahlt   | < 0,0001** |
| gestrahlt + freeform bond | freeform bond   | < 0,0001** |
| gestrahlt                 | keine   | < 0,0001** |
| freeform bond             | keine   | < 0,0001** |
| gestrahlt                 | freeform bond   | 0,1811     |

## Anhang

*Tabelle 41: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [freeform plast] auf additiver Basis. Vergleich der Alterungsformen innerhalb einer Konditionierungsform*

| Prüfgruppe                              | Reparaturmaterial freeform plast auf additiver Basis |          |
|---|--|----------|
| Vergleich:                              | 24Std. trocken vs. 14Tg. Wasser                      |          |
| Oberflächenkonditionierung<br>keine     | Oberflächenkonditionierung<br>keine                  | p- Wert: |
| 24Std. trocken                          | 14Tg. Wasser   | 0,1330   |
| Oberflächenkonditionierung<br>gestrahlt | Oberflächenkonditionierung<br>gestrahlt              | p- Wert: |
| 14Tg. Wasser                            | 24Std. trocken                                       | 0,0150   |

*Tabelle 42: p- Werte der Prüfgruppe Reparaturmaterial [freeform plast] auf additiver Basis [freeprint splint 2] mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress].*

| Prüfgruppe                                       | Reparaturmaterial freeform plast auf additiver Basis            |           |
|--|---|-----------|
| Vergleich:                                       | mit der konventionellen [Kontrollgruppe Palapress]              |           |
| Prüfgruppe                                       | Prüfgruppe  | p- Wert:  |
| [Kontrollgruppe Palapress]<br>+ [24Std. trocken] | [freeform plast]+ [keine]+<br>[24Std. trocken]                  | <0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress]<br>+ [24Std. trocken] | [freeform plast]+ [gestrahlt]+<br>[24Std. trocken]              | <0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress]<br>+ [14Tg. Wasser]   | [freeform plast] + [keine]+<br>[14Tg. Wasser]                   | <0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress]<br>+ [14Tg. Wasser]   | [freeform plast] + [gestrahlt]+<br>[14Tg. Wasser]               | <0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress]<br>+ [14Tg. Wasser]   | [freeform plast]+[freeform bond] +<br>[14Tg. Wasser]            | <0,0001** |
| [Kontrollgruppe Palapress]<br>+ [14Tg. Wasser]   | [freeform plast]+[gestrahlt]+<br>freeform bond]+ [14Tg. Wasser] | <0,0001** |

## Anhang

### Bruchflächenanalyse:

Ergebnisse bei der Alterung 24Std. trocken

*Tabelle 43: Anzahl der jeweiligen Bruchtypen bei der Alterung [24Std. trocken], bei der Prüfgruppe: Kontrollgruppe Palapress. Sowie den additiven Gruppen mit den Reparaturmaterialien: [Palapress], [primosplint] und [freeprint splint 2].*

| Alterung                                | 24Std. trocken                     |                     |                       |   |                     |                       |
|---|------------------------------------|---------------------|-----------------------|---|---------------------|-----------------------|
| Prüfgruppe-<br>gruppe                   | Kontrollgruppe<br>Palapress        |                     |                       | Palapress<br>auf additiver Basis          |                     |                       |
| <i>Bruchtypen</i>                       | <i>adhäsiv</i>                     | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> | <i>adhäsiv</i>                            | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> |
| <i>Oberflächen-<br/>konditionierung</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>                | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   | <i>Anzahl<br/>n</i>                       | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   |
| keine                                   | -                                  | -                   | -                     | 0   | 20                  | 0                     |
| gestrahlt                               | -                                  | -                   | -                     | 0   | 20                  | 0                     |
| monomer                                 | -                                  | -                   | -                     | 0   | 20                  | 0                     |
| gestrahlt +<br>monomer                  | 0                                  | 20                  | 0                     | 0   | 20                  | 0                     |
| Alterung                                | 24Std. trocken                     |                     |                       |   |                     |                       |
| Prüfgruppe-<br>gruppe                   | primosplint<br>auf additiver Basis |                     |                       | freeprint splint 2<br>auf additiver Basis |                     |                       |
| <i>Bruchtypen</i>                       | <i>adhäsiv</i>                     | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> | <i>adhäsiv</i>                            | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> |
| <i>Oberflächen-<br/>konditionierung</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>                | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   | <i>Anzahl<br/>n</i>                       | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   |
| keine                                   | 11                                 | 9                   | 0                     | 0   | 20                  | 0                     |
| gestrahlt                               | 10                                 | 6                   | 4                     | 0   | 20                  | 0                     |
| primostick                              | 0                                  | 12                  | 8                     | -   | -                   | -                     |
| gestrahlt +<br>primostick               | 2                                  | 11                  | 7                     | -   | -                   | -                     |

## Anhang

---

*Tabelle 44: Anzahl der jeweiligen Bruchtypen bei der Alterung [24Std. trocken], bei den Prüfgruppen: additive Prüfgruppen mit den Reparaturmaterialien: [freeform fixgel] und [freeform plast]*

| Alterung                                | 24Std. trocken                         |                     |                       |                                       |                     |                       |
|---|--|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Prüf-<br>gruppe                         | freeform fixgel<br>auf additiver Basis |                     |                       | freeform plast<br>auf additiver Basis |                     |                       |
| <b>Bruchtypen</b>                       | <i>adhäsiv</i>                         | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> | <i>adhäsiv</i>                        | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> |
| <b>Oberflächen-<br/>konditionierung</b> | <i>Anzahl<br/>n</i>                    | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   | <i>Anzahl<br/>n</i>                   | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   |
| keine                                   | 10                                     | 6                   | 1                     | 15                                    | 2                   | 3                     |
| gestrahlt                               | 11                                     | 2                   | 7                     | 7                                     | 8                   | 5                     |

## Anhang

Ergebnisse bei der Alterung 14Tg. Wasser

*Tabelle 45: Anzahl der jeweiligen Bruchtypen bei der Alterung [14Tg Wasser], bei der Prüfgruppe: Kontrollgruppe Palapress. Sowie den additiven Gruppen mit den Reparaturmaterialien: [Palapress], [primosplint] und [freeprint splint 2].*

| Alterung                                | 14Tg. Wasser                       |                     |                       |   |                     |                       |
|---|------------------------------------|---------------------|-----------------------|---|---------------------|-----------------------|
| Prüf-<br>gruppe                         | Kontrollgruppe<br>Palapress        |                     |                       | Palapress<br>auf additiver Basis          |                     |                       |
| <i>Bruchtypen</i>                       | <i>adhäsiv</i>                     | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> | <i>adhäsiv</i>                            | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> |
| <i>Oberflächen-<br/>konditionierung</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>                | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   | <i>Anzahl<br/>n</i>                       | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   |
| keine                                   | -                                  | -                   | -                     | 0   | 19                  | 0                     |
| gestrahlt                               | -                                  | -                   | -                     | 0   | 20                  | 0                     |
| monomer                                 | -                                  | -                   | -                     | 2   | 12                  | 4                     |
| gestrahlt +<br>monomer                  | 0                                  | 20                  | 0                     | 0   | 20                  | 0                     |
| Alterung                                | 14Tg. Wasser                       |                     |                       |   |                     |                       |
| Prüf-<br>gruppe                         | primosplint<br>auf additiver Basis |                     |                       | freeprint splint 2<br>auf additiver Basis |                     |                       |
| <i>Bruchtypen</i>                       | <i>adhäsiv</i>                     | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> | <i>adhäsiv</i>                            | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> |
| <i>Oberflächen-<br/>konditionierung</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>                | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   | <i>Anzahl<br/>n</i>                       | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   |
| keine                                   | 18                                 | 0                   | 2                     | 6   | 5                   | 9                     |
| gestrahlt                               | 1                                  | 0                   | 19                    | 0   | 13                  | 7                     |
| primostick                              | 0                                  | 12                  | 8                     | -   | -                   | -                     |
| gestrahlt +<br>primostick               | 1                                  | 9                   | 10                    | -   | -                   | -                     |

## Anhang

---

*Tabelle 46: Anzahl der jeweiligen Bruchtypen bei der Alterung [14Tg. Wasser], bei den additive Prüfgruppen mit den Reparaturmaterialien: [freeform fixgel] und [freeform plast]*

| Alterung                                | 14Tg. Wasser                           |                     |                       |                                       |                     |                       |
|---|--|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Prüf-<br>gruppe                         | freeform fixgel<br>auf additiver Basis |                     |                       | freeform plast<br>auf additiver Basis |                     |                       |
| <b>Bruchtypen</b>                       | <i>adhäsiv</i>                         | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> | <i>adhäsiv</i>                        | <i>kohäsiv</i>      | <i>ge-<br/>mischt</i> |
| <b>Oberflächen-<br/>konditionierung</b> | <i>Anzahl<br/>n</i>                    | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   | <i>Anzahl<br/>n</i>                   | <i>Anzahl<br/>n</i> | <i>Anzahl<br/>n</i>   |
| keine                                   | 13                                     | 2                   | 5                     | 19                                    | 0                   | 1                     |
| gestrahlt                               | 0                                      | 20                  | 0                     | 0                                     | 14                  | 6                     |
| freeform bond                           | 0                                      | 18                  | 2                     | 5                                     | 4                   | 11                    |
| gestrahlt +<br>freeform bond            | 0                                      | 19                  | 1                     | 0                                     | 20                  | 0                     |

### **Oberflächenbeschaffenheit:**

Ergebnisse bei der Alterung 24Std. trocken

## Anhang

*Tabelle 47: Werte der Rauheit ( $R_a$ ) aller Reparaturmaterialien und Oberflächenkonditionierungen bei der Alterung [24Std.trocken].*

|   | <b><math>R_a</math>- Werte (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |                |                   |                  |
|---|---|----------------|-------------------|------------------|
| <b>Alterung</b>                                 | <b>24Std. trocken</b>                                     |                |                   |                  |
| <b>Oberflächenkonditionierung</b>               | <b>Minimum</b>  | <b>Maximum</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Std. Abw.</b> |
| <b>Kontrollgruppe Palapress</b>                 |   |                |                   |                  |
| gestrahlt + monomer                             | 2,335   | 5,898          | 3,401             | 0,591            |
| <b>3D- gedruckte Basis [freeprint splint 2]</b> |   |                |                   |                  |
| keine   | 0,340   | 2,978          | 0,753             | 0,419            |
| gestrahlt                                       | 0,315   | 8,009          | 4,408             | 1,975            |
| monomer   | 0,504   | 1,539          | 0,915             | 0,206            |
| gestrahlt + monomer                             | 0,637   | 11,896         | 5,215             | 1,408            |
| primostick                                      | 0,072   | 4,393          | 1,063             | 0,769            |
| gestrahlt + primostick                          | 0,211   | 13,603         | 1,867             | 1,979            |

*Tabelle 48: Werte der Welligkeit ( $W_a$ ) aller Reparaturmaterialien und Oberflächenkonditionierungen bei der Alterung [24Std.trocken].*

|                                   | <b><math>W_a</math>- Werte (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |                |                   |                  |
|-----------------------------------|---|----------------|-------------------|------------------|
| <b>Alterung</b>                   | <b>24Std. trocken</b>                                     |                |                   |                  |
| <b>Oberflächenkonditionierung</b> | <b>Minimum</b>  | <b>Maximum</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Std. Abw.</b> |
| <b>Kontrollgruppe Palapress</b>   |   |                |                   |                  |
| gestrahlt + monomer               | 2,960   | 21,281         | 9,436             | 4,767            |
| <b>3D- gedruckte Basis</b>        |   |                |                   |                  |
| keine                             | 0,135   | 2,745          | 1,216             | 0,730            |
| gestrahlt                         | 0,469   | 6,046          | 2,783             | 1,685            |
| monomer                           | 0,344   | 4,576          | 1,896             | 1,143            |
| gestrahlt + monomer               | 0,592   | 6,166          | 2,649             | 1,232            |
| primostick                        | 1,685   | 7,252          | 4,040             | 1,155            |
| gestrahlt + primostick            | 2,092   | 22,571         | 9,229             | 5,269            |

## Anhang

*Tabelle 49: Werte der Wellentiefe ( $W_t$ ) aller Reparaturmaterialien und Oberflächenkonditionierungen bei der Alterung [24Std.trocken].*

|                                   | <b><math>W_t</math>- Werte (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |                |                   |                  |
|-----------------------------------|---|----------------|-------------------|------------------|
| <b>Alterung</b>                   | <b>24Std. trocken</b>                                     |                |                   |                  |
| <b>Oberflächenkonditionierung</b> | <b>Minimum</b>  | <b>Maximum</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Std. Abw.</b> |
|                                   | <b>Kontrollgruppe Palapress</b>                           |                |                   |                  |
| gestrahlt + monomer               | 3,048   | 24,931         | 9,218             | 3,861            |
|                                   | <b>3D- gedruckte Basis</b>                                |                |                   |                  |
| keine                             | 0,256   | 3,411          | 0,927             | 0,507            |
| gestrahlt                         | 0,388   | 26,993         | 8,128             | 5,627            |
| monomer                           | 0,460   | 6,054          | 1,820             | 1,077            |
| gestrahlt + monomer               | 0,812   | 26,070         | 8,727             | 4,044            |
| primostick                        | 0,559   | 13,409         | 3,715             | 1,991            |
| gestrahlt + primostick            | 1,780   | 44,033         | 8,883             | 7,424            |

## Anhang

Ergebnisse bei der Alterung 14Tg. Wasser

*Tabelle 50: Werte der Rauheit ( $R_a$ ) aller Reparaturmaterialien und Oberflächenkonditionierungen bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

|   | <b><math>R_a</math>- Werte (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |                |                   |                  |
|---|---|----------------|-------------------|------------------|
| <b>Alterung</b>                         | <b>14Tg. Wasser</b>                                       |                |                   |                  |
| <b>Oberflächen-<br/>konditionierung</b> | <b>Minimum</b>  | <b>Maximum</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Std. Abw.</b> |
|   | <b>Kontrollgruppe Palapress</b>                           |                |                   |                  |
| gestrahlt + monomer                     | 2,395   | 9,427          | 3,626             | 0,792            |
|   | <b>3D- gedruckte Basis</b>                                |                |                   |                  |
| keine                                   | 0,330   | 2,390          | 0,696             | 0,335            |
| gestrahlt                               | 0,533   | 11,404         | 5,847             | 1,492            |
| monomer                                 | 0,217   | 1,398          | 0,496             | 0,184            |
| gestrahlt + monomer                     | 1,929   | 8,355          | 5,771             | 1,010            |
| primostick                              | 0,053   | 1,327          | 0,267             | 0,222            |
| gestrahlt + primostick                  | 0,206   | 13,072         | 1,421             | 1,893            |
| freeform bond                           | 0,035   | 2,890          | 0,567             | 0,639            |
| gestrahlt + freeform bond               | 0,106   | 5,486          | 0,735             | 0,736            |

## Anhang

*Tabelle 51: Werte der Welligkeit ( $W_a$ ) aller Reparaturmaterialien und Oberflächenkonditionierungen bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

|   | <b><math>W_a</math>- Werte (<math>\mu\text{m}</math>)</b> |                |                   |                  |
|---|---|----------------|-------------------|------------------|
| <b>Alterung</b>                         | <b>14Tg. Wasser</b>                                       |                |                   |                  |
| <b>Oberflächen-<br/>konditionierung</b> | <b>Minimum</b>  | <b>Maximum</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Std. Abw.</b> |
| <b>Kontrollgruppe Palapress</b>         |   |                |                   |                  |
| gestrahlt + monomer                     | 1,745   | 24,925         | 8,130             | 6,786            |
| <b>3D- gedruckte Basis</b>              |   |                |                   |                  |
| keine                                   | 0,225   | 2,458          | 1,212             | 0,665            |
| gestrahlt                               | 1,715   | 21,554         | 6,003             | 3,701            |
| monomer                                 | 0,092   | 2,596          | 0,733             | 0,673            |
| gestrahlt + monomer                     | 1,481   | 16,694         | 6,705             | 3,739            |
| primostick                              | 0,493   | 4,233          | 2,386             | 1,044            |
| gestrahlt + primostick                  | 2,373   | 42,577         | 13,110            | 10,032           |
| freeform bond                           | 0,443   | 13,271         | 3,848             | 2,350            |
| gestrahlt + freeform bond               | 0,986   | 16,221         | 4,774             | 3,981            |

## Anhang

*Tabelle 52: Werte der Wellentiefe ( $W_t$ ) aller Reparaturmaterialien und Oberflächenkonditionierungen bei der Alterung [14Tg. Wasser].*

|   | <b>W<sub>t</sub>- Werte (µm)</b> |                |                   |                  |
|---|----------------------------------|----------------|-------------------|------------------|
| <b>Alterung</b>                         | <b>14Tg. Wasser</b>              |                |                   |                  |
| <b>Oberflächen-<br/>konditionierung</b> | <b>Minimum</b>                   | <b>Maximum</b> | <b>Mittelwert</b> | <b>Std. Abw.</b> |
| <b>Kontrollgruppe Palapress</b>         |                                  |                |                   |                  |
| gestrahlt + monomer                     | 3,604                            | 35,117         | 11,852            | 7,048            |
| <b>3D- gedruckte Basis</b>              |                                  |                |                   |                  |
| keine                                   | 0,295                            | 3,546          | 1,256             | 0,705            |
| gestrahlt                               | 2,332                            | 49,972         | 13,564            | 6,259            |
| monomer                                 | 0,202                            | 3,295          | 0,747             | 0,333            |
| gestrahlt + monomer                     | 4,960                            | 37,320         | 14,669            | 5,764            |
| primostick                              | 0,255                            | 9,822          | 2,284             | 2,032            |
| gestrahlt + primostick                  | 0,729                            | 97,518         | 15,815            | 21,627           |
| freeform bond                           | 0,226                            | 11,339         | 3,072             | 2,642            |
| gestrahlt + freeform bond               | 0,353                            | 15,724         | 3,430             | 3,067            |