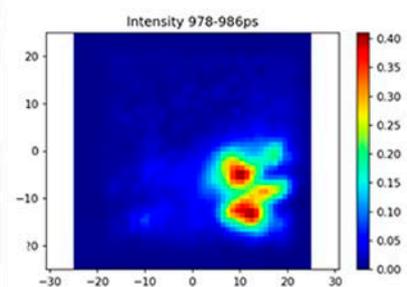
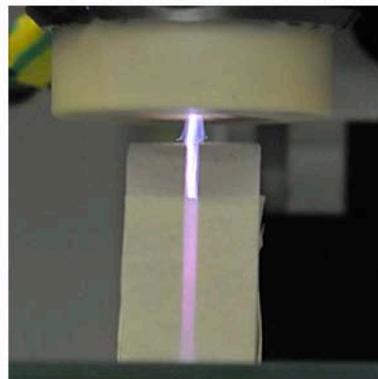


# Abschlussbericht

Hildesheim/Göttingen/Marburg September 2021

**Innovative Methoden zur Verbesserung der Haftfestigkeit von Materialanbindungen bei der Ausführung von  
Hohlraumhinterfüllungen an anthropogen geschädigten historischen Wandmalereien AVAH  
Konzeption – Optimierung – Charakterisierung**



gefördert unter Az.: **34227/01-45 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt**  
Projektbeginn: 01. Februar 2018  
Laufzeit: 3 Jahre 6 Monate

**Projektleitung:**

**Prof. apl. Prof. Dr. Wolfgang Viöl**  
 Hochschule HAWK  
 Hildesheim/Holzminden/Göttingen  
**Ingenieurwissenschaften und Gesundheit**  
 Von-Ossietzky-Str.99  
 37085 Göttingen  
 Tel: 05121/881-265  
 Email: wolfgang.vioel@hawk.de

**Projektpartner:**

**Prof. Dr. Ursula Schädler-Saub**  
 HAWK Hochschule für angewandte  
 Wissenschaft und Kunst  
 Hildesheim/Holzminden/Göttingen  
**Fakultät Bauen und Erhalten**  
 Bismarckplatz 10/11  
 31135 Hildesheim



**Prof. Dr. rer. nat. Martin Koch**  
 Philipps Universität Marburg  
**Fachbereich Physik**  
 AG Experimentelle Halbleiterphysik  
 Renthof 5  
 35032 Marburg

**Verfasser:**

Prof. apl. Prof. Dr. Wolfgang Viöl  
 Dipl. Rest. Kirsti Krügener, Jan Ornik M.Sc,

**Bearbeiter:**

Martin Bellmann M.Eng., Christian Ochs M.Eng, Marcus Harms M.Eng,  
 Dipl. Rest. Kirsti Krügener, Stefanie Endrulat M.A., Meike Büttner M.A., Dipl.  
 Rest. Carla Leupold M.A., Jan Ornik M.Sc., Dr. Eva-Maria Stübling, Cornelius  
 Mach M.Sc.

**Kooperationspartner:**

Institut für Steinkonservierung e.V. Mainz; Frau Dr. K. Kraus  
 Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, Hannover  
 LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur, Münster  
 BLDAN Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege, Brandenburg  
 Fürstliche Hofkammer Bückeberg, Leiter Bauabteilung Herr D. Weh

Fa. Tubag Trass Vertrieb GmbH, Kruft  
 Fa. Menlo-Systems, München  
 Fa. DBD Plasma GmbH, Gleichen  
 Fa. Chemiewerk Bad Köstritz GmbH

**Fachbeirat:**

**Frau Dr. Petra Egloffstein**, Fa. Tubag Trass Vertrieb GmbH  
**Herr Hon.-Prof. Dr. Erwin Stadlbauer**, Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege, Hannover

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>5</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>5</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>DIAGRAMMVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>DIAGRAMMVERZEICHNIS</b> .....	<b>8</b>
<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>10</b>
<b>2. ZUSAMMENFASSUNG DER UNTERSUCHUNGSPAKETE DER PROJEKTPHASEN</b> .....	<b>12</b>
<b>3. OBJEKTVORSTELLUNG SCHLOSSKAPELLE BÜCKEBURG UND IHRE WANDMALEREIEN: KUNST- UND RESTAURIERUNGSGESCHICHTE</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1 Kunstgeschichte</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2 Restaurierungsgeschichte</b> .....	<b>13</b>
<b>4. FAKULTÄT BAUEN UND ERHALTEN – KONZEPTION</b> .....	<b>16</b>
<b>4.1 Festlegung der Pilotfläche</b> .....	<b>16</b>
<b>4.2 Probenentnahme an der Pilotfläche</b> .....	<b>19</b>
<b>4.3 Probenauswertung</b> .....	<b>20</b>
<b>4.4 Putzmörtelzusammensetzung</b> .....	<b>23</b>
<b>4.5 Rezeptentwicklung Hinterfüllmörtel</b> .....	<b>27</b>
<b>4.6 Hinterfüllmörtel – Materialauswahl und Beschreibung</b> .....	<b>27</b>
<b>4.6.1 Bindemittel</b> .....	<b>27</b>
4.6.1.1 Kalk.....	27
4.6.1.2 Kieselöl.....	28
<b>4.6.2 Zuschlagstoff</b> .....	<b>30</b>
4.6.2.1 Marmormehle.....	30
4.6.2.2 Hohlglaskugeln Scotchlite S22.....	30
<b>4.6.3 Zusätze</b> .....	<b>31</b>
4.6.3.1 Tylose MH 30.000 YP4.....	31
4.6.3.2 Cab-O-Sil.....	31
4.6.3.3 WPC Romstedt.....	31
4.6.3.4 Tween 20® (Polysorbat 20).....	31
<b>4.7 Untersuchungskatalog zur Frischmörtelanalyse</b> .....	<b>32</b>
4.7.1 Sedimentationsgeschwindigkeit.....	33
4.7.2 Penetrationsverhalten.....	33
4.7.3 Trocknungs- und Anbindungsverhalten.....	33
4.7.4 Fließverhalten an der Wand.....	34
4.7.5 Fließverhalten an der Schräge.....	34
4.7.6 Bruchfestigkeit.....	35
4.7.7 Einfüllverhalten in Hohlräume.....	35
<b>4.8 Herstellung der Hinterfüllmörtel-Rezepturen</b> .....	<b>35</b>
<b>4.9 Exemplarische Ergebnisse zur Frischmörtelanalyse</b> .....	<b>36</b>
4.9.1 Rezeptur Kieselöl.....	36
4.9.2 Kanülangängigkeit.....	36
4.9.3 Ergebnis Sedimentationsgeschwindigkeit.....	37
4.9.4 Ergebnis Penetrationsverhalten.....	37
4.9.5 Ergebnis Trocknungsverhalten.....	38
4.9.6 Ergebnis Fließgeschwindigkeit an der Wand.....	39
4.9.7 Ergebnis Fließgeschwindigkeit an der Schräge.....	40
4.9.8 Ergebnis Bruchfestigkeit.....	41
4.9.9 Ergebnis Einfüllverhalten in Hohlräume.....	41
4.9.10 Zusammenfassung der Frischmörtelanalysen.....	42
<b>4.10 Herstellung von Verbund- und Hohlraumprüfkörpern</b> .....	<b>43</b>
4.10.1 Hohlraumprüfkörper.....	45
4.10.2 Herstellung von gefassten Prüfkörpern.....	47
4.10.3 Herstellung von beschichteten Prüfkörpern.....	48
4.10.4 Erstellung eines 3D-Modells eines Pilotflächenbereiches.....	49

<b>5.</b>	<b>FAKULTÄT INGENIEURWISSENSCHAFTEN UND GESUNDHEIT – OPTIMIERUNG .....</b>	<b>51</b>
5.1	Voruntersuchungen der Plasmaquellen .....	51
5.2	Konzeptstudie Disc-Jet .....	53
5.2.1	Vorversuche mit Disc-Jet an Gipsprüfkörpern.....	53
5.2.2	Vorversuche mit Disc-Jet an Hohlraumprüfkörpern.....	54
5.3	Versuche zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Plasmabehandlung.....	54
5.3.1	Auswertung zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Plasmabehandlung .....	56
5.3.2	Optische Begutachtung von beschichteten Mörteloberflächen nach Plasmabehandlung .....	57
5.3.3	Mikroskopische Begutachtung von beschichteten Mörteloberflächen nach Plasmabehandlung ..	57
5.4	Versuche zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Ozonbehandlung.....	60
5.4.1	Auswertung zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Ozonbehandlung.....	60
5.4.2	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen.....	61
5.5	Untersuchungen zu Plasma- und Ozonbehandlung auf Farbfassungen .....	61
5.5.1	Versuchsdurchführung der Plasma- und Ozonbehandlung auf Farbfassungen.....	62
5.5.2	Versuchsauswertung der Plasma- und Ozonbehandlung auf Farbfassungen .....	66
5.6	Modifizierung der Ozoneinspeisung und Plasmabehandlung.....	66
5.7	Wasseraufnahmefähigkeitsversuche von Putzoberflächen durch Plasma- und Ozonbehandlung ..	67
5.8	Untersuchungen zur Verbesserung der Haftzugfestigkeit durch Ozonbehandlungen .....	68
5.8.1	Durchführung der Ozonbehandlung und Hinterfüllung .....	69
5.8.2	Durchführung der Haftzugprüfungen .....	69
5.8.3	Auswertung der Haftzugprüfung.....	69
5.9	Zusammenfassung der Plasma-Ozon-Analysen .....	71
<b>6.</b>	<b>PHILIPPS-UNIVERSITÄT MARBURG – CHARAKTERISIERUNG.....</b>	<b>73</b>
6.1	THz-Datenbank .....	73
6.2	Messbarkeit von unebenen Oberflächen .....	76
6.3	Messbarkeit hinterfüllter Hohlräume .....	79
6.4	Systemanpassung und Vorbereitung mittels einer 3D-Testfläche .....	89
<b>7.</b>	<b>ERGEBNISSE ZUM BEARBEITUNGSZYKLUS-LABOR .....</b>	<b>90</b>
7.1	Ozonbehandlung und Hinterfüllung der Prüfkörper .....	91
7.2	THz-Untersuchung der Prüfkörper .....	92
7.2.1	Prüfkörper 21A.....	93
7.2.2	Prüfkörper 21B.....	96
7.3	Resümee des Bearbeitungszyklusses im Labor .....	99
<b>8.</b>	<b>ERGEBNISSE ZUM BEARBEITUNGSZYKLUS-SCHLOSSKAPELLE BÜCKEBURG .....</b>	<b>101</b>
8.1	Ergebnisse der Roboterarm-THz-Scans.....	103
8.1.1	Messfeld E1.....	108
8.1.2	Messfeld B2 .....	112
8.2	Resümee des Bearbeitungszyklusses am Objekt und des Projektes .....	116
<b>9.</b>	<b>LITERATURNACHWEIS .....</b>	<b>118</b>
<b>10.</b>	<b>QUELENNACHWEIS .....</b>	<b>118</b>
<b>11.</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>119</b>
11.1	Analyseergebnisse Konzeption .....	119
11.1.1	Feststoffabscheidung Kieselsol .....	119
11.1.2	Hinterfüllmörtelprotokolle.....	120
11.1.2.1	Mörtelreihe 1 .....	120
11.1.2.2	Mörtelreihe 5 .....	128
11.1.2.3	Mörtelreihe 9 .....	136
11.2	Analyseergebnisse Optimierung .....	139
11.2.1	Dokumentation Haftzugmessung.....	139

### 11.3 Technische Merkblätter Kieselsole ..... 146

#### Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Anmachw.	Anmachwasser
BM	Bindemittel
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Diagr.	Diagramm
Fa.	Firma
gem.	gemäß
HAWK	Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
HFuLT	TRANSMIT-Geschäftsbereich für Hochfrequenz- und Lasertechnik, Marburg
Kap.	Kapitel
M.%	Masse
max.	maximal
Nr.	Nummer
ps	Picosekunde
PE	Polyethylen
P2P	Peak to Peak
r.F.	relative Luftfeuchte
RT	Raumteil
Tab.	Tabelle
THz	Terahertz
THz-TDS	Terahertz Time-Domain-Spectroscopy / Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie
Vol. %	Volumenprozent
w/z-Wert	Wasserzementwert

#### Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Entzerrte Gesamtaufnahmen der Gewölbe der Schlosskapelle Bückeberg, gefertigt als Kartierungsvorlage von der Fa. Fokus GmbH Leipzig (2012) .....	10
<b>Abb. 2:</b> Sieblinie V5 Gipsputzmörtel 57598 .....	23
<b>Abb. 3:</b> Korngrößenverteilung V5 Gipsputzmörtel 57598 .....	23
<b>Abb. 4:</b> Fotografische Dokumentation Korngrößenverteilung V5 Gipsputzmörtel 57598 .....	24
<b>Abb. 5:</b> Sieblinie Kalkputz 57383 .....	25
<b>Abb. 6:</b> Korngrößenverteilung Kalkputz 57383 .....	25
<b>Abb. 7:</b> Fotografische Dokumentation Korngrößenverteilung Kalkputz 57383 .....	26
<b>Abb. 8:</b> Aufstellung der Fließform unter Testbedingung .....	34
<b>Abb. 9:</b> Testreihe 9.1 zur Sedimentationsgeschwindigkeit mit eingezeichneten Sedimentationsgrenzen (rot) nach sieben Tagen .....	37
<b>Abb. 10:</b> Penetrationstest Reihe 9.1 aller Mörtel nach zwei Tagen .....	38
<b>Abb. 11:</b> Trocknung der Hinterfüllmörtel im Rohring nach 2 Tagen auf PE Untergrund .....	39
<b>Abb. 12:</b> Trocknung der Hinterfüllmörtel im Rohring nach 2 Tagen auf Gips-Untergrund .....	39
<b>Abb. 13:</b> Auswertung zur Fließgeschwindigkeit Reihe 9.1 an der Schräge auf Gipsputz .....	41
<b>Abb. 14:</b> Prüfkörper mit Hinterfüllung der Mörtel der Prüfreihe KS 9.1 .....	41
<b>Abb.15:</b> Prüfkörper mit zwei definierten Hohlräumen aus Gipsputzmörtel 57598 (links) und HKCP Kalkputz 57383 (rechts) .....	45
<b>Abb. 16:</b> Technische Zeichnung der Abformelemente mit Bemaßung .....	46
<b>Abb. 17:</b> Prüfkörper 1. Testreihe Fakultät N .....	47
<b>Abb. 18:</b> Prüfkörper 1. Testreihe Philipps Universität Marburg .....	47
<b>Abb. 19:</b> Prüfkörperreihe zur Beurteilung von farblichen Veränderungen durch den Einsatz von	

Plasma/Ozon .....	48
<b>Abb. 20:</b> Links Prüfkörper mit Farbauftrag der ausgewählten Farbabfolgen, rechts nach Auftrag mit pigmentiertem Leinölfirnis .....	49
<b>Abb. 21:</b> Links: Eckbereich der Testfläche [...]. Rechts: Unteransicht der Testfläche [...]	50
<b>Abb. 22:</b> 3D-Modell aus Polyurethan mit Farbfassung .....	50
<b>Abb. 23:</b> Aufbau der Plasmaquelle DJ .....	51
<b>Abb. 24:</b> Plasmabehandlung des Prüfkörpers VVG01 .....	51
<b>Abb. 25:</b> Plasmabehandlung des Prüfkörper VVG02 .....	52
<b>Abb. 26:</b> Konzeptstudie Disc-Jet- Miniaturisierung.....	52
<b>Abb. 27:</b> Disc-Jet-Miniaturisierung.....	53
<b>Abb. 28:</b> Entladung der Disc-Jet-Miniaturisierung auf Gipsprüfkörpern .....	54
<b>Abb. 29:</b> Entladung der Disc-Jet-Miniaturisierung auf Hohlraumprüfkörpern .....	54
<b>Abb. 30:</b> Prüfkörper der Prüfreihe V5 Gipsputzmörtel 57598 mit Leinöl .....	57
<b>Abb. 29:</b> Prüfkörper der Prüfreihe HKCP Kalkputz 57383 mit Leinöl .....	57
<b>Abb. 30:</b> Links: Gipsmörtel Referenz; rechts: Gipsmörtel 20 s plasmabehandelt (je 750 x 750 µm) ...	58
<b>Abb. 31:</b> Links: Gipsmörtel Referenz; rechts: Gipsmörtel 20 s plasmabehandelt.....	58
<b>Abb. 32:</b> Links: Mikroskopie Referenz (750 x 750 µm); rechts: Topografie Referenz.....	59
<b>Abb. 33:</b> Links: Mikroskopie 2 s Plasma (750 x 750 µm); rechts: Topografie 2 s Plasma.....	59
<b>Abb. 34:</b> Links: Mikroskopie 20 s Plasma (750 x 750 µm); rechts: Topografie 20 s Plasma .....	59
<b>Abb. 35:</b> Aufbau einer Ozonbehandlung mittels Lavaldüse.....	62
<b>Abb. 36:</b> Modifizierung-OES .....	66
<b>Abb. 37:</b> Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der abgeformten Proben.....	74
<b>Abb. 40:</b> Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der in Tabletten gepressten Zuschläge.....	75
<b>Abb. 38:</b> Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der Bindemittelproben, die mittels THz-ATR-Spektroskopie vermessen wurden.....	75
<b>Abb. 39:</b> Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der Additive. Mowilith wurde in Form einer Tablette eingetrocknet und in Transmission vermessen, wobei die Additive WPC Romstadt und Tween 20® mittels THz ATR-Spektroskopie vermessen wurden .....	75
<b>Abb. 40:</b> Charakterisierung der maximal detektierbaren Winkelabweichung zwischen zwei Grenzflächen .....	76
<b>Abb. 41:</b> Ergebnis der auf THz-Daten basierten tomographischen Rekonstruktion eines Testkörpers mit Metallschicht auf der flachen Basisfläche (links). Querschnitte für konstante x- und y- Werte (rechts), die Position wird in der linken Grafik durch die gelb gestrichelten Linien verdeutlicht.....	77
<b>Abb. 42:</b> Tomographische Rekonstruktion der THz-Daten eines Testkörpers mit Metallschicht.....	78
<b>Abb. 43:</b> Tomographische Rekonstruktion der THz-Daten eines nicht-metallisierten Testkörpers ....	78
<b>Abb. 44:</b> Probe 1 (links) Probe 2 (rechts) .....	79
<b>Abb. 45:</b> Erklärung Zeitbereichsdatenpeaks .....	80
<b>Abb. 46:</b> Zeitbereichsdaten von Probe 1, oben: ohne Hinterfüllung, Mitte: mit Hinterfüllung, unten: mit Luftloch in der Hinterfüllung .....	81
<b>Abb. 50:</b> Zeitbereichsdaten von Probe 2, oben: mit Hinterfüllung, unten: mit Luftloch in der Hinterfüllung .....	82
<b>Abb. 47:</b> Probe 1 im Rasterscan, oben links: Fotografie der Oberfläche, oben rechts: Peak-zu-Peak- Amplitude, unten links: Intensität im Zeitbereich, der dem Oberflächenpuls entspricht, unten rechts: Intensität im Zeitbereich, der dem Puls im Zwischenraum entspricht .....	83
<b>Abb. 48:</b> Probe 2 im Rasterscan, oben links: Fotografie der Oberfläche, oben rechts: Peak-zu-Peak- Abstand, unten l.: Intensität an der Oberfläche, unten r.: Intensität im Zwischenraum .....	85
<b>Abb. 49:</b> Probe 2: Messpunkte zur Trocknungsuntersuchung.....	86
<b>Abb. 50:</b> Zeitbereichsdaten der neun Messpunkte zu Messbeginn.....	87
<b>Abb. 51:</b> Zeitbereichsdaten der neun Messpunkte zu Messende .....	87
<b>Abb. 52:</b> Peak-zu-Peak-Abstand von Oberflächen- und Endreflexpeak in Abhängigkeit der Messzeit bei allen neun Messpunkten.....	88

<b>Abb. 53:</b> Massenabnahme von Probe 2 in Abhängigkeit der Messzeit .....	89
<b>Abb. 54:</b> Systemvorbereitung für die Untersuchungen in der Schlosskapelle in Bückeberg.....	90
<b>Abb. 59:</b> Links Laboraufbau Hohlraumflutung mit Ozon, rechts Prüfkörperlagerung im Klimaschrank	91
<b>Abb. 60:</b> Foto des Prüfkörpers in der Seitenansicht (oben) und schematisch dargestellter Proben- querschnitt (unten) .....	92
<b>Abb. 61:</b> a) Foto des Prüfkörpers 21 A in der Draufsicht von der gewölbten Seite; b) Foto des entsprechenden Querschnittes ( $x = 4 \text{ mm}$ ) nach dem Durchsägen des hinterfüllten Prüfkörpers; c) der entsprechende aus der THz-Untersuchung erzeugte Querschnitt des Prüfkörpers .....	93
<b>Abb. 62:</b> THz-Messsignal für den nicht hinterfüllten Prüfkörper an der Position $y = 8 \text{ mm}$ .....	93
<b>Abb. 63:</b> a) Foto des zersägten Prüfkörpers 21 A in der Draufsicht von der flachen Seite; b) Foto des entsprechenden Querschnittes ( $x = 4 \text{ mm}$ ) nach dem Durchsägen des hinterfüllten Prüfkörpers; c) der entsprechende aus der THz-Untersuchung erzeugte Querschnitt des Prüfkörpers .....	94
<b>Abb. 55:</b> Am hinterfüllten Prüfkörper gewonnenes THz-Messsignal an der Position $y = 8 \text{ mm}$ .....	95
<b>Abb. 56:</b> Die normierten und vertikal verschobenen THz-Messsignale a) vor und b) nach dem Hinterfüllen .....	96
<b>Abb. 57:</b> Fotos von Prüfkörper 21 B a) von der untersuchten Seite nach dem Hinterfüllen, b) von der Rückseite nach dem Zersägen und c) vom Querschnitt mit dem auffälligen Bereich .....	97
<b>Abb. 58:</b> Die normierten und vertikal verschobenen THz-Messsignale a) vor und b) nach dem Hinterfüllen .....	97
<b>Abb. 59:</b> THz-Messsignal für den hinterfüllten Prüfkörper.....	98
<b>Abb. 60:</b> Prüfkörper 21A mit zwei Sägeschnitten mit Hohlräumen .....	99
<b>Abb. 70:</b> Prüfkörper 21 B mit vier Sägeschnitten mit Hohlräumen .....	99
<b>Abb. 71:</b> Oben: Übersicht über den Arbeitsbereich Schlosskapelle Bückeberg, links unten: THz- Messung an Fläche B, Mitte unten: Ozonbehandlung in Fläche E, rechts unten: Hinterfüllung in Fläche E .....	101
<b>Abb. 72:</b> Testfelder A, E und B in der Wandfläche.....	102
<b>Abb. 61:</b> Messfelder in der Testfläche von links A, E, B .....	102
<b>Abb. 62:</b> Ermittelte Oberflächenprofile der Testflächen A und E mit eingezeichneten THz- Messbereichen.....	103
<b>Abb. 75:</b> Ermittelte Oberflächenprofile der Testfläche B mit eingezeichneten THz-Messbereichen.	104
<b>Abb. 63:</b> THz-Peak-zu-Peak-Amplituden-Bild für Messbereich A1 vor und nach dem Hinterfüllen...	105
<b>Abb. 64:</b> THz-Peak-zu-Peak-Amplituden-Bild für die Messbereiche E1 und E2 vor und nach dem Hinterfüllen .....	105
<b>Abb. 65:</b> THz-Peak-zu-Peak-Amplitude für die Messbereiche B1 und B2 vor und nach dem Hinterfüllen .....	106
<b>Abb. 66:</b> Flugzeit des reflektierten THz-Pulses in Pikosekunden für den Messbereich E1 vor und nach dem Hinterfüllen.....	107
<b>Abb. 80:</b> THz-Flugzeit des reflektierten THz-Pulses in Pikosekunden für den Messbereich E1 vor und nach dem Hinterfüllen bei angeglichenen Peakpositionen .....	107
<b>Abb. 81:</b> Gemittelte Intensität im Zeitbereich der Oberfläche im Messbereich E1 jeweils vor und nach der Hinterfüllung .....	108
<b>Abb. 82:</b> Gemittelte Intensität im Zeitbereich eines vermutlichen Hohlraums im Messbereich E1 jeweils vor und nach der Hinterfüllung.....	109
<b>Abb. 83:</b> Gemessene THz-Signale in Abhängigkeit der Zeit an einem Punkt des identifizierten Hohlraums in Messbereich E1 .....	110
<b>Abb. 67:</b> Intensität in Abhängigkeit der Zeit entlang eines Schnitts parallel zur x-Achse um den Punkt $y = 180$ . Gezeigt sind zwei Messungen, die vor (links) und nach dem Hinterfüllen (rechts) von Messbereich E1 gewonnen wurden .....	109
<b>Abb. 68:</b> Intensität in Abhängigkeit der Messzeit entlang eines Schnitts der y-Achse am Punkt $x = 0$ für Messungen vor und nach dem Hinterfüllen von Messbereich E1 .....	111
<b>Abb. 69:</b> Gemittelte Intensität im Zeitbereich der Oberfläche im Messbereich B2 jeweils vor und nach	

der Hinterfüllung .....	112
<b>Abb. 70:</b> Gemittelte Intensität im Zeitbereich eines mutmaßlichen Hohlraums im Messbereich B2 jeweils vor und nach der Hinterfüllung.....	113
<b>Abb. 71:</b> Gemessene Amplituden in Abhängigkeit der Zeit an einem Punkt des identifizierten Hohlraums in Messbereich B2 .....	113
<b>Abb. 72:</b> Intensität in Abhängigkeit der Zeit entlang eines Schnitts der x-Achse bei y = 125 mm für Messungen vor und nach dem Hinterfüllen des Messbereichs B2 .....	114
<b>Abb. 90:</b> Intensität in Abhängigkeit der Zeit entlang eines Schnitts der y-Achse bei x = 221 mm für Messungen vor und nach dem Hinterfüllen des Messbereichs B2 .....	115
<b>Abb. 91:</b> Petrischalentest der Kieselol nach 9 Tagen .....	119

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Auflistung der Schichtenabfolge der Deckmalereien Schlosskapelle Bückeberg .....	14
<b>Tab. 2:</b> Eigenschaften des Bindemittels Köstrosol® 0830 AS .....	29
<b>Tab. 3:</b> Eigenschaften des Bindemittels Köstrosol® 1530 AS .....	29
<b>Tab. 4:</b> Eigenschaften des Bindemittels Köstrosol® 1030 KD.....	30
<b>Tab. 5:</b> Eigenschaften des Bindemittels Ludox® PX 30.....	30
<b>Tab. 7:</b> Rezeptur der kieselolgebundenen Mörtel der Prüfreihe 9 .....	36
<b>Tab. 8:</b> Beurteilung zum Fließvermögen an der Wand .....	40
<b>Tab. 9:</b> Beurteilung zum Fließvermögen an der Schräge .....	40
<b>Tab. 10:</b> Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der genutzten mit Kieselol geb. Mörtel.	43
<b>Tab. 11:</b> Untersuchungskataloge der Prüfkörper für die Plasma/Ozon Analysen .....	43
<b>Tab. 12:</b> Untersuchungskataloge der Prüfkörper für die THz-Analysen .....	44
<b>Tab. 13:</b> Pigmentauswahl und Bezeichnung .....	48
<b>Tab. 14:</b> Versuchsplan zu Analysen der Oberflächenenergie durch Plasmabehandlung.....	55
<b>Tab. 15:</b> Ozonbehandlung: Cadmiumrot Nr. 2 – Kremer Pigment 21130 & Eisenoxidschwarz 318 .....	63
<b>Tab. 16:</b> Plasmabehandlung: Cadmiumrot Nr. 2 – Kremer Pigment 21130 & Eisenoxidschwarz 318 ..	63
<b>Tab. 17:</b> Ozonbehandlung: Chromorange, bleihaltig – Kremer Pigment 4230 & Braunocker deutsch	63
<b>Tab. 18:</b> Plasmabehandlung: Chromorange, bleihaltig – Kremer Pigment 4230 & Braunocker.....	63
<b>Tab. 19:</b> Ozonbehandlung: Kremserweiß, Bleiweiß in Öl – Kremer Pigment 4023 & Chromoxidgrün.	64
<b>Tab. 20:</b> Plasmabehandlung: Kremserweiß, Bleiweiß in Öl – Kremer Pigment 4023 & Chromoxidg ...	64
<b>Tab. 21:</b> Ozonbehandlung: Blanc fix, Schwerspat natur, Bariumsulfat – Kremer Pigment 58700 .....	64
<b>Tab. 22:</b> Plasmabehandlung: Blanc fix, Schwerspat natur, Bariumsulfat .....	64
<b>Tab. 23:</b> Ozonbehandlung: Champagner Kreide – Deffner & Johann & Ultramarinblau hell .....	65
<b>Tab. 24:</b> Plasmabehandlung: Champagner Kreide – Deffner & Johann & Ultramarinblau hell .....	65
<b>Tab. 25:</b> Überblick der im THz-Frequenzbereich untersuchten Materialien .....	73
<b>Tab. 26:</b> Bezeichnung der analysierten Hohlraumprüfkörper .....	91

## Diagrammverzeichnis

### Diagrammverzeichnis

<b>Diagr. 1:</b> Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Gipsputzmörtel nach Plasmabehandlung	56
<b>Diagr. 2:</b> Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Kalkputzmörtel nach Plasmabehandlung.....	56
<b>Diagr. 3:</b> Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Gipsputzmörtel nach Ozonbehandlung.....	59
<b>Diagr. 4:</b> Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Kalkputzmörtel nach Ozonbehandlung.....	60
<b>Diagr. 5:</b> Wasseraufnahme nach Plasma- und Ozonbehandlung vonV5 Gipsputzmörtel 57598	66

<b>Diagr. 6:</b> Wasseraufnahme nach Plasma- und Ozonbehandlung von HKCP Kalkputz 57383 .....	67
<b>Diagr. 7:</b> Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Gipsputzmörtel KS 9.1 830 B .....	68
<b>Diagr. 7:</b> Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Kalkputzmörtel KS 9.1 830 B .....	69
<b>Diagr. 8:</b> Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Gipsputzmörtel KS 1.1 830 B .....	69
<b>Diagr. 9:</b> Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Kalkputzmörtel KS 1.1 830 B .....	70
<b>Diagr. 10:</b> Feststoffabscheidung der Kieselsole .....	118

## 1. Einleitung

Das Forschungsprojekt untersuchte einen neuartigen Bearbeitungszyklus zur verbesserten Anbindung und Überprüfung von Hohlraumhinterfüllungen an Wandmalereien. Bei der Erhaltung historischer Putzschichten, meist Träger von historischen Fassungen und/oder Malschichten, stellen sich aus konservatorischer Sicht zunehmend Fragen nach dem Umgang mit historischen Restaurierungen besonders hinsichtlich des Wirkungsgrades der früher verwendeten Materialien. Wiederkehrend finden sich bei vielen Objekten Materialablösungen (Putz-, Fassung- und Malschichten), auch auf Grund unterschiedlicher Alterungseigenschaften, die durch anthropogene Einflüsse maßgeblich bestimmt werden. Vor allem die Anbindung von Hinterfüllmörteln an zum Teil sehr glatten Oberflächen von historischen Gips- und Kalkmörteln stellt eine große Herausforderung im konservatorischen Umgang dar.

Viele der im Laufe der Restaurierungsgeschichte eingesetzten Materialien wurden vor ihrer Anwendung gar nicht oder nur ungenügend auf ihre Verträglichkeit hin untersucht. Vor dem Einsatz neuer Materialien steht heutzutage deren vorherige umfangreiche Analyse in der Restaurierungswissenschaft an oberster Stelle. Das Ziel aller zukünftigen konservatorischen Arbeiten rund um das Zusammenwirken unterschiedlicher Mörtelsubstanzen muss es sein, durch den Einsatz langfristig greifender, zerstörungsfreier Maßnahmen eine bestmögliche Materialanbindung zu schaffen. Modellhaft wurde dies in diesem Forschungsprojekt mit einem neuartigen Bearbeitungszyklus an den wertvollen Wand- und Deckenmalereien der Schlosskapelle Bückeberg, welche stellvertretend für viele nationale Wandmalereiobjekte mit ähnlicher Schadensdimension stehen, realisiert. Diese Erforschung zur verbesserten Anbindung bei Hohlraumhinterfüllungen wurde in einem interdisziplinären Forschungsvorhaben, bestehend aus drei Teildisziplinen mit unterschiedlichen technologischen Schwerpunkten, ausgehend von Laboranalysen am Objekt umgesetzt.



**Abb. 73:** Entzerrte Gesamtaufnahmen der Gewölbe der Schlosskapelle Bückeberg, gefertigt als Kartierungsvorlage von der Fa. Fokus GmbH Leipzig (2012)

Bereits durch die an der Fakultät Bauen und Erhalten (B) der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) im Jahr 2013/14 durchgeführte Maßnahmenbetreuung und Notsicherung der

national wertvollen Deckenmalereien in der Schlosskapelle der Bückeburg wurde die Notwendigkeit deutlich, sich mit der Hohlraumproblematik bei sog. Altrestaurierungen intensiver zu befassen. (Zur Kunst- und Restaurierungsgeschichte siehe Kapitel 3.1. und 3.2.) Die Voruntersuchungen an über die gesamte Deckenfläche entnommenen Proben zeigten bereits, dass seit der Entstehung der spätgotischen Malereien, ihrer späteren Übermalung im frühen 17. Jh. und der rekonstruierenden Neuschöpfung in verschiedenen Restaurierungsphasen Mörtelmaterialien verschiedenster Zusammensetzung in großen und kleinen Teilbereichen genutzt wurden; Materialien, die vor allem auch auf Grund ihrer physikalischen Eigenschaften oft keinen guten Verbund aufweisen. Innerhalb dieses Projektes wurden sowohl Bereiche aus den 2014 konservatorisch und restauratorisch bearbeiteten Deckenmalereien als auch der im 21. Jh. unbearbeiteten Wandmalereiflächen genauer betrachtet und in der Laborphase zum objektbezogenen Bearbeitungszyklus aufgenommen.

Hierbei setzte das Projekt bei einer eigenen Injektionsmörtelkonzeption auf bis dato in der Restaurierung noch nicht gebräuchlichen Partikelgrößen von unterschiedlichen Kieselolen aus der Industrie als Bindemittel an. Die Forschungsgruppe versprach sich, ausgehend von einer Grundrezeptur durch den geringeren und variierbaren Einsatz von Partikelgrößen einen klaren Vorteil gegenüber den konventionellen Restaurierungsmörteln. Dieser Vorteil bewahrheitete sich vor allem in der besseren Einstellung der Fließfähigkeit und Anbindung für Hohlräume unterschiedlichster Größe. Zudem wurde eine optimale Anhaftung vor allem an glatten Oberflächen der Grenzflächen angestrebt. Besonders an diesen Flächen sollte eine verbesserte Haftfestigkeit der eingesetzten Mörtel an Hohlraumgrenzflächen durch die neuartige Behandlung der Hohlräume (Oberflächenaktivierung) durch die Einleitung von Kaltplasma (20-30°C)/Ozon erforscht werden. Für die vorherige exakte Vermessung der Hohlräume sowie die Überprüfung des Wirkungsgrades der Plasmabearbeitung und Anbindung der Hohlraumhinterfüllungen wurde THz-TDS (Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie) eingesetzt. Der Bearbeitungszyklus wurde an den 2013/14 nicht bearbeiteten Wandflächen der Decken- und Wandmalereien umgesetzt.

Der Ergebnisstand der Forschung aus diesem Projekt wird in jeweiligen Unterkapiteln der drei Arbeitsgruppen (HAWK Fakultät Bauen und Erhalten, Fakultät Ingenieurwissenschaften und Gesundheit, Philipps-Universität Marburg Fachbereich Physik) dargestellt. Die Zusammenführung der Untersuchungsergebnisse und die gemeinsame Umsetzung am Objekt wird in den Kapiteln 7 und 8 dargestellt.

## 2. Zusammenfassung der Untersuchungspakete der Projektphasen

### • **Materialauswahl und Materialanalyse / Voruntersuchungen am Objekt**

Voruntersuchungen am Objekt betrafen die potentiellen Testflächen zur Umsetzung des Bearbeitungszyklusses. Hierfür wurde ein Wandbereich in der Schlosskapelle genau begutachtet, entstehungszeitliche Einordnungen der Putzvorkommen vorgenommen und mikroskopische Analysen an Proben durchgeführt. Ausgehend von den Putzanalysen wurden Putzmörtelmischungen gefertigt, die für die Herstellung von Prüfkörpern, wie Hohlraumprüfkörpern, dienen. Ausgehend von den bereits 2014 am Objekt genutzten Hinterfüllmörteln wurden weitere Neuentwicklungen von verbindenden Hinterfüllmörteln erarbeitet.

### • **Ermittlung von Materialeigenschaften der Hinterfüllmörtel**

Zur Ermittlung der Materialeigenschaften der entwickelten Hinterfüllmörtel wurden zahlreiche Untersuchungen vorgenommen. Die ausgewählten Mörtelmischungen wurden mit Prüfungsmethoden zu Konsistenz, Fließgeschwindigkeit, Kanülangängigkeit, Sedimentationsgeschwindigkeit, Penetrationsverhalten, Trocknungsverhalten, Anbindungsverhalten, Schrumpfungsverhalten und Verteilung im Hohlraum untersucht. Durch Untersuchungen mittels mikroskopischer Analyse (VHX-Digital-Mikroskop) konnten die in den THz-Messungen erzielten Ergebnisse zur Ablösung bzw. Anbindung des Hinterfüllmörtels im Hohlraum überprüft werden. Haftzugprüfungen an verfüllten gips- und kalkputzbasierten Putzprüfkörpern wurden zur Überprüfung des Anbindungsverhaltens von ausgewählten Hinterfüllmörteln vorgenommen.

### • **Identifikation relevanter Kenndaten für die THz-Analyse und Auswertung**

Es wurde die Charakterisierung ausgewählter Materialien im THz-Frequenzbereich (Materialdatenbank) und die Identifizierung dielektrischer Parameter vorgenommen. Aufgenommen in diese Untersuchungsreihe wurden alle im Rahmen des Projektes verwendeten Putze, Bindemittel, Zuschläge und Zusätze. Dies geschah, um Kennwerte für spätere THz-Analysen am Objekt vorliegen zu haben, maximal messbare Materialdicken einschätzen und Datensätze der Messungen am Objekt optimal auswerten zu können.

### • **Identifikation relevanter Kenndaten für die Nutzung von Plasma/Ozon**

Zur Nutzung von Kaltplasma/Ozon an historischen Putzflächen gab es vor Projektbeginn keine Datenlage, auf die zurückgegriffen werden konnte. Daher wurden umfangreiche Voruntersuchungen zum Einfluss von Plasma und Ozon auf die optische und oberflächenenergetische Veränderung der Materialien wie Putzmörtel und Fassung getätigt.

### • **Umsetzung des Bearbeitungszyklusses am Objekt**

Vor der Umsetzung am Objekt wurden konzipierte Hohlraumprüfkörper dem Bearbeitungszyklus – Vermessung, Ozonflutung, Verfüllung, Vermessung – unterzogen und durch Auftrennung der Prüfkörper optisch überprüft. Die Umsetzung des Bearbeitungszyklusses erfolgte innerhalb einer Woche am Objekt in Bückeberg im Juli 2021.

### 3. Objektvorstellung Schlosskapelle Bückeberg und ihre Wandmalereien: Kunst- und Restaurierungsgeschichte

#### 3.1 Kunstgeschichte

Die Kapelle ist ein spätgotischer Saalbau mit rundbogigem Kreuzrippengewölbe, das wohl unter Johann IV. um 1500 eingezogen wurde. Über die damalige Ausmalung und Ausstattung ist nichts bekannt, abgesehen von geringen restauratorischen Befunden, die auf eine Bemalung des Deckengewölbes hinweisen.<sup>1</sup> Eine vollständige, sehr reiche Neuausstattung der Kapelle im Stil der Spätrenaissance erfolgte unter Fürst Ernst 1603-08; beteiligt waren die Bildhauer Gebrüder Ebbert und H. Wulff, der sächsische Hofarchitekt G. M. Nosseni und vermutlich auch der Maler J. Hopfe.

Bemerkenswert sind die Wandmalereien, die direkt auf den spätgotischen Architekturoberflächen ausgeführt wurden, in Kalktechnik mit hohem Anteil organischer Bindemittel.<sup>2</sup> Die Wandteile oberhalb der Vertäfelung und das Gewölbe sind „übersponnen von einem bizarren Geschlinge gemalter Schweif- und Rollwerkformen mit vegetabilen Detailbildungen und eingegliederten Engelsfiguren; über Kanzelwand und Portal Verdichtung des Grotteskendekors zu phantastischen Architekturgebilden, angeregt durch die Architekturphantasien W. Dietterlins; in den Laibungen der Nordwand große Passionsszenen.“<sup>3</sup> Diese Wandmalereien sind heute nur durch die nachschöpferische Übermalung von 1886 überliefert, was in der kunsthistorischen Literatur kaum berücksichtigt wird.

#### 3.2 Restaurierungsgeschichte

Die Wandmalereien aus dem frühen 17. Jh. wurden zu einem archivalisch nicht erfassbaren Zeitpunkt komplett übertüncht. 1886 wurden sie durch Prof. Müller aus Düsseldorf im Auftrag des Fürsten Georg Adolf freigelegt (siehe Akte II NLD; Riedl, 2013-14, vermutet einen Kleisterstrappo als Freilegetechnik) und nach damaliger Auffassung restauriert, d.h. de facto nachschöpferisch übermalt und in den umfangreichen neu verputzten Fehlstellenbereichen malerisch ergänzt. Aus dem Bericht des Kirchenmalers R. Droste ergibt sich, dass Prof. Müller damals etliche Bereiche neu verputzt und mit Figuren und Ornamenten bemalt sowie die ganze Malerei abschließend mit einer Schellacklösung überspritzt hat (Droste 1954, in Akte II NLD). N. Riedl identifiziert diese Beschichtung als mehrlagigen Leinölüberzug (Riedl 2013-14).

1945 wurde das Kapellengewölbe durch eine einschlagende Granate erschüttert. Nach dem 2. Weltkrieg wurden die Wandmalereien als „außerordentlich schadhaft“<sup>4</sup> bezeichnet. Der Kirchenmaler Droste führte eine Proberestaurierung an einer Wandfläche oberhalb der Empore durch. Im Laufe der Jahre 1952-53 folgte die Restaurierung der Wandmalereien durch Droste. So berichtet Dr. André von der Dienststelle Denkmalpflege am 26.01.53, dass die Restaurierung der Gewölbemalereien im westlichen Joch durchgeführt wurde. Im Schlussbericht vom 23.01.1954 beschreibt Droste, dass er die Wandmalereien abschließend mit einer Bienenwachslösung überzogen habe und dass eine Rippe des Chorgewölbes durch eine Verankerung mit U-Eisen gesichert und eingekittet wurde. Droste erwähnt nicht, dass er malerische Ergänzungen in Öltechnik durchgeführt hat (siehe Riedl 2013-14); ebenso wenig geht er auf von ihm durchgeführte Kittungen und Hinterfüllungen ein. Eine weitere Renovierungs- und Restaurierungsphase erfolgte in den 1970er Jahren. Die Wandmalereien wurden dabei mit einer Beschichtung aus Leinöl mit einem Naturharzzusatz überzogen. Diese Beschichtung

<sup>1</sup> Droste 1954 in Akte II NLD und Riedel 213-2014

<sup>2</sup> Riedl, 2013-2014

<sup>3</sup> siehe Dehio, Ausgabe 1992, S. 311

<sup>4</sup> Gutachten 19.07.51, in: Akte II NLD

trägt in Verbindung mit den älteren Beschichtungen, allesamt stark gealtert, wesentlich zur starken Verbräunung der Wandmalereien bei.<sup>5</sup> Einen Überblick über den Schichtaufbau der Malereien bezogen auf ihre Entstehungs- und Restaurierungsgeschichte bietet die im Rahmen der Voruntersuchungen 2013-14 in Bezug auf Materialanalysen entstandene tabellarische Auflistung.

**Tab. 1: Auflistung der Schichtenabfolge der Deckmalereien Schlosskapelle Bückeberg**

Schichtenabfolge	Beschreibung	Materialzusammensetzung <sup>6</sup>	Interpretation
<b>01</b>	Kapellenostwand ist Teil des ehem. mittelalterlichen Wohnturms, Kapellennordwand ist Teil der Wehrmauer der ehem. Wasserburg	Regelmäßiges mittelalterliches Bruchsteinmauerwerk aus Sandstein der Region (Oberkirchner Sandstein) im Bereich des ehem. Wohnturms	Wasserburg aus dem Jahren <b>1302-04</b>
	<b>Gotische Malerei</b>		
<b>002</b>	Einzug des gotischen Gewölbes	Gewölbeschale aus Ziegelmauerwerk, Chorbogen aus Sandstein der Region (Oberkirchner Sandstein)	1396 Errichtung der Burgkapelle
<b>02</b>	Helle Grundierung	Homogene Schicht aus Kalk mit organischen Bindemitteln (Tempera: Öl/Protein), rotbraune Eisenpigmente	Gotische Ausmalung
<b>2</b>	Helle Fassungsschicht	Kalkmalerei mit reichlich organischem Bindemittel (Tempera: Öl/Protein), rote und gelbe Eisenalumosilikate und Eisenoxidhydroxid	Gotische Ausmalung, graue und grüne Federornamente auf rotem Grund, steinfarbige Rippen mit schwarz abgesetzt
	<b>Renaissancemalerei</b>		<b>1560-63</b> Bau der vierflügeligen Schlossanlage
<b>03</b>	Tüncheschichten mit deutlichem Pinselduktus, heute nur im Streiflicht erkennbar, ausgeprägtes kleinteiliges Craquelé	Grundierung in Kalktechnik mit organischem Bindemittelzusatz (Tempera: Öl/Protein)	Auftrag der Renaissancemalerei über der bestehenden gotischen Ausmalung
<b>3</b>	Polychrome Reste der Renaissancemalerei mit ausgeprägtem Craquelé	Kalkmalerei mit reichem organischem Bindemittelzusatz (Tempera: Öl/Protein), Bleiweiß, Bleizinnigelb, Holzkohle, Ocker, Zinnober, Braune Erde	Renaissancemalerei von <b>1601-1604</b>
	<b>Übertünchung</b>		
<b>4</b>	Helle Übertünchung der Renaissancemalerei	Freilegung mit Kleisterstrappo, Überzug aus Schellack	Freilegung der renaissancezeitlichen Malerei 1880

<sup>5</sup> Zusammenfassende Ergebnisse der Recherche zur Restaurierungsgeschichte von Prof. Dr. Schädler-Saub (2018)

<sup>6</sup> Angaben zu den Materialien beziehen sich auf die Analyseergebnisse von DREWELLO & WEIßMANN (2014)

Schichten- abfolge	Beschreibung	Materialzusammensetzung <sup>7</sup>	Interpretation
<b>19. Jh. Rekonstruierende Neuschaffung</b>			
005	Hellgrauer, sehr feiner und harter Mörtel mit vereinzelt erkennbaren weißen Gallen, mehrlagig aufgetragen, Oberfläche rau	Bindemittelreicher Kalkgipsputzmörtel mit organischem Bindemittelzusatz (Öl); Gips: Kalkmischungsverhältnis 2:1, Zuschlag aus schlecht gerundetem silikatischem Material und Gips als Zuschlag, die Oberfläche des Mörtels ist mit Öl durchtränkt	Umfangreiche Neuput- zung der Wand- und Deckenflächen
05	Helle Grundierung ohne deutlichen Pinselduktus auf der rauen Putzoberfläche	Grundierung aus Ölmalerei, Bindemittel Öl und Bleiseifen, Bleiweiß, Holzkohle, Braune Erde, roter Lack, etwas Kalk	1880- 86 neu- schaffende Rekonstruktion der Malerei des frühen 17. Jh.
5	Farbintensive polychrome Malerei mit feinem typischem Ölmalereiduktus	Polychrome Malschicht in Öltechnik, Bleiweiß, Holzkohle, Braune Erde, Bleichromat, Eisenoxid, Karminlack, Chromrot, Bariumsulfat, gelber Ocker, Chromgrün, grüner Lüster, Schlagmetallschichten	1894-98 Erweiterung des Schlosses, große Renovierungsphase
	Brauner Überzug	Mindestens zweilagig aufgetragener Öllack	
<b>1950er Jahre Renovierung</b>			
006	Ausbesserungsmörtel, weich, hell und mit glatter Oberfläche auf der Malereifläche, Metallanker sind mit einem dunklen Kitt eingesetzt	Bindemittelreicher Kalkmörtel, Calcit und Aragonit wenig Gips, hoher Anteil an gelöschtem aber nicht carbonatisiertem Calciumhydroxid, Zuschlag besteht aus gerundetem silikatischem Sand, dunkle Kittmasse aus Ölkitt, Öl, Kalk und Calciumseifen vermutlich mit Metallschlacke als Zuschlag	1952 Restaurierung der Wand- und Deckenmalerei, Malschichtfestigung mit Kasein, Tränken des Malereigrundes mit Leinöl, Neuput- zung mit Zement- mörtel, Wachsüberzug
06	Helle Grundierung	Grundierung in Öltechnik mit Zink- und Bleiseifen	
6	Polychrome Malerei ohne deutlichen Pinselduktus	Malerei in Öltechnik mit Öl und Metallseifen, Chrompigmente, Zink- und Bleiseifen, Wachsfilm auf der Oberfläche	
<b>1970er Jahre Renovierungsphase</b>			
07		Rötliche Grundierung in Öltechnik, Bleiweiß, Holzkohle, Rotpigment	
7		Reine Bleiweißfassung	
8	Brauner, klebriger Überzug	Öllack aus gealtertem Leinöl und Naturharzzusatz, vermutlich Sandarak, mindestens zweilagig aufgetragen	

<sup>7</sup> Angaben zu den Materialien beziehen sich auf die Analyseergebnisse von DREWELLO & WEIßMANN (2014)

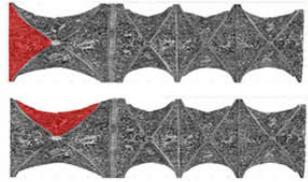
## 4. Fakultät Bauen und Erhalten – Konzeption

### 4.1 Festlegung der Pilotfläche

Gemeinsam mit der Fa. Konservierungswerkstatt Belter/Leupold, die bereits die letzten Restaurierungsmaßnahmen 2013/14 durchgeführt hat, wurden mehrere potentielle Pilotflächen festgelegt. Hinsichtlich des Forschungszieles, einen verbesserten Arbeitszyklus hinsichtlich der Hohlraumbemaßung, Anbindungsverbesserung und Maßnahmenüberprüfung bei Hohlraumhinterfüllungen zu nutzen, wurden auch in jüngster Zeit nicht restaurierte Wandflächen in die Auswahl mit einbezogen, welche die Hohlraumproblematik aufweisen. Die Bezeichnung der Flächen erfolgt nach den bereits im Untersuchungsbericht Belter/Leupold genutzten Kartierungen und Aufteilungen der Gewölbesegmente.

Die Auswahl fiel auf Bereiche in den Zwickel des Gewölbeseigel 1 in Verbindung zur Kappe 5 und den darunterliegenden Wandflächen. Es handelt sich hierbei um Flächen zur Außenwand Richtung Süd/Ost und der östlichen Innenfläche. Hier zeigen sich vor allem in den Wandbereichen erhebliche Ablösungen von unterschiedlichen Mörtelsystemen (d.h. Mörtelschichten aus verschiedenen Bau- und Gestaltungsphasen) sowie die durch akustische Detektion festzustellende Ausbreitung von Hohlräumen in der Fläche. Ebenfalls in die Auswahl aufgenommen wurden bereits restaurierte Bereiche im Zwickel zwischen dem Gewölbeseigel und der Kappe. Bereits vorhandene Bohrlöcher, die zur Hinterfüllung und somit zur Anbindung der Deckenfläche im Bereich der Zwickel angebracht wurden, sollen für weitere Untersuchungen genutzt werden können. Auch hier lagen nach akustischer Detektion weitere Hohlräume in den bereits restaurierten Flächen vor. Dies war aufgrund der Zielsetzungen der Maßnahmen von 2014 so zu erwarten. Bei diesen waren anbindende Hinterfüllungen von zum Teil großen Hohlräumen statt vollflächige Hinterfüllungen vorgegeben. Eine Begründung hierfür ist auch in der Belastung auf die Oberfläche, d.h. auf die Verputz- und Malschichten, zu sehen, die bei Einbringung einer im Gewicht zu umfangreichen Materialhinterfüllung zu erwarten war. Die Hohlräume konnten zum Zeitpunkt der Maßnahmen nur abgeschätzt, nicht aber durch genaue Vermessung bezüglich der Hinterfüllung kalkuliert werden.

Zusätzliches Kriterium für die Auswahl der Pilotflächen ist eine leichte Zugänglichkeit zu den Untersuchungsfeldern, die keine zusätzliche Einrüstung nötig macht. Der ausgewählte Bereich ist über die Orgelempore für alle weiteren Untersuchungen und Anwendungen gut zu erreichen. Eine zusätzliche schwingungsfreie Einrüstung für die Analysen mittels THz-Strahlung ist nicht notwendig. Im Folgenden werden Kartierungen der Pilotfläche hinsichtlich der verschiedenen historischen Putze (soweit sie optisch zu beurteilen waren) und der ausgewählten potentiellen Mess- und Bearbeitungsflächen dargestellt. Die Kartierung wurde unter Nutzung von metigo MAP erstellt.

<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Objekt</b> Schlosskapelle Decken- Wandmalerei	<b>Thema</b> Putzbereiche in der Pilotfläche	<b>Lokalisierung</b> 
	<b>Bearbeiter</b> Carla Leupold Kirsti Krügener		
<b>Datum</b> 14.03.2018	<b>Bauteil</b> Gewölbesegeel 1, Kappe 5 und darunterliegende Wände		

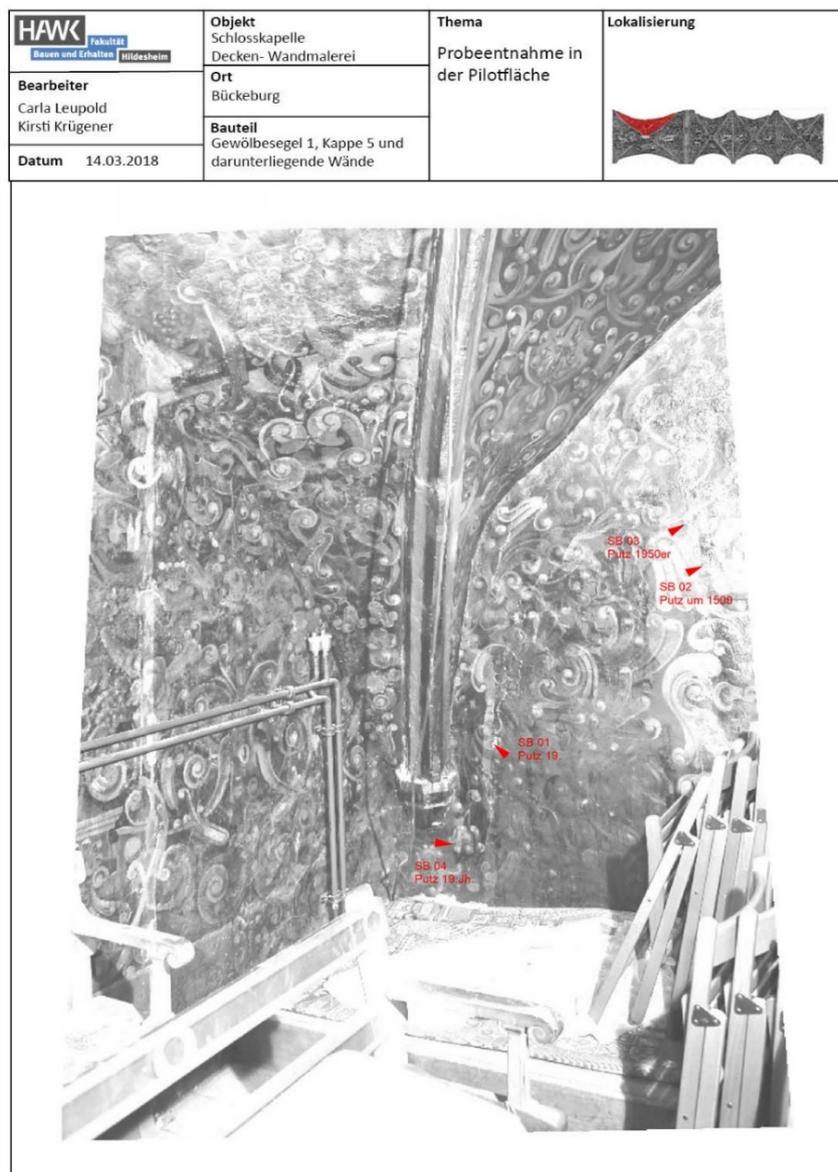


<b>HAWK</b> Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Objekt</b> Schlosskapelle Decken- Wandmalerei	<b>Thema</b> Potentielle Mess- felder in der Pilot- fläche	<b>Lokalisierung</b> 
	<b>Ort</b> Bückeburg		
<b>Bearbeiter</b> Carla Leupold Kirsti Krügener	<b>Bauteil</b> Gewölbeseigel 1, Kappe 5 und darunterliegende Wände		
<b>Datum</b> 14.03.2018			



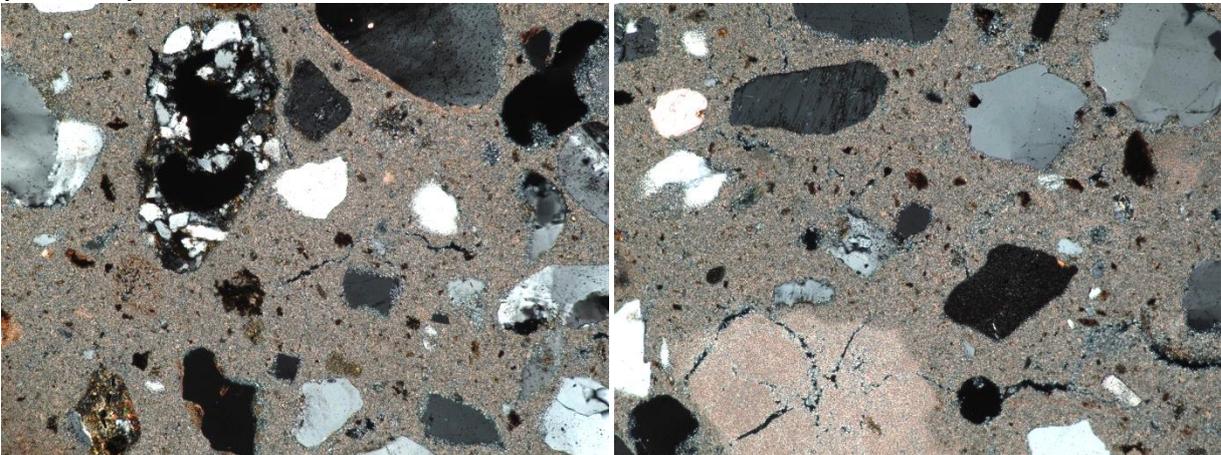
## 4.2 Probenentnahme an der Pilotfläche

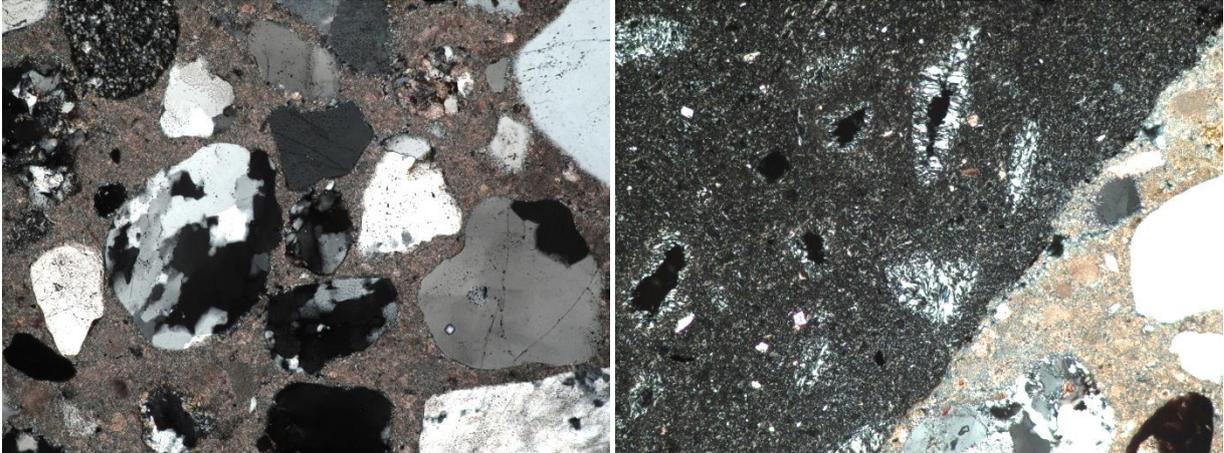
Da die genaue Zusammensetzung der Mörtelsysteme im Bereich der Testflächen auf Grundlage der bisherigen Untersuchungsergebnisse<sup>8</sup> nicht eindeutig geklärt werden konnte, wurde in Absprache mit dem Fachbeirat (Frau Dr. Egloffstein, Herrn Dr. Stadlbauer) sowie mit dem Leiter der Bauabteilung von Schloss Bückeberg Herrn Weh, eine weitere Probenentnahme im Bereich der Pilotflächen vereinbart. Für die Probenentnahme wurden Bereiche gewählt, die bereits Schädigungen an den Kanten der Putzmörtelflächen aufwiesen. Es wurden insgesamt vier Proben entnommen, wobei nur von drei Putzmörteln Dünnschliffe gefertigt und analysiert werden konnten. Zwei der vier Putzmörtel (SB 01 und SB 04) zeigten nach erster mikroskopischer Beurteilung durch Frau Dr. Kraus (IFS Mainz) identische Zusammensetzungen, daher wurde die Schliffanalyse auf drei Putzmörtel und Mörtelmischungen reduziert. Im Folgenden werden die Kartierung der Probeentnahmestellen, Proben und Schliffauswertungen vorgestellt.

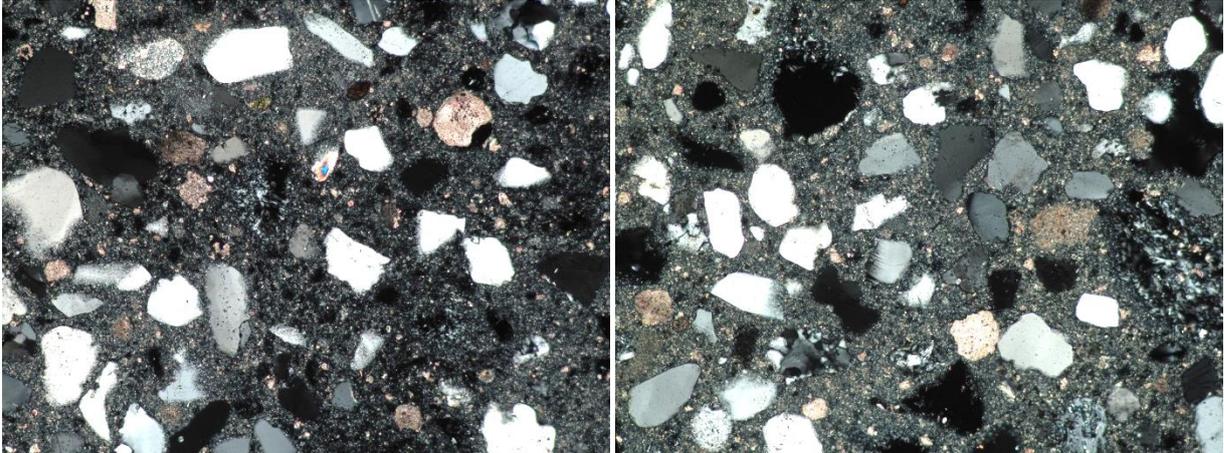


<sup>8</sup> Analyseergebnisse von DREWELLO & WEIßMANN (2014)

### 4.3 Probenauswertung

<b>PROBENENTNAHME</b> 	<b>Bearbeiter</b> Carla Leupold Kirsti Krügener
<b>Ort:</b> Bückeburg	<b>Datum:</b> 09.05.2018
<b>Objekt:</b> Decken-Wandmalerei	<b>Probenentnahmestelle:</b> Wandfläche unter Kappe 5
<b>Methode der Probennahme:</b> Wand unter Kappe 5	<b>Befund-Nr:</b> <b>SB 02</b>
<b>Probenart:</b> Putzmörtel mit min. Malschicht	
<b>Kurzbeschreibung:</b> Nach optischer Zuordnung an der Malerei wird die spätgotische Putzschicht, die auch Träger der Malerei des frühen 17. Jh. und der Übermalung des 19. Jh. ist vermutet. <b>Fragestellung:</b> Welche Mörtelzusammensetzung liegt vor?	
Probeentnahmestelle	
	
<b>Dünnschliffe Aufnahme bei Doppelpolarisation, lange Achse 1,25 mm (M 4593-2)</b>	
	
<b>Auswertung Dr. K. Kraus (IFS):</b> Reiner Kalkmörtel mit silikatischem Sand, homogen	

<b>PROBENENTNAHME</b> 	<b>Bearbeiter</b> Carla Leupold Kirsti Krügener
<b>Ort:</b> Bückeburg	<b>Datum:</b> 09.05.2018
<b>Objekt:</b> Decken-Wandmalerei	<b>Probenentnahmestelle:</b> Wandfläche unter Kappe 5
<b>Methode der Probennahme:</b> Wand unter Kappe 5	<b>Befund-Nr:</b> <b>SB 03</b>
<b>Probenart:</b> Putzmörtel mit min. Malschicht	
<b>Kurzbeschreibung:</b> Nach optischer Zuordnung an der Malerei (malerische Ergänzung von 1952-53) wird der Putz in die 1950er Jahre eingeordnet. <b>Fragestellung:</b> Welche Mörtelzusammensetzung liegt vor? Probeentnahmestelle	
	
<b>Dünnschliffe Aufnahme bei Doppelpolarisation, lange Achse 1,25 mm (M 4593-3A, links und M 4593-3B, rechts)</b>	
	
<b>Auswertung Dr. K. Kraus (IFS):</b> (2 Mörtel A, B), A: reiner Kalkmörtel vgl. SB02, B: Gipsputzmörtel (zuschlagfrei, 20. Jh.?)	

<b>PROBENENTNAHME</b>  Fakultät Bauen und Erhalten Hildesheim	<b>Bearbeiter</b> Carla Leupold Kirsti Krügener
<b>Ort:</b> Bückeburg	<b>Datum:</b> 09.05.2018
<b>Objekt:</b> Decken-Wandmalerei	<b>Probenentnahmestelle:</b> Wandfläche unter Kappe 5
<b>Methode der Probennahme:</b> Wand unter Kappe 5	<b>Befund-Nr:</b> <b>SB 04</b>
<b>Probenart:</b> Putzmörtel mit min. Malschicht	
<b>Kurzbeschreibung:</b> Nach optischer Zuordnung an der Malerei (Übermalung von 1886) wird der Putz ins 19. Jh. eingeordnet. <b>Fragestellung:</b> Welche Mörtelzusammensetzung liegt vor? Probeentnahmestelle	
	
<b>Dünnschliffe Aufnahme bei Doppelpolarisation, lange Achse 1,25 mm (M4593-4)</b>	
	
<b>Auswertung Dr. K. Kraus (IFS):</b> Gipsputzmörtel, geringer Löschkalkanteil (max. 10 %) mit Zuschlag (Quarzsand, aber auch Kalksteinsplitt), sehr inhomogen	

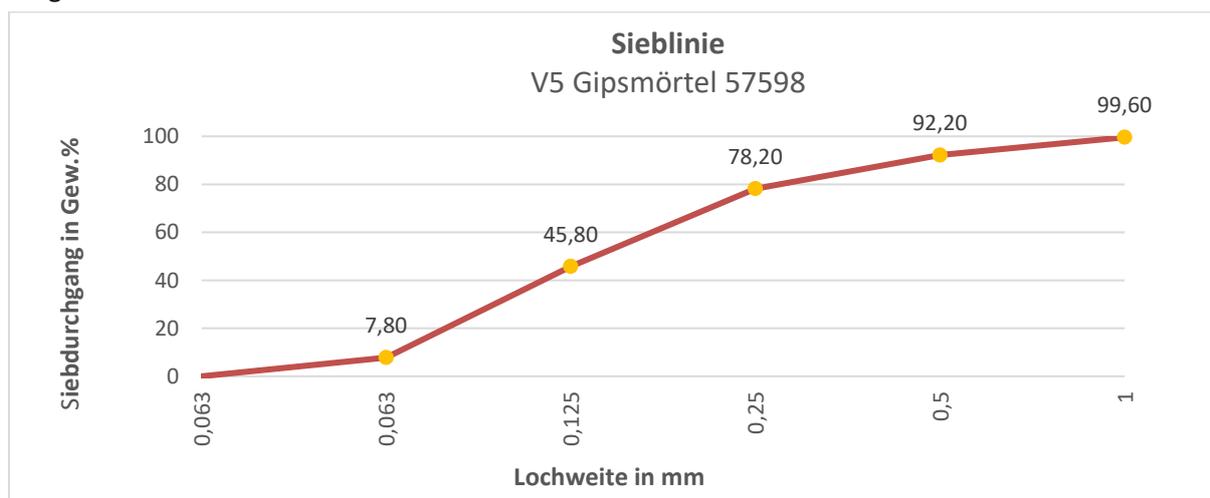
#### 4.4 Putzmörtelzusammensetzung

Auf Basis der Ergebnisse der Schlifffanalysen aus Kapitel 4.3 erfolgte in Absprache mit dem Fachbeirat, Frau Dr. Egloffstein, die Erstellung von zwei Putzmörtelmischungen für die Herstellung von Hohlraum- und Verbundprüfkörper. Diese Prüfkörper wurden sowohl für Laboranalysen, als auch für die Simulation des neuartigen Bearbeitungszyklus unter Laborbedingungen hergestellt. Die Auswahl fiel auf:

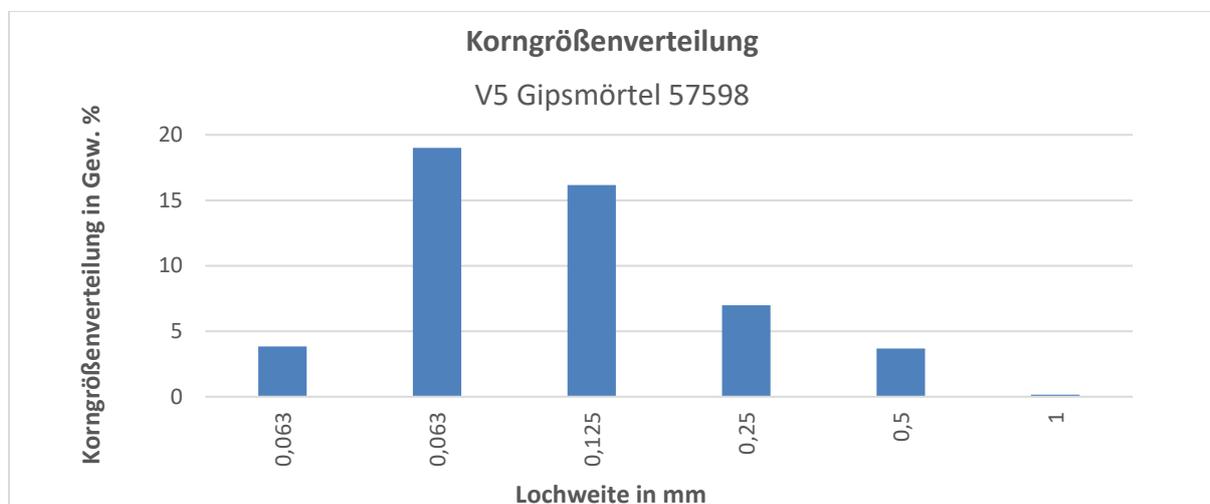
- Gips Mörtel – V5 Gipsputzmörtel 57598
- Gips und Kalkmörtel (2:1) – HKCP Kalkputz 57383

Unter Beratung mit Herrn Simon von der Fa. Tubag Trass Vertrieb GmbH wurden diese Mörtelmischungen bei Tubag unter Berücksichtigung der Zuschläge hergestellt.

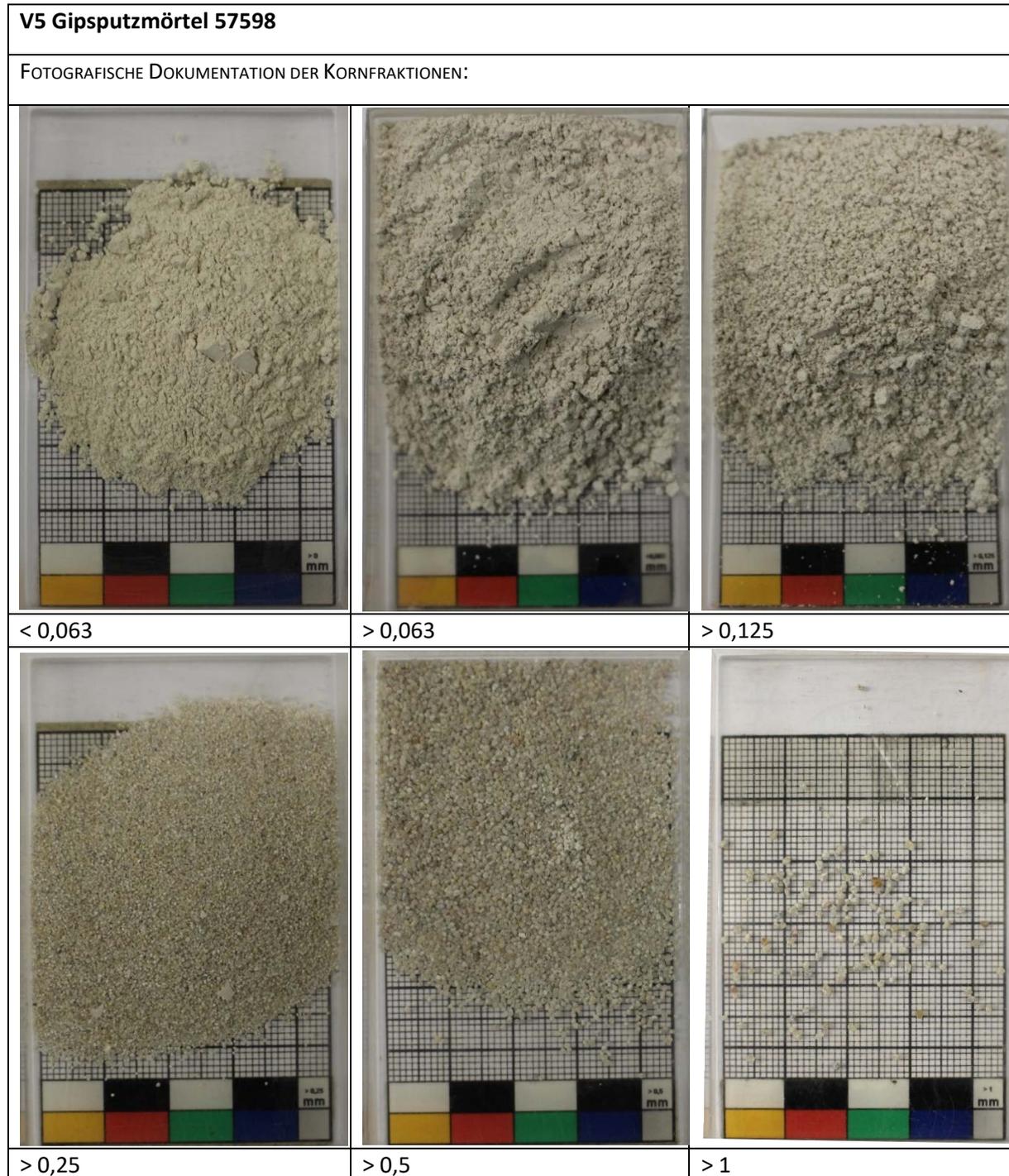
Um für die weiteren Prüfverfahren eine genaue Kenntnis über die potentiell in Bückeberg vorliegenden Korngrößen hinsichtlich der Beurteilung des Sedimentationsverhaltes der Injektionsmörtel und der potentiellen Streuung der THz-Strahlung an großen Partikelgrößen zu erhalten, wurden Sieblinien der von der Fa. Tubag zur Verfügung gestellten Mörtel (V5 Gipsputzmörtel 57598 und HKCP Kalkputz 57383) angefertigt. Die untersuchte Mörtelmenge betrug je 50 g. Die Siebmaschine wurde auf 10 Minuten Rüttelzeit eingestellt. Ermittelt und grafisch sowie fotografisch dargestellt wird der Mittelwert von 3 Prüfungen. In den **Abb. 2** bis **Abb. 7** werden die Ergebnisse der Sieblinienanalyse vorgestellt.



**Abb. 74:** Sieblinie V5 Gipsputzmörtel 57598



**Abb. 75:** Korngrößenverteilung V5 Gipsputzmörtel 57598



**Abb. 76:** Fotografische Dokumentation Korngrößenverteilung V5 Gipsputzmörtel 57598

Partikelgrößen in den Sieben mit der Lochweite 2 mm und 4 mm waren nicht vorhanden.

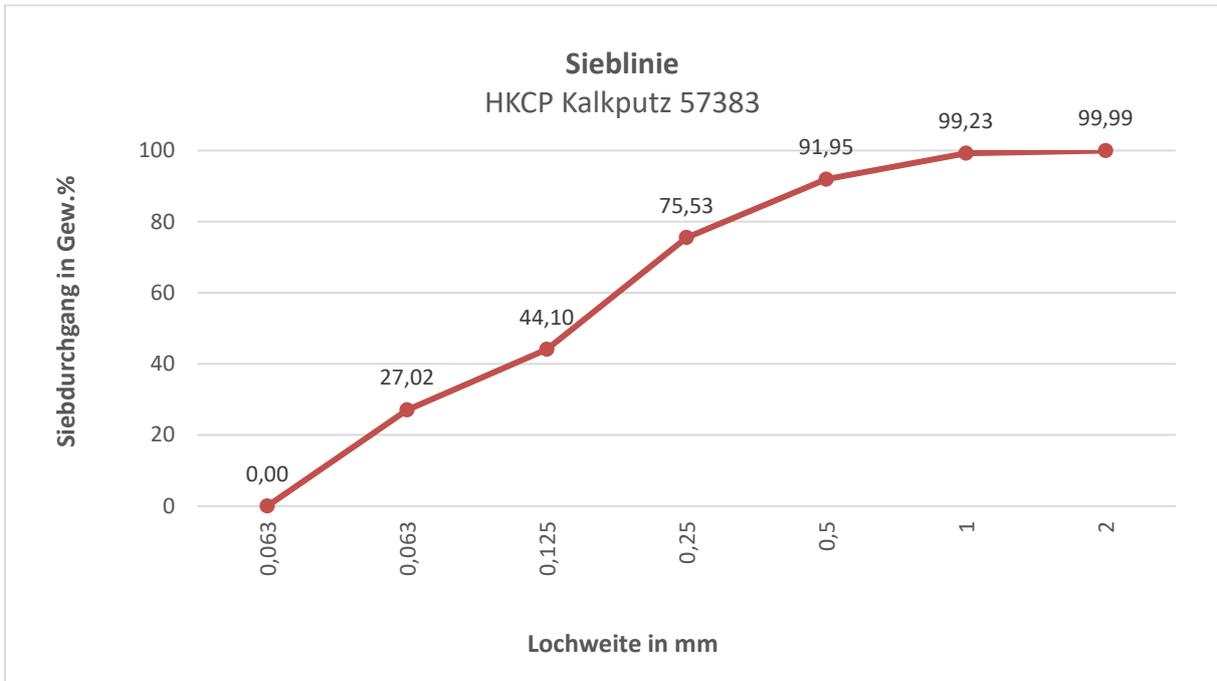


Abb. 77: Sieblinie Kalkputz 57383

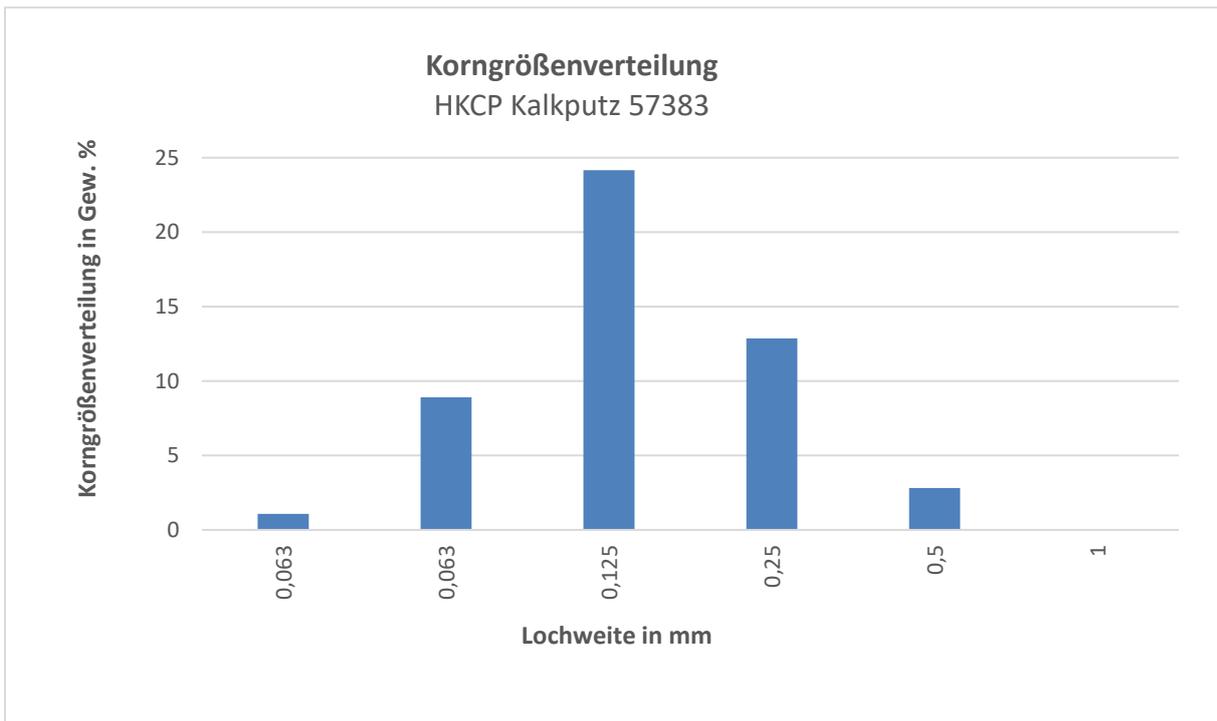


Abb. 78: Korngrößenverteilung Kalkputz 57383

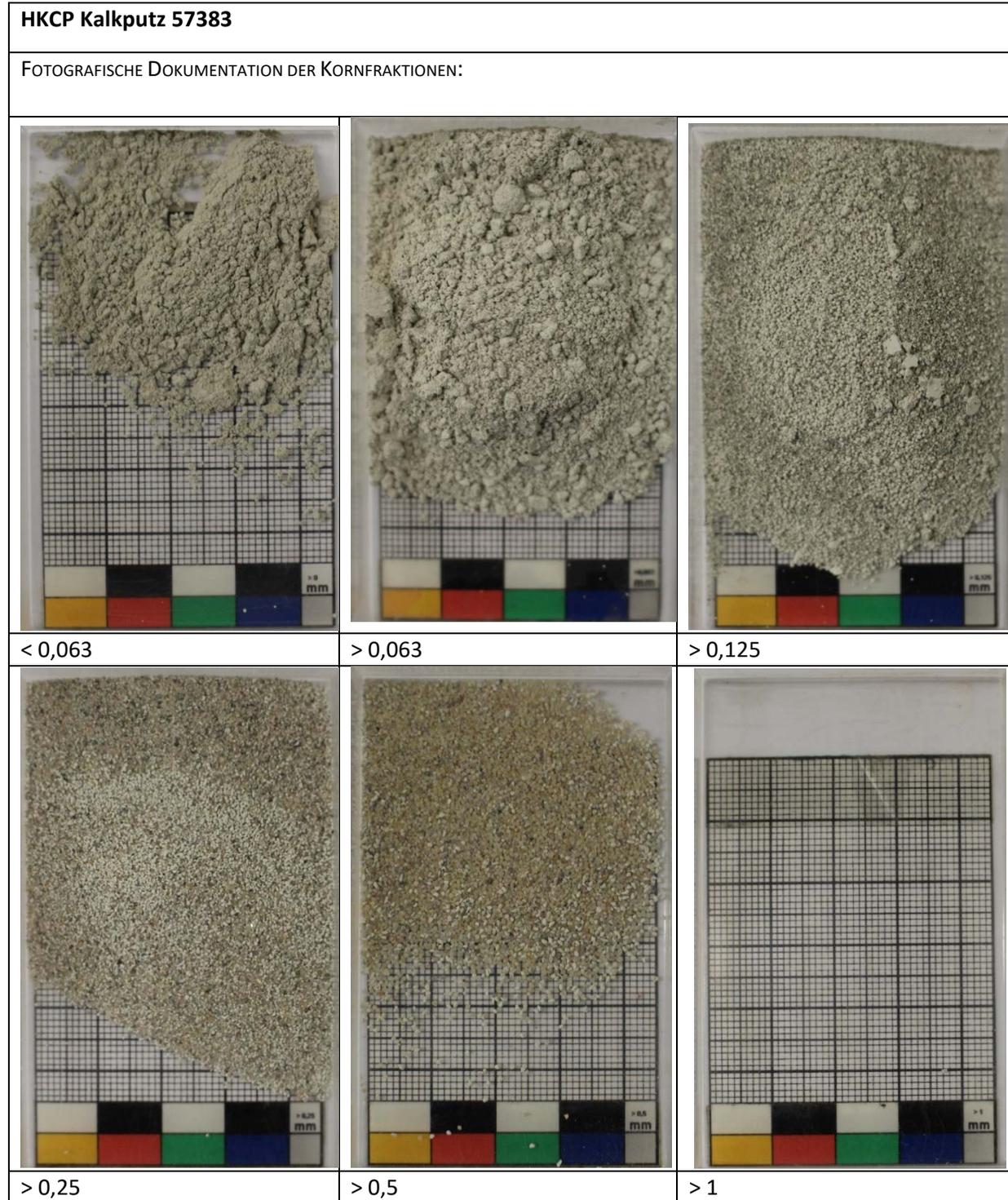


Abb. 79: Fotografische Dokumentation Korngrößenverteilung Kalkputz 57383

Partikelgrößen in den Sieben mit der Lochweite 4 mm waren nicht vorhanden.

## 4.5 Rezeptentwicklung Hinterfüllmörtel

Bei der Auswahl der Materialien für die Injektionsmörtel mussten folgende Anforderungen an den späteren Injektionsmörtel erfüllt werden:

- Die Hinterfüllmaterialien müssen chemisch an die Originalsubstanz angepasst werden
- Gleichzeitig muss die Hinterfüllmasse rissfrei austrocknen
- Mischbarkeit mit reduzierter Wassermenge
- Die Hinterfüllmasse soll ein gutes Fließverhalten haben
- Die Hinterfüllmasse soll insgesamt einen geringen Erhärtungsschwund aufweisen
- Die Erhärtung der Massen soll schnell eintreten und kontinuierlich erfolgen
- Die Hinterfüllmasse soll im flüssigen Zustand keine Sedimentation zeigen
- Die injizierte Masse soll auch ohne eine große Menge an Sauerstoff ausreagieren können
- Die Masse darf nicht zu dicht oder zu schwer sein

Ausgehend von den bereits entwickelten Massen für die Restaurierungsmaßnahmen im Deckenbereich der Schlosskapelle aus dem Jahr 2014<sup>9</sup> und einer Weiterentwicklung von Massen mit unterschiedlichen Bindemitteln im Rahmen einer Bachelorarbeit<sup>10</sup> an der HAWK wurde eine Fortentwicklung der Rezepturen mit den Bindemitteln Kieselsol und formulierter Kalk vorgenommen. Es wurde weiterhin verfolgt, einen verbindenden Hinterfüllmörtel für die Hohlräume und die unterschiedlichen Putzvorkommen zu entwickeln.

## 4.6 Hinterfüllmörtel – Materialauswahl und Beschreibung

### 4.6.1 Bindemittel

#### 4.6.1.1 Kalk

Der für die Mörtelentwicklung verwendete formulierte Kalk wurde in seinem Mischverhältnis von Herrn Walter Simon von der Fa. Tubag Trass für dieses Projekt konzipiert. Er besteht aus Kalk und puzzolanisch erhärtenden Zusatzstoffen mit einem Anteil an rheinischem Trass. Die Zusammensetzung von formulierten Kalken regelt die Norm EN 459-1. Für die Deklaration der Massenanteile der jeweiligen Mischungsbestandteile ist der Hersteller zuständig. Generell handelt es sich um Baukalk, denen im normativ vorgegebenen Rahmen definierte Mengen anderer Bestandteile zugemischt werden können, um gezielt bestimmte Eigenschaften einzustellen. Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um anorganisch-mineralische Komponenten, die überwiegend hydraulisch abbinden.<sup>11</sup>

Bis zum Zeitpunkt des Zwischenberichts lagen der HAWK die genauen Mischungsverhältnisse nicht vor. Generell kann ein FL Kalk aus den Bestandteilen Baukalk (CL und NHL), Zement (CEM I, II, III, Portlandzementklinker, natürliches Puzzolan, natürliches getempertes Puzzolan, Kalkstein, Hüttensand, Calciumsulfat, Silicastaub, organische Zusätze > 0,2 M.%, mineralische Zusätze > 1 M.%, bestehen.

Ein Grund der Nutzung von kalkreichen Mörteln liegt darin, dass diese einen hohen Grad an Deformation absorbieren, bevor sie brechen. Daher sind sie in der Lage, Bewegungen der historischen Gebäude aufzunehmen.[1] Die Bewegung, verursacht durch Erschütterungen, auch durch ein

---

<sup>9</sup> Riedl, 2014

<sup>10</sup> Büttner, 2017

<sup>11</sup> Jaschko et al., 2013

regelmäßiges hohes Publikumsaufkommen in den über der Schlosskapelle Bückeberg befindlichen Räumen im Bereich der Deckenmalereien, stellen, wie anhand der Untersuchung von 2014 ersichtlich, eines der Hauptprobleme hinsichtlich der partiellen Trennung zwischen den einzelnen historischen Putzschichten dar.

#### 4.6.1.2 Kieselzol

Kieselsole sind wässrige kolloidale Suspensionen mit annähernd kugelförmigen Polykieselsäure-Molekülen. Bei den verwendeten Kieselsohlen Köstrosol® (0830 AS, 1530 AS, 1030 KD) und Ludox® PX 30 handelt es sich auf Grund des Lösemittels [H<sub>2</sub>O] um ein sog. Aquagelen, dass durch die Abdampfung des Wassers ein festes Netzwerk aus SiO<sub>2</sub> ausbildet. Die Hydrolyse und Kondensation des Sol-Gel-Prozesses von Kieselzol aus Silizium [SiO<sub>2</sub> · nH<sub>2</sub>O] verläuft in folgenden Schritten:

Hydrolysereaktion:

[4.1]



Wasserkondensation:



Die einzelnen Schritte der Prozesse lassen sich nicht trennen, da nach der Hydrolyse der ersten Gruppe übergangslos die Kondensationsreaktion einsetzt. Die anschließende Art der Trocknung der Gele hat einen großen Einfluss auf deren Struktur. Für die industrielle Verwendung der Kieselsole wird zwischen Trocknung unter Normalbedingung, Gefriertrocknung und überkritischer Trocknung (Hoch- bzw. Niedrigtemperaturmethode) unterschieden.<sup>12</sup>[2] Die für diese Arbeit verwendeten Proben wurden alle unter Normalbedingung getrocknet, d.h. das Lösemittel Wasser verdunstete bei konstant eingestellter Atmosphäre in Bezug auf Temperatur und Raumfeuchte.

Das theoretische Verhältnis zwischen H<sub>2</sub>O und der Si-Vorläuferverbindung (Precursor) für eine gänzliche Hydrolyse sollte ein molares Verhältnis von 2:1 aufweisen. Durch eine erhöhte Menge an Wasser wird die Hydrolyse beschleunigt.<sup>13</sup>

Durch die Verdunstung des Wassers bildet sich im Aushärtungsprozess zunächst ein Gel und anschließend das feste, spröde Siliciumoxid.<sup>14</sup> Die katalytische Gelbildung findet durch die Verringerung des pH-Werts statt oder durch das Vorhandensein von Elektrolyten, da diese bei ihrer Dissoziation in Wasser die negative Ladung der Kieselsäurepartikel verringern.[3]<sup>15</sup> Hierdurch werden dreidimensionale Netzstrukturen mit gebundenem Wasser gebildet. Durch den physikalischen Vorgang des verdunstenden Wassers bilden sich Siliciumoxid-Agglomerate mit weniger stark ausgeprägter Netzstruktur.<sup>16</sup>

Das Bindemittel Ludox® PX 30 wurde bereits in der Rezeptentwicklung an der HAWK zur Hinterfüllmörtelkonzeption genutzt.<sup>17</sup> Die Produkte des Projektpartners Fa. CWK Bad Köstritz wurden neu in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen. In der Theorie kann durch die Kombination

<sup>12</sup> Meyer, 2004, S. 11

<sup>13</sup> Meyer, 2004, S. 13

<sup>14</sup> Müller, 1999, S. 62

<sup>15</sup> Lehmkuhl, 1990, S. 36-38

<sup>16</sup> Lehmkuhl, 1990, S. 38

<sup>17</sup> Büttner, 2017

von Natriumhydroxid und Gips Natriumsulfat gebildet werden. Jedoch liegen die Natriumanteile bei dem handelsüblichen Ludox® PX 30 bei lediglich 0,27-0,37 %, bei allen Produkten von CWK Bad Köstritz sogar darunter. Inwieweit solche geringen Mengen zur Gipsbildung führen können, ist aus der Literatur nicht bekannt.

Für die Nutzung von kieselolgebundenen Injektionsmassen spricht, dass sich das im Abbindeprozess abgeschiedene Bindemittel Siliciumoxid  $\text{SiO}_2$  auch in den Bestandteilen der am Objekt vorkommenden Putze wiederfindet. Kieselolgebundene Hinterfüllmassen weisen in der Regel einen guten kapillaren Wassertransport und niedrige Haftzugwerte auf.<sup>18</sup> Zudem findet bei der Hinterfüllung der Hohlräume und Risse gleichzeitig eine Festigung durch die Penetration des Bindemittels in die umliegenden Putze und Mörtel statt.

Die wichtigsten Eigenschaften nach Herstellerangaben in Bezug auf die Mörtelherstellung der unterschiedlichen Kieselolsorten sind in den folgenden Tabellen aufgeführt. Für alle Kieselsole wurde vor Nutzung im Projekt die Festmittelabscheidung in der Petrischale ermittelt.

**Tab. 2: Eigenschaften des Bindemittels Köstrosol® 0830 AS**

Köstrosol® 0830 AS	
Chemische Charakterisierung	wässrige Dispersionen aus kolloidalem Siliziumdioxid
Aussehen und Geruch	Durscheinend, charakteristischer Geruch
pH-Wert bei 25°C	9,6
Löslichkeit in Wasser	Vollständig mischbar
Dichte bei 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,201
Feststoffgehalt % (m/m)	29,5
Alkalität (als Na) % (m/m)	0,05
Spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /g	290
Viskosität (25°C, $\dot{\gamma}$ =50/s) mPa·s	8
Schutz vor Mikroorganismen	ohne; Wachstum durch enthaltenen Ammoniak unterdrückt

**Tab. 3: Eigenschaften des Bindemittels Köstrosol® 1530 AS**

Köstrosol® 1530 AS	
Chemische Charakterisierung	wässrige Dispersionen aus kolloidalen Siliziumdioxid
Aussehen und Geruch	opaleszente Flüssigkeit
pH-Wert bei 25°C	9,4
Löslichkeit in Wasser	Vollständig mischbar
Dichte bei 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,203
Feststoffgehalt % (m/m)	30,1
Alkalität (als Na) % (m/m)	0,1
Spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /g	197
Viskosität (25°C, $\dot{\gamma}$ =50/s) mPa·s	5
Schutz vor Mikroorganismen	ohne; Wachstum vom enthaltenen Ammoniak unterdrückt

<sup>18</sup> Lehmkuhl, 1994, S.320-321

Tab. 4: Eigenschaften des Bindemittels Köstrosol® 1030 KD

Köstrosol® 1030 KD	
Chemische Charakterisierung	wässrige Dispersionen aus kolloidalen Siliziumdioxid
Aussehen und Geruch	opaleszente Flüssigkeit
pH-Wert bei 25°C	9
Löslichkeit in Wasser	Vollständig mischbar
Dichte bei 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,205
Feststoffgehalt % (m/m)	30,1
Freie Alkalität (als Na <sub>2</sub> O) % (m/m)	0,27
Spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /g	240
Viskosität (25°C, $\dot{\gamma}$ =50/s) mPa·s	5
Schutz vor Mikroorganismen	ohne; Wachstum vom enthaltenen Ammoniak unterdrückt

Tab. 5: Eigenschaften des Bindemittels Ludox® PX 30

Ludox® PX 30	
Chemische Charakterisierung	wässrige Dispersionen aus kolloidalen Siliziumdioxid
Aussehen und Geruch	opaleszente Flüssigkeit
pH-Wert bei 25°C	-
Löslichkeit in Wasser	Vollständig mischbar
Dichte bei 20°C [g/cm <sup>3</sup> ]	1,20-1,21
Feststoffgehalt % (m/m)	30
Freie Alkalität (als Na <sub>2</sub> O) % (m/m)	0,27-0,37
Spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /g	240
Spezifische Oberfläche m <sup>2</sup> /g	230-290
Viskosität (20°C) mPa·s	12
Schutz vor Mikroorganismen	-

## 4.6.2 Zuschlagstoff

### 4.6.2.1 Marmormehle

Ausgehend von den bisherigen Mörtelmischungen wurde die Nutzung der Marmormehle von der Fa. Kremer Pigment in den Mahlungen mittel (< 90 µm) und Marmormehl, gröber (< 200 µm) in den konzipierten Mörteln weitergeführt. Marmormehle werden vor allem deshalb als Zuschlagsstoffe gewählt, da sie aus chemisch stabilem Calciumcarbonat bestehen und durch die feine Mahlung einen entsprechend leichten Zuschlag darstellen.

### 4.6.2.2 Hohlglaskugeln Scotchlite S22

Hohlglaskugeln sind ein beliebter Leichtzuschlag. Durch deren runde Form und das verringerte Gesamtgewicht des Mörtels verbessert sich dessen Fließeigenschaft. Gleichzeitig verringert sich zudem das Elastizitätsmodul und die Haftzugfestigkeit des Hinterfüllmörtels.[4]<sup>19</sup> Die 20-60 µm großen

<sup>19</sup> Egloffstein et al., 2000, S. 94-95

Hohlglasskugeln weisen eine idealrunde Form mit einer Dichte von  $0,22 \text{ g/cm}^3$  auf. Jedoch schwimmen die Hohlglasskugeln durch ihre geringe Dichte in wässrigen Systemen oben auf, da sie die Dichte von Wasser stark unterschreiten.<sup>20</sup> Herstellungsbedingt weisen Lösungen mit enthaltenen Hohlglasskugeln einen hohen pH-Wert von über 10 auf.<sup>21</sup>

### 4.6.3 Zusätze

#### 4.6.3.1 Tylose MH 30.000 YP4

Langkettige Tylosen werden vor allem auf Grund ihres Wasserrückhaltevermögens, welches das Penetrieren des eingetragenen Wassers in den Untergrund verringert, oft als Zusatz für Hinterfüllmassen gewählt. Zudem beeinflusst Tylose das Sedimentationsverhalten und führt zu einer Verringerung der Härte der Massen.<sup>22</sup> Bei den verwendeten Produkten handelt es sich um wasserlösliche, nichtionische Methylhydroxyethylcellulose der Firma ShinEtsu. Die Tylose MH 30.000 P4 ist anquellverzögert, besitzt eine Viskosität von  $30000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  und hat eine höhere verdickende Wirkung.<sup>23</sup> Für alle konzipierten Mörtel wurde eine Verdünnung von 0,5 % in dest. Wasser verwendet.

#### 4.6.3.2 Cab-O-Sil

Bei Cab-O-Sil handelt es sich um pyrogenes Silicium Oxid, welches durch die Verbrennung von flüchtigen Silicium Verbindungen entsteht. Durch die Reaktion mit Wasser und Sauerstoff entstehen feine Silicium-Agglomerate aus Siloxan- und Silanolgruppen. Durch die in Wasser gelösten Silanolgruppen bilden sich Wasserstoffbrücken mit einer Netzstruktur, die zur Veränderung der Viskosität führt. Cab-O-Sil verhindert somit bei kieselsäureestergebundenen Mörteln das Sedimentieren der Füllstoffe und nimmt auch bei bestimmter Konzentration Einfluss auf das Fließverhalten. Es dient als Verdickungs- und Stellmittel. Bei Zugabe von mehr als 1,5 %, bezogen auf den Bindemittelanteil, kommt es zu einer starken Thixotropie und verringerter Fließfähigkeit.

Cap-O-Sil wurde nur bei den kieselolgebundenen Massen eingesetzt.

#### 4.6.3.3 WPC Romstedt

Abweichend von den Rezepturen mit durch Kalk gebundenen Mörteln wurde das Mowilith® LDM 6880 durch WPC ersetzt. Es handelt sich hierbei um eine wässrige Dispersion eines Copolymer auf Basis von Butylacrylat und Methylmethacrylat. Es wird als Additiv für hydraulische Mörtel genutzt, um die Verarbeitbarkeit, die Festigkeitswerte und das Schwundverhalten zu verbessern. Durch die Zugabe wird der Wasserzementfaktor reduziert wobei, herstellerbedingt empfohlen, maximal 5-15 % des Anmachwassers durch WPC ersetzt werden können.

WPC wurde nur bei den mit Kalk gebundenen Massen eingesetzt.

#### 4.6.3.4 Tween 20® (Polysorbat 20)

Tween 20® erweist sich in kieselolgebundenen Hinterfüllmassen als wirksamer Zusatz zur Verbesserung der Sedimentationseigenschaften.<sup>24</sup> Tween 20® ist ein Polyoxyethylensorbit-

---

<sup>20</sup> Technisches Merkblatt Fa. Kremer

<sup>21</sup> Büttner, 2017

<sup>22</sup> Hentschel, 2001, S. 73

<sup>23</sup> Technisches Datenblatt Fa. ShinEtsu

<sup>24</sup> Lehmkuhl, 1990

anfettsäureester, ein nichtionisches Tensid mit lösungsvermittelnden Eigenschaften für wässrige Systeme. Sein pH-Wert liegt bei 5-7.<sup>25</sup>

#### 4.7 Untersuchungskatalog zur Frischmörtelanalyse

Die erstellten Hinterfüllmörtel wurden hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit und ihres Trocknungs- und Sedimentationsverhaltens durch die Überprüfung des Kanüldurchgangs, der Sedimentationsstabilität, des Penetrations- und Fließvermögens sowie der Trocknung im Rohring auf saugfähiger und versiegelter Fläche beurteilt. Zusätzlich wurde die Beurteilung der Fließgeschwindigkeit und des Fließverhaltens der Mörtel an schräger Fläche in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen. Ebenfalls wurden Prüfkörper in der Größe 30x10x10 mm in einer Silikonform abgeformt, und anschließend händisch auf ihre Bruchfestigkeit und optisch auf ihre Phasentrennung hin beurteilt. Eine Herstellung von Prüfkörpern mit größerem Abmaß zur Nutzung von Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen war nicht möglich.

Des Weiteren wurden vier ausgewählte Mörtelreihen nach Plasma- bzw. Ozonbehandlung in unterschiedlichen Konfigurationen mittels Haftzugprüfung auf ihre Anbindung hin überprüft. Auch die Anbindung und Verteilung des Mörtels im planparallelen wie auch gewölbten Hohlraum wurde mittels THz-TDS analysiert.

Tab. 6: Untersuchungskatalog für die physikalische Kennwertermittlung der PK KS und FK

Bezeichnung der Prüfkörperreihen	Prüfkörpergeometrie	Anzahl der Prüfkörper	Untersuchung
Kieselöl: Köstrosol® 830 AS/1530 AS/ 1030 KD/ Ludox® PX 30  <b>KS 1 +</b> 830,1530,1030, LU  <b>KS 2-10 +</b> 830, LU  Händisch gerührte Mörtelmischungen wurden mit dem Zusatz <b>B</b> versehen.	Reagenzglas	1 pro Mischung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sedimentationsverhalten</li> </ul>
	Greiner Röhrchen	1 pro Mischung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Penetrationsverhalten</li> </ul>
	Rohring	2 pro Mischung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Trocknungs- und Anbindungsverhalten</li> </ul>
Formulierter Kalk  <b>FK1-FK2</b>  Händisch gerührte Mörtelmischungen wurden mit dem Zusatz <b>B</b> versehen.	Wand/Laufschiene	2 pro Mischung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fließverhalten an der Senkrechten und an der Schrägen</li> </ul>

<sup>25</sup> Sicherheitsdatenblatt Fa. Roth

#### 4.7.1 Sedimentationsgeschwindigkeit

Um eine frühzeitige Trennung von Zuschlägen und Bindemitteln auszuschließen, die einen im Gefüge instabilen Mörtel zur Folge hätte, wurde die Sedimentationsgeschwindigkeit der Mörtel überprüft.

Zur Bestimmung der Sedimentationseigenschaften wurden 20 ml Frischmörtel in ein verschließbares Reagenzglas gegeben und die Phasentrennung anhand der Phasengrenzen mittels Messung in einem Messintervall von 15, 30, 60, 120 min und nach 1, 2 und 7 Tage bestimmt. Aufgrund des runden Bodens der Reagenzgläser wurde die Tischplatte als Null angenommen. Die Füllhöhe betrug demnach ca. 13 cm. Die Bestimmung und Auswertung der ermittelten Werte dienten dazu, die mögliche Abtrennung einzelner Stoffe aus der Masse zu beurteilen.<sup>26</sup> Durch das verschlossene Glas fand keine Verdunstung des jeweiligen Flüssiganteils statt, sodass die getroffenen Aussagen nicht eins zu eins auf das Objekt übertragen werden können, da hier eine Migration von Flüssigkeit in die umliegenden Putzmörtel angenommen werden kann.

#### 4.7.2 Penetrationsverhalten

Mithilfe dieser Versuchsreihe lässt sich das Eindringvermögen des Bindemittels in den Untergrund beurteilen. Dieses sollte im Fall des Einsatzes an der Wandmalerei in Bückeberg möglichst gering ausfallen, um die Bildung von Salzen auf Grund des vorhandenen Gipsputzmörtels zu verhindern.

Für den Versuch wurden in Anlehnung an die Untersuchungen von KNÖFLER/SCHUBERT<sup>27</sup>[5] Greiner Röhrchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden des Röhrchens versehen. Dieses diente dazu, eine Entlüftung zu ermöglichen. Anschließend wurde eine Skala startend am oberen Ende der vorhandenen Skala des Greiner Röhrchens, beginnend bei 0 cm und endend bei 5 cm, angeklebt. Die Röhrchen wurden mit trockenem Sand mit grober Körnung 5 mm gefüllt, um ein Rieseln des eigentlichen Prüfsandes aus der Bohrung zu verhindern. Anschließend wurde Quarzsand (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm bis auf 3,5 cm der Skala aufgefüllt. Um eine Reproduzierbarkeit der Dichte zu gewährleisten, wurde der Sand in den Röhrchen für 5 sec. auf einem Vibrationstisch bei 3000 Schwingungen/min verdichtet.<sup>28</sup> Alle Prüfröhrchen wurden mit Injektionsmassen auf 0 mm aufgefüllt und die Penetrationsfortschritte nach einer Stunde, einem Tag und zwei Tagen anhand der Masseabnahme an der Skala abgelesen.

Der gewählte Zeitraum wurde anhand des in den Vorversuchen geringen und langsamen Penetrationsverhaltens der Mörtelmischungen als sinnvoll erachtet.

#### 4.7.3 Trocknungs- und Anbindungsverhalten

Um das Trocknungsverhalten der frischen Injektionsmassen beurteilen zu können, wurden in flachen PE-Ringen (Höhe 2 mm,  $\varnothing$  40 mm), die auf eine Putzfläche des im Projekt genutzten V5 Gipsputzmörtel platziert wurden, die jeweiligen Injektionsmassen der Reihen FK und KS aufgebracht. Dieser Test sollte zeigen, wie schnell und gleichmäßig die Materialien auf Putzmaterial trocknen und ob die jeweilige Masse in Rand- oder Oberflächenbereichen zu Schrumpfung, Riss- oder Blasenbildung neigt. Bei der Nutzung des Gipsputzes für den Untergrund bezieht sich das Verhalten der Injektionsmörtel auf die größtmögliche angenommene Saugfähigkeit des Untergrundes. Diese wird im Fall der vorliegenden und bereits konservatorisch bearbeiteten Hohlräume an den Wand- und Deckenmalereien in Bückeberg jedoch nicht angenommen. Daher wurden zusätzlich das Trocknungsverhalten auf einer PE-

---

<sup>26</sup> Knöfel, Schubert, 1993, S. 155

<sup>27</sup> Knöfel, Schubert, 1993, S. 156

<sup>28</sup> D'ham, 2003, S. 42

Platte mit ebenfalls darauf angebrachten PE-Ringen zur Simulation von versiegelten Oberflächen erprobt.

Das Anbindungsverhalten wurde nur an den Prüfkörpern auf Gipsuntergrund händisch überprüft.

#### 4.7.4 Fließverhalten an der Wand

Um das senkrechte Fließverhalten der Injektionsmörtel auf leicht verdichteten Untergründen beurteilen zu können, wurde in der Wandwerkstatt der HAWK eine bereits mit Kalktünche beschichtete Fläche gewählt, die eine Lauflänge von 1,80 m gewährleistete. 10 ml aller Injektionsmassen wurden mit einer Spritze ohne Kanüle im 45° Winkel an der Wand aufgesetzt, mit gleichmäßigem Druck gelehrt und die Lauflängen sowie der Stand der Massen an der Wand beurteilt.

#### 4.7.5 Fließverhalten an der Schräge

Diese Testung von Injektionsmassen entspricht keiner Norm, sondern wurde aus der Idee entwickelt, das Ausbreitungs- und Laufverhalten von Mörtel hinsichtlich der Fließrichtungen auch in die Tiefe besser beurteilen zu können. Es wurde eine Form in der Größe 32 cm lang und 18 cm breit aus dem im Projekt verwendeten V5 Gipsputzmörteln hergestellt und 4 Wochen bei 20°C und 65 rLF gelagert. Diese wurden mit Lauffinnen von 30 cm Länge in Dreieckform versehen. Aufgestellt zur Ermittlung des Fließverhaltens wurden diese Laufformen mit einem Winkel von 45° am höchsten Punkt, auslaufend auf 10° am Endpunkt der Lauflänge (**Abb. 8**).

Da es keine Erfahrungswerte in Bezug auf dieses Testverfahren gibt, wurde eine Masse von 10 ml bestimmt. Diese wurde am höchsten Punkt gleichmäßig so lange appliziert bis Zeit und Strecke der Ausbreitung bis zum End- oder Auslaufpunkt der Massen gemessen wurde.



**Abb. 80:** Aufstellung der Fließform unter Testbedingung

#### 4.7.6 Bruchfestigkeit

Da Normprüfkörper für die Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfung massebedingt nicht hergestellt werden konnten, wurde die Bruchfestigkeit anhand von abgeformten Prüfkörpern (30x30x10 mm<sup>3</sup>) händisch überprüft und am Bruchbild die Phasentrennung beurteilt.

#### 4.7.7 Einfüllverhalten in Hohlräume

Diese Untersuchung wurde in die Prüfreihe mit aufgenommen, um eine bessere Beurteilung hinsichtlich der Fließfähigkeit bei Hohlraumhinterfüllung treffen zu können, insbesondere auch um ein verändertes Verhalten in der Verarbeitung nach der Plasma-/Ozonbehandlung einordnen zu können. Es wurde in einen jeweils ca. 2 mm breiten Hohlraum eines Prüfkörpers aus zwei Gipsputzflächen ca. 5 ml Hinterfüllmörtel mittels Schlauch appliziert. Hierbei wurde darauf geachtet, dass der Schlauch während des Hinterfüllvorgangs von unten nach oben gezogen wurde, um eine gleichmäßige Verteilung zu ermöglichen.

#### 4.8 Herstellung der Hinterfüllmörtel-Rezepturen

Die erste Prüfreihe würde mit sämtlichen in Kapitel 6.2.1 aufgeführten Bindemitteln durchgeführt. Anschließend fand in Absprache mit dem Fachbeirat anhand der Ergebnisse der Prüfreihe 1 eine Auswahl der weiterzuführenden kieselolbasierten Bindemittel statt, die Entscheidung fiel auf das Kieselol Köstrosol® 0830 AS und das handelsübliche Ludox® PX 30. Diese wurden, ebenso wie das Bindemittel formulierter Kalk, bis zur Prüfreihe 5 weitergeführt. Gesamt wurden 10 Prüfreiheiten vorgenommen. Aufgezeigt werden im Rahmen des Berichtes die Ergebnisse der Prüfreihe eins, fünf und neun. Die kieselolgebundenen Mörtel dieser Mörtelreihen wurden auf Grund ihrer ermittelten Eigenschaften bei der Umsetzung des Bearbeitungszyklusses in der Schlosskapelle Bückeberg eingesetzt. Da der Einsatz des kalkgebundenen Mörtels vor allem hinsichtlich des hohen Wasseranteils und des erhöhten Penetrationsverhaltens gegenüber den kieselolgebundenen Mörteln nicht für die Umsetzung am Objekt in Frage kam, wurde dessen Beprobung nur bis zur Prüfreihe 5 vorgenommen. Variiert wurden die Mörtelmischungen in den Einstellungen des Verhältnisses Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser.

Sowohl für die kieselolgebundenen als auch für den kalkgebundenen Mörtel erfolgte in den Testreihen zunächst eine Vermischung der Trockenanteile sowie die Vermischung der flüssigen Komponenten untereinander. Ausnahme bildet der Zusatz WPC. Da dieser zur starken Schaumbildung neigte, wurde er lediglich in den letzten 10 Sekunden der Mischzeit zugegeben. Zunächst wurden die Mörtel in der ersten Mörtelkonzeption mittels Dispergiergerät der Firma Distech UG 2 min mit 20.000 U/min Rührzeit im kleinsten Rührbecher und Mixaufsatz mit Ø 30 mm hergestellt. Da sich bei der Herstellung der Probemischungen per Hand und anschließend per Dispergiergerät starke Unterschiede in den Eigenschaften (Fließfähigkeit, Sedimentationsstabilität etc.) der Mörtel zeigte, wurde praxisbezogen auf die Mischung mit einem Stabmixer und eine Handmischung umgestellt. Ab der Messreihe 6 wurden die Mörtel sowohl nach Herstellung mit einem Stabmixer, als auch nach Handrührung beprobt und die Ergebnisse gegenübergestellt. Vor allen Mischverfahren wurden die trockenen und flüssigen Komponenten 1 min mit einem Spatel vermischt, um eine vollständige Vermengung der Massen zu gewährleisten und anschließend 2 min mit dem Spatel bzw. Stabmixer ineinandergemischt. Die Zugabe der Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm) erfolgte bei der Nutzung des Stabmixers nach dem Mixvorgang mit max. 1 Minute.

Die Bezeichnung der Mörtelreihen im Verlauf des Berichtes werden im Folgenden mit ihren jeweiligen Bindemitteln KS (Kieselso) und FK (Formulierter Kalk) abgekürzt. Die Abkürzung KS wird durch das entsprechende Kieselso mit dessen Produktbezeichnung aufgeführt. Die Kennzeichnung FK wird durch die Nummerierung im Unterpunkt erweitert, um zwischen der Rezeptur mit dem Zusatz von WTC und ohne zu unterscheiden. Der Zusatz B kennzeichnet die in händischer Mischung hergestellten Hinterfüllmörtel.

Alle Versuche wurden in der Wandmalereiwerkstatt der HAWK bei  $19^{\circ}\text{C} \pm 5$  und  $41\% \pm 5$  rLF durchgeführt. Die Protokolle der Versuchsergebnisse finden sich im Anhang. Exemplarisch wird die Reihe 9 der verwendeten kieselso gebundenen Mörtel im Folgenden dargestellt. Hinterfüllmörtelprotokolle für verwendete kieselso gebundene und kalkgebundene Hinterfüllmörtel finden sich im Anhang.

## 4.9 Exemplarische Ergebnisse zur Frischmörtelanalyse

### 4.9.1 Rezeptur Kieselso

Tab. 7: Rezeptur der kieselso gebundenen Mörtel der Prüfreihe 9

INJEKTIONSMATERIAL/BINDEMittel:		Benennung:
Kieselso Köstrosol® 830 AS/Ludox® PX 30		KS 9.1 (830 /LU) (830 B /LU B)
Trockenanteile:		
4 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 $\mu\text{m}$ )	
1,5 g	Cap-O-Sil	
32 g	Marmormehl 0-90 $\mu\text{m}$	
12,5 g	Marmormehl < 200 $\mu\text{m}$	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ <b>1:1,28</b>
35 g	Kieselso	
10 g	Tylose 30.000, 0,3 % in Wasser	
0,16 g	Tween 20® (Polysorbat 20)	
<b>Bemerkung:</b> Die Hohlgaskugeln wurden durch 1 min Mischung per Hand nach der Mischung mit dem Stabmixer hinzugefügt. Der händisch gerührte Mörtel hat den Zusatz B in seiner Bezeichnung.		

### 4.9.2 Kanülangängigkeit

Die Kanülangängigkeit ist bei Hinterfüllmörteln hinsichtlich der Verarbeitbarkeit der Massen eine relevante Kenngröße. Durch die bei den mit Kieselso gebundenen Massen gewählte maximale Korngröße von 90-200  $\mu\text{m}$  eignen sich Kanülen ab  $\varnothing$  1,5 mm. Die kalkgebundenen Masse ließen sich nur mit Aufsatz eines Schlauches  $\geq \varnothing$  3 mm verarbeiten.

#### 4.9.3 Ergebnis Sedimentationsgeschwindigkeit

Keine der Hinterfüllmörtel zeigte bis zur ersten Stunde eine Sedimentation. Erst nach zwei Stunden konnte eine erste Phasentrennung bei der mit Stabmixer vermischten Masse **KS 9.1 830** festgestellt werden. Nach einem Tag konnte auch die Phasentrennung bei **KS 9.1 LU** beobachtet werden. Die Masse **KS 9.1 LU B** zeigte Ausflockungen nach zwei Stunden, aber eine Phasentrennung erst nach zwei Tagen. Einzig die Masse **KS 9.1 830 B** zeigt keine Phasentrennung, lediglich eine leichte Ausflockung nach 2 Stunden. **Abb. 9** zeigt das Sedimentationsverhalten nach 7 Tagen. Gesamt ist zu sagen, dass die handgerührten Mischungen eine spätere und weniger ausgeprägte oder gar keine Trennung zeigen. Alle Mörtel zeigten eine leichte Schaumbildung an der Oberfläche der eingefüllten Mörtel, welche auch als leichte Schaumschicht über den gesamten Untersuchungszeitraum stehen blieb. Alle Proben waren an der Oberfläche leicht konkav.

Im Anhang werden die Messergebnisse in Messprotokollen tabellarisch aufgeführt.



**Abb. 81:** Testreihe 9.1 zur Sedimentationsgeschwindigkeit mit eingezeichneten Sedimentationsgrenzen (rot) nach sieben Tagen

#### 4.9.4 Ergebnis Penetrationsverhalten

Das Eindringverhalten der kieselolgebundenen Massen kann über den gesamten Messablauf als gering eingestuft werden. Alle Mörtel bzw. das Wasser/Bindemittel penetrieren über den regulären Messzeitraum max. 1 mm in das Sandbett. Die Penetration erfolgt bei allen Mörtelreihen annähernd gleich. Die Messungen werden nach Vorgabe bis 2 h ausgewertet. Die Hinterfüllmörtel zeigen erst nach zwei Tagen eine Penetration von 8 mm bis 14 mm. Dabei liegt das Penetrationsverhalten von den

Mörteln mit dem Kieselöl Ludox® PX 30 mit 13 (B) bzw. 14 mm höher als dass der Reihe mit Köstrosol® 830 AS mit 8 (B) bzw. 9 mm. Im Anhang werden die Messergebnisse in Messprotokollen tabellarisch aufgeführt.



Abb. 82: Penetrationstest Reihe 9.1 aller Mörtel nach zwei Tagen

#### 4.9.5 Ergebnis Trocknungsverhalten

Die Massen wurden auf einen saugenden Gipsuntergrund sowie auf eine PE Platte gegeben, um einen saugenden und einen versiegelten Untergrund zu simulieren.

Bei allen Massen auf PE Untergrund zeigt sich nach 2 Tagen eine leichte Schrumpfung des Injektionsmaterials an den Rändern der Ringe und in der Mitte der Massen. Allerdings sind diese als gering einzustufen. Auf den Gipsuntergründen ist keine Schrumpfung an den Rändern zu sehen, dafür eine leichte Absenkung des Mörtelspiegels in der Mitte sowie leichte Rissbildung. Die Rissbildung der Mörtel **KS 9.1 LU** und **KS 9.1 LU B** sind hierbei als ausgeprägter einzustufen als die der Reihe **KS 9.1 830** und **KS 9.1 830 B**. Alle Oberflächen lassen eine leichte Blasenbildung erkennen. Eine gute Anbindung an die Oberfläche des Gipsuntergrunds ist bei allen Mörteln gegeben, sie ließen sich nach Abnahme der Rohringe nicht durch leichtes mechanisches Einwirken entfernen.

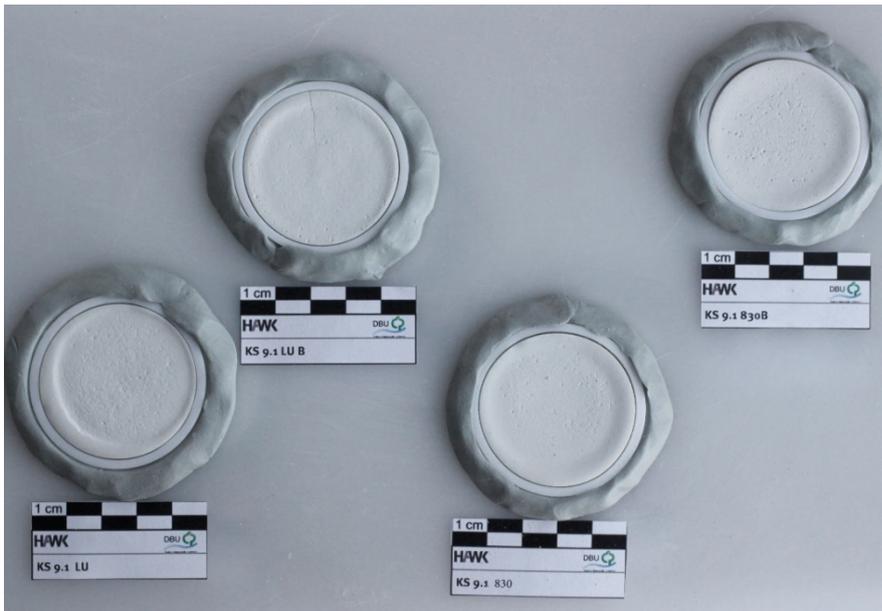


Abb. 83: Trocknung der Hinterfüllmörtel im Rohring nach 2 Tagen auf PE Untergrund



Abb. 84: Trocknung der Hinterfüllmörtel im Rohring nach 2 Tagen auf Gips-Untergrund

#### 4.9.6 Ergebnis Fließgeschwindigkeit an der Wand

Getestet wurde das Fließverhalten von 10 ml an geglätteter und gefasster Oberfläche nach Ansetzen der Spritze im 45° Winkel an die Wand und annähernd gleichem Druckverhalten. Es zeigt sich, dass die handgerührten Massen wesentlich besser laufen als die mit Stabmixer gerührten Massen, obwohl sie sich in der subjektiven Beurteilung beim Abtropfen vom Spatel ähnlich verhalten. **KS 9.1 830** und **KS 9.1 830 B** laufen über die gesamte Fläche.

Tab. 8: Beurteilung zum Fließvermögen an der Wand

Untersuchungsthema	Masse	Mörtelmenge [ml]	Länge [cm]	Zeit [sec]	Beschreibung
Fließgeschwindigkeit an der Wand		10			
	KS 9.1 830		168		Läuft gut und gleichmäßig, ist kompakt, liegt als leichte Erhöhung auf der Wandoberfläche
	KS 9.1 830 B		180		Läuft gut und gleichmäßig, fließt schneller als 830, ist kompakt, liegt als leichte Erhöhung auf der Wandoberfläche
	KS 9.1 LU		175		Läuft gut und gleichmäßig, ist kompakt, liegt als leichte Erhöhung auf der Wandoberfläche
	KS 9.1 LU B		180		Kompakte Masse, fließt etwas schneller als LU, läuft bis unten

#### 4.9.7 Ergebnis Fließgeschwindigkeit an der Schräge

Das Fließverhalten an der Schräge gestaltet sich bei den beprobten Mörtelmischungen unterschiedlich. Gesamt ist zu sagen, dass die handgerührten Mörtel schneller fließen, als die mit dem Stabmixer gefertigten. Es zeigte sich, dass die Massen **KS 9.1 LU** und **KS 9.1 LU B** schneller in ihrer Fließgeschwindigkeit waren und die Masse **KS 9.1 830** träger floss und sich auch nicht bis zum Ende der Schiene ausbreitete. Der Mörtel **KS 9.1 830 B** floss zwar langsamer als **KS 9.1 LU B**, dafür blieb in der Flussrinne mehr Mörtelmasse stehen.

Tab. 9: Beurteilung zum Fließvermögen an der Schräge

Untersuchungsthema	Masse	Mörtelmenge [ml]	Länge [cm]	Zeit [sek]	Beschreibung
Fließgeschwindigkeit an der Schrägen		10			
	KS 9.1 830	max.	20,5	372	Fließt langsam und stagniert bei 20,5 cm, ganze Spritze eingefüllt
	KS 9.1 830 B		30	429	Läuft sehr langsam aber gleichmäßig bis zum Ende, ganze Spritze eingefüllt
	KS 9.1 LU		30	21	Läuft zügig und breitet sich unten aus, läuft besser als 830, ganze Spritze eingefüllt
	KS 9.1 LU B		30	106	Läuft relativ gut und stetig, besser als 830, ganze Spritze eingefüllt

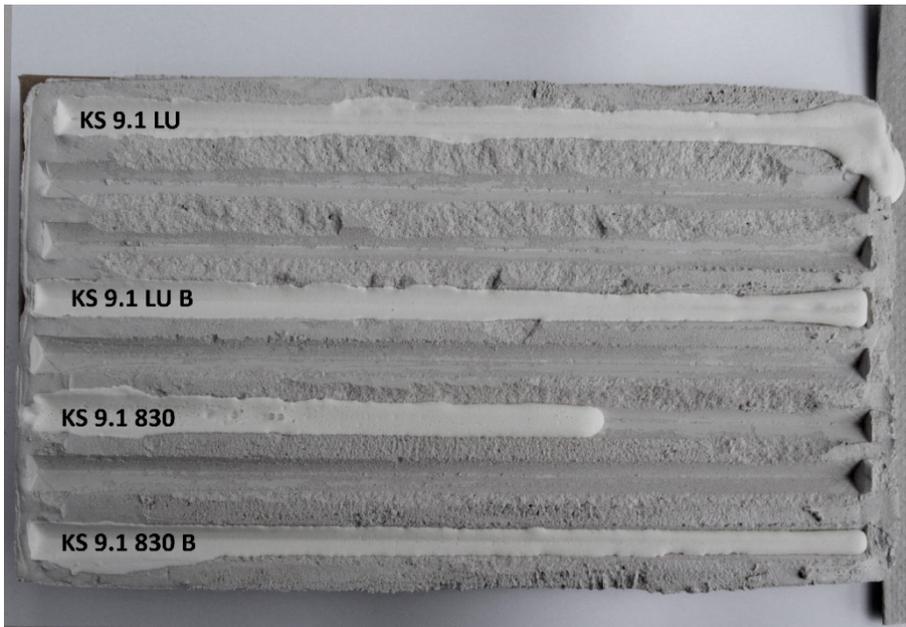


Abb. 85: Auswertung zur Fließgeschwindigkeit Reihe 9.1 an der Schräge auf Gipsputz

#### 4.9.8 Ergebnis Bruchfestigkeit

Alle Prüfkörper zeigten sich stabil und ließen sich in einem Zug mittig zerbrechen. Bei keinem der Prüfkörper war eine starke Absandung an den Bruchflächen erkennbar. Eine optische Trennung der Phasen war nur bei Prüfkörper **KS 9.1 LU** ersichtlich aber nicht durch die gesamte Fläche ausgeprägt.

#### 4.9.9 Ergebnis Einfüllverhalten in Hohlräume

Alle getesteten Massen ließen sich homogen fließend in die Hohlraumprüfkörper einfüllen und verteilten sich im gesamten Hohlraum. Nach dem Einfüllen standen zunächst alle Mörtel bis zur oberen Kante des Hohlraums bündig und sackten dann leicht ab, wobei die handgerührten Mörtel **KS 9.1 830 B** und **KS 9.1 LU B** weniger einsacken als die mit dem Stabmixer gefertigten Mörtel.

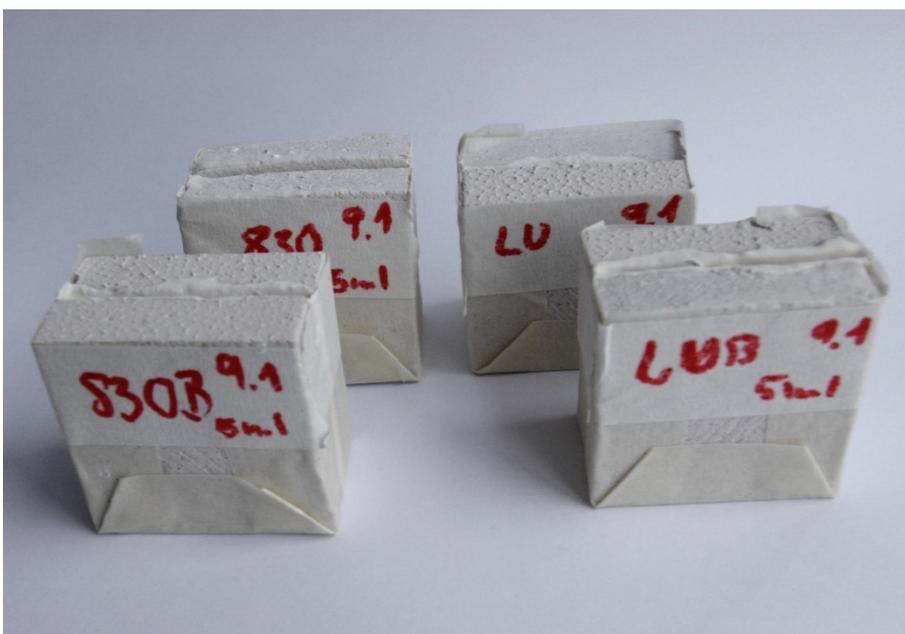


Abb. 86: Prüfkörper mit Hinterfüllung der Mörtel der Prüfreihe KS 9.1

#### 4.9.10 Zusammenfassung der Frischmörtelanalysen

In der Zusammenfassung der Frischmörtelanalyse werden die Mörtel aufgezeigt, die nach Beurteilung aller Analyseergebnisse für die Nutzung an den Wandmalereien für unterschiedliche Anforderungen an Hohlraumgrößen in Frage kamen. Ausgewählt wurden nur die Mörtelmischungen der Reihen mit dem Bindemittel Kieselol. Die Wandbereiche in der Schlosskapelle Bückeberg, die im Bereich der Pilotfläche akustisch und optisch untersucht wurden, zeigten sowohl breite Risse und tiefe Ablösungen zwischen einzelnen Putzflächen als auch nur akustisch festzustellende Hohlräume ohne direkten Zugang über Putzflanken. Durch die Erfahrungswerte der Sicherungsmaßnahmen 2014 wurde bezüglich unterschiedlicher Hohlraumgrößen die Einstellung des verbindenden Hinterfüllmörtels, vor allem hinsichtlich der Fließfähigkeit, berücksichtigt. Da die mit Köstrosol® 830 AS gebundenen Mörtel gesamt ein besseres Verhalten in der Sedimentation, Rissbildung, Haftfestigkeit und Anbindung zeigten und mit einer bessern Standfestigkeit an der Wand vor allem auch für größere Hohlräume in Frage kamen, wurde diesem Bindemittel in der Umsetzung des Bearbeitungszyklusses der Vorzug vor Ludox® PX 30 gegeben.

Eine Nutzung von Mörteln aus formuliertem Kalk kam vor allem aus zwei Gründen für die Anwendung an den Putzflächen der Schlosskapelle Bückeberg nicht in Frage. Zum einen zeigten die Mörtel ein hohes Penetrationsverhalten des Wasseranteils, der bei möglichst niedriger Einstellung zu einem zu geringen Fließverhalten und zu Rissbildung führte. Die Vorgabe, vor allem für den vorliegenden Gipsputz, war es jedoch, eine möglichst geringe Einbringung von Feuchtigkeit in diesen zu erzeugen, was durch die Nutzung von Kieselol als Bindemittel mit wenigen Millimetern erfüllt wurde. Ein Vorteil der kalkgebundenen Massen ist in deren Standfestigkeit und deren geringen Sedimentation zu sehen, wodurch sie für eine Hinterfüllung von größeren Hohlräumen ohne umliegende Gipsputze nach vorgenommenen Untersuchungsreihen geeignet erscheinen.

Die Herstellungsart der Hinterfüllmörtel haben einen großen Einfluss auf deren Eigenschaften. Insbesondere die Fließfähigkeit der Mörtel verringert sich bei Nutzung eines Stabmixers oder Dispergiergeräts. Aber auch die Rissbildung und das erhöhte Sedimentations- und Penetrationsverhalten sprechen bei der Herstellung der Hinterfüllmörtel mit Kieselol für eine Nutzung der händischen Vermengung der Komponenten. Auch bei den kalkgebundenen Mörteln wurde die Schaumbildung durch die Nutzung des Dispergiergerätes als zu hoch eingestuft. Die Standfestigkeit wurde zwar durch die mechanische Vermischung bei allen Mörteln begünstigt, die Fließfähigkeit aber auch sehr herabgesetzt. Durch die Testreihen mit unterschiedlicher Herstellungsart bei gleichem Mischverhältnis der Komponenten konnte verifiziert werden, bei welchem Anspruch an den Mörtel welche Herstellungsart geeignet ist.

Für die größeren Hohlräume mit mehr als 200 ml Füllvolumen wurde die Masse mit dem geringsten Schwund und Rissbildung **KS 1.1 830 B** ausgewählt, für mittlere Hohlräume zwischen 5-200 ml **KS 9.1 830 B** und für Haarrisse **KS 5.1 830 B**.

Tab. 10: Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse der genutzten mit Kieselol gebundenen Mörtel

Prüfkörperreihe	Fließfähigkeit	Sedimentation	Penetrationsverhalten	Rissbildung/ Schwund	Bruchfestigkeit	Einfüllverhalten in Hohlräume
KS 1.1 830	+++	+++	++++	++++	++++	+++
KS 1.1 830 B	++++	++++	++++	++++	++++	+++
KS 5.1 830	+++	++	++	++	++	++++
KS 5.1 830 B	++++	+++	++	++	+++	++++
KS 9.1 830	++	+++	+++	++	+++	+++
KS 9.1 830 B	+++	++++	+++	+++	+++	+++
KS 1.1 LU	++	+++	++++	+++	+++	+++
KS 1.1 LU B	+++	+++	++++	++++	++++	+++
KS 5.1 LU	+++	++	++	++	++	++++
KS 5.1 LU B	++++	++	++	++	++	++++
KS 9.1 LU	+++	+++	+++	++	+++	+++
KS 9.1LU B	+++	+++	+++	++	+++	+++
- schlecht ++ mittel +++ gut ++++ sehr gut						

#### 4.10 Herstellung von Verbund- und Hohlraumprüfkörpern

Tab. 11: Untersuchungskataloge der Prüfkörper für die Plasma/Ozon Analysen

Bezeichnung der Prüfkörperreihen	Prüfkörpergeometrie	Anzahl der Prüfkörper	Untersuchung
<b>Putzprüfkörper</b> V5 Gips HKCP	Scheiben (4x4x0,5 cm)	/9 Prüfkörper pro Mörtel =18	Untersuchung zur Verbesserten Wasseraufnahmefähigkeit durch Ozon/Plasmabehandlung
<b>Beschichtete Prüfkörper</b> V5 Gips-Leinöl HKCP -Leinöl	Scheiben mit Leinölstrich (4x4x0,5 cm)	/17 Prüfkörper pro Mörtel = 34	Beurteilung zur Verbesserung der Gesamtoberflächenenergie mittels Plasma
<b>Gefasste Prüfkörper</b> R,S,O,BO,W,G,BF,LO C KR, B	Scheiben mit Farbfassung (4x4x0,5 cm)	65	Beurteilung zum optischen Einfluss von Plasma/Ozonbehandlung auf Pigmente/Fassung
<b>Verbundprüfkörper</b> Als Beispiel: 20 LU 60 III G  FK/LU/KÖ 5sec./20 sec. 40W, 60W G/K	Hohlraumprüfkörper Planparallel (4x4x1,5 cm)	/1-17 4 Prüfkörper pro Reihe 3 Testreihen = ca. 200	Haftzugprüfung zur Überprüfung der Anbindung nach Plasma/Ozonbehandlung
<b>Hohlraumprüfkörper</b> VVG01 und VVG02	Hohlraumprüfkörper abgeformt/Plasma Ausbreitung	2	Optische Beurteilung der Ausbreitung von Plasma, eingeführt über Bohrloch in Hohlraum.
<b>Verbundprüfkörper</b> KS 1.1 830/20-22 (I-II)	Hohlraumprüfkörper abgeformt/Ozon behandelt	5	Verbesserung der Mörtelanbindung durch Ozonbehandlung im Hohlraumdetektion

Tab. 12: Untersuchungskataloge der Prüfkörper für die THz-Analysen

Bezeichnung der Prüfkörperreihen	Prüfkörpergeometrie	Anzahl der Prüfkörper	Untersuchung
<b>Bindemittel Kieselzol</b> 0830AS 1030KD 1530AS Ludox® PX 30	Eingetrocknet oder Tablettenform	/ 1-3 3 Prüfkörper pro Kieselzol = 12	Kennwertermittlung des Absorptionskoeffizienten und Brechungsindex in THz-Strahlung
<b>Bindemittel Kalk</b> FK Kalkprodukt	Presslinge bzw. Scheiben (4x4x0,5 cm)	/ 1-3 3 Prüfkörper pro Mörtel/Zuschlag = 27 Prüfkörper	
<b>Putzmörtel</b> V5 Gips HKCP			
<b>Zuschläge</b> Marmormehl (extra, mittel, grob) Tylose Hohlglaskugeln Cab-O-Sil			
<b>Additive</b> WPC Tween 20 Mowilith	Eingetrocknet oder Tablettenform	/ 1-3 3 Prüfkörper pro Additiv = 9	
<b>Hinterfüllmörtel</b> KS 9.1 830 KS 9.1 LU FK	Scheiben (4x4x0,5 cm)	/ 1-3 3 Prüfkörper pro Mörtel = 9	
<b>Verbundprüfkörper</b> V5 Gips mit KS 9.1 830	Hohlraumprüfkörper Planparallel (4x4x1,5 cm)	2	Messbarkeit der Verteilung von Hinterfüllmörtel/Hohlraumdetektion
V5 Gips /20-22 (I-II)	Hohlraumprüfkörper abgeformt/mit Ozon behandelt	5	Messbarkeit der Verteilung von Hinterfüllmörtel/Hohlraumdetektion

#### 4.10.1 Hohlraumprüfkörper

Für die weiterführenden Untersuchungen der Arbeitsgruppen der Fakultät Naturwissenschaft und Technik HAWK (Fakultät N) und der Philipps Universität Marburg wurden Verbund- und Hohlraumprüfkörper für Testreihen zur Überprüfung der Anbindung von Mörteln hergestellt. Hierfür war zum einen beabsichtigt, die Prüfkörper nach der Behandlung mit Plasma zu hinterfüllen und nach entsprechender Trocknung mittels Haftzugmessung zu überprüfen. Gegenübergestellt wurden hierbei immer mit Plasma bearbeitete und hinterfüllte Prüfkörper in Bezug auf unbearbeitete hinterfüllte Referenzprüfkörper. Des Weiteren wurden an Prüfkörpern gleicher Geometrie Trocknungsverhalten und Verteilung im Hohlraum mittels THz-Strahlung überprüft. Ziel der Untersuchung war es, Aussagen über den optimalen Zeitpunkt der THz-Messungen am Objekt in Bückeberg treffen zu können.

Bei einem zu hohen Restwassergehalt der Injektionsmassen im Hohlraum würden die Messungen verfälscht werden, da THz-Strahlung von Wasser absorbiert wird und somit die Massen bei zu hoher Feuchtigkeit nicht durchdrungen wird. Hier soll die Festlegung eine Grenze zur Messung mit Restfeuchte im Material festgelegt werden.

Einheitlich für beide Untersuchungsreihen wurden aus den Normprüfkörpern  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  der Mörteln V5 Gipsputzmörtel 57598 und HKCP Kalkputz 57383, Prüfplatten in der Größe  $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}^3$  mittels Präzisionssäge gefertigt. Jeweils zwei dieser Platten wurden mit einem definierten Hohlraum im Abstand zueinander mittels Kreppband fixiert (Abb.15). Die Wahl, Kreppband zu nutzen, lag in dessen Eigenschaft der Diffusionsfähigkeit. Übliche Absperrungen mit Silikon o.ä. hätten nach eigenen Einschätzungen ein verändertes Abbindeverhalten des Hinterfüllmörtels im Vergleich zu den Vorgaben am Original zur Folge. Zudem wurde Kreppband für die Bearbeitung mit Plasma und Ozon von der AG Fakultät N als unbedenklich hinsichtlich der Wechselwirkung eingestuft.



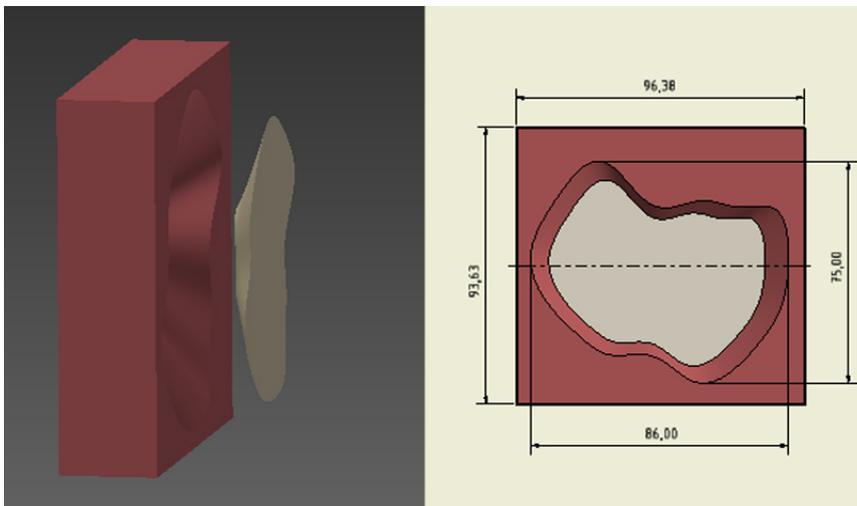
**Abb.87:** Prüfkörper mit zwei definierten Hohlräumen aus Gipsputzmörtel 57598 (links) und HKCP Kalkputz 57383 (rechts)

Da vor allem auch die gleichmäßige Verteilung von unterschiedlichen Mörteln vergleichend beurteilt werden sollte, entstand die Idee, Formen zur Herstellung immer gleicher Hohlraumprüfkörper zu konzipieren. Diese sollten ebenfalls für die technischen Verfahren des Projektes die Vergleichbarkeit von z.B. Vermessung der Hohlräume und Verteilung von Plasmen ermöglichen. Daher wurde mittels

3D-CAD-Software ein Prüfkörper sowie ein Hohlraum entworfen und mittels 3D-Drucker mit einem flexiblen Filament ausgedruckt. Die Wahl einer flexiblen Masse zur Herstellung der Formungen erfolgte, um die Ausformung der Prüfkörper nach Erhärtung zu erleichtern. Die Abformung erfolgte nach den folgenden Schritten:

- Einfüllung der Mörtelmasse
- Versenkung des ausgedruckten Hohlraums mittels gleichbleibenden Abstandhalters
- Ausformung des Hohlraums und des Hohlraumprüfkörpers
- Anbringung der Rückseite des Hohlraumprüfkörpers nach Trocknung und Ausformung des Hohlraums

Im Folgenden wird die Form mit Bemaßung als grafische Zeichnung dargestellt.



**Abb. 88:** Technische Zeichnung der Abformelemente mit Bemaßung

In den Voruntersuchungen und Maßnahmen wurde bereits durch Abschätzung des Fassungsvermögens der Hohlräume bei der Hinterfüllung eine Hohlraumbreitung in meist größeren Abmaßen vorgefunden. Hinterfüllungen wurden im Rahmen der Restaurierungsmaßnahmen bis zu einem Volumen von 200 ml<sup>3</sup> vorgenommen.<sup>29</sup> Die Bemaßung der „künstlichen“ Hohlräume richtete sich nach diesen Angaben und den Ergebnissen an der Voruntersuchung der Pilotfläche im Jahr 2018.

Zur ersten Bewertung der Bearbeitung mit Plasma beziehungsweise der Analyse mittels THz-Strahlung, wurden Prüfkörper aus Gips (AF) für Voruntersuchungen erstellt. Um die Ausbreitung von Plasma im Hohlraum durch die Zuleitung eines ca. 2 mm großen Injektionslochs zu simulieren, wurden zwei Prüfkörper mit Bohrungen an unterschiedlicher Oberflächengeometrie hergestellt (**Abb. 17**) und an der flach auslaufenden Seite aufgesägt. Dies geschah, um die Ausbreitung des Plasmas optisch beurteilen zu können. Um die Messbarkeit von Hohlräumen mittels THz-Strahlung in unterschiedlichen Auftreffrichtungen der Strahlung zu simulieren, wurden Prüfkörper in verschiedenen Varianten hergestellt. Hierbei wurden zwei Prüfkörper mit einer definierten Reflexionsschicht aus Alu versehen, an welcher die THz-Strahlung vollständig reflektiert wird (**Abb. 18**).

<sup>29</sup> Leupold/Belter, 2014

Dies erleichterte die Zuordnung der einzelnen THz-Reflexe und unterstützte die spätere Interpretation der Daten von Prüfkörpern ohne Metallschicht.

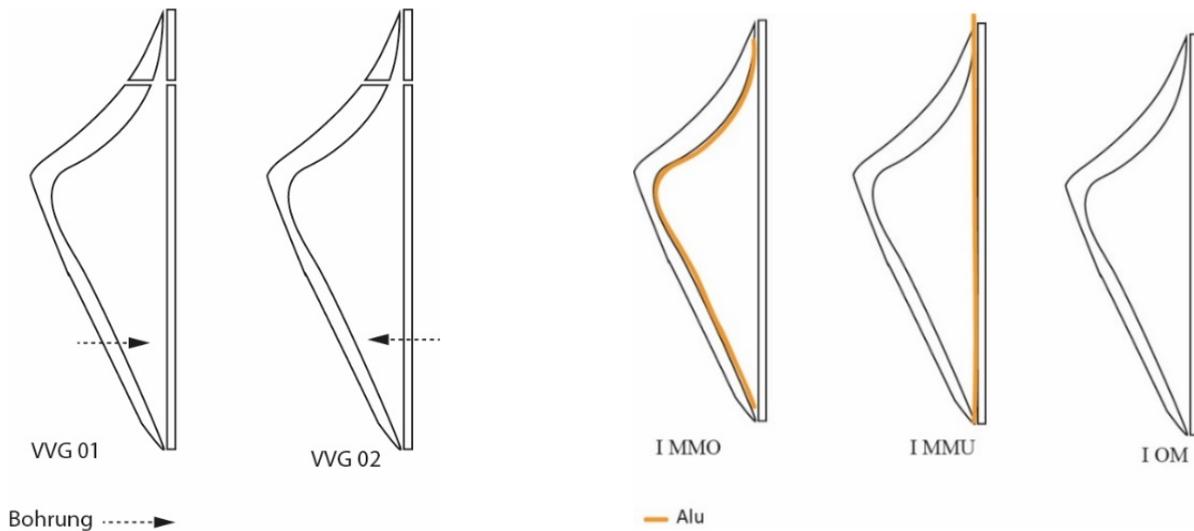


Abb. 89: Prüfkörper 1. Testreihe Fakultät N

Abb. 90: Prüfkörper 1. Testreihe Philipps Universität Marburg

#### 4.10.2 Herstellung von gefassten Prüfkörpern

Für die weiterführenden Untersuchungen der Arbeitsgruppen der Fakultät Naturwissenschaft und Technik HAWK bezüglich der Auswirkung von Plasma/Ozon auf Farbfassung wurden Gipsputze mit Farbfassungen hergestellt. Die Auswahl der genutzten Pigmente (**Tab. 13**) orientierte sich an den Pigmentuntersuchungen, die das Labor Drewello & Weißmann 2013 durchgeführt und im Zustandsbericht von Prof. Dr. Nicole Riedl-Siedow aufgeführt wurden.

Gefertigt wurden jeweils 12 Prüfkörper und ein Referenzprüfkörper (4 x 4 x 1 cm) aus Gipsputzmörtel mit zwei Farbstreifen (**Abb. 19**). Angesetzt wurden die Pigmente in Leinöl. Beim Ansatz wurde von dem in der Deckkraft geringsten Pigment ausgegangen und dieses deckend eingestellt. Die weiteren Pigmente wurden daraufhin in der gleichen Menge eingewogen und angesetzt. Ausgenommen war das Pigment Bleiweiß, das bereits in Leinöl durch die Firma Kremer Pigmente gebrauchsfertig vorlag. Der Auftrag erfolgte ohne Grundierung durch einfaches Aufstreichen, wobei auf eine homogene Oberfläche geachtet wurde. Auf eine Grundierung wurde verzichtet, da nicht die Anbindung, sondern die farbliche Veränderung durch Plasma/Ozon Ziel der Untersuchung an Farbfassungen sein sollte (siehe Kapitel 5.5.1). Diese Fassung ohne Grundierung lässt sich auch auf einem Gipsuntergrund vornehmen.

Das Weiter wurden Prüfkörper gleicher Dimension aus Gips- und Kalkputzmörtel (V5 Gipsputzmörtel 57598 und HKCP Kalkputz 57383) mit Leinölüberzug gefertigt. Dieser Leinölüberzug simulierte die nach Untersuchung vorliegende Vermutung der vorgenommenen Leinöltränkung oder Leinölnutzung im Bereich der Hohlräume an den Wandmalereien der Schlosskapelle Bückeberg.<sup>30</sup> Die Prüfkörper wurden zur Untersuchung mittels Plasma zur Verbesserung und Erhöhung der Oberflächenenergie genutzt. Die Erhöhung der Oberflächenenergie kann eine verbesserte Anbindung von z.B. eingesetzten Hinterfüllmörteln an sonst hydrophoben Oberflächen bewirken (siehe Kapitel 5.3).

<sup>30</sup> Riedl, 2014

Der Auftrag des Leinöls erfolgte mittels Tränkung einer Oberfläche auf Dreieckleisten 5 mm in Leinöl stehend über einen Tag mit anschließender Trocknung und Lagerung im Klimaraum bei 20°C und 60 % rLF.

Tab. 13: Pigmentauswahl und Bezeichnung

	Reihe	Pigment	Abkürzung
	1	Cadmiumrot Nr. 2 – Kremer Pigment 21130	R
	1	Eisenoxidschwarz 318 – Kremer Pigment 48400	S
x	2	Chromorange, bleihaltig – Kremer Pigment 4230	O
	2	Braunocker deutsch hellbraun – Kremer Pigment 4023	BO
x	3	Kremserweiß, Bleiweiß in Öl – Kremer Pigment 460007	W
	3	Chromoxidgrün – Kremer Pigment 44200	G
	4	Blanc fix, Schwerspat natur, Bariumsulfat – Kremer Pigment 58700	BF
	4	Lichter Ocker – Deffner & Johann	LO
	5	Champagner Kreide – Deffner & Johann	C Kr
	5	Ultramarinblau hell – Kremer Pigment 45080	B



Abb. 91: Prüfkörperreihe zur Beurteilung von farblichen Veränderungen durch den Einsatz von Plasma/Ozon

#### 4.10.3 Herstellung von beschichteten Prüfkörpern

Wie schon in Kapitel 3.2 beschrieben, sind die Oberflächen der Decken- und Wandmalereien bei zurückliegenden Renovierungs- und Restaurierungsarbeiten mit Beschichtungen überzogen worden. Sie weisen, wie die Abbildungen in den Kartierungen in Kapitel 4.1 deutlich machen, unterschiedliche Glanzzustände auf. Zudem tragen diese Überzüge zu einer starken Verbräunung und somit zu einer optisch indifferenten Abgrenzung der einzelnen Farbtöne der malerischen Darstellungen bei. Der Glanzfaktor wie auch die dunkeln Farbtöne können dazu führen, dass bestimmte Flächen vom 3D-Streiflichtscanner der THz-Messeinheit nicht akkurat erfasst werden können (siehe Beschreibung Kapitel 6.4). Daher wurde überlegt, Prüfkörper mit Farbfassung und abdunkelnden Überzügen zu erstellen, um an diesen Probemessungen zu simulieren. Zur genauen Zusammensetzung der originalen Überzüge gibt es unterschiedliche Angaben, die in historischen Dokumenten zu finden sind und Ergebnisse, die Analysen aus den Jahren 2013/14 hervorbrachten. Für die Herstellung der farblich

gefassten Prüfkörper wurden die bereits für die Testreihe der Plasma-/Ozonbearbeitung gefertigten Prüfkörper (**Abb. 19**) übernommen. Die Entscheidung fiel auf die Simulation eines verdunkelten Überzuges durch einen pigmentierten Leinölfirnis und eine pigmentierte Bienenwachsmasse. Für die Pigmentierung wurde Terra di Siena dunkel gebrannt (40430) von Kremer Pigmente gewählt. Der Auftrag erfolgte mittels Pinsel. Im Fall des Wachsauftrags wurde die Oberfläche nach Auftrag mit Pinsel mittels Heizschuh nachgeglättet, da auch die originalen Oberflächen in ihrer optischen Beschaffenheit eher glatt wirken. Der Grad der Verdunkelung ist an dem ursprünglich weißen Mittelstreifen zwischen den Farbaufträgen nachzuvollziehen.



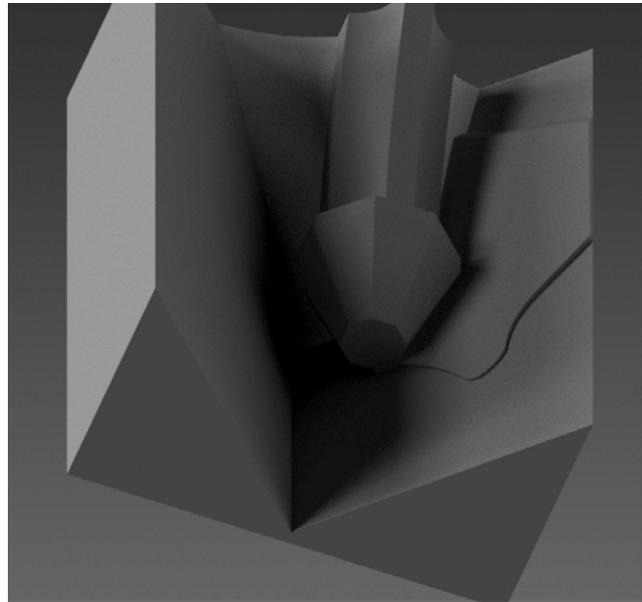
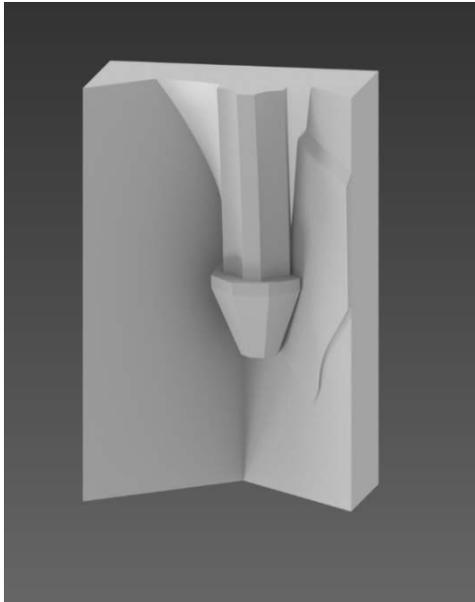
**Abb. 92:** Links Prüfkörper mit Farbauftrag der ausgewählten Farbabfolgen, rechts nach Auftrag mit pigmentiertem Leinölfirnis

Angedacht war vor allem dunkle Bereiche (Braunocker deutsch hellbraun – Kremer Pigment 4023, Eisenoxidschwarz 318 – Kremer Pigment 48400, Lichter Ocker – Deffner & Johann, Chromoxidgrün – Kremer Pigment 44200) aneinanderzufügen und ggf. in unterschiedlichen Höhen zu platzieren, um zu überprüfen, ob der Streiflichtscanner die Unterschiede der Höhenabgrenzung, beeinflusst durch den Glanzfaktor, erfassen kann.

#### 4.10.4 Erstellung eines 3D-Modells eines Pilotflächenbereiches

Was bei der Nutzung des Roboterarms im Kirchenraum an der Pilotfläche beachtet werden musste, waren mögliche Kollisionsflächen. Besonders war der Rippenbogen hier zu berücksichtigen. Um bestmöglich auf das Verfahren vor Ort vorbereitet zu sein und den Roboterarm in seinem Bewegungsradius möglicherweise vorab einzuschränken, wurde die Nutzung eines Modells zur Simulation der Messsituation erdacht. Um hier möglichst nah an die reale Situation heranzureichen, wurde der Bereich um die Messflächen mit allen relevanten Höhen der architektonischen Elemente händisch in x,y,z-Achse vermessen. Diese Daten wurden mittels der 3D-CAD-Software Autodesk Inventor in eine 3D-Zeichnung umgesetzt (**Abb. 21**). Die Gesamthöhe der bemessenen Fläche beträgt

90 cm. Die leichte Unebenheit, die innerhalb der Oberfläche der Testfläche B im Original vorhanden ist, wurde in der entsprechenden Höhe, aber nicht mit der exakten Ausdehnung in der Breite angelegt. Es wurde ein Modell im Rapid Prototyping Labor der Fakultät Gestaltung der HAWK aus einem Stück Polyurethan gefräst und anschließend in der Oberfläche geglättet.



**Abb. 93:** Links: Eckbereich der Testfläche mit unterem Bereich des Rippenbogens und angelegter unebener Oberfläche im Hohlraumbereich. Rechts: Unteransicht der Testfläche mit Rippenbogen und den relevanten Hinterschneidungen in den unteren Bereichen des Übergangs zu den Kappen

Die erhöhten Teilbereiche rechts des Rippenbogens wurden farblich nach Vorbild der Malereien in Bückeberg gefasst (**Abb. 22**) und mit Carnaubawachs in Terpentinöl gelöst für den Glanzfaktor überzogen, getrocknet und anschließend der Philipps Universität Marburg für Laborversuche zur Verfügung gestellt.



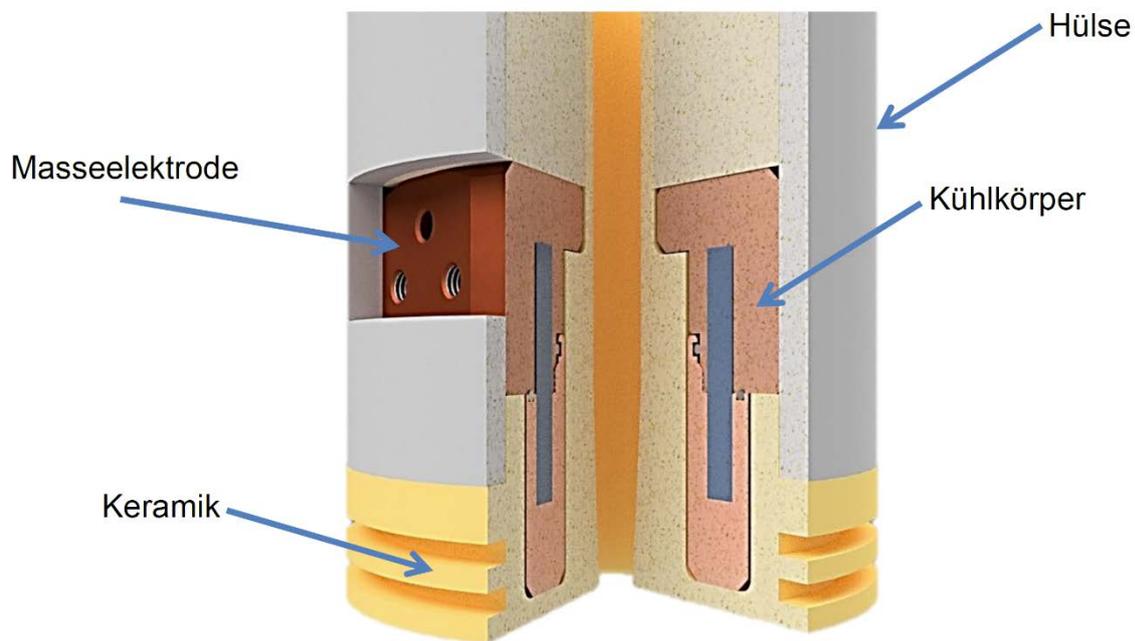
**Abb. 94:** 3D-Modell aus Polyurethan mit Farbfassung

## 5. Fakultät Ingenieurwissenschaften und Gesundheit – Optimierung

### 5.1 Voruntersuchungen der Plasmaquellen

Für die Vorversuche zur Überprüfung der Ausbreitung von Plasma im Hohlraum wurde die Plasmaquelle Disc-Jet (DJ) verwendet. Diese Quelle basiert auf dem nachfolgenden Aufbau in **Abb. 23** (Patentnummer DE 10 2016 209 097.6).

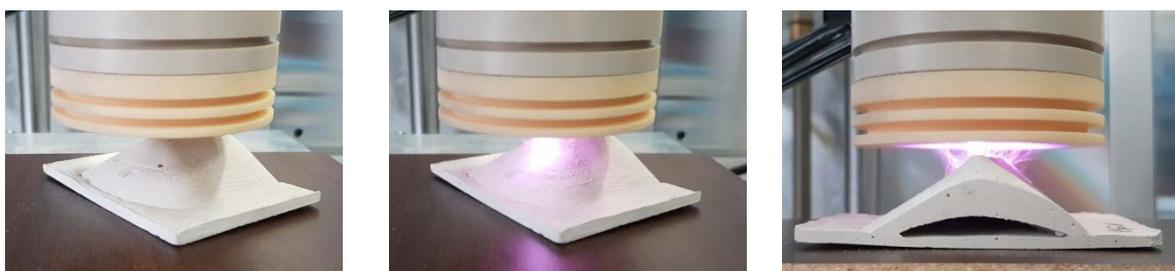
Innerhalb der Keramik befindet sich ein Kupferkörper, der einerseits als Masseelektrode dient und andererseits als Kühlkörper agiert. Eingebettet wird der Kupferkörper in eine Kunststoffhülse (**Abb. 23**). In der Keramik befindet sich konzentrisch die Hochspannungselektrode aus Edelstahl. Durch die Hochspannungselektrode wird auch das zum Zünden des Plasmas erforderliche Prozessgas eingespeist. Durch diesen Aufbau kann die Plasmaquelle auf Substraten, die nicht elektrisch leitfähig sind, Plasma generieren.



**Abb. 95:** Aufbau der Plasmaquelle DJ

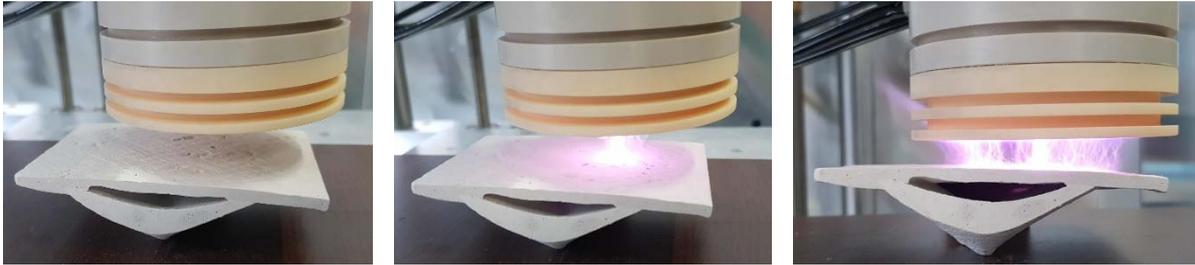
Für diese Untersuchungen wurden die in Kapitel 4.10.1 /**Abb. 17** vorgestellten Prüfkörper verwendet und der Disc-Jet an unterschiedlichen Oberflächenkonfigurationen ausgerichtet.

In **Abb. 24** ist zu sehen, dass der Disc-Jet direkt über der 2 mm-Bohrung des Probenkörpers VVG01 auf der unebenen Oberfläche steht. Die mittige Abbildung zeigt die Plasmaentladung in dieser Position. Rechts ist die Frontale der Plasmaentladung zu erkennen. Visuell ist festzustellen, dass sich keine Plasmaentladung im Hohlraum ausbildet.



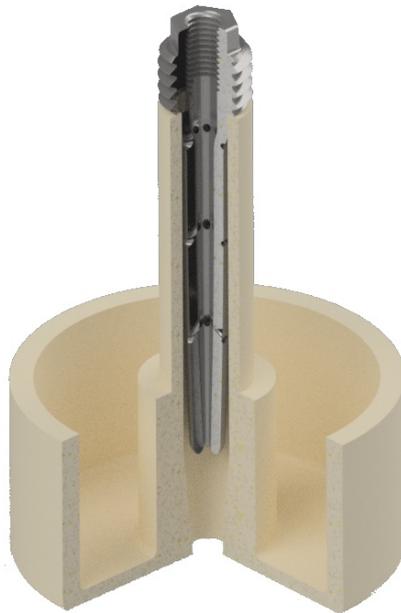
**Abb. 96:** Plasmabehandlung des Prüfkörpers VVG01

In **Abb. 25** ist der Disc-Jet direkt über der 2 mm-Bohrung an der geraden Fläche des Probenkörpers VVG02 ausgerichtet. Auch hier ist keine Entladung innerhalb des Hohlraums festzustellen.



**Abb. 97:** Plasmabehandlung des Prüfkörper VVG02

Die in den **Abb. 25** dargestellten Versuche wurden unter Verwendung des Prozessgases Argon mit einem Durchfluss von 15 l/min realisiert. Dabei wurde ein HV-X20 Generator der Firma Tante verwendet. Die eingekoppelte Leistung betrug bei den Versuchen 150 Watt bei einer sinusförmigen Spannung von ca. 12 kV und einer Frequenz von 18 kHz. Bei beiden Probenkörpern zeigen sich bereits große Effizienzverluste, indem das Plasma in erster Linie auf der Oberfläche der Probenkörper generiert wird. Dies ist auf den großen Düsenaustritt der Quelle zurückzuführen. Auch ein Variieren der Durchflussmenge und ein Wechsel auf das Prozessgas Helium erbrachten keine Verbesserungen, deshalb muss die Austrittsöffnung des Disc-Jets verkleinert werden. Dieses kann nur erfolgen, indem die gesamte Plasmaquelle in ihrer Größe skaliert wird, da sonst die geometrischen Abmessungen nicht mehr im Verhältnis zur Durchflussmenge stehen und elektrische Überschläge im Disc-Jet entstehen könnten, was zu einer Beschädigung der Quelle bzw. Fehlfunktionen führen könnte.



**Abb. 98:** Konzeptstudie Disc-Jet- Miniaturisierung

Zudem war der Disc-Jet von seinen Abmaßen her zu groß, um nah genug an die zu behandelnden Flächen geführt zu werden (**Abb. 26**). Außerdem ist eine zu hohe Leistung erforderlich, um einen späteren Einsatz als Handgerät zu ermöglichen. In **Abb. 26** ist die angedachte Skalierung des Disc-Jets dargestellt. Hierbei ist die Hochspannungselektrode mit tordierten Prozessgasbohrungen zu sehen.

Diese Tordierung sollte einen gerichteten und verengten Prozessgasstrahl gewährleisten, welcher eine Plasma-Einkopplung in die 2 mm große Bohrung ermöglichen sollte. Der gleichzeitig deutlich verkleinerte Düsenaustritt sollte zur Fokussierung des Plasmastrahls beitragen.

## 5.2 Konzeptstudie Disc-Jet

In **Abb. 27** ist die Konzeptstudie der Disc-Jet-Miniaturisierung abgebildet. Die beiden Schlüsselkomponenten (Keramik und Hochspannungselektrode) sind Sonderanfertigungen, deren Herstellung sich sowohl sehr zeit- als auch kostenintensiv dargestellt hat. Das fertige Funktionsmuster kommt zum aktuellen Zeitpunkt ohne zusätzliche Kühlung aus. Die Miniaturisierung des ursprünglichen Disc-Jets hat die benötigten Betriebsparameter reduziert, weshalb nur ein Bruchteil an Wärmeentwicklung auftritt. Die Hochspannungselektrode mit den Prozessgasbohrungen ist angepasst an den Keramikdurchmesser zur Einhaltung des benötigten Verhältnisses von Prozessgasbohrung in der Hochspannungselektrode zur Austrittsbohrung der Keramik. Des Weiteren ermöglicht die kompakte Bauweise bereits eine einfache Handhabung und eine gute Positionierbarkeit über dem jeweiligen Substrat. Die Prozessgas- und Hochspannungskontaktierungen sind durchweg als einfache Steckverbindungen ausgelegt, was dem Ganzen einen modularen Charakter gibt.



**Abb. 99:** Disc-Jet-Miniaturisierung

### 5.2.1 Vorversuche mit Disc-Jet an Gipsprüfkörpern

Der DJ-Mini wird für den Betrieb an einem Ausleger befestigt, der an eine Lineareinheit montiert wird. In den ersten Vorversuchen werden die Parameter zur Plasmaerzeugung eruiert (Prozessgas, Leistung, Spannung, Frequenz, Behandlungsabstand). In der **Abb. 28** wurde der DJ-Mini mit folgenden Parametern betrieben: Eine Betriebsspannung von 11 kV, ein Gasvolumenstrom von 10 l/min, ein variabler Behandlungsabstand von 1 mm bis 30 mm, eine Betriebsfrequenz von 17 kHz und eine eingekoppelte Leistung von 50 Watt. Als Leistungsgenerator dient ein Tantec HV-X20 mit dem Hochspannungstransformator HT-X1-34oil und einer Sinusspannung von maximal 34 kV. Anhand der dargestellten Bilder kann man sehr gut die Variation in der Entladungscharakteristik bei Annäherung der Quelle an die Oberfläche der Gipsprüfkörper erkennen. Je geringer der Behandlungsabstand, desto flächiger bzw. voluminöser wird die Plasmaentladung. Dies kann durch den geringer werdenden

Entladungsraum erklärt werden, der mit abnehmendem Abstand ein sogenanntes „ionisiertes Gaskissen“ erzeugt. Dieses Gaskissen kann insbesondere bei Einspeisung in Hohlräume spaltgängige Volumenentladungen erzeugen, welche im Hinblick auf die Aufgabenstellung notwendig sein können.



Abb. 100: Entladung der Disc-Jet-Miniaturisierung auf Gipsprüfkörpern

### 5.2.2 Vorversuche mit Disc-Jet an Hohlraumprüfkörpern

In **Abb. 29** ist die Applikation des DJ-Mini auf den geometrisch komplexen Hohlraumprüfkörpern verdeutlicht. Es ist deutlich zu sehen, dass der Plasmajet punktuell an einer Schräge einsetzbar ist, ohne mit der umgebenden Fläche zu interagieren. Dieser Aspekt ist überaus wichtig, da in der späteren Anwendung Wandmalereien nicht mit dem Plasma interagieren sollten. Ebenso positiv zu bemerken ist, dass beim Einsatz des DJ-Mini weniger Gasvolumen für eine homogene Entladung gebraucht wird als beim herkömmlichen DJ. Des Weiteren konnte deutlich dargestellt werden, dass das Plasma die 2 mm-Bohrungen durchströmt und sich ein flächiger Fußpunkt im Inneren des Hohlraumes ausbildet. Diese Entladungscharakteristik lässt sich durch den Anstellwinkel der Quelle und den Abstand zur Oberfläche variieren und nach Bedarf ausweiten. Das hier verwendete Prozessgas war Argon, jedoch wurde im Rahmen der weiteren Projektlaufzeit die Effizienz weiterer Gase wie beispielsweise Helium eruiert.

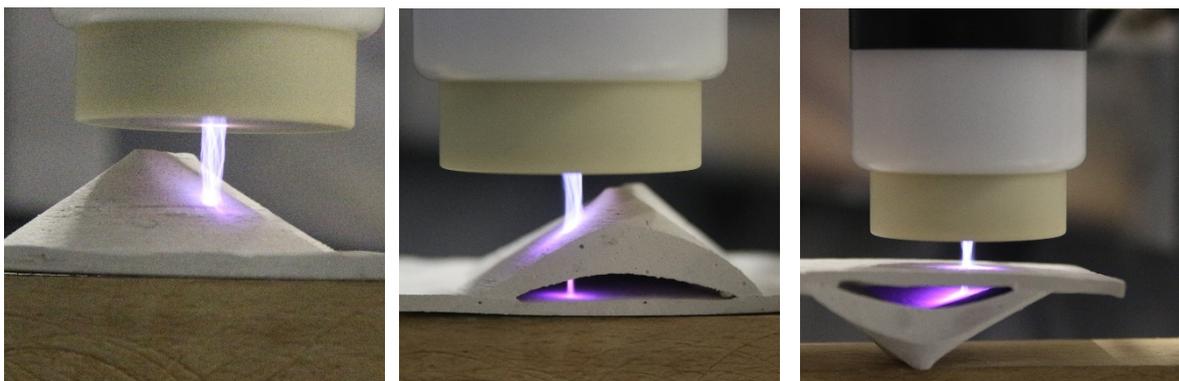


Abb. 101: Entladung der Disc-Jet-Miniaturisierung auf Hohlraumprüfkörpern

### 5.3 Versuche zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Plasmabehandlung

Für die Ermittlung der Oberflächenenergie mittels Tropfenkonturanalyse wurden pro Parametersatz drei Mörtelprobenkörper mit jeweils drei Messungen durchgeführt. Aus den Messergebnissen wurden Mittelwerte inkl. Standardabweichungen gebildet, die sich in polare und disperse Anteile aufteilen. Nach den erfolgreichen Vorversuchen wurden die Parameter festgelegt und nachfolgender

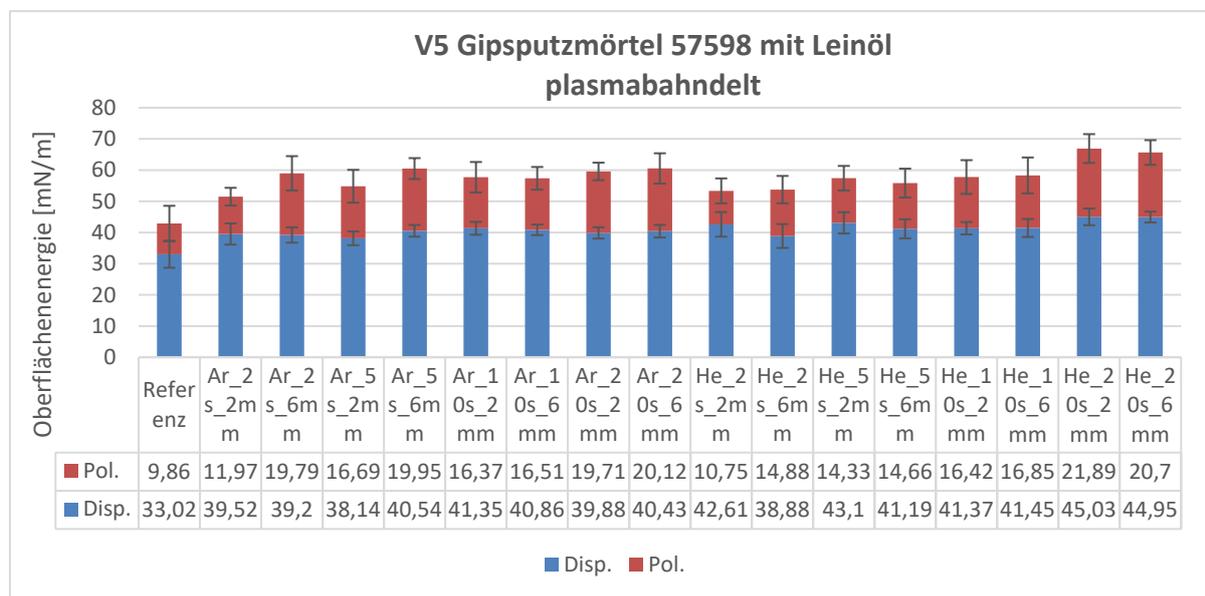
Versuchsplan durchgeführt (Tab. 14). V5 Gipsputzmörtel 57598 und HKCP Kalkputz 57383 ohne Leinöl konnten mit dem Kontaktwinkelmessgerät nicht untersucht werden, da die unbehandelten Oberflächen für die Messung zu hydrophil sind.

**Tab. 14: Versuchsplan zu Analysen der Oberflächenenergie durch Plasmabehandlung**

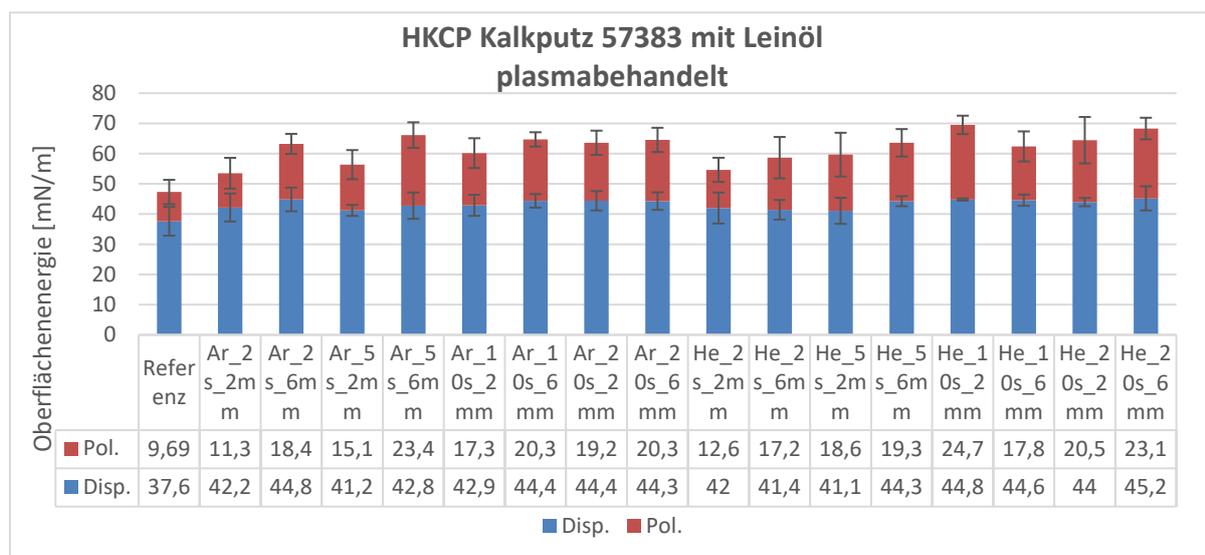
Versuchsdurchführung											
Plasmaquelle: Miniaturisierter DiscJet											
Fixparameter: Leistung 150 Watt und Prozessgasdurchfluss: 15 l/min											
Spannung: 8 - 12 kV; Frequenz: 15 - 18 kHz											
Kalkgipsmörtel mit Leinöl											
Oberflächenenergie [mN/m] Referenz											
Gesamt		47,3		8,79							
Dispersiv		37,6		4,76							
Polar		9,69		4,03							
Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Argon 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 20s		
Gesamt		53,49		9,72		Gesamt		56,34		6,65	
Dispersiv		42,16		4,62		Dispersiv		41,2		1,82	
Polar		11,34		5,1		Polar		15,14		4,83	
Gesamt		60,15		8,42		Gesamt		63,59		7,22	
Dispersiv		42,89		3,49		Dispersiv		44,39		3,21	
Polar		17,27		4,93		Polar		19,2		4,01	
Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Helium 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 20s		
Gesamt		54,63		9,13		Gesamt		59,66		11,55	
Dispersiv		41,98		5,13		Dispersiv		41,06		4,32	
Polar		12,64		4		Polar		18,6		7,24	
Gesamt		69,51		3,39		Gesamt		64,44		9,05	
Dispersiv		44,79		0,35		Dispersiv		43,96		1,37	
Polar		24,72		3,04		Polar		20,48		7,68	
Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Argon 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 20s		
Gesamt		63,23		7,23		Gesamt		66,13		8,6	
Dispersiv		44,83		3,91		Dispersiv		42,76		4,36	
Polar		18,39		3,32		Polar		23,37		4,23	
Gesamt		64,71		4,61		Gesamt		64,55		6,91	
Dispersiv		44,37		2,25		Dispersiv		43,96		2,9	
Polar		20,33		2,37		Polar		20,27		4,01	
Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Helium 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 20s		
Gesamt		58,65		10,1		Gesamt		63,58		6,19	
Dispersiv		41,41		3,24		Dispersiv		44,25		1,66	
Polar		17,24		6,86		Polar		19,33		4,54	
Gesamt		62,38		6,84		Gesamt		62,38		6,84	
Dispersiv		44,58		1,86		Dispersiv		45,17		3,99	
Polar		17,8		4,98		Polar		23,13		3,57	
Gipsmörtel mit Leinöl											
Oberflächenenergie [mN/m] Referenz											
Gesamt		53,49		9,72							
Dispersiv		42,16		4,62							
Polar		11,34		5,1							
Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Argon 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 20s		
Gesamt		51,49		6,23		Gesamt		54,83		7,45	
Dispersiv		39,52		3,39		Dispersiv		38,14		2,2	
Polar		11,97		2,84		Polar		16,69		5,26	
Gesamt		57,72		6,97		Gesamt		57,72		6,97	
Dispersiv		41,35		2,07		Dispersiv		41,35		2,07	
Polar		16,37		4,89		Polar		19,71		2,8	
Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm			Abstand 2 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Helium 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 20s		
Gesamt		53,36		7,93		Gesamt		57,43		7,33	
Dispersiv		42,61		3,94		Dispersiv		43,1		3,41	
Polar		10,75		3,99		Polar		14,33		3,92	
Gesamt		57,78		7,39		Gesamt		57,78		7,39	
Dispersiv		41,37		1,98		Dispersiv		41,37		1,98	
Polar		16,42		5,41		Polar		21,89		4,62	
Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Argon 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Argon 20s		
Gesamt		58,99		7,96		Gesamt		60,49		5,23	
Dispersiv		39,2		2,47		Dispersiv		40,54		1,87	
Polar		19,79		5,49		Polar		19,95		3,36	
Gesamt		57,37		5,34		Gesamt		57,37		5,34	
Dispersiv		40,86		1,7		Dispersiv		40,86		1,7	
Polar		16,51		3,64		Polar		20,12		4,85	
Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm			Abstand 6 mm		
Oberflächenenergie [mN/m] Helium 2s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 5s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 10s			Oberflächenenergie [mN/m] Helium 20s		
Gesamt		53,76		8,2		Gesamt		55,85		7,68	
Dispersiv		38,88		3,82		Dispersiv		41,19		3,05	
Polar		14,88		4,38		Polar		14,66		4,62	
Gesamt		58,3		8,64		Gesamt		58,3		8,64	
Dispersiv		41,45		2,88		Dispersiv		41,45		2,88	
Polar		16,85		5,76		Polar		20,7		3,96	

### 5.3.1 Auswertung zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Plasmabehandlung

Anhand der Darstellung in den **Diagr. 1** und **Diagr. 2** ist zu erkennen, dass das Plasma eine Steigerung der Gesamtoberflächenenergie bewirkt. Sowohl der disperse als auch der polare Anteil ist bei jeglicher Parametereinstellung gegenüber der Referenz (V5 Gipsputzmörtel 57598 und HKCP Kalkputz 57383) gestiegen. Diese Steigerung findet sowohl bei der Plasmabehandlung mit Argon als auch bei der Behandlung mit Helium statt. Es gibt zwischen den beiden Gasen nur eine geringe Differenz in den Werten. Die höhere Tiefengängigkeit der Heliumentladung kann bei den späteren Hohlkörpern von Bedeutung sein. Bei einem Behandlungsabstand von 6 mm im Vergleich zu 2 mm zeigt sich ein deutlicher Anstieg des polaren Anteils, was auf einen vermehrten Sauerstoffanteil in der Entladung schließen lässt. Der Abstand hat keinen signifikanten Einfluss auf den dispersen Anteil. Die deutlichste Steigerung in Bezug auf die Behandlungsdauer zeigt sich je nach Parametereinstellung ab 5 Sekunden aufwärts.



**Diagr. 11:** Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Gipsputzmörtel nach Plasmabehandlung



**Diagr. 12:** Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Kalkputzmörtel nach Plasmabehandlung

### 5.3.2 Optische Begutachtung von beschichteten Mörteloberflächen nach Plasmabehandlung

Die optische Begutachtung zwischen der Referenzprobe und den Prüfkörpern mit unterschiedlicher Behandlungsdauer zeigte keine makroskopisch auswertbaren Änderungen der Oberflächengeometrie. Dies galt sowohl für die Prüfkörper aus Gipsputz- sowie Kalkputzmörtel. Um dennoch Oberflächenveränderungen zwischen der Referenzprobe und dem Einfluss der Behandlungszeiten mittels Plasma auszuschließen zu können, wurden der Gipsputzmörtel und Kalkputzmörtel einer weiteren Analyse hinsichtlich der Oberflächentomografie unterzogen. Aufgrund der präparationsbedingten Rauigkeit der Kalkputzprüfkörperoberflächen war die Einordnung der Ergebnisse der optischen Bewertung eingeschränkt möglich, die zusätzlich durchgeführten mikroskopischen Analysen dargestellt in Kapitel 5.3.3 gaben hier einen genaueren Aufschluss.



Abb. 102 : Prüfkörper der Prüfreihe V5 Gipsputzmörtel 57598 mit Leinöl

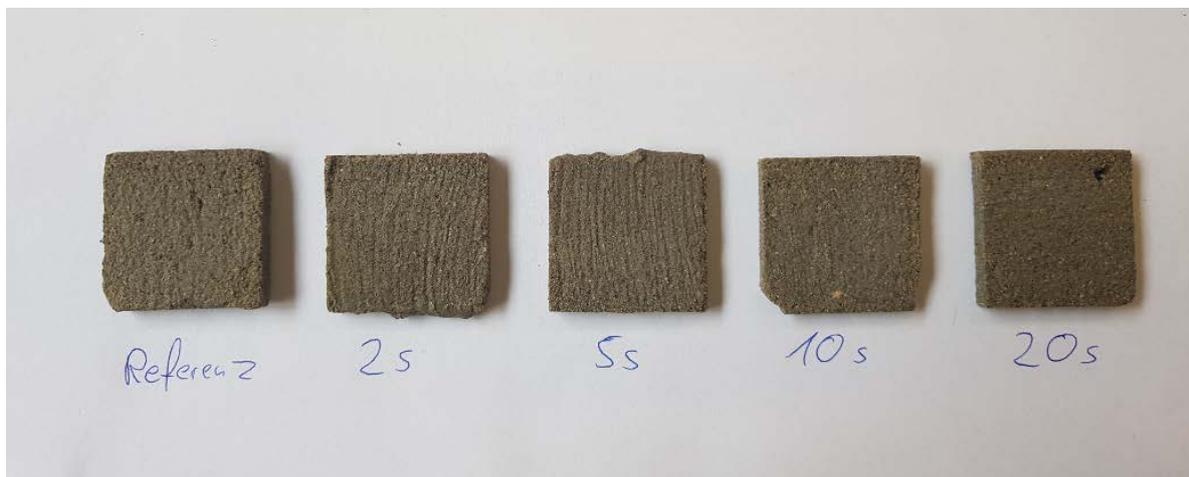


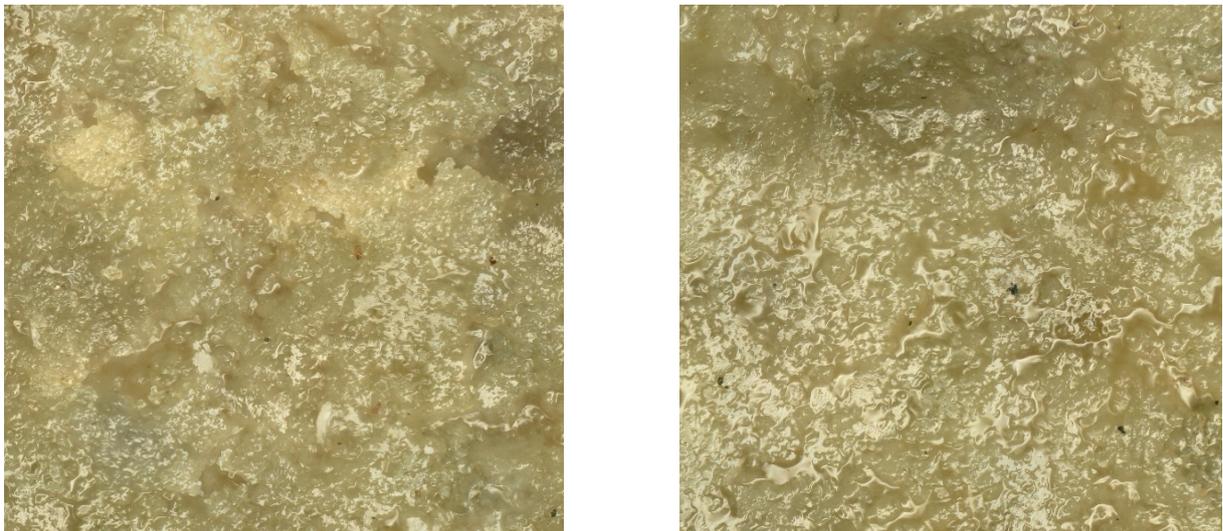
Abb. 103: Prüfkörper der Prüfreihe HKCP Kalkputz 57383 mit Leinöl

### 5.3.3 Mikroskopische Begutachtung von beschichteten Mörteloberflächen nach Plasmabehandlung

Aus den Auswertungen zur Veränderung der Oberflächenenergie aus Kapitel 5.3.1 geht hervor, dass zwischen den genutzten Prozessgasen Argon und Helium bei einem Abstand von 6 mm und der längsten Plasmabehandlungszeit von 20 s kaum signifikante Unterschiede in der Erhöhung der Oberflächenenergie herrschen. Auch zwischen den Prozesszeiten von 2 bis 20 Sekunden konnten keine optisch erkennbaren Unterschiede an der Oberfläche ausgemacht werden. Daher wurde zusätzlich die

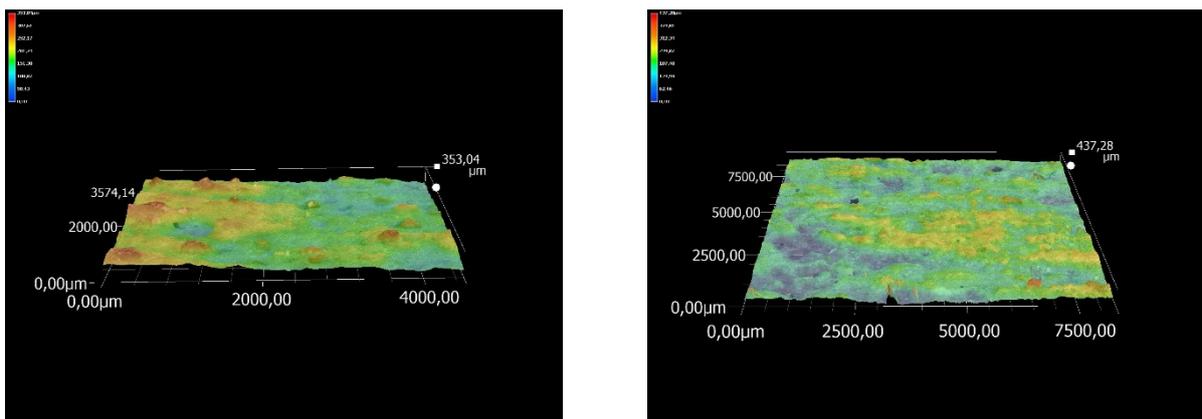
mikroskopische topografische 2D-Oberflächenanalyse mittels Keyence 3D-Digitalmikroskop VHX lediglich an einem Prüfkörper vor und nach der längsten Bearbeitungszeit von 20 s verglichen.

Die **Abb. 32** zeigt links die 2D-topografische Oberflächenaufnahme einer unbehandelten Gipsmörtelprobe. Rechts ist dieselbe Gipsmörtelprobe nach der Plasmabehandlung zu sehen. Als Behandlungsparameter wurde ein Abstand von 6 mm, eine Behandlungsdauer von 20 s und als Prozessgas Argon (15 l/min) gewählt.



**Abb. 104:** Links: Gipsmörtel Referenz; rechts: Gipsmörtel 20 s plasmabehandelt (je 750 x 750  $\mu\text{m}$ )

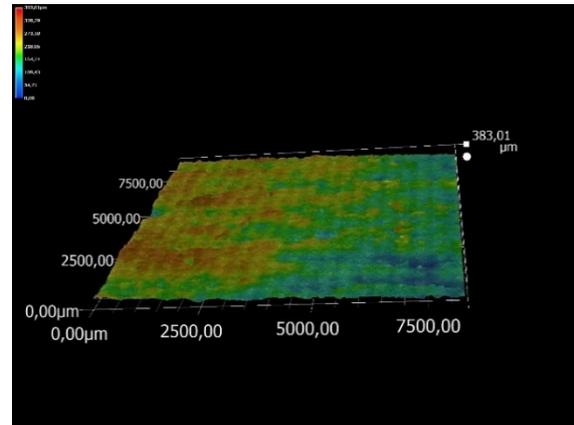
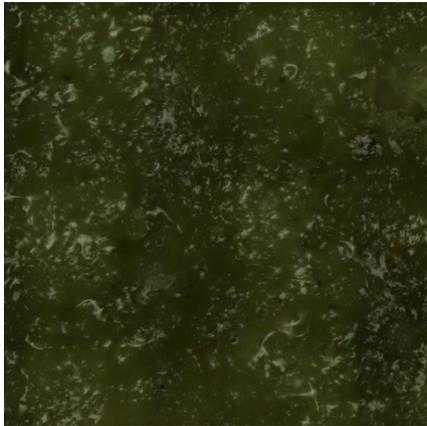
Visuell sind in der 2D-Mikroskopie kaum signifikante Unterschiede in der Oberflächentopografie zwischen bearbeiteter und unbearbeiteter Oberfläche zu erkennen. Um eine genauere Aussage über topografische Unterschiede der Oberflächen treffen zu können, wurde aus der 2D-Aufnahme eine 3D-Topografie erstellt (**Abb. 33**) und eine Bewertung vorgenommen.



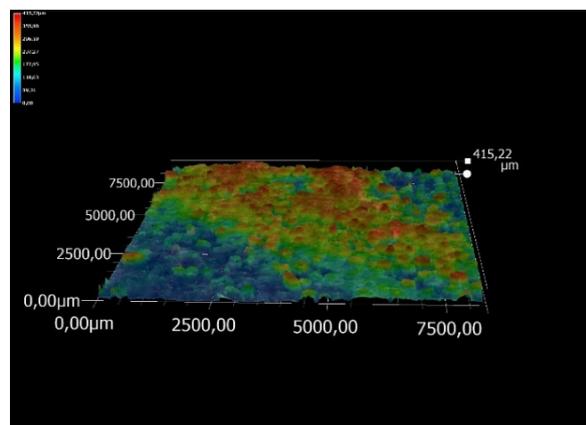
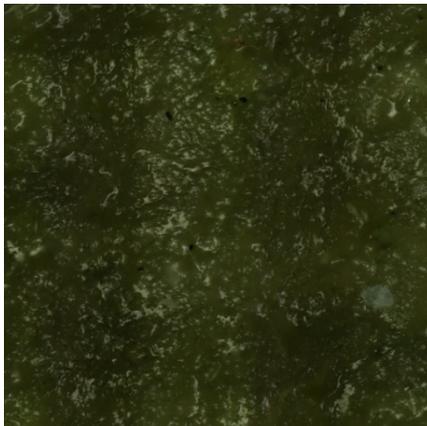
**Abb. 105:** Links: Gipsmörtel Referenz; rechts: Gipsmörtel 20 s plasmabehandelt

In **Abb. 33** sind die Referenz und dieselbe Probe nach einer 20 s langen Plasmabehandlung zu sehen. Die Veränderung der Höhendifferenz zwischen dem gemessenen Minimum und Maximum des Höhenprofils liegt hier bei 353,04  $\mu\text{m}$  für die Referenz und 437,28  $\mu\text{m}$  nach 20 s Behandlungsdauer. Auf der plasmabehandelten Probe sind gleichmäßig verteilte Krater erkennbar, die als Filament-Einschläge charakteristisch für senkrecht auf das Substrat auftreffende Entladungen sind. Daraus ist zu

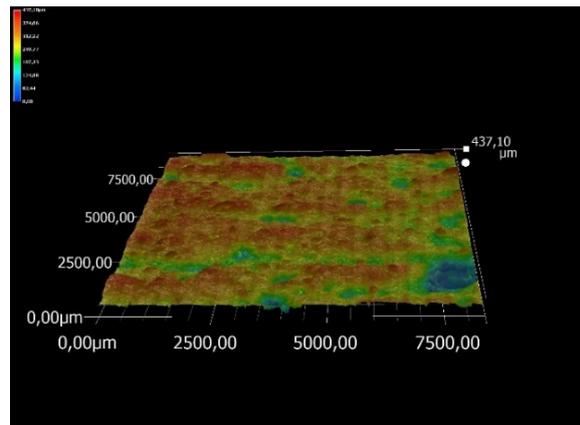
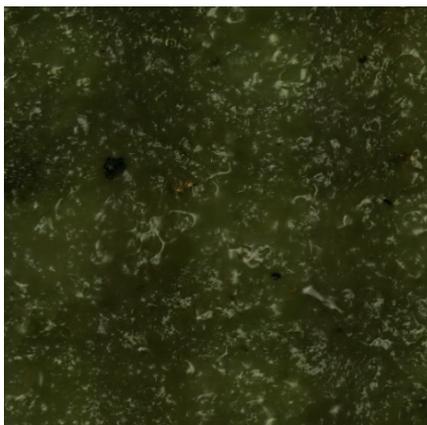
schließen, dass sich eine sehr geringe Änderung der Topografie bereits nach 20 s Plasmabehandlung ergibt. Im Vergleich wurde die Testreihe an einem Prüfkörper aus Kalkputzmörtel nach 2 s und 20 s im Vergleich zur unbehandelten Oberfläche untersucht (**Abb. 34, Abb. 35, Abb. 36**).



**Abb. 106:** Links: Mikroskopie Referenz (750 x 750 μm); rechts: Topografie Referenz



**Abb. 107:** Links: Mikroskopie 2 s Plasma (750 x 750 μm); rechts: Topografie 2 s Plasma



**Abb. 108:** Links: Mikroskopie 20 s Plasma (750 x 750 μm); rechts: Topografie 20 s Plasma

Es ist ersichtlich, dass die Höhendifferenz auch bei Kalkmörtelputzen durch die Plasmabehandlung von 383,01 μm (Referenz) über 415,22 μm (2 s) auf 437,10 μm (20 s) steigt.

Es kann aufgrund der Ergebnisse darauf geschlossen werden, dass eine längere Plasmabehandlungszeit von Putzmörteln somit nicht in Betracht kam, da sonst weitere physikalische Einflüsse bei der Plasmabehandlung Schäden an den Prüfkörpern und somit letztendlich auch an originalen Oberflächen hervorrufen könnten.

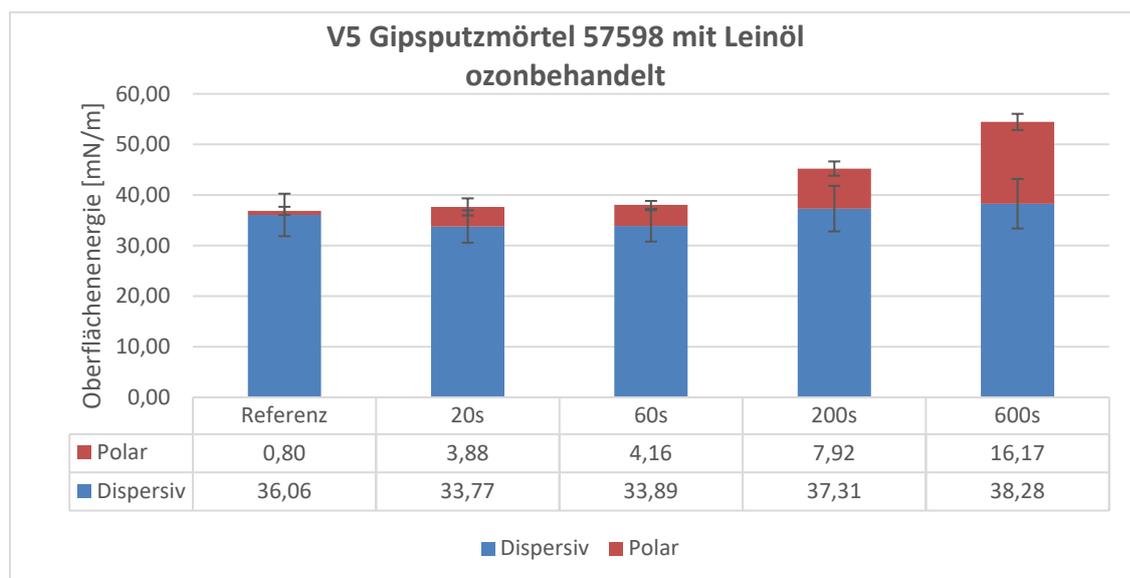
#### 5.4 Versuche zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Ozonbehandlung

Wie die Ergebnisse in Kapitel 5.3 zeigen, kann die Nutzung von Plasma an mineralischen Oberflächen zu Verlusten der Substanz führen. Daher wurde in den weiteren Untersuchungen die Nutzung von Ozon zur Flutung von Hohlräumen in den laufenden Testreihen mit aufgenommen. Um zu beurteilen, wie sich Ozon auf mineralische Oberflächen, aber auch in gefassten oder beschichteten Oberflächen auswirkt, wurde zunächst die Prüfreihe zur Analyse der veränderten Oberflächenenergie durch Ozonbehandlung an beschichteten Oberflächen vorgenommen.

Die Kalk- und Gipsputzmörtelproben wurden hierfür im weiteren Verlauf der Testreihen mittels des Ozongenerators Bitom OZONE GENERATOR BT-W10 behandelt. Dieser Ozongenerator produziert 10 g Ozon pro Stunde. Für die Testreihe wurden, wie bei der Reihe in Kapitel 5.3, pro Parametersatz drei Mörtelprobenkörper mit jeweils drei Messungen an 4 x 4 x 0,5 cm großen Prüfkörpern an der Oberfläche behandelt und mittels Tropfenkonturanalyse auf die Veränderung der Oberflächenenergie im Vergleich zum Referenzprüfkörper hin beprobt.

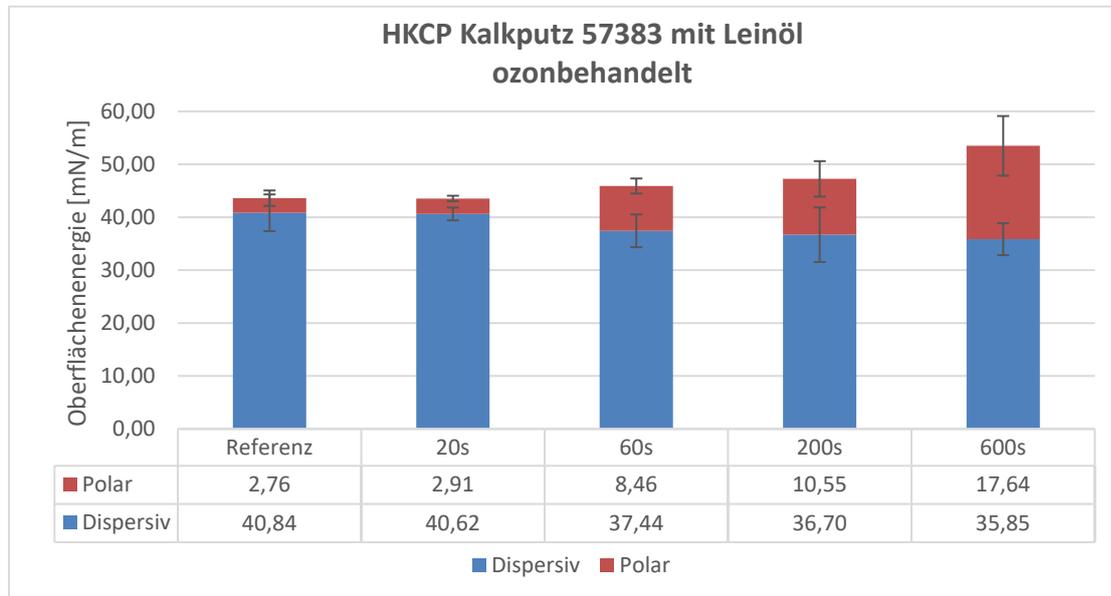
##### 5.4.1 Auswertung zur Veränderung der Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen durch Ozonbehandlung

Aus **Diagr. 3** und **Diagr. 4** ist zu schließen, dass die unbehandelten Prüfkörper (Referenz) deutlich geringere polare Anteile aufweisen als die Referenzproben aus dem Kapitel 5.3.1.



**Diagr. 13:** Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Gipsputzmörtel nach Ozonbehandlung

Bei den Gipsproben sank der polare Anteil von 9,8 mN/m auf 0,8 mN/m und bei den Kalk-Gips-Proben von 9,7 mN/m auf 2,76 mN/m. Es wird angenommen, dass die Proben für die Ozonbehandlung eine längere Auslagerungszeit erfahren haben als die Proben für die Plasmabehandlung und somit finden wahrscheinlich weitere Aushärtungsprozesse, z.B. Verdunstungseffekte des Leinöls, statt. Diese Aushärtungsprozesse wirken sich signifikant auf den polaren Anteil aus. Der disperse Anteil unterscheidet sich jedoch nur marginal zu den Referenzproben der plasmabehandelten Proben.



**Diagr. 14:** Auswertung zur Oberflächenenergie von leinölbestrichenem Kalkputzmörtel nach Ozonbehandlung

#### 5.4.2 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Oberflächenenergie von beschichteten Mörteloberflächen

Durch die Ozonbehandlung wurde, wie auch bei der Plasmabehandlung, eine deutliche Erhöhung der Oberflächenenergie hervorgerufen. Die Behandlungszeit mit Ozon war gegenüber einer Plasmabehandlung zwar deutlich länger, aber wird durch weitere Vorteile der Ozonbehandlung kompensiert. Für eine benutzerfreundliche Umsetzung liegt der Vorteil von ozonbasierten Handgeräten im Personen- und Objektschutz. Durch diese Behandlungsart kommt der Benutzer nicht in Kontakt mit Hochspannung, die bei der Erzeugung von Plasma erforderlich ist. Des Weiteren bleibt ein thermischer Einfluss, d.h. die Erwärmung von behandelten Oberflächen und eine damit einhergehende Spannung des Materials durch thermische Dehnung, aus. Die Korrelation zwischen veränderter Oberflächenenergie und der daraus erhofften Haftungsoptimierung wurde mittels der Analysen zu Haftzugprüfungen in Kapitel 5.8 weiter untersucht.

#### 5.5 Untersuchungen zu Plasma- und Ozonbehandlung auf Farbfassungen

In diesem Kapitel werden die Analysen zur Auswirkung von Plasma- bzw. Ozonbehandlung auf Farbfassung verschiedener Farbpigmente dargestellt. Hintergrund der Versuchsreihe ist das mögliche Auftreffen von Plasma bzw. Ozon bei der Einleitung in die Hohlräume am Objekt und dessen Auswirkung einschätzen bzw. besser steuern zu können.

### 5.5.1 Versuchsdurchführung der Plasma- und Ozonbehandlung auf Farbfassungen

Die Behandlungsparameter wurden aus Vorversuchen zu Haftzugfestigkeiten übernommen, da hier bereits Parameter zur Verbesserung der Haftung von Mörteln eingegrenzt werden konnten. Der Miniatur-DJ wurde mit folgenden Parametern betrieben: Einer Betriebsspannung von 8-12 kV, einem Gasvolumenstrom von 15 l/min, einer Betriebsfrequenz von ca. 17 kHz und einer eingekoppelten Leistung von 150 Watt. Als Prozessgas kam Argon zum Einsatz.

Der Abstand von der Lavaldüse (Austritt des Ozons) und der Plasmaquelle (60 Watt) zum Farbsubstrat wurden daher auf jeweils 4 mm festgesetzt. Die Lavaldüse und die Plasmaquelle wurden jeweils mittig über das Farbsubstrat der Proben (**Abb. 19**) ausgerichtet, so dass beide Farbpigmente zu gleichen Flächenteilen behandelt werden konnten. Die Behandlungsdauer gliederte sich jeweils in:

**Ozonbehandlung:** 0 (Referenz), 20, 60, 200 und 600 Sekunden

**Plasmabehandlung:** 0 (Referenz), 2, 5, 10, 20, 60, 120 Sekunden

Für jede zeitliche Bearbeitungsreihe wurde ein Prüfkörper nacheinander den Bearbeitungszeiten unterzogen, wobei die bereits genutzte Zeit aufaddiert wurde. Die Farbproben wurden nach der entsprechenden Zeitdauer unverzüglich fotografiert und sofort weiterbehandelt, damit mögliche auftretende thermische und/oder physikalische Effekte nicht zu stark unterbrochen wurden.

In den folgenden Tabellen (**Tab. 15** bis **Tab. 24**) sind Fotografien der Farbproben nach unterschiedlicher Behandlungsdauer abgebildet.



**Abb. 109:** Aufbau einer Ozonbehandlung mittels Lavaldüse, Düsenabstand zum Substrat von ca. 4 mm

Tab. 15: Ozonbehandlung: Cadmiumrot Nr. 2 – Kremer Pigment 21130 &amp; Eisenoxidschwarz 318 – Kremer Pigment 48400

Ozonbehandlung				
Referenz	20 sec	60 sec	200 sec	600 sec
				

Tab. 16: Plasmabehandlung: Cadmiumrot Nr. 2 – Kremer Pigment 21130 &amp; Eisenoxidschwarz 318 – Kremer Pigment 48400

Plasmabehandlung						
Referenz	2 sec	5 sec	10 sec	20 sec	60 sec	120 sec
						

Tab. 17: Ozonbehandlung: Chromorange, bleihaltig – Kremer Pigment 4230 &amp; Braunocker deutsch hellbraun – Kremer Pigment 4023

Ozonbehandlung				
Referenz	20 sec	60 sec	200 sec	600 sec
				

Tab. 18: Plasmabehandlung: Chromorange, bleihaltig – Kremer Pigment 4230 &amp; Braunocker deutsch hellbraun – Kremer Pigment 4023

Plasmabehandlung						
Referenz	2 sec	5 sec	10 sec	20 sec	60 sec	120 sec
						

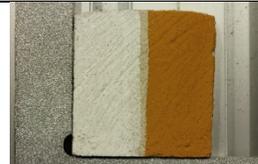
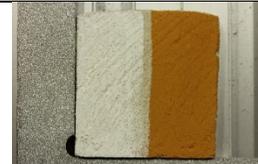
Tab. 19: Ozonbehandlung: Kremserweiß, Bleiweiß in Öl – Kremer Pigment 4023 &amp; Chromoxidgrün – Kremer Pigment 44200

Ozonbehandlung				
Referenz	20 sec	60 sec	200 sec	600 sec
				

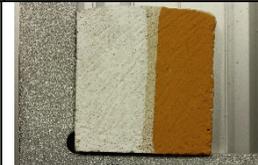
Tab. 20: Plasmabehandlung: Kremserweiß, Bleiweiß in Öl – Kremer Pigment 4023 &amp; Chromoxidgrün – Kremer Pigment 44200

Plasmabehandlung						
Referenz	2 sec	5 sec	10 sec	20 sec	60 sec	120 sec
						

Tab. 21: Ozonbehandlung: Blanc fix, Schwerspat natur, Bariumsulfat – Kremer Pigment 58700 &amp; Lichter Ocker – Deffner &amp; Johann

Ozonbehandlung				
Referenz	20 sec	60 sec	200 sec	600 sec
				

Tab. 22: Plasmabehandlung: Blanc fix, Schwerspat natur, Bariumsulfat – Kremer Pigment 58700 &amp; Lichter Ocker – Deffner &amp; Johann

Plasmabehandlung						
Referenz	2 sec	5 sec	10 sec	20 sec	60 sec	120 sec
						

Tab. 23: Ozonbehandlung: Champagner Kreide – Deffner &amp; Johann &amp; Ultramarinblau hell – Kremer Pigment 45080

Ozonbehandlung				
Referenz	20 sec	60 sec	200 sec	600 sec
				

Tab. 24: Plasmabehandlung: Champagner Kreide – Deffner &amp; Johann &amp; Ultramarinblau hell – Kremer Pigment 45080

Plasmabehandlung						
Referenz	2 sec	5 sec	10 sec	20 sec	60 sec	120 sec
						

### 5.5.2 Versuchsauswertung der Plasma- und Ozonbehandlung auf Farbfassungen

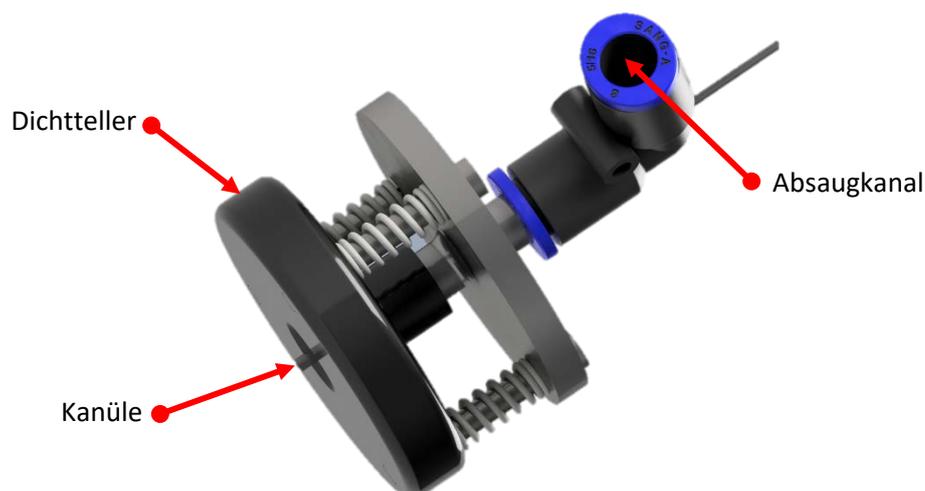
Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Farbpigmente unterschiedlich auf die Plasma- und Ozonbehandlung reagieren:

Bei der Ozonbehandlung ist nach der maximalen Behandlungsdauer von 600 Sekunden bei den Farbpigmenten Cadmiumrot (**Tab. 15**) und Chromorange (**Tab. 17**) eine Gelbverfärbung festzustellen. Das Farbpigment Blanc fix (**Tab. 21**) hat sich zum Teil aufgelöst und ist mittig nicht mehr vorhanden. Die anderen Farbpigmente weisen keine bzw. nur sehr geringe Änderungen der Farbfassung auf. Bei der Plasmabehandlung ist nach der maximalen Behandlungsdauer von 120 Sekunden bei dem Farbpigment Kremserweiß (**Tab. 20**) eine gelbliche Verfärbung festzustellen. Das Farbpigment Ultramarinblau (**Tab. 24**) ist durch die Plasmabehandlung geringfügig farbschwächer geworden. Die anderen Pigmente weisen keine bzw. nur minimale Änderungen der Farbfassung auf.

Die Ozon- und Plasmabehandlung kann einen Einfluss auf die Farbpigmente und somit auf Farbfassung haben. Gerade bei längeren Behandlungszeiten zeigte sich, dass ein unerwünschter Verfärbungseffekt nicht auszuschließen ist. Daher wurde nach den bis hierhin durchgeführten Testreihen beschlossen, bei den ausstehenden Experimenten/Versuchen und am Objekt in Bückeberg den direkten Kontakt von Ozon und Plasma auf gefassten Oberflächen zu vermeiden. Es entwickelte sich die Überlegung, das Ozon mittels feiner Kanülen direkt in die Bohrungen der Hohlräume zu leiten. Bei der Plasmabehandlung wurde angedacht, mittels einer Bohrungsmaske die Farbpigmente der Wandmalerei zu schützen.

### 5.6 Modifizierung der Ozoneinspeisung und Plasmabehandlung

Die Ozon- und Plasmabehandlungen haben bei längeren Behandlungszeiten einen Einfluss auf die Farbpigmente und deren Farbfassung gezeigt. Daher sollte ein direkter Kontakt von Ozon und Plasma mit der Wandmalerei vermieden werden. In **Abb. 38** ist die Konzeption eines Ozoneinspeisungssystems, kurz OES, abgebildet. Der OES garantiert ein zielgerichtetes Einleiten von Ozon in den Hohlraum der Wandmalerei. Dieses System gewährleistet eine sichere und unkomplizierte Handhabung.



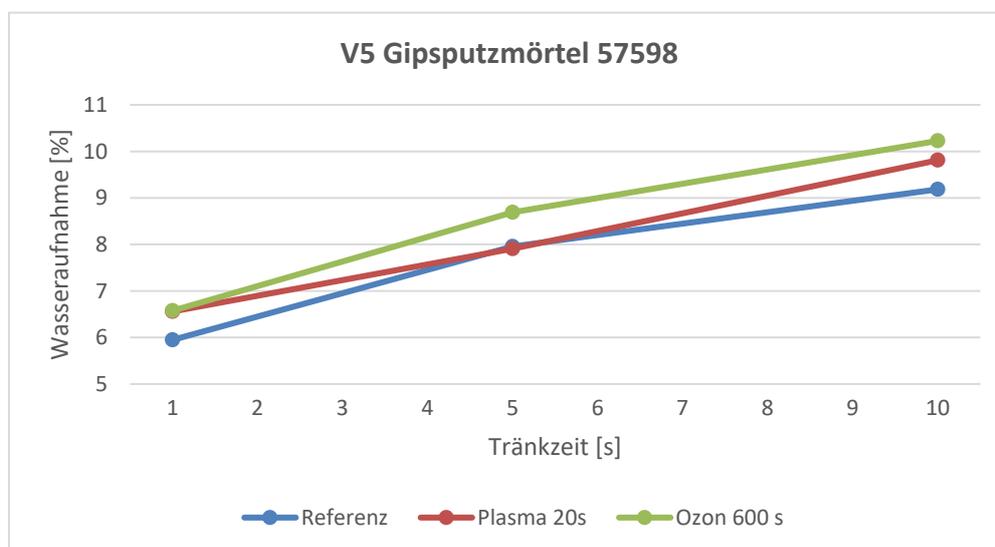
**Abb. 110:** Modifizierung-OES

Das durch den Ozongenerator erzeugte Ozon strömt durch die zentrisch angeordnete Kanüle in den Hohlraum der Wandmalerei. Da der Durchmesser der Kanüle geringer als die anvisierte Größe der Hohlraumbohrung ist, kann das Ozon nach erfolgreicher Flutung des Hohlraumes wieder am Ringspalt austreten. Das austretende Ozon wird über den konzentrischen Absaugkanal abgeleitet. Der Dichtteller, bestehend aus transparentem Kunststoff, verhindert, dass Ozon seitlich in die Raumluft beziehungsweise auf die Wandmalerei austreten kann. Der durchsichtige Kunststoff erleichtert die schadensfreie Positionierung der Kanüle über der Hohlraumbohrung.

Das Prinzip des OES ist bei der Plasmabehandlung nicht anwendbar, da durch die metallische Kanüle das Plasma nicht in den Hohlraum geleitet werden kann. Die Stabilität einer nichtleitfähigen Kanüle (z. B. aus Glas, Keramik, Kunststoff etc.) kann in diesen geringen Abmaßen nicht gewährleistet werden. Eine mögliche Lösung besteht darin, eine Bohrungsmaske zwischen Plasmaquelle und Wandmalerei zu platzieren, die die Farbpigmente der Wandmalerei schützt.

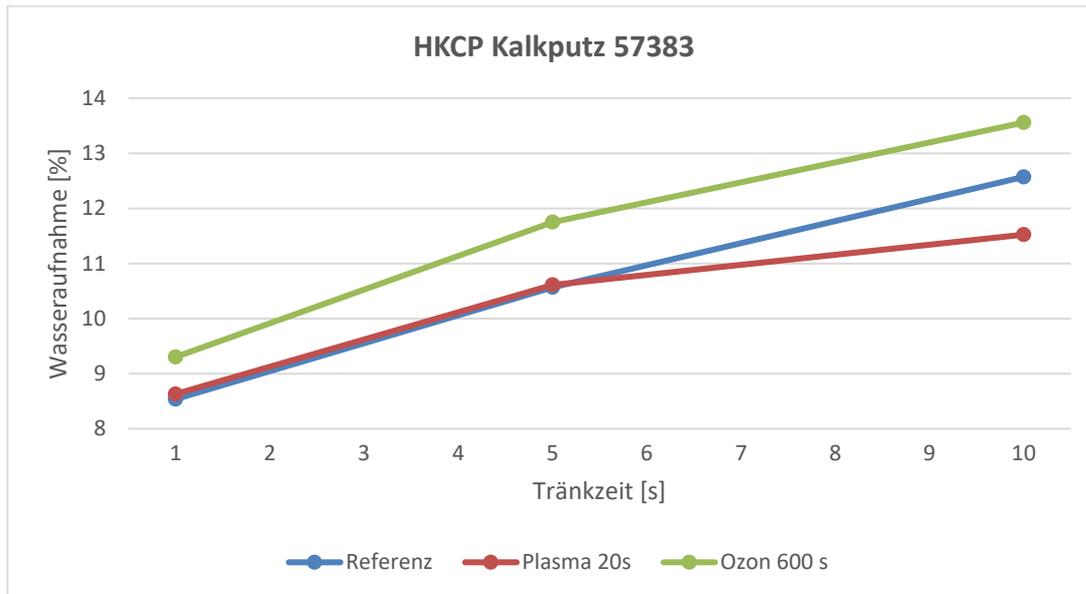
### 5.7 Wasseraufnahmefähigkeitsversuche von Putzoberflächen durch Plasma- und Ozonbehandlung

In den vorherigen Kapiteln konnte eine gesteigerte Oberflächenenergie durch eine Plasma- bzw. Ozonbehandlung festgestellt werden. In diesem Kapitel wird aufgezeigt, ob die veränderte Oberflächenenergie Einfluss auf das Wasseraufnahmeverhalten der Gips- und Kalkputzmörtelproben hat. Jeweils 3 Prüfkörper (4x4x0,5 cm) pro Bearbeitungsreihe wurden vor dem Tränken mit Plasma bzw. Ozon behandelt. Hiernach fand die Tränkung der Kalk- anschließend wurde diesen mittels definierten Luftstroms überflüssiges Wasser von der Oberfläche entfernt und zuletzt gewogen. Die Wägung und Tränkung fand durch eine Anbringung der Proben mittels Klammern an der Kraftmessdose Mark – 10 Force Gauge Model M5 – 012 statt. Durch die Gewichtszunahme konnte die prozentuale Wasseraufnahme bestimmt werden. In **Diagr. 5** sind die drei Verläufe der Gipsputz-Referenzproben (blau), der plasmabehandelten Gipsputz-Proben (rot) sowie der ozongebehandelten Gipsputz-Proben (grün) zu sehen. Dabei ist festzustellen, dass wie erwartet eine höhere Tränkzeit eine höhere Wasseraufnahme zur Folge hat. Allerdings zeigt sich bei den ozon und plasmabehandelten Proben ein signifikant höherer Wasseraufnahmegrad. Ferner zeigt die 600 s Ozonbehandlung einen stärkeren Effekt als die 20 s Plasmabehandlung.



**Diagr. 15:** Wasseraufnahme nach Plasma- und Ozonbehandlung von V5 Gipsputzmörtel 57598

In **Diagr. 6** sind die drei Verläufe der Kalkputz-Referenzproben (blau), der plasmabehandelten Kalkputz-Proben (rot) sowie der ozonbehandelten Kalkgips-Proben (grün) zu sehen. Dabei ist festzustellen, dass im Vergleich zu den Gipsputzproben der Kalkputz erwartungsgemäß generell eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit hat. Zudem zeigt sich ein differenziertes Verhalten zwischen der Ozon- und Plasmabehandlung. Nach der Plasmabehandlung ist keine stärkere Wasserzunahme (1 s und 5 s) im Vergleich zur Referenz ersichtlich. Bei 10 Sekunden Behandlung kann sogar eine Verringerung der Wasseraufnahme festgestellt werden. Hingegen zeigt die Ozonbehandlung, ähnlich wie bei den Gipsputzproben, eine generelle Steigerung der Wasseraufnahme im Vergleich zur Referenzprobe.



**Diagr. 16:** Wasseraufnahme nach Plasma- und Ozonbehandlung von HKCP Kalkputz 57383

Zusammenfassend zeigten die Wasseraufnahmeversuche sowohl für den Kalkputz als auch für die Gipsputz-Proben, dass die 10-minütige Ozonbehandlung eine stärkere Wasseraufnahme bei allen Tränkzeiten im Vergleich zu den Referenz- bzw. Plasma-Proben aufweist. Für die Bearbeitung der Hohlräume der Wandmalereien in Bückeberg kann somit durch den Einsatz von Plasma oder Ozon eine bessere Saugfähigkeit der Putzoberflächen erzielt werden. Vor allem für das Vornässen von schmalen Rissen zur verbesserten Lauffähigkeit von Hinterfüllmörteln kann dies als vorteilhaft gewertet werden.

## 5.8 Untersuchungen zur Verbesserung der Haftzugfestigkeit durch Ozonbehandlungen

Zur weiterführenden Untersuchung der Anbindung der entwickelten Hinterfüllmörtel an Gips-Kalkputzmörtel fanden Haftzuganalysen an den Mörteln **KS 1.1 830 B**, **KS 9.1 830 B**, und **KS 5.1 830 B** statt, welche auch in Bückeberg zum Einsatz kamen. Lediglich für die Reihe **KS 5.1 830 B** wurden außer Prüfkörpern mit Ozonbehandlung auch noch solche mit Plasmabehandlung beprobt. Da im Laufe des Projektes entschieden wurde, die Nutzung von Ozon zur Hohlraumflutung umzusetzen, erfolgte eine Reduzierung der Haftzugmessungen auf die Analyse der mit Ozon behandelten Prüfkörper. Dargestellt werden im Folgenden die Ergebnisse der Testreihen **KS 1.1 830 B** und **KS 9.1 830 B**.

### 5.8.1 Durchführung der Ozonbehandlung und Hinterfüllung

Für die Testreihen kamen planparallele Prüfkörper aus Kalkputz und aus Gipsputz mit definiertem Hohlraum (siehe Kapitel 4.10.1 / **Abb.15**) zum Einsatz; in die Hohlräume eingeleitet wurde das Ozon über eine Kanüle. Neben dem Einfluss der Ozonflutung (10 min und 20 min) wurde zusätzlich der Einfluss einer Vornässung der Kalk- und Gipsputzmörtel mit Ethanol 98 % und auch in Kombination mit der Ozonbehandlung untersucht. Gegenübergestellt wurde allen Untersuchungsreihen eine Probereihe mit Referenzprüfkörpern. Die Vorgehensweise bei der Vorbereitung der Putzflächen mittels Ethanols wurde von den bisher in Bückeburg durchgeführten Maßnahmen übernommen. Die Fließfähigkeit der Hinterfüllmörtel sollte so vor allem im Bereich von Haarrissen erhöht werden. Vorgenässt wurden die Prüfkörper jeweils unmittelbar vor der Befüllung mit dem jeweiligen Hinterfüllmörtel. Hergestellt wurden die Prüfkörper analog zu den in Kapitel 4 beschriebenen Testreihen. Pro Bearbeitungsreihe wurden jeweils 3 Prüfkörper mittels Spritze über einen Schlauch mit 2 mm Durchmesser verfüllt.

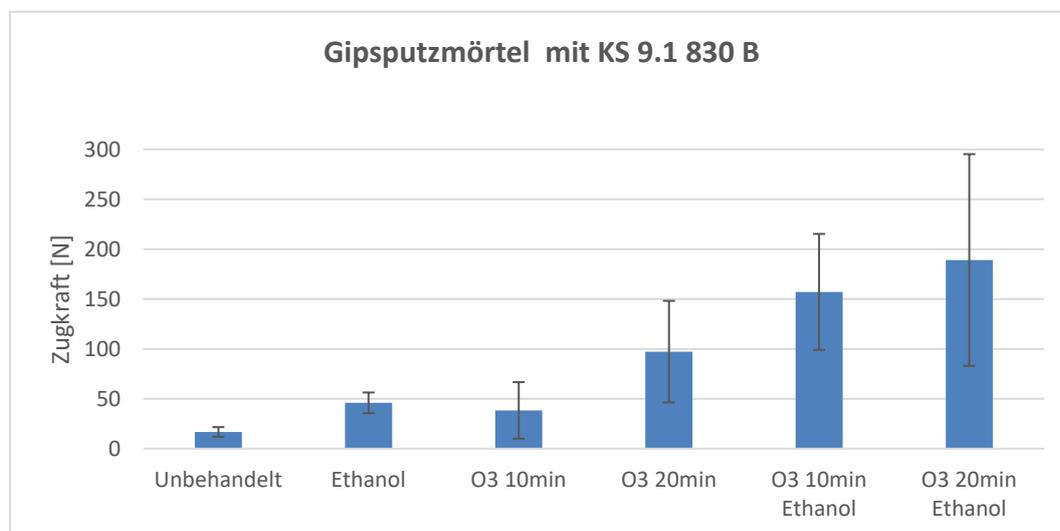
Nach Durchführung der Hinterfüllung fand die Lagerung der Prüfkörper stehend über 4 Wochen in einem Klimaschrank bei 20°C und 65 % rLF statt.

### 5.8.2 Durchführung der Haftzugprüfungen

Für die Haftzugprüfung fand die Anbringung der Prüfstempel mittels Zweikomponenten-Epoxydharz an die Prüfkörper statt. Zuvor erfolgten die Abnahme der Klebebänder, Reinigung der Kanten und eine Neubeschriftung der Proben. Zum Einsatz kam das Haftzugmessgerät Mecmesin MultiTest 2.5-xt (einsäulige Zugprüfmaschinen) aus dem Labor für Plasmatechnik in Göttingen.

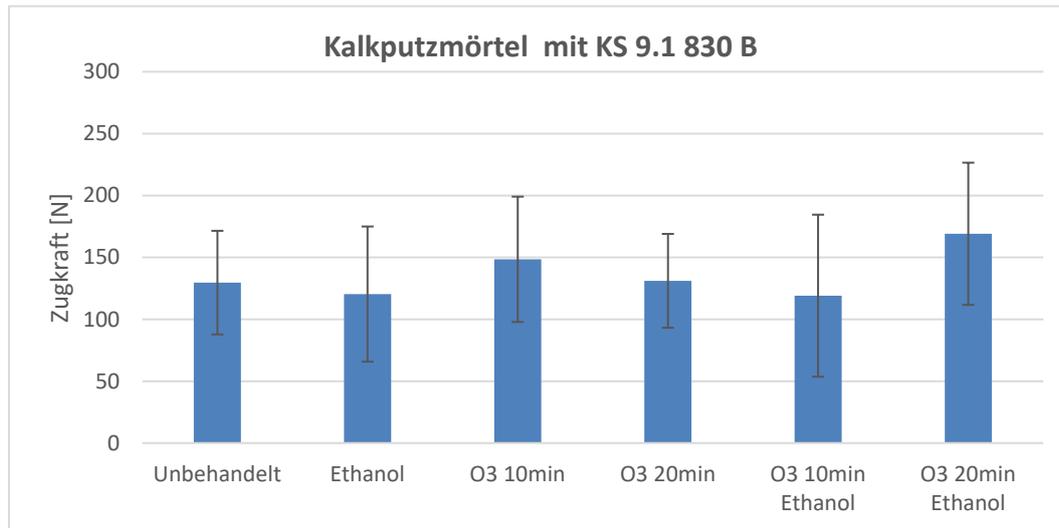
### 5.8.3 Auswertung der Haftzugprüfung

In **Diagr. 7** sind die maximalen Zugkräfte der mit **KS 9.1 830 B** hinterfüllten Gipsputzprüfkörper bis zum Materialbruch dargestellt. Es zeigt sich, dass sowohl eine Ethanol-Tränkung sowie eine Ozonbehandlung eine deutliche Steigerung der Bruchfestigkeit im Vergleich zur unbehandelten Referenz mit sich bringt. Außerdem zeigen sich signifikante Synergieeffekte zwischen der Ozonbehandlung und der Ethanol-Tränkung, die eine zusätzliche Steigerung der Bruchfestigkeit zur Folge haben.



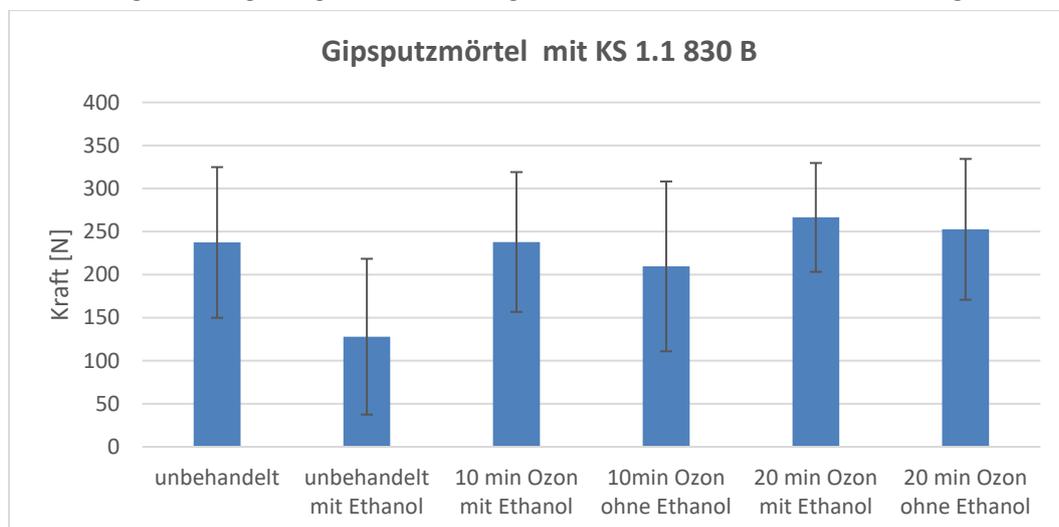
**Diagr. 7:** Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Gipsputzmörtel KS 9.1 830 B

In **Diagr. 8** sind die maximalen Zugkräfte der mit **KS 9.1 830 B** hinterfüllten Kalkputzprüfkörper bis zum Materialbruch dargestellt. Es zeigt sich, dass anhand der Zugfestigkeiten keine signifikanten Unterschiede zwischen unbehandelten und behandelten (Ethanol und Ozon) Kalkputzprüfkörpern festgestellt werden können. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass es bereits bei den unbehandelten Referenzproben zu einem Kohäsionsbruch im Ausgangsmaterial (Kalkputz) gekommen ist. Somit weist die Fügeverbindung zwischen dem Kalkputz und dem Füllmörtel eine höhere Festigkeit auf als der Kalkputz allein. Eine Bruchfestigkeitssteigerung der Verbindungsflächen kann daher nicht mehr festgestellt werden.



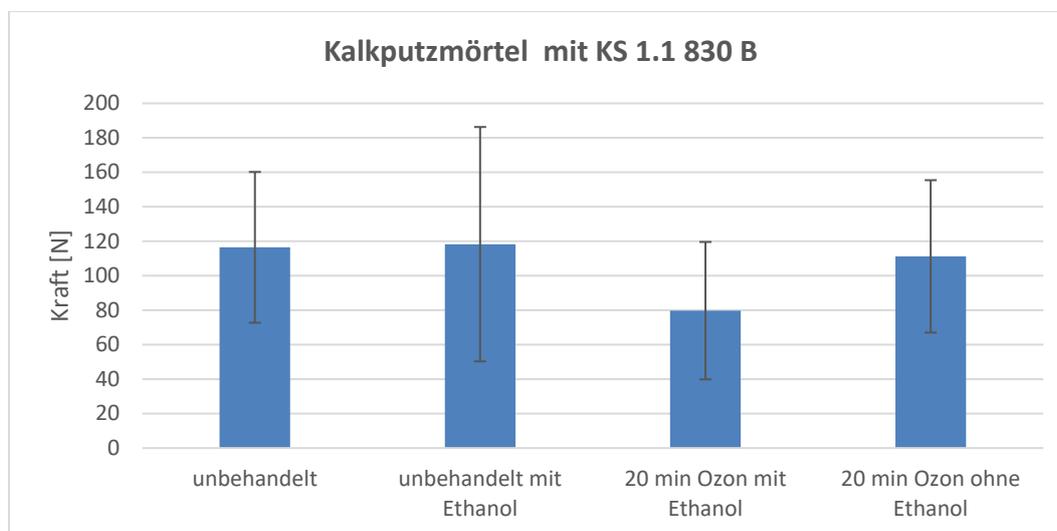
**Diagr. 17:** Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Kalkputzmörtel KS 9.1 830 B

Für eine weitere Versuchsreihe zur Bruchfestigkeitsbestimmung wurde der Hinterfüllmörtel **KS 1.1 830 B** beprobt. Dieser zeigte sich in seinen Eigenschaften der Anbindung im Rahmen der Frischmörtelanalyse (Kapitel 4.7) als besonders geeignet. **Diagr. 9** zeigt, dass der Hinterfüllmörtel der Reihe 1.1 eine deutlich höhere Bruchfestigkeit bei den unbehandelten Gipsputzprüfkörpern aufweist. Durch die Einstellung des Mörtels KS 1.1 ist es bereits bei beiden Referenzproben zu einem Kohäsionsbruch im Ausgangsmaterial (Gips) gekommen. Somit hat die Fügeverbindung zwischen dem Gipsputz und dem Hinterfüllmörtel eine höhere Festigkeit, als der Gips für sich. Eine Bruchfestigkeitssteigerung der Verbindungsflächen kann daher nicht mehr festgestellt werden.



**Diagr. 18:** Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Gipsputzmörtel KS 1.1 830 B

Analog zu den Gipsputzprüfkörpern aus der Versuchsreihe Gipsputz mit **KS 1.1 830 B** weisen bereits die unbehandelten Kalkputzprüfkörper mit **KS 1.1 830 B** einen Kohäsionsbruch auf. Somit sind die Ergebnisse aus **Diagr. 9** korrespondierend zu den Ergebnissen aus **Diagr. 10** zu bewerten.



**Diagr. 19:** Haftzugfestigkeit der Untersuchungsreihe an Kalkputzmörtel KS 1.1 830 B

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass eine Oberflächenbehandlung durch Ozon und anschließender Ethanol-Tränkung eine deutliche Steigerung der Bruchfestigkeit erzeugen kann. Dieser Effekt ist vor allem bei einem nicht optimal abgestimmten Füllmörtel in Bezug zum Trägermaterial (Putz) festzustellen. Bei Verwendung eines optimal auf den Untergrund (Putz) abgestimmten Hinterfüllmörtels kann kaum eine weitere Erhöhung der Bruchfestigkeit ermittelt werden, da es bereits zum Kohäsionsbruch im Grundmaterial kommt. Ein negativer Einfluss durch die Ozonbehandlung und Ethanol-Tränkung konnte jedoch nicht festgestellt werden.

## 5.9 Zusammenfassung der Plasma-Ozon-Analysen

Die ersten Versuche wurden mit der vorhandenen Plasmaquelle Disc-Jet an Hohlprüfkörpern durchgeführt. Dabei ließ sich feststellen, dass der Disc-Jet von der Geometrie her, sowie von den elektrischen Parametern nicht optimal für die Einleitung von Plasma in Hohlräume geeignet ist. Daraus entstand die Disc-Jet-Miniaturisierung. Die Bauweise wurde kompakter konzipiert und weitere Anpassungen ermöglichten eine gezieltere Plasmaführung. Mithilfe der Disc-Jet-Miniaturisierung konnte eine Plasmaentladung innerhalb der Hohlprüfkörper realisiert werden. Die ersten analytischen Ergebnisse zeigten, dass die Plasmabehandlung eine Erhöhung der Oberflächenenergie zur Folge hatte. Des Weiteren konnten geringe makroskopische sowie mikroskopische (LSM) Veränderungen der Prüfkörper-Oberflächen detektiert werden. Neben der Plasmabehandlung mit der Disc-Jet-Miniaturisierung wurden die Prüfkörper parallel mit Ozon behandelt. Ferner konnte festgestellt werden, dass die Ozon- und Plasmabehandlung einen Einfluss auf die Farbpigmente einer Farbfassung haben kann. Darüber hinaus wurden Tränkungsversuche mit den (Kalk-)Gipsputzprüfkörpern durchgeführt. Sowohl die Ozon- als auch die Plasmabehandlung zeigten zum überwiegenden Teil eine erhöhte Wasseraufnahme der Prüfkörper. Die analytischen Ergebnisse aus Mikroskopie, Oberflächenenergie, Oberflächentopografie und Tränkungsverhalten zeigen, dass sowohl die Plasmabehandlung als auch die Ozonbehandlung einen positiven Einfluss auf die (Kalk-)Gipsputzprüfkörper hatten. Im Hinblick auf sicherheitstechnische und anwendungsspezifische Aspekte wurden sowohl die weiteren Versuche im Labor, als auch die abschließenden Behandlungen an der Pilotfläche der Wandmalereien in Bückeberg mittels Ozons durchgeführt. In den

Laboruntersuchungen erfolgten Analysen zur Haftzugfestigkeit die Auskunft über die Anbindung der Hinterfüllmörtel zwischen Putzflächen geben sollten. Dabei wurde festgestellt, dass eine Oberflächenbehandlung durch Ozon und anschließender Ethanol-Tränkung die Bruchfestigkeit steigern kann.

Anhand der gesammelten Erkenntnisse konnten die Parameter für eine effektive Ozonbehandlung an der Pilotfläche, bei gleichzeitigem Ausschluss einer Beschädigung der Wandmalerei, festgelegt werden. Somit konnten die finalen Untersuchungen am Restaurierungsobjekt in Bückeberg erfolgen.

## 6. Philipps-Universität Marburg – Charakterisierung

THz-Voruntersuchungen fanden in mehreren Phasen des Projektes statt und können inhaltlich und konzeptuell in vier Gruppen unterteilt werden:

- THz-Datenbank
- Messbarkeit von unebenen Oberflächen
- Messbarkeit hinterfüllter Hohlräume
- Systemanpassung und Vorbereitung mittels eines 3D-Modells als Testfläche (Kapitel 4.10.4)

Die Voruntersuchungen zu dem gesamten Bearbeitungszyklus (THz-Untersuchung von Hohlräumen, Plasma/Ozon-Bearbeitung, Hinterfüllen von Hohlräumen, THz-Untersuchung von hinterfüllten Hohlräumen) sind in dem folgenden Kapitel beschrieben. Im folgenden Unterkapitel sind zuerst die Materialeigenschaften der für dieses Projekt relevanten Materialien zusammengefasst (Brechungsindex und Absorptionskoeffizient im THz-Frequenzbereich).

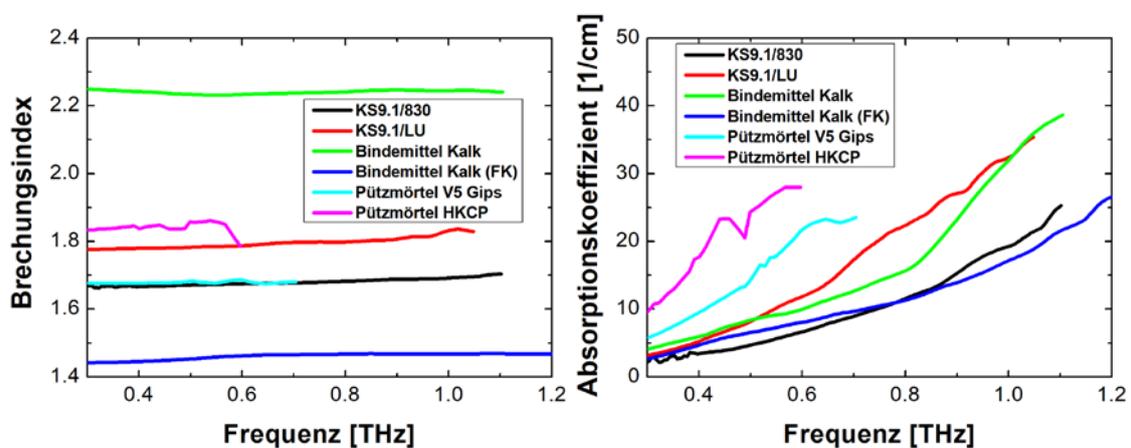
### 6.1 THz-Datenbank

Nach Analyse der in der Schlosskapelle Bückeberg verwendeten Materialien konnte die THz-Datenbank angelegt werden. Die Datenbank bildet die Grundlage für die Auswertung aller weiteren bildgebenden und tomografischen Messungen an Testkörpern und an der Pilotfläche in der Schlosskapelle Bückeberg. Die Daten ermöglichen später eine Transformation der zeitabhängigen THz-Daten in eine räumliche Dimension, die zur Bestimmung der Hohlraumdimensionen nötig ist. **Tab. 25** gibt einen Überblick über in diesem Projekt charakterisierten Materialien (siehe auch **Tab. 12** in Kapitel 4.10).

**Tab. 25: Überblick der im THz-Frequenzbereich untersuchten Materialien**

N	Name	Form der Probe	THz-Messanordnung
1	Hinterfüllmörtel KS 9.1/830	Abgeformt	Transmission
2	Hinterfüllmörtel KS 9.1/LU	Abgeformt	Transmission
3	Bindemittel Kalk FK	Abgeformt	Transmission
4	Bindemittel Kalk	Abgeformt	Transmission
5	Putzmörtel HKCP	Abgeformt	Transmission
6	Putzmörtel V5 Gips	Abgeformt	Transmission
7	Zuschlag Marmormehl Extra	Gepresst	Transmission
8	Zuschlag Marmormehl Mittel	Gepresst	Transmission
9	Zuschlag Marmormehl Grob	Gepresst	Transmission
10	Zuschlag Tylose	Gepresst	Transmission
11	Zuschlag Cab-O-Sil	Gepresst	Transmission
12	Zuschlag Hohlglaskugeln	Pulver	ATR
13	Bindemittel Kieselsolegel Köstrosol 0830AS	Kolloidale Lösung	ATR
14	Bindemittel Kieselsolegel Köstrosol 1030KD	Kolloidale Lösung	ATR
15	Bindemittel Kieselsolegel Köstrosol 1530AS	Kolloidale Lösung	ATR
16	Bindemittel Ludox® PX 30	Kolloidale Lösung	ATR
17	Additiv WPC Romstedt	Kolloidale Lösung	ATR
18	Additiv Tween 20®	Kolloidale Lösung	ATR
19	Additiv Mowilith	Tablette, eingetrocknet	Transmission

Die zur Untersuchung vorgesehenen Materialien lagen in unterschiedlichen Formen vor und mussten vor der Messung noch entsprechend vorbereitet werden. Die Zuschläge, die in Pulverform vorlagen, wurden in Tabletten gepresst. Die Mörtel und die beiden Kalk-Bindemittel wurden in die Form einer planparallelen Platte gebracht und untersucht. Proben, die in flüssiger Form vorlagen, wurden, sofern es möglich war, in einer Tablettenform eingetrocknet (Mowilith). Die so entstandenen Proben in Form von gepressten oder eingetrockneten Tabletten und abgeformten Prüfkörpern wurden mit einem fasergekoppelten THz-Spektrometer in Transmission fokussiert vermessen. War ein Abformen oder Pressen der Proben nicht möglich (Kieselsolegele, Hohlglaskugeln, Bindemittel Ludox® und Additive), wurden diese in Reflexion vermessen. Dazu wurde eine Messanordnung für abgeschwächte Totalreflexion (engl.: attenuated total reflection = ATR) verwendet. Mit dieser Messanordnung ist es möglich, auch stark absorbierende Materialien wie polare Flüssigkeiten im THz-Bereich zu untersuchen. In diesem Fall wurden die flüssigen Proben in das Spektrometer eingebracht und solange vermessen, bis sich die Flüssigkeit verflüchtigt hatte. Je nach Ausbildung des Festkörpers kann es während der Verflüchtigung zu Lufteinschlüssen zwischen Probe und Messfläche kommen. Dies führt zu Ungenauigkeiten in der Messung, weshalb diese Daten größere Schwankungen im Verlauf aufweisen. THz-ATR-Spektroskopie wurde auch zum Untersuchen von Hohlglaskugeln verwendet, da sich diese nicht pressen lassen. Dabei ist zu beachten, dass es auch bei Hohlglaskugeln zu Lufteinschlüssen zwischen Kugeln und der Messfläche kommen kann, was ebenfalls zu Messungenauigkeiten führen könnte. Die Messergebnisse sind in **Abb. 39**, **Abb. 40**, **Abb. 41** und **Abb. 42** zu sehen.



**Abb. 111:** Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der abgeformten Proben

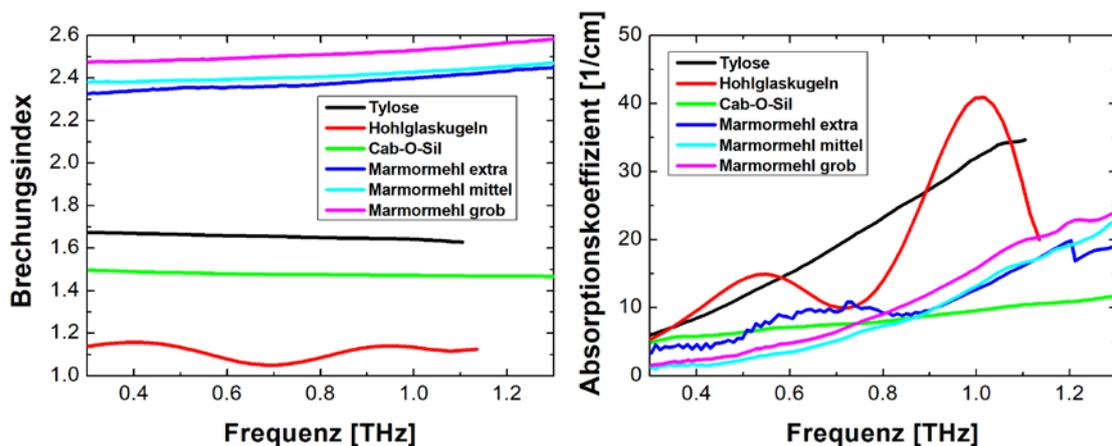


Abb. 112: Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der in Tabletten gepressten Zuschläge. Hohlgaskugeln wurden ohne Verpressen mittels THz-ATR-Spektroskopie vermessen

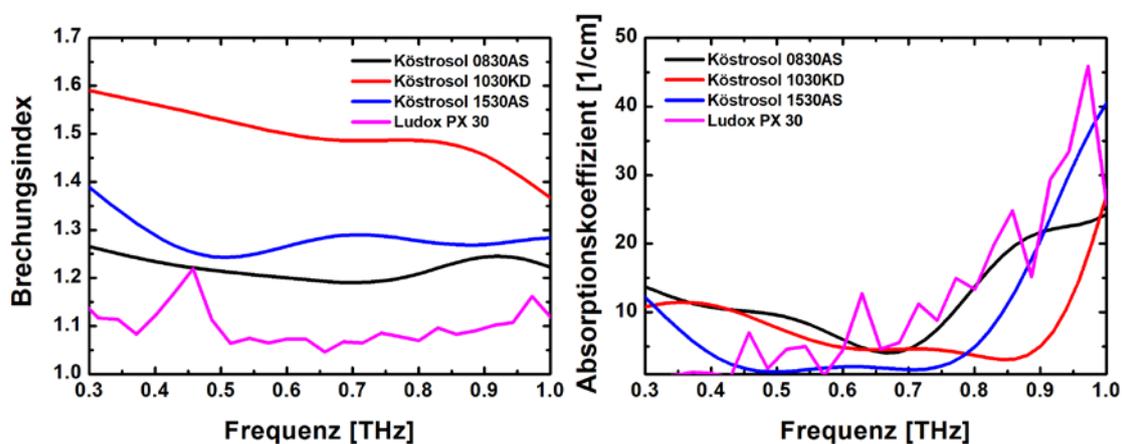


Abb. 113: Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der Bindemittelproben, die mittels THz-ATR-Spektroskopie vermessen wurden

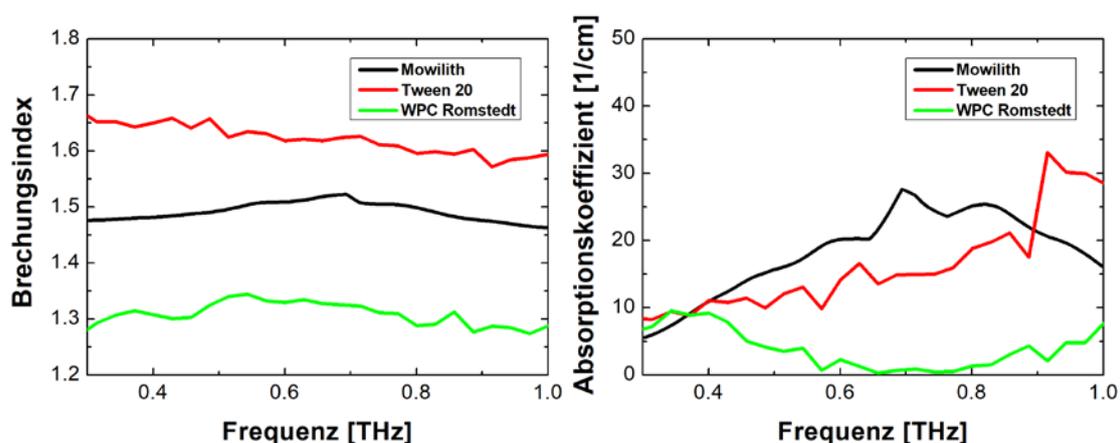
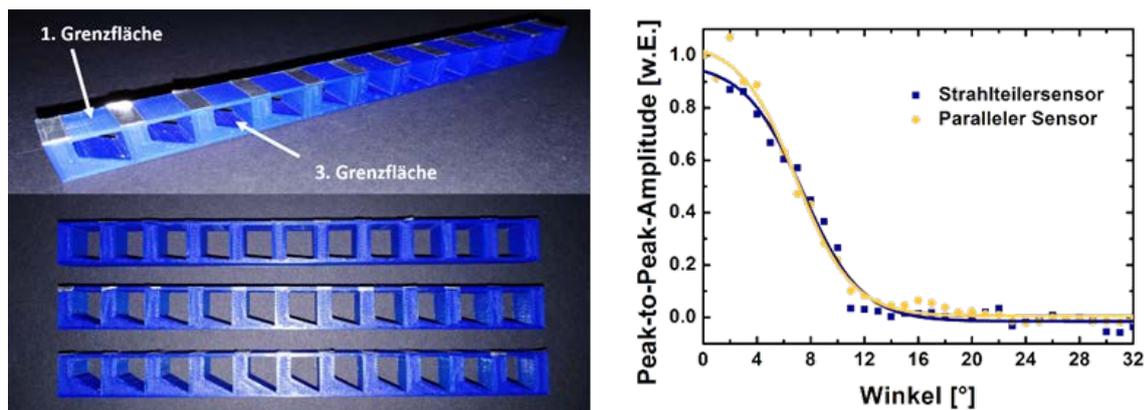


Abb. 114: Brechungsindex (links) und Absorptionskoeffizient (rechts) der Additive. Mowilith wurde in Form einer Tablette eingetrocknet und in Transmission vermessen, wobei die Additive WPC Romstedt und Tween 20® mittels THz ATR-Spektroskopie vermessen wurden

## 6.2 Messbarkeit von unebenen Oberflächen

Mehrschichtige Proben weisen häufig keine Planparallelität der inneren Strukturen auf. D.h. der Verlauf einer tieferliegenden Schicht kann signifikant von der der Oberfläche abweichen, anhand deren Verlauf der THz-Sensor ausgerichtet wird. Um die Grenzen des Systems in dieser Hinsicht genauer zu evaluieren, wurden Testkörper entwickelt, die das Problem eines abweichenden Verlaufs tieferliegender Schichten simulieren. Der Testkörper besteht aus einer ersten ebenen Kunststoffschicht. Unterhalb dieser Kunststoffschicht folgt nach einem Hohlraum eine weitere Kunststoffschicht, die unterschiedliche Winkelabweichungen zur ersten Schicht aufweist (vgl. **Abb. 43**, links). Insgesamt wurden die Testkörper so konzipiert, dass Winkelabweichungen zwischen  $0^\circ$  und  $32^\circ$  abgedeckt wurden. Um die einzelnen Bereiche innerhalb der Messdaten besser voneinander unterscheiden zu können, wurde die Oberfläche der Testkörper mit Aluminiumstreifen versehen, die die einzelnen Bereiche voneinander trennen. Um die Winkelabweichung zu bestimmen, ab welcher kein THz-Reflex aus der zweiten Kunststoffschicht mehr in Richtung Detektor reflektiert wird, wurde die Peak-to-Peak-Amplitude des entsprechenden THz-Reflexes gegen die Winkelabweichung aufgetragen (vgl. **Abb. 43**, rechts). Die Testkörper wurden mit zwei unterschiedlichen THz-Sensoren vermessen. Der erste THz-Sensor (Strahlteilersensor) beinhaltet einen Strahlteiler der die emittierte Strahlung auf die Probe reflektiert und dann die von Probe reflektierte Strahlung zu dem Detektor lenkt. In dem zweiten THz-Sensor (paralleler Sensor) sind Emitter- und Detektormodul parallel zueinander ausgerichtet und die emittierte THz-Strahlung ist mithilfe von zwei parabolischen Spiegeln unter einem Einfallswinkel von etwa  $10^\circ$  auf die Probe geführt. Die reflektierte Strahlung ist dann von zwei weiteren parabolischen Spiegeln zu dem Detektormodul geführt, wo sie erfasst wird. Hinsichtlich der Winkeltoleranz zeigen sich keine Unterschiede zwischen den Sensoren. Für beide Sensoren kann für den Grenzwinkel ein Wert von etwa  $11^\circ$  bestimmt werden. Ab diesem Winkel wird die Strahlung unter einem Winkel zurückreflektiert, der zu stark von der Position des Detektors abweicht. Es wird somit kein THz-Signal mehr detektiert. Alle weiteren Untersuchungen in Reflexion wurden mit dem parallelen Sensor durchgeführt.

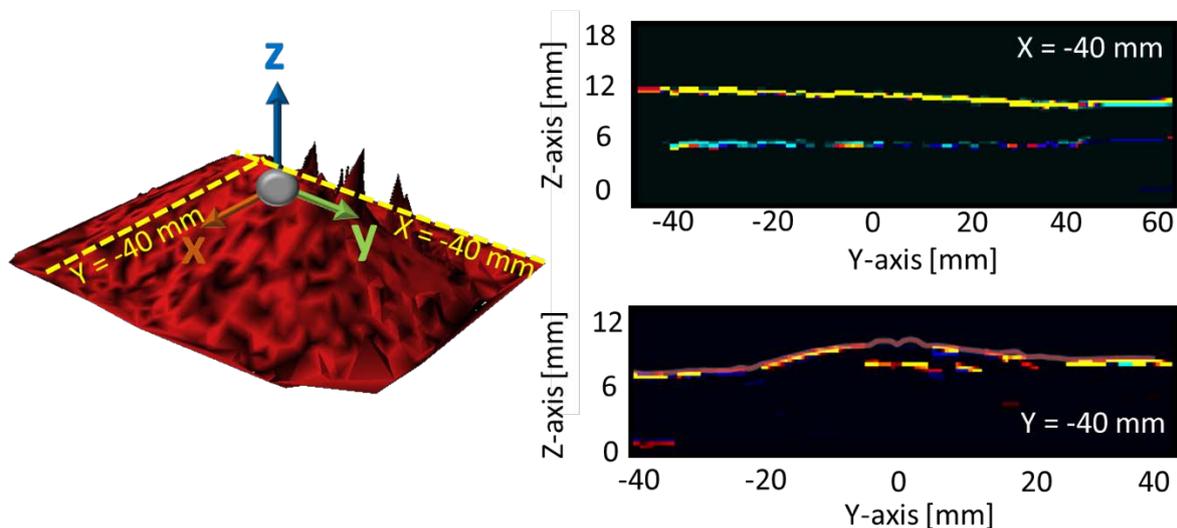


**Abb. 115:** Charakterisierung der maximal detektierbaren Winkelabweichung zwischen zwei Grenzflächen

Um den Einfluss von unebenen Oberflächen noch besser einschätzen zu können, wurden drei zusätzliche Prüfkörper (**Abb. 17**) aus Putzmörtel-Gips V5 hergestellt. Die Testkörper wurden anschließend in Reflexion mit einem roboterbasierten THz-Spektrometer<sup>31</sup> vermessen. Dazu wurde zunächst in einem Streifenprojektionsverfahren die dreidimensionale Oberfläche des Objektes erfasst.

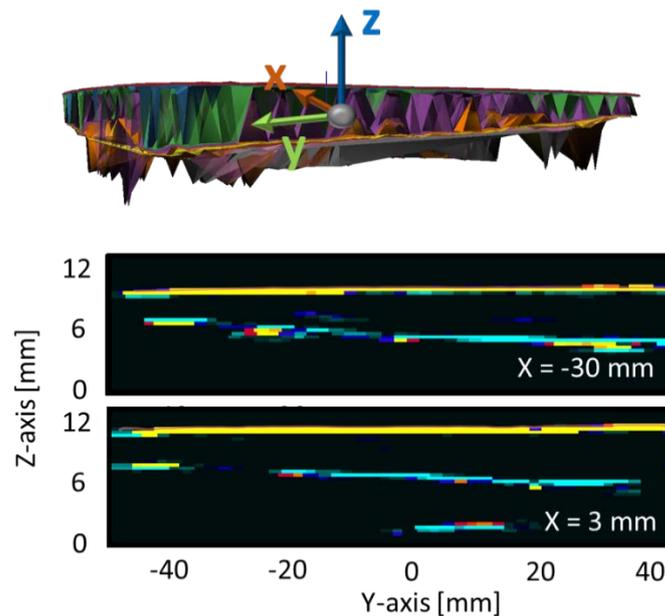
<sup>31</sup> E. Stübling et. al.

Basierend auf diesen Daten wurde dann die punktweise Positionierung für den THz-Sensor berechnet. Für jeden Testkörper wurden ca. 1600 einzelne Punkte in einem 2 mm-Raster auf der Probenoberfläche vermessen. Die Messergebnisse der verschiedenen Testkörper sind in den **Abb. 44** bis **Abb. 46** dargestellt. **Abb. 44** zeigt die Ergebnisse für einen Testkörper, bei dem die Grundplatte zusätzlich mit einer Metallfolie beschichtet war und die THz-Strahlung zunächst auf die gekrümmte Oberfläche des Testkörpers traf. Auf der linken Seite ist die tomographische Rekonstruktion der ersten Grenzfläche gezeigt, rechts sind Querschnitte durch den vollständigen Testkörper zu sehen. Die Ergebnisse zeigen, dass die innenliegende Metallschicht nur in den Randbereichen der Aufwölbung sicher identifiziert werden kann (z.B. Schnitt bei  $y = -40$  mm). In den Bereichen, wo ein größerer Abstand zwischen Metallschicht und erster Mörtelschicht besteht, ist die Ablenkung der THz-Strahlung zu stark, sodass diese nicht mehr detektiert werden kann. Betrachtet man die Randbereiche der Grundplatte, die nicht mehr durch die Metallfolie abgedeckt sind (z.B.  $x = -40$  mm), so kann man beobachten, dass sich die Stärke der Mörtelschicht gut rekonstruieren lässt. Auch die anhand der THz-Daten berechnete Materialstärke stimmt mit der gemessenen Materialstärke gut überein.



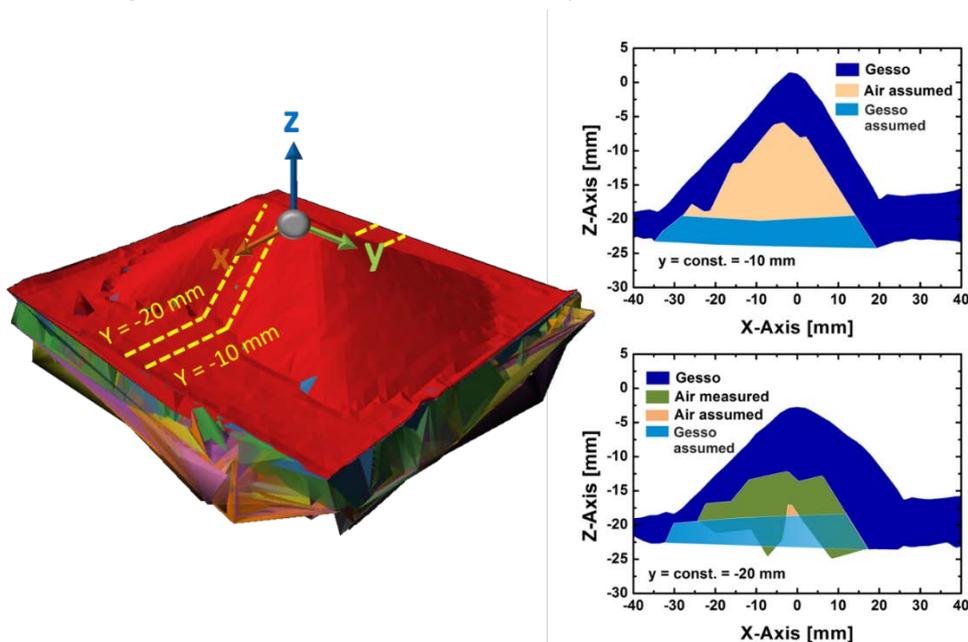
**Abb. 116:** Ergebnis der auf THz-Daten basierten tomographischen Rekonstruktion eines Testkörpers mit Metallschicht auf der flachen Basisfläche (links). Querschnitte für konstante  $x$ - und  $y$ -Werte (rechts), die Position wird in der linken Grafik durch die gelb gestrichelten Linien verdeutlicht

**Abb. 45** zeigt ähnliche Ergebnisse für einen Testkörper, dessen Aufwölbung innenliegend mit einer Metallschicht versehen wurde und dessen flache Grundplatte die erste Schicht für die auftreffende THz-Strahlung darstellt. Auch hier kann die Stärke der Grundplatte sehr gut rekonstruiert werden. Die Bestimmung der Hohlraumdimensionen ist wieder nur in den Randbereichen möglich und deutet sich sowohl in der dreidimensionalen Rekonstruktion als auch im Querschnitt ( $x = 3$  mm) an. Insofern kann zunächst festgehalten werden, dass es bei den roboterbasierten THz-Messungen keine Rolle spielt auf welche Testkörperoberfläche die Strahlung zunächst trifft. Für flache, wenig gekrümmte Hohlräume ist eine Evaluierung der Hohlraumdimension möglich.



**Abb. 117:** Tomographische Rekonstruktion der THz-Daten eines Testkörpers mit Metallschicht auf der gewölbten Seite (oben); Querschnitt bei konstanten x-Positionen (Mitte und unten)

Die anschließend vermessene Probe enthält keine zusätzliche Metallschicht. Die Probe wurde von der gewölbten Seite aus kommend vermessen. Die Ergebnisse sind in **Abb. 46** dargestellt. Die dreidimensionale Darstellung der Rekonstruktionsergebnisse zeigt, dass die Randbereiche des Testkörpers sehr gute reproduziert werden können. Zudem war es in diesem Falle ansatzweise möglich, die Rückseite der Mörtelschicht auch in den stark gekrümmten Bereichen zu detektieren (vgl. **Abb. 46**, rechts oben). Zusätzlich konnte an verschiedenen Positionen ein Reflex der nachfolgenden flachen Basisschicht gemessen werden (vgl. **Abb. 46**, rechts unten). Der Rekonstruktionsalgorithmus weist allerdings in diesem Fall noch einige Schwachstellen auf, da die THz-Reflexe teilweise den Schichten falsch zugeordnet werden. So beinhaltet die gemessene zweite Luftschicht bereits Bereiche, in denen eigentlich die Mörtelschicht der Grundplatte lokalisiert sein sollte.



**Abb. 118:** Tomographische Rekonstruktion der THz-Daten eines nicht-metallisierten Testkörpers (links) und Querschnitte für konstante y-Werte (rechts)

### 6.3 Messbarkeit hinterfüllter Hohlräume

Um einschätzen zu können, ob sich hinterfüllte Hohlräume vermessen lassen, wurden zwei ähnliche Prüfkörper vorbereitet, hinterfüllt und mittels THz-Spektroskopie untersucht. Jeder bestand aus zwei rechteckigen Mörtelplatten (ca. 40 x 40 mm<sup>2</sup>) mit Dicken von jeweils ca. 3 mm. Zwischen die zwei Mörtelplatten wurde eine ca. 2,5 mm dicke Glasplatte gelegt und die beiden Mörtelplatten wurden an den Rändern mit einem Klebeband verbunden und fixiert. Vor der Untersuchung mittels THz-Spektroskopie wurde die Glasplatte entfernt, damit ergab sich eine Probe mit einem Hohlraum. Das Klebeband hat den Abstand zwischen den beiden Mörtelplatten aufrechterhalten und beim Hinterfüllen auch das Auslaufen des Mörtels verhindert. Für die detaillierte Beschreibung dieser Proben sei auf den dritten Zwischenbericht verwiesen.

Vor dem Hinterfüllen wurde eine der zwei Proben untersucht. Sie wurde in einem Rastermuster abgescannt, um ein THz-Bild von Probe und Hohlraum zu erhalten. Danach wurden die beiden Proben hinterfüllt und eine davon wurde an neun Stellen während der Trocknung des Hinterfüllmörtels untersucht. Der Sinn dieser Messung war, einschätzen zu können, wie lange der Trocknungsprozess dauert und ab welchem Zeitpunkt die Probe oder später die Wand in der Schlosskapelle mittels THz-Spektroskopie untersucht werden kann. Nachdem beide Proben getrocknet waren, wurden sie wieder in einem Rastermuster abgefahren und vermessen, um den Erfolg des Hinterfüllprozesses festzustellen. Für alle THz-Untersuchungen wurde das Robotersystem<sup>32</sup> in Reflexions-Geometrie verwendet. In **Abb. 47** sieht man die beiden zur Überprüfung der Messmethode hergestellten Proben nach dem Hinterfüllen.



**Abb. 119:** Probe 1 (links) Probe 2 (rechts)

Der Zwischenraum beider Platten ist bis auf die Ecke, die zum Betrachter zeigt, mit dem Mörtelfüllmaterial **KS 9.1/830 B** hinterfüllt. Am unteren Rand der Platten sieht man noch Reste der Klebestreifen, mit denen die beiden Platten vor dem Hinterfüllen zusammengehalten wurden. Auf die Unterseite der Platten wurde eine Metallfolie aufgeklebt, die bei den Messungen einen klaren Reflex der Rückseite garantiert.

#### Zeitbereichsanalyse

Um den Auswertungsprozess der THz-Zeitbereichssignale zu erläutern, werden im Folgenden zunächst Messdaten von einzelnen Punkten des Raster-scans diskutiert. In **Abb. 48** sieht man ein Zeitbereichssignal, welches vor der Hinterfüllung an Probe 1 gewonnen wurde, mit einigen erklärenden Anmerkungen.

---

<sup>32</sup> E. Stübling et.al.

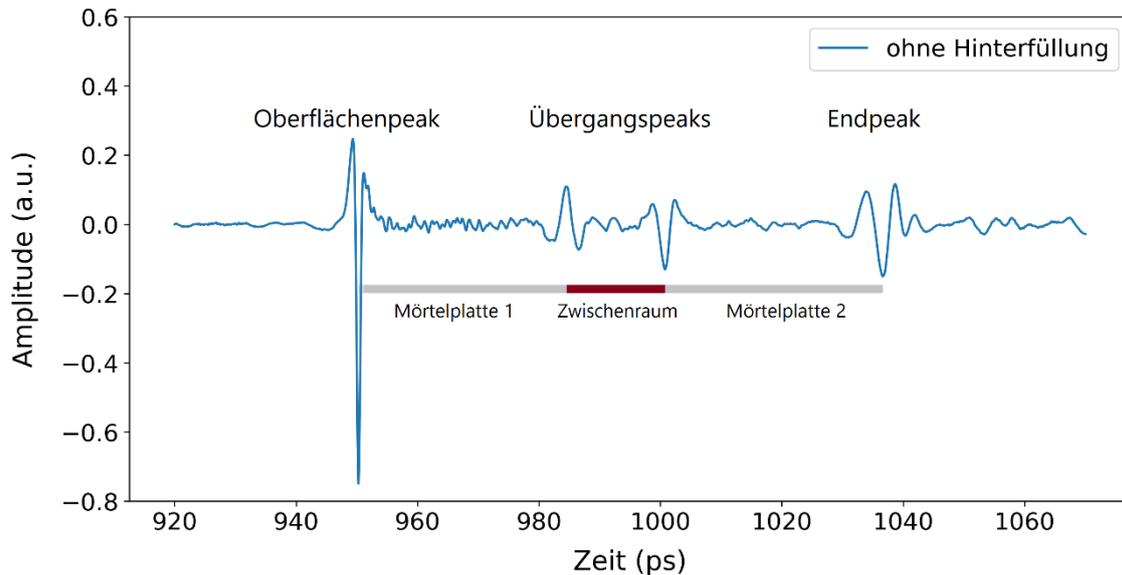


Abb. 120: Erklärung Zeitbereichsdatenpeaks

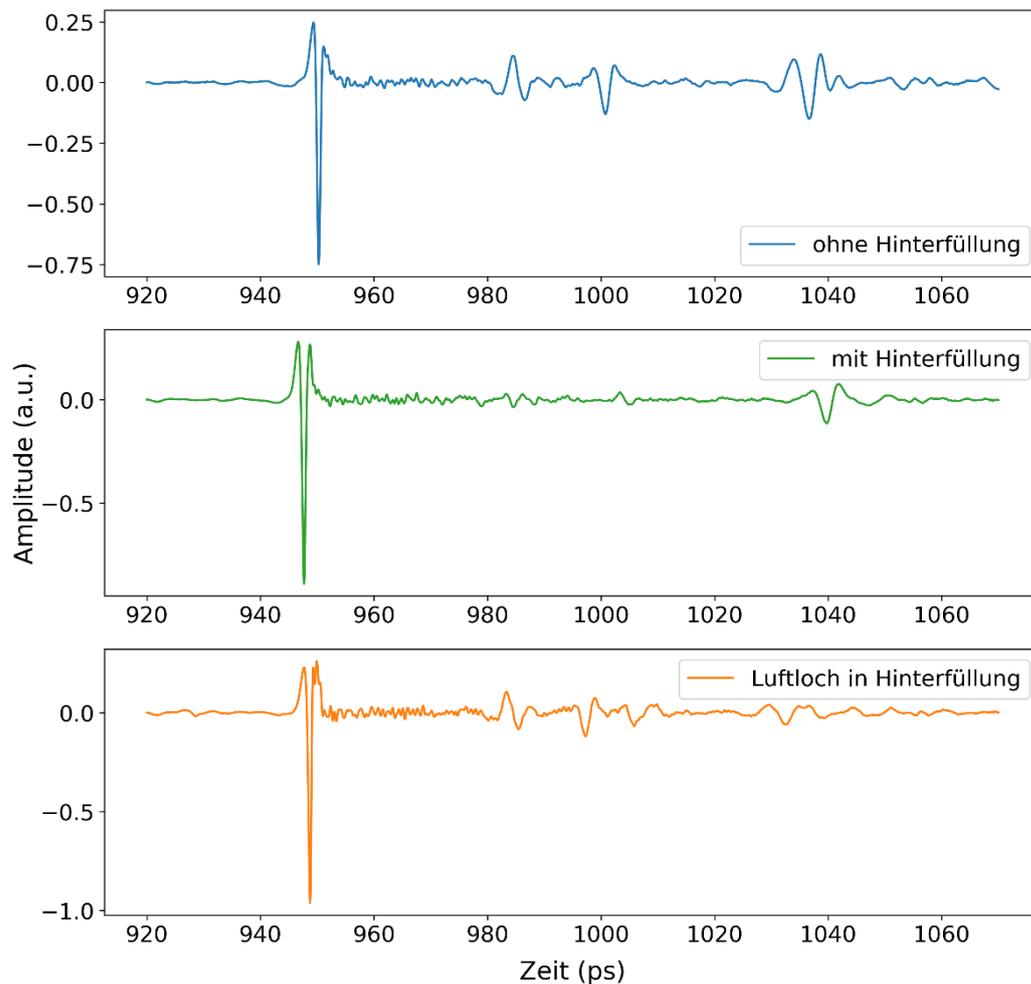
Die Auftragung zeigt die Zeitabhängigkeit der Amplitude des THz-Signals. Die erste, besonders ausgeprägte Signalspitze ist der Oberflächenpeak der ersten Mörtelplatte. Er ist erheblich größer als alle anderen Peaks, da die an der ersten Oberfläche zurückreflektierte Strahlung nur reflektiert und nicht zusätzlich absorbiert wird. D.h. sie muss nur durch die Luft bis zum Detektor propagieren. Als nächstes sieht man den ersten Übergangspeak innerhalb der Probe. Dieser beschreibt das Ende der ersten Mörtelplatte und den Übergang zum Zwischenraum, der in diesem Fall aus Luft besteht. Die Signalamplitude ist wesentlich kleiner im Vergleich als die des Oberflächenpulses, weil die THz-Strahlung hier durch die erste absorbierende Mörtelplatte propagieren muss. Zudem ist die Pulsform invertiert (auf den Kopf gestellt), da der Puls von einem Übergang aus einem Material mit größerem Brechungsindex (Mörtel) in ein Material mit kleinerem Brechungsindex (Luft) stammt. Der nächste Übergangspeak beschreibt die Reflexion der Strahlung an der Oberfläche der zweiten Mörtelplatte. Dieser Puls weist eine ähnliche Amplitude auf wie der vorherige, verläuft aber umgekehrt, da er in diesem Fall von einem Übergang aus einem Material mit kleinerem Brechungsindex (Luft) in ein Material mit größerem Brechungsindex (Mörtel) stammt. Ganz rechts in der Zeitspur folgt der Endpeak, der die Reflexion an der Metallfolie beschreibt. Da hier alle übrige Strahlung zurückreflektiert wird, ist er wieder größer als die beiden Übergangspeaks. Dieser Endpeak wird im Feldversuch wahrscheinlich nicht zu sehen sein, da in dem Fall keine Metallfolie das Ende der Mörtelschicht begrenzt und die dahinterliegende Wand wahrscheinlich zu dick ist, um irgendeinen THz-Puls innerhalb des Zeitmessfensters aufnehmen zu können.

Aus der Laufzeitdifferenz  $\Delta t$  der beiden Übergangspeaks lässt sich mithilfe der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  und mit Kenntnis des Brechungsindex  $n$  des Materials der Zwischenraumschicht deren Dicke  $d$  nach folgender Formel berechnen:

$$d = \frac{c_0 \cdot \Delta t}{2 \cdot n} \quad \text{Gl. 1}$$

Nach dem Hinterfüllen sollte sich die physische Dicke des Zwischenraums nicht verändern. Da der Hinterfüllmörtel einen höheren Brechungsindex (ca. 1,65, siehe **Abb. 39**) als Luft aufweist, ist der Zwischenraum jedoch optisch dicker und damit liegen die zwei mittleren Pulse weiter auseinander. In **Abb. 49** sieht man die Zeitbereichsmessungen von drei Punkten von Probe 1. Eine der gezeigten

Messungen wurde vor dem Hinterfüllen aufgenommen, die beiden anderen danach. Eine dieser zwei Messungen stammt aus dem erfolgreich hinterfüllten Bereich und die andere aus dem nicht hinterfüllten Bereich (siehe **Abb. 47**).



**Abb. 121:** Zeitbereichsdaten von Probe 1, oben: ohne Hinterfüllung, Mitte: mit Hinterfüllung, unten: mit Luftloch in der Hinterfüllung

In der obersten Graphik sieht man die Zeitbereichsdaten für einen Punkt vor dem Hinterfüllen der Mörtelplatten, also zu einem Zeitpunkt zu dem beide Platten noch mithilfe von Objektträgern auf konstanter Distanz gehalten werden. Man sieht, dass sich hier sowohl die beiden Übergangspeaks als auch der Endpeak stark vom Hintergrund abheben, was daran liegt, dass sich im Zwischenraum nur Luft befindet. Diese absorbiert die THz-Strahlung fast gar nicht, wodurch Endpeak und zweiter Übergangspeak weniger abgeschwächt werden. Des Weiteren sorgt der große Brechungsindexunterschied zwischen Mörtelplatte und Luft für stärkere Übergangspeaks. Mithilfe der Gleichung zur Berechnung der Dicke und einem Brechungsindex von  $n = 1$  für Luft ergibt sich aus dem Abstand der Übergangspeaks  $\Delta t = 16,3$  ps für den Zwischenraum eine Dicke von  $d = 2,44 \pm 0,07$  mm.

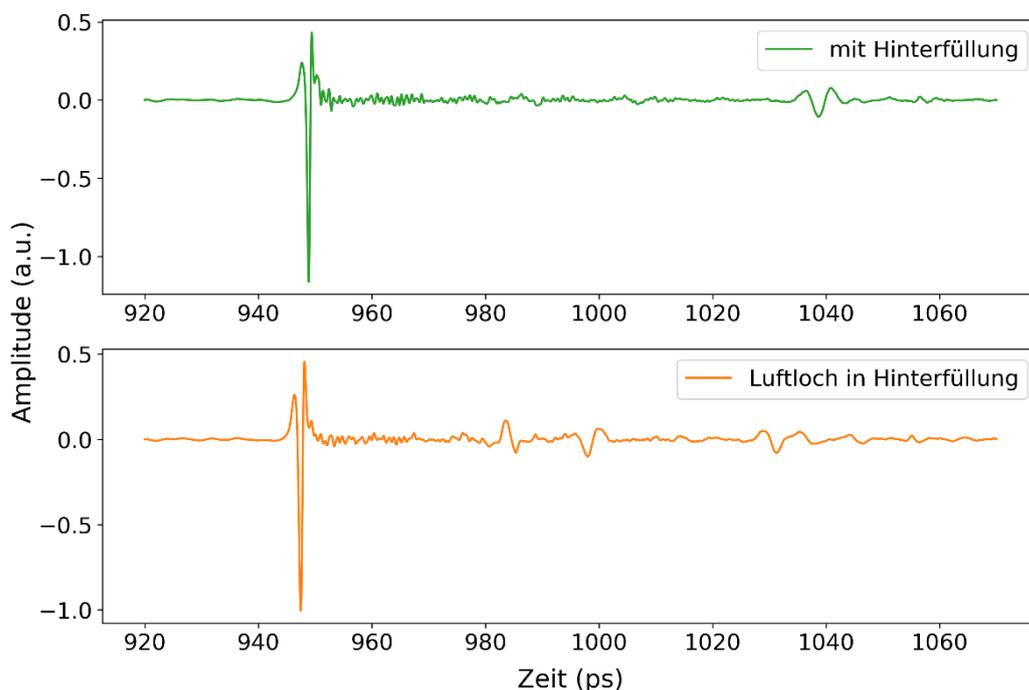
In der mittleren Graphik sieht man die Zeitbereichsdaten für einen Punkt aus dem erfolgreich hinterfüllten Bereich der Probe nach dem Trocknen. Hier kann man die Übergangspeaks kaum noch erkennen und der Endpeak ist kleiner. Dies liegt daran, dass das Hinterfüllmaterial sowohl die Strahlung stärker absorbiert als auch einen ähnlichen Brechungsindex wie die Mörtelplatten aufweist. Hier ergibt sich aus dem Abstand der Übergangspeaks  $\Delta t = 18,85$  ps mithilfe des Brechungsindex

des Hinterfüllmaterials KS 9.1/830 von  $n = 1,65 \pm 0,12$  (**Abb. 39**) und der obigen Gleichung eine Dicke von  $d = 1,71 \pm 0,13$  mm.

In der unteren Graphik sieht man die Zeitbereichsdaten für einen Punkt der hinterfüllten Probe nach dem Trocknen. An dieser Position der Probe befindet sich jedoch ein Luftloch in der Hinterfüllmasse. Aus diesem Grund erkennt man wieder stärkere Übergangspeaks, während der Endpeak ähnlich stark ausfällt wie an einer gut hinterfüllten Stelle. Aus den starken Übergangspeaks lässt sich leicht auf ein Luftloch an diesem Punkt schließen, da hier der größere Brechungsindexunterschied zwischen Mörtel und Luft wieder für stärkere Rückreflexe sorgt. Nutzt man wieder die Gleichung zur Bestimmung der Dicke und verwendet hierbei den Brechungsindex für Luft von  $n = 1$  ergibt sich aus dem Zeitabstand der Übergangspeaks  $\Delta t = 13,95$  ps eine Dicke von  $d = 2,09 \pm 0,07$  mm.

Vergleicht man nun die so bestimmten Dicken mit der mechanisch gemessenen Dicke von  $d = 2,0 \pm 0,2$  mm der Zwischenschicht der hinterfüllten und getrockneten Probe 1, so sieht man, dass die Dicken der hinterfüllten Probe sowohl am Punkt mit als auch ohne Luftloch im Rahmen des Messfehlers dem mechanisch gemessenen Wert entsprechen. Die Dicke vor der Hinterfüllung ist größer, vermutlich, weil hier die beiden Mörtelplatten noch mithilfe von Objektträgern auseinandergehalten wurden, diese aber vor dem Hinterfüllen entfernt worden sind.

Eine ähnliche Auswertung wurde auch an Probe 2 durchgeführt. Diese wurde vor dem Hinterfüllen nicht vermessen, weshalb nur die THz-Zeitbereichsmessungen für die hinterfüllte Probe in **Abb. 50** gezeigt werden.



**Abb. 122:** Zeitbereichsdaten von Probe 2, oben: mit Hinterfüllung, unten: mit Luftloch in der Hinterfüllung

In der oberen Graphik sieht man die Zeitbereichsdaten für einen Punkt der hinterfüllten und getrockneten Probe. Hier erkennt man wieder schwach ausgeprägte Übergangspeaks, die auf eine gute Hinterfüllung hindeuten. Mit dem Brechungsindex des Hinterfüllmaterials KS 9.1/830 von  $n = 1,65 \pm 0,12$  (**Abb. 39**) und dem Zeitabstand der Übergangspeaks  $\Delta t = 18,2$  ps ergibt sich mithilfe der Gleichung zur Bestimmung der Dicke eine Dicke von  $d = 1,65 \pm 0,13$  mm.

Die untere Graphik zeigt die Zeitbereichsdaten für einen Punkt der hinterfüllten und getrockneten Probe, an dem sich ein Luftloch in der Hinterfüllmasse befindet. Man erkennt auch hier wieder die

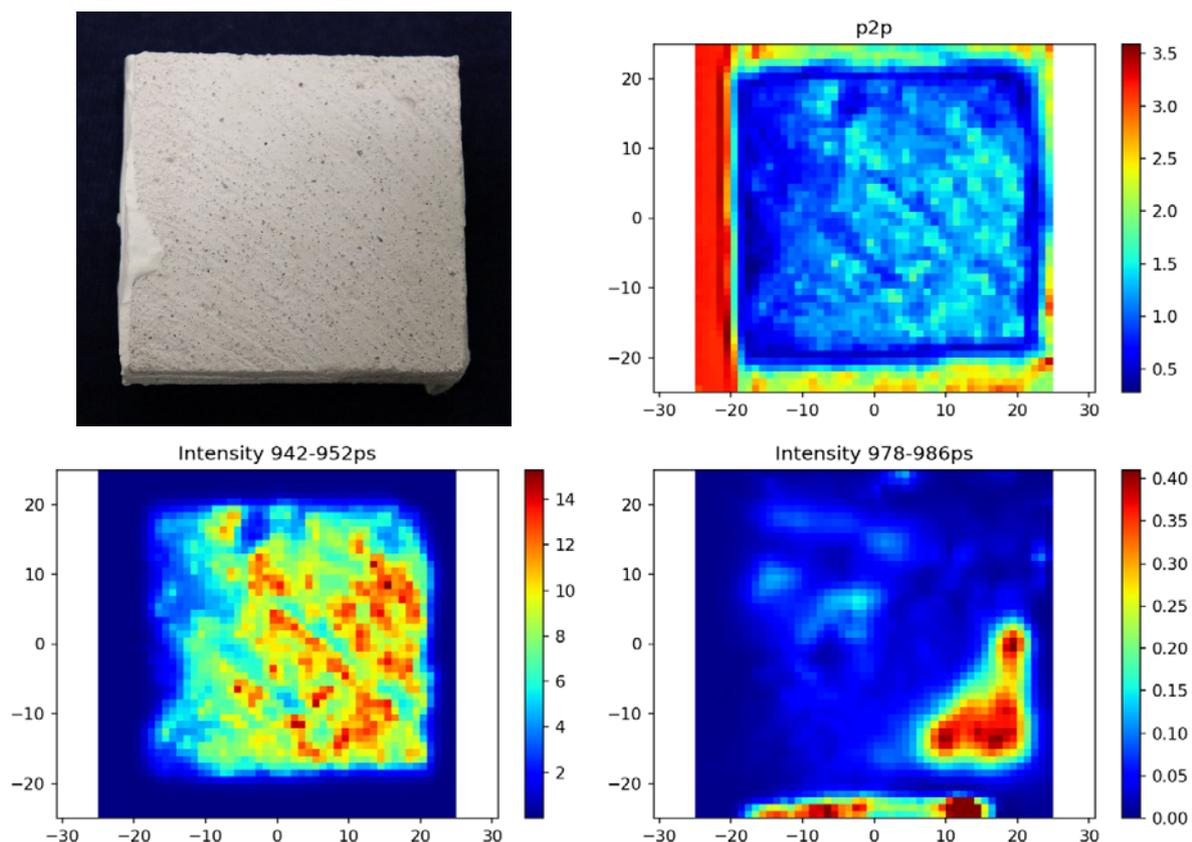
stärker ausgeprägten Übergangspeaks, die auf das Vorhandensein des Luftlochs hinweisen. Mithilfe des Brechungsindex der Luft von  $n = 1$  und dem Zeitabstand der Übergangspeaks  $\Delta t = 14,4$  ps ergibt sich über die Gleichung zur Bestimmung der Dicke eine Dicke von  $d = 2,16 \pm 0,07$  mm.

Vergleicht man nun die so bestimmten Dicken mit der mechanisch gemessenen Dicke der Zwischenschicht von Probe 2  $d = 2,0 \pm 0,5$  mm, sieht man, dass die beiden errechneten Werte im Rahmen des Messfehlers dem gemessenen Wert entsprechen. Der gemessene Wert hat dabei einen größeren Fehler als bei Probe 1, da hier die einfassenden Mörtelplatten unebener sind und daher der Abstand zwischen ihnen örtlich fluktuiert.

Insgesamt kann man konstatieren, dass die THz-Zeitbereichsspektroskopie eine Messmethode ist, die es erlaubt, zu ermitteln, ob an einem Punkt in der Hinterfüllung ein Luftloch vorliegt. Zudem lässt sich einigermaßen gut bestimmen, wie dick die Hinterfüllschicht ist, beziehungsweise wie tief das Luftloch reicht.

### Analyse der Rasteraufnahmen

Um Punkte in der Hinterfüllung einer Probe mit potenziellen Fehlstellen, also Luftlöchern, zu identifizieren, wurden die Proben zunächst in einem Rastermuster abgescannt. Dadurch konnte nicht nur die Stärke der Hinterfüllschicht sondern auch ihre seitliche Ausdehnung ermittelt werden.



**Abb. 123:** Probe 1 im Raster scan, oben links: Fotografie der Oberfläche, oben rechts: Peak-zu-Peak-Amplitude, unten links: Intensität im Zeitbereich, der dem Oberflächenpuls entspricht, unten rechts: Intensität im Zeitbereich, der dem Puls im Zwischenraum entspricht

Dafür wurden die Proben auf eine Metallplatte gelegt und mit dem Roboterarm wurde in einem Raster von  $50 \times 50$  Punkten mit einem Abstand von 1 mm jeweils eine komplette Zeitbereichsspur aufgenommen. Bei diesem Rastermaß liegen die Proben mit ihren  $40 \times 40$  mm<sup>2</sup> auch mit kleinen Positionsabweichungen vom Mittelpunkt noch gut im Rasterbereich. Dafür muss aber die exakte

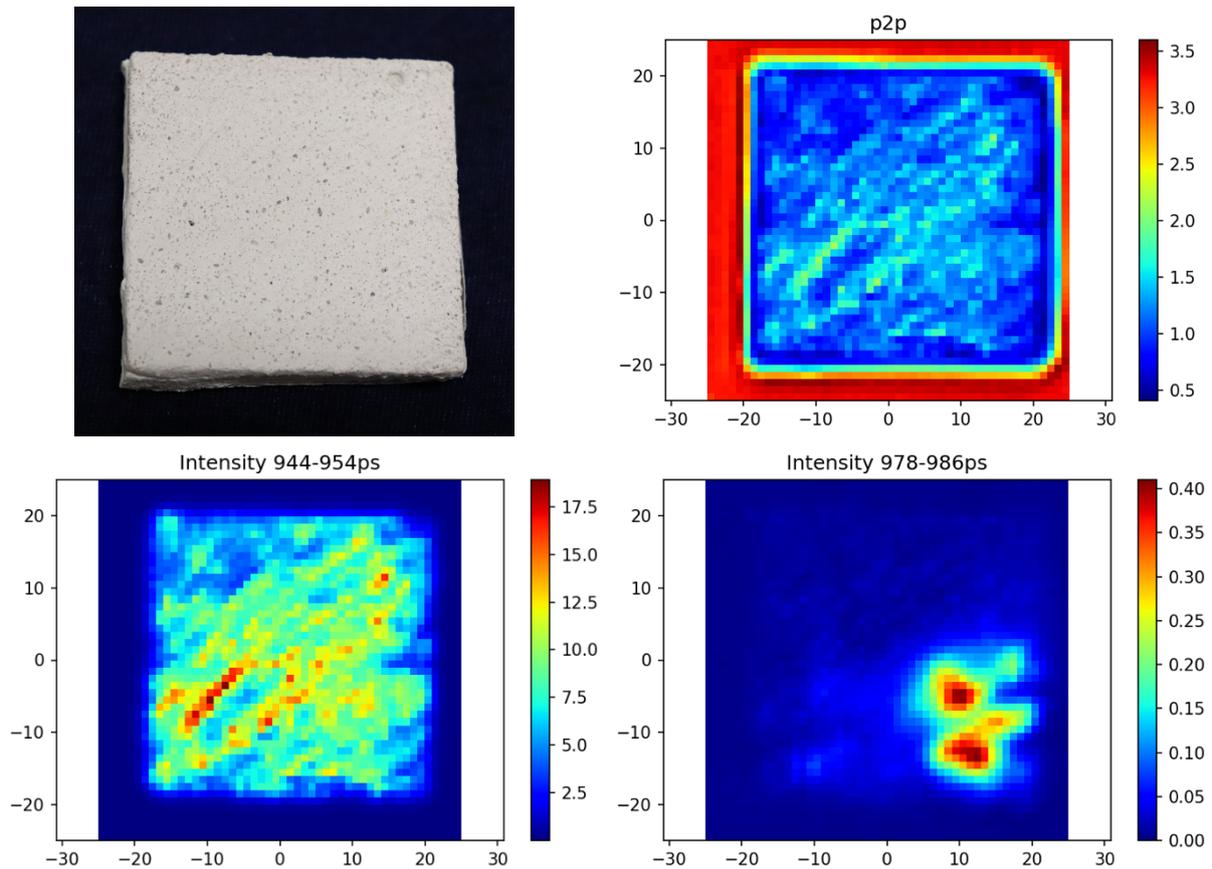
Position später mithilfe der Messdaten bestimmt werden. Die einzelnen THz-Zeitbereichsdaten wurden erst einmal mit einem Butterworth-Filter auf einen Frequenzbereich von 0,1 bis 1,5 THz gefiltert. Danach wurde die Peak-zu-Peak-Amplitude (p2p) des gesamten Zeitbereichs und die Intensitäten in gewissen Zeitbereichen berechnet und als Falschfarbbilder dargestellt. In **Abb.51** sind die Ergebnisse des THz-Rasterscans für die Probe 1 dargestellt.

Im ersten Bild (**Abb. 51**, oben links), sieht man eine Fotografie von Probe 1. Die Ausrichtung ist die gleiche wie bei den im Folgenden beschriebenen THz-Bildern. Der nicht erfolgreich hinterfüllte Bereich befindet sich in der unteren rechten Ecke der Probe.

Das zweite Bild (**Abb. 51**, oben rechts) zeigt die Peak-zu-Peak-Amplitude der Zeitbereichsdaten. In dieser Grafik kann man sehr gut die Position und Ausrichtung der Probe im Rasterscan erkennen, da sie die Strahlung erheblich schlechter als die dahinterliegende Metallplatte reflektiert. Damit lässt sich der Bereich, in dem die Probe liegt, auf etwa -20 bis 23 Pixel in X-Richtung und etwa -21 bis 22 Pixel in Y-Richtung bestimmen. Dies hilft dabei die Ausdehnung der Probe in den nachfolgenden Grafiken nicht aus den Augen zu verlieren. Des Weiteren kann man auch den Bereich mit geringerer Amplitude am linken Rand der Probe erkennen, von dem man im ersten Bild sieht, dass hier etwas Hinterfüllmaterial auf der Vorderseite der Probe getrocknet ist. Genauso lässt sich auch die ungefähre Form der Sägerillen an der Oberfläche erkennen.

Im dritten Bild (unten links) sieht man die Gesamtintensität im Zeitbereich von 942 bis 952 Pikosekunden, was, wenn wir uns an die Zeitbereichsdaten aus **Abb. 49** zurückerinnern, genau dem Zeitbereich des Oberflächenpeaks entspricht. Man sieht hier also die Intensität der Oberflächenreflexion. Auch hier kann man wieder die beschmierte Oberfläche als dunkleren Fleck sowie das ungefähre Rillenmuster der Oberfläche erkennen, da glatte Flächenabschnitte mehr zum Detektor zurückreflektieren als gekrümmte.

In der vierten Darstellung, unten rechts, sieht man die Gesamtintensität im Zeitbereich von 978 bis 986 Pikosekunden, was wiederum dem Zeitbereich des ersten Übergangspeaks aus **Abb. 49** entspricht. Vorsicht ist beim direkten Vergleich mit der dritten Grafik geboten, da dort die Intensitätsskala um mehr als das 30-fache größer ist. In der Grafik sieht man zum einen ein rotes Band am unteren Bildrand, das aber, schaut man zurück auf die zweite Grafik, außerhalb der Probe liegt. Zum anderen erkennt man einen großen roten Fleck stärkerer Intensität in der rechten unteren Ecke der Abbildung, der auch im Gebiet der Probe liegt. Dieser Fleck beschreibt ziemlich gut die Ausdehnung des nicht hinterfüllten Bereichs der Probe. Zusätzlich lassen sich noch in der Nähe der Mitte und zur oberen Ecke hin etwas hellere Bereiche erkennen, die anscheinend nicht vollständig aber zumindest teilweise hinterfüllt sind. Für Probe 2 wurden die auf gleiche Weise wie für Probe 1 im Rasterscan ermittelten Zeitbereichsdaten wieder mit einem Butterworth-Filter auf einen Frequenzbereich von 0,1 bis 1,5 THz gefiltert und die Peak-zu-Peak-Amplitude (p2p) für den gesamten Zeitbereich und die Intensitäten in gewissen Zeitbereichen berechnet und als Falschfarbbilder dargestellt. Diese Ergebnisse des THz-Rasterscans für Probe 2 in sind in **Abb. 52** dargestellt.



**Abb. 124:** Probe 2 im Raster scan, oben links: Fotografie der Oberfläche, oben rechts: Peak-zu-Peak-Abstand, unten links: Intensität an der Oberfläche, unten rechts: Intensität im Zwischenraum

Im ersten Bild, oben links, sieht man eine Fotografie der Oberfläche von Probe 2 wieder in derselben Ausrichtung wie die per Raster scan ermittelten Daten.

Im zweiten Bild, oben rechts, sieht man den Peak-zu-Peak-Abstand der Zeitbereichsdaten im Raster scan. In dieser Grafik erkennt man die Position und Ausrichtung von Probe 2 im Raster scan sehr gut, da die Probe die Strahlung erheblich schlechter als die dahinterliegende Metallplatte reflektiert. Hiermit lässt sich wieder der Bereich, in dem die Probe liegt, auf etwa -21 bis 22 Pixel in X-Richtung und etwa -19 bis 23 Pixel in Y-Richtung bestimmen. Man sieht in der oberen rechten Ecke einen kleinen Bereich geringerer Amplitude, der genau drei dort befindlichen Löchern aus der ersten Grafik entspricht. Erneut lässt sich die ungefähre Form der Sägerillen an der Oberfläche erkennen.

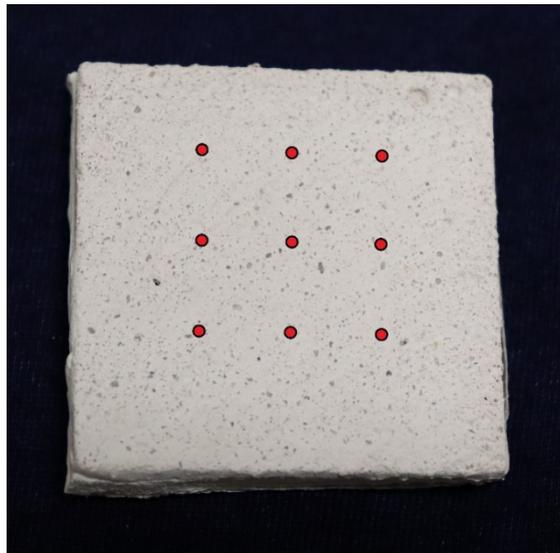
In der dritten Abbildung, unten links, sieht man die Gesamtintensität im Zeitbereich von 942 bis 952 Pikosekunden, was genau dem Zeitbereich des Oberflächenpeaks aus **Abb. 50** entspricht. Auch hier kann man wieder die drei Punkte in der oberen Ecke als dunkleren Fleck sowie das ungefähre Rillenmuster der Oberfläche erkennen. Insgesamt scheint die Oberfläche aber etwas glatter zu sein als bei Probe 1.

In der vierten Abbildung, unten rechts, sieht man die Gesamtintensität im Zeitbereich von 978 bis 986 Pikosekunden, was dem Zeitbereich des ersten Übergangspeaks aus **Abb. 50** entspricht. Hier erkennt man zwei rote Flecken stärkerer Intensität in der rechten unteren Ecke der Grafik. Beide liegen innerhalb der Probe und beschreiben die Ausdehnung des nicht hinterfüllten Bereichs der Probe einigermaßen gut. Die ungleichmäßige Ausdehnung bzw. Intensität des Gebiets lässt sich auf eine zur Zwischenschicht hin hervorstehende Ecke der unteren Mörtelplatte und einen ungleichmäßigen Plattenabstand zurückführen.

Mithilfe des Zeitbereichsrasterscans lassen sich also Fehlstellen und Hohlräume in der trockenen Hinterfüllmasse recht gut erkennen und lokalisieren; zudem kann man ihre Ausdehnung ermitteln.

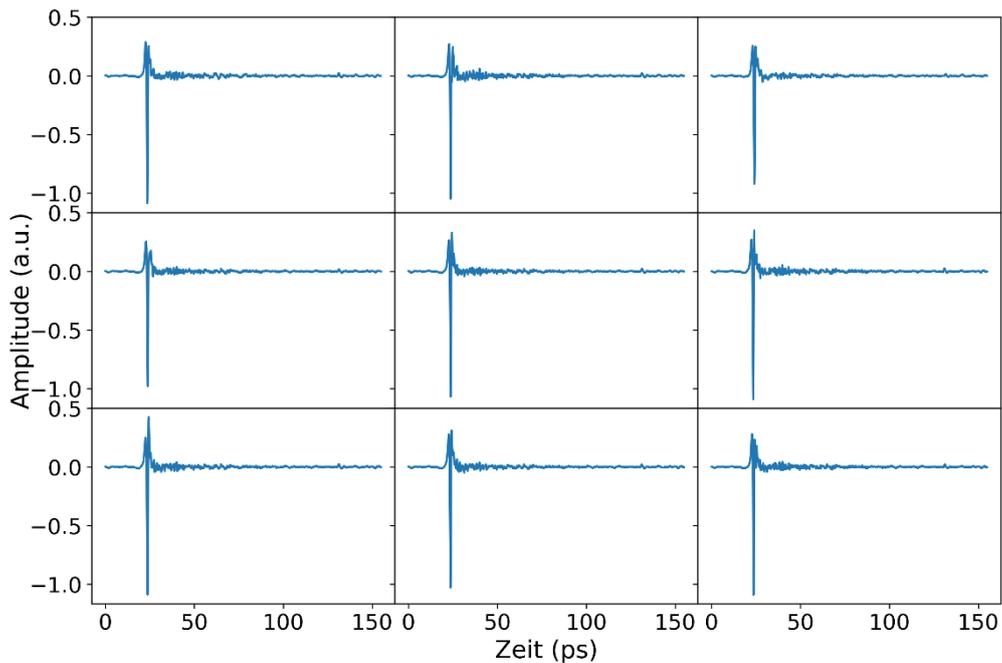
### Trocknungsuntersuchungen

Von generellem Interesse ist es, ab welchem Zeitpunkt man nach dem Hinterfüllen die THz-Untersuchungen sinnvoll durchführen kann. Um diesen Zeitpunkt zu ermitteln, wurde das Trocknungsverhalten von Probe 2 an neun Messpunkten, die immer wieder der Reihe nach vermessen wurden, in einer Langzeitmessung untersucht. Der Prüfkörper wurde vertikal gestellt und mit dem Robotersystem über einen Zeitraum von 50 Stunden nach dem Hinterfüllen in regelmäßigen Abständen vermessen. In **Abb. 53** sind die Messpunkte auf Probe 2 markiert, an denen während des Trocknens gemessen wurde.



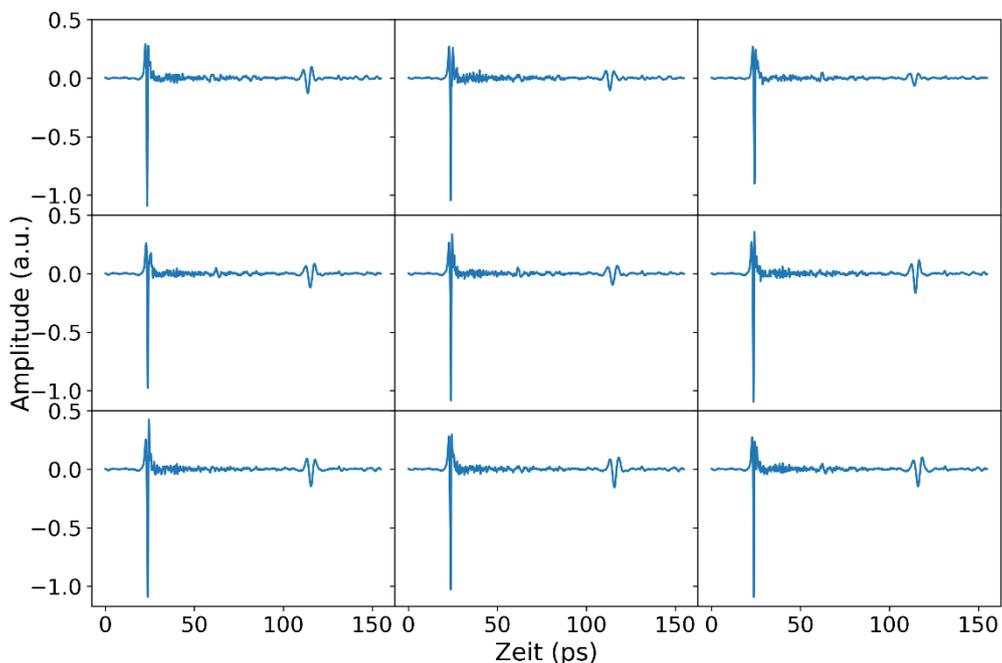
**Abb. 125:** Probe 2: Messpunkte zur Trocknungsuntersuchung

Die Messpunkte sind dabei nicht zentriert, sondern etwas nach oben verschoben, da während der Messung die Probe senkrecht stand und dabei am unteren Rand befestigt war, um zu verhindern, dass sie umfällt. Die Messpunkte haben dabei einen Abstand von 5 mm. Die Probe wurde senkrecht gestellt, damit das Füllmaterial aus der Öffnung an der oberen Kante, durch die der Hohlraum erst hinterfüllt wurde, nicht herausfließt. Die auf die Rückseite der Probe angeklebte Metallfolie dient dabei als Referenz für die Rückwand.



**Abb. 126:** Zeitbereichsdaten der neun Messpunkte zu Messbeginn

In **Abb. 54** sind die Zeitbereichsdaten aller neun Messpunkte zu Messbeginn zu sehen, die genauso angeordnet sind wie die Messpunkte auf der Probe in **Abb. 53**. Dargestellt ist dabei die Amplitude für alle Messpunkte in Abhängigkeit der auf null normierten Verzögerungszeit. Gut erkennen kann man den Oberflächenpeak. Alle anderen Peaks werden zu Messbeginn vom Wasseranteil des noch flüssigen Hinterfüllmaterials **KS 9.1/830** absorbiert.

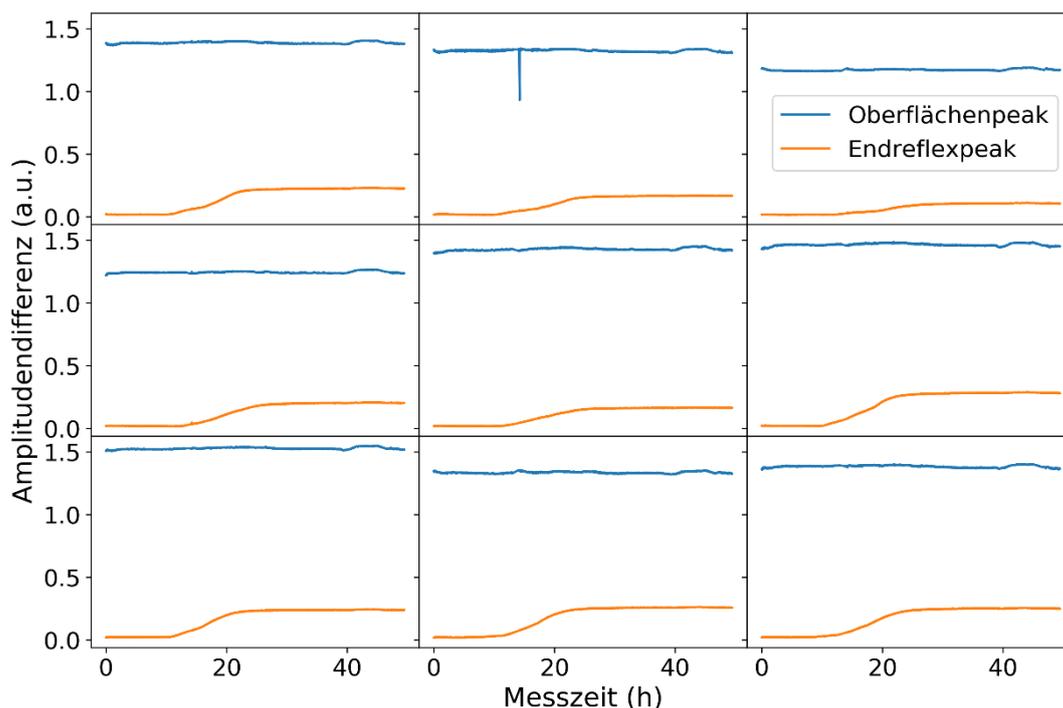


**Abb. 127:** Zeitbereichsdaten der neun Messpunkte zu Messende

In **Abb. 55** sind die Zeitbereichsdaten aller neun Messpunkte zu Messende, also 50 Stunden nach Messbeginn, zu sehen. Diese sind dabei wieder genauso angeordnet wie die Messpunkte auf der Probe in **Abb. 53**. Wieder sieht man die Amplituden für alle Messpunkte in Abhängigkeit der auf null normierten Verzögerungszeit. Auch hier sticht der Oberflächenpeak hervor. Allerdings lässt sich auch

der Endpeak, der von der Reflexion an der Metallfolie herrührt, gut identifizieren. Die Übergangspeaks lassen sich hierbei immerhin noch einigermaßen gut ermitteln.

Um nun das Trocknungsverhalten zu untersuchen, wird im Folgenden der am Ende der Messung gut sichtbare Endpeak betrachtet. In einem auf dem Endpeak zentrierten Intervall wurde die Peak-zu-Peak Amplitude für alle Aufnahmen berechnet, hier als Amplitudendifferenz bezeichnet. Es war zu erwarten, dass nach einer gewissen Zeit die Amplitudendifferenz zu steigen anfängt bis ein Plateau erreicht wird, weil dann der Hinterfüllmörtel komplett trocken ist. In **Abb. 56** ist die Amplitudendifferenz vom Oberflächenpeak in Blau und vom Endreflexpeak in Gelb in Abhängigkeit der Messzeit für alle neun Messpunkte zu sehen. Diese befinden sich wieder in derselben Anordnung wie die Messpunkte in **Abb. 53**.



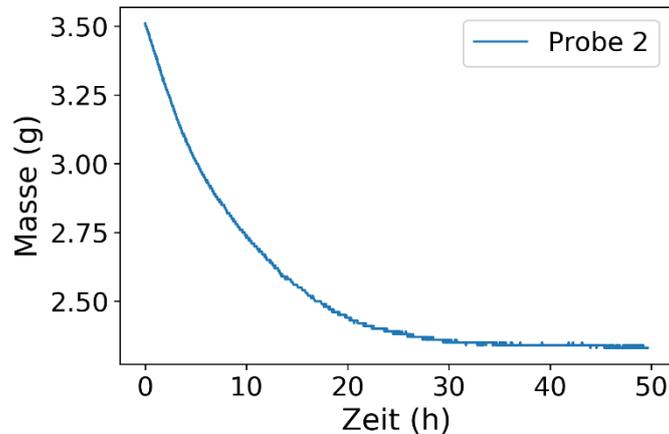
**Abb. 128:** Peak-zu-Peak-Abstand von Oberflächen- und Endreflexpeak in Abhängigkeit der Messzeit bei allen neun Messpunkten

Man sieht, dass die Amplitudendifferenz des Oberflächenpeaks abgesehen von leichten Schwankungen über den gesamten Messzeitraum für alle neun Punkte relativ konstant ist. Den Ausreißer beim Messpunkt in der Mitte oben kann man als Messfehler betrachten und vernachlässigen. Währenddessen liegt die Amplitudendifferenz für den Endreflexpeak am Anfang bei etwa Null, beginnt nach ungefähr 10 Stunden zu steigen und bleibt ab etwa 25 Stunden auf einem gleichbleibenden Niveau.

Anhand der Änderung des Peak-zu-Peak-Abstands des Endreflexpeaks kann man also darauf schließen, ab wann eine THz-Vermessung bei einer solchen Trocknung sinnvoll ist, während die Daten vom Oberflächenpeak als Referenz dienen, um Änderungen und Fehler im Messvorgang leichter erkennen zu können. Anhand der Messdaten kann man also davon ausgehen, dass eine Messung einer solchen hinterfüllten Probe nach etwa 25 Stunden sinnvoll erfolgen kann.

Wenn der Hinterfüllmörtel trocknet, verliert er an Masse, da das enthaltene Wasser verdunstet. Deswegen wurde die Probe direkt nach dem Hinterfüllen für die Zeit der Trocknungsuntersuchung auf eine Waage gestellt. Die angezeigte Masse der Probe wurde mit einer Webcam aufgenommen und

mittels einer OCR-Software (Optical Character Recognition, engl. für optische Zeichenerkennung) wurden die Werte ermittelt. In **Abb. 57** ist die Massenabnahme während der Trocknung dargestellt.



**Abb. 129:** Massenabnahme von Probe 2 in Abhängigkeit der Messzeit

Wie erwartet sieht man, dass die Masse der Probe mit der Trocknungszeit abnimmt. Man kann sehr gut den exponentiellen Abfall der Masse ablesen, der auf der Verdunstung von Wasser aus dem Hinterfüllmaterial basiert. Auch erkennt man hier, dass sich nach etwa 25 Stunden die Masse nur noch minimal und ab ca. 30 Stunden fast gar nicht mehr ändert.

Vergleicht man dies mit dem Ergebnis aus **Abb. 56**, detektiert man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Massenabnahme und Größe des Endreflexpeaks. Insgesamt lässt sich Folgendes festhalten: Um gute Ergebnisse zu erzielen, sollte eine THz-Untersuchung nahe des Zeitpunktes der vollständigen Trocknung stattfinden, aber definitiv nicht wesentlich früher.

#### 6.4 Systemanpassung und Vorbereitung mittels einer 3D-Testfläche

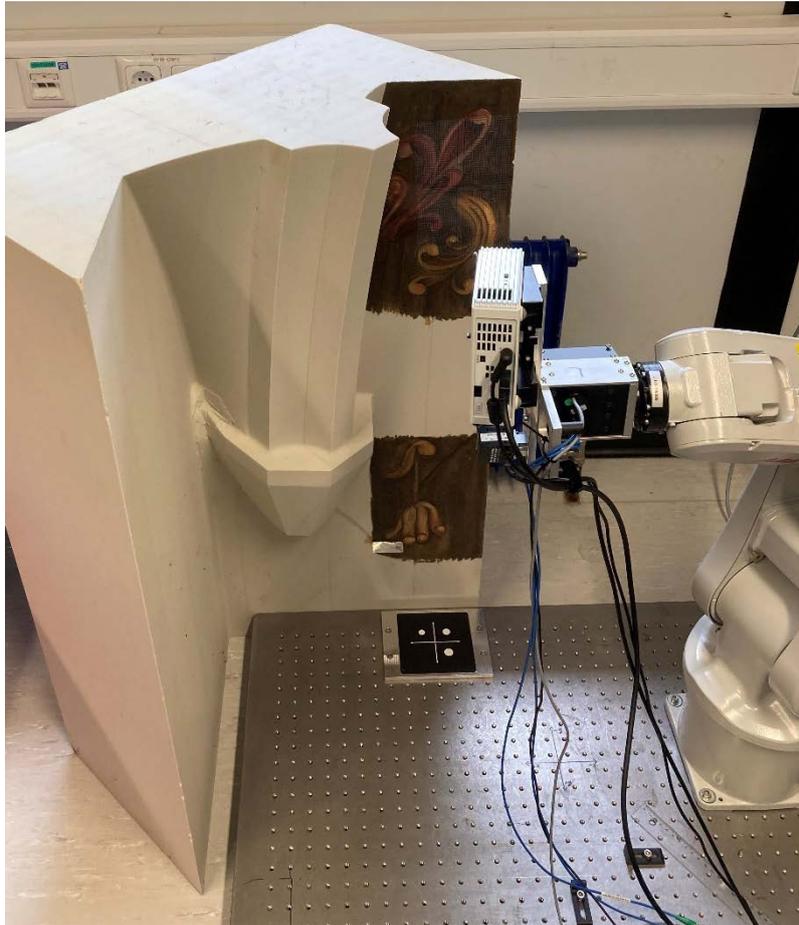
Für die Vorortuntersuchung in der Schlosskapelle Bückeburg war ein bildgebendes, roboterbasiertes THz-System [6]<sup>33</sup> vorgesehen, welches das Abscannen von Objekten mit unebenen Oberflächen ermöglicht. Der Messvorgang ist wesentlich aufwändiger als ein konventioneller 2D-Raster-Scan und kann in vier Schritte unterteilt werden:

1. 3D-Scan der Oberfläche,
2. Berechnung des Messpfades,
3. Simulation der Roboterbewegung und Kollisionskontrolle,
4. roboterbasierte THz-Messung.

Bevor ein solcher Messvorgang begonnen werden kann, müssen die einzelnen Systemkomponenten (d.h. 3D-Scanner, Roboterarm, THz-Sensorik) miteinander verbunden und kalibriert werden. Diese zeitaufwändige Kalibration muss normalerweise nur vor der allerersten Messung durchgeführt werden. Eine erneute Kalibration wird bei Systemveränderungen, wie z.B. Umbau oder Abbau und Neuaufbau des Systems an einem neuen Standort, nötig. Genauere Auslegung und bevorzugte Pose des Roboters gegenüber dem Objekt müssen vor Beginn der Kalibration genauestens durchdacht werden, damit das gesamte Objekt untersucht werden kann, ohne die Kalibration wiederholen zu müssen. Dafür wurde ein für die Untersuchung vorgesehener Teil der Wand in der Schlosskapelle modelliert und ein Modell aus Polyurethan hergestellt (siehe Abschnitt 4.10.4). Diese Testwand wurde

<sup>33</sup> E. Stübling, et.al.

in Räumlichkeiten der Philipps-Universität Marburg aufgestellt (**Abb. 58**) und zur Vorbereitung auf die Vorortmessungen in Bückeburg verwendet.



**Abb. 130:** Systemvorbereitung für die Untersuchungen in der Schlosskapelle in Bückeburg

Mithilfe der Testwand konnte die Position des Robotersystems auf einem Breadboard optimiert werden, damit die für die Untersuchung vorgesehenen Flächen erreicht werden können. Zusätzlich hat sich herausgestellt, dass die Steuerungssoftware zum Scannen von Flächen in der vertikalen Ebene angepasst werden musste. Aufgrund der Vorbereitung an der Testwand konnten die Messungen mit dem Roboter-System in der Schlosskapelle Bückeburg reibungslos und zeiteffizient durchgeführt werden.

## 7. Ergebnisse zum Bearbeitungszyklus-Labor

Zur Simulation des Bearbeitungszyklusses im Labor wurden reproduzierbare Prüfkörper mit Hohlraum aus Gipsputzmörtel erstellt (Kapitel 4.10.1.) Dieser Bearbeitungszyklus, beginnend mit der Hohlraumvermessung mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie, der Ozonflutung und der anschließenden Verfüllung der Hohlraumprüfkörper und der erneuten THz-Messung zur Überprüfung der Maßnahme, wurde zur Abstimmung der Hohlraumhinterfüllung und einer möglichen Anpassung des Mörtels für die Umsetzung am Objekt genutzt.

## 7.1 Ozonbehandlung und Hinterfüllung der Prüfkörper

Insgesamt wurden fünf Prüfkörper vermessen und befüllt. Vier davon wurden mit einer Ozonflutung behandelt und ein Referenzprüfkörper blieb unbehandelt. Die Hohlraumprüfkörper wurden, wie nachfolgend aufgelistet, unterschiedlich vorbehandelt und nach der Ozonbehandlung (ohne Referenzprüfkörper) mit ca. 11 ml Hinterfüllmörtel der Rezeptur **KS 1.1 830 B** hinterfüllt:

Tab. 26: Bezeichnung der analysierten Hohlraumprüfkörper

Prüfkörperbezeichnung	Bearbeitung
21 A	mit Ozonbehandlung mit vorheriger Ethanolapplikation und Nachfüllung nach ersichtlichem Absacken am Einfüllloch
21 C	mit Ozonbehandlung mit vorheriger Ethanolapplikation und Nachfüllung nach ersichtlichem Absacken am Einfüllloch
21 B	ohne Ozonbehandlung nur mit vorheriger Ethanolapplikation befüllt mit Nachfüllung nach ersichtlichem Absacken am Einfüllloch
20 I	mit Ozonbehandlung mit vorheriger Ethanolapplikation und Nachfüllung nach ersichtlichem Absacken am Einfüllloch
20 II	mit Ozonbehandlung mit vorheriger Ethanolapplikation und ohne Nachverfüllen nach Erstbefüllung

Alle Hinterfüllungen erfolgten im senkrecht stehenden Zustand der Probe mit den Bohrungen im oberen Bereich. Das untere Loch diente als Loch der Befüllung, das obere als Entlüftungsloch, an dem auch ersichtlich war, wenn die Probe bis oben befüllt wurde. Hier trat der Mörtel im flüssigen Zustand wieder aus. Für die vorherige Ozonanwendung wurde der Ozongenerator Bitom OZONE GENERATOR BT-W10 verwendet. Sowohl bei den Laborversuchen als auch bei den Versuchen am Objekt in Bückeburg wurde der Ozongenerator auf maximaler Stufe (100 %) betrieben. Dies entspricht einer maximalen Ozonproduktion von bis zu 10 g Ozon pro Stunde. Das Ozon wurde dabei mittels eines ozonbeständigen Schlauchs in den jeweiligen Hohlraum 20 min (Labor- und Objektversuche) eingeleitet. Die Prüfkörper wurden anschließend für zwei Wochen im Klimaschrank bei 20°C und 65 % rLF gelagert und anschließen erneut mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie vermessen.

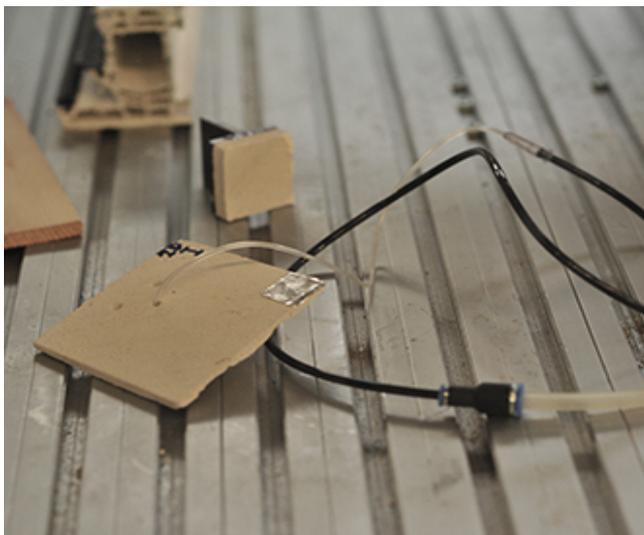


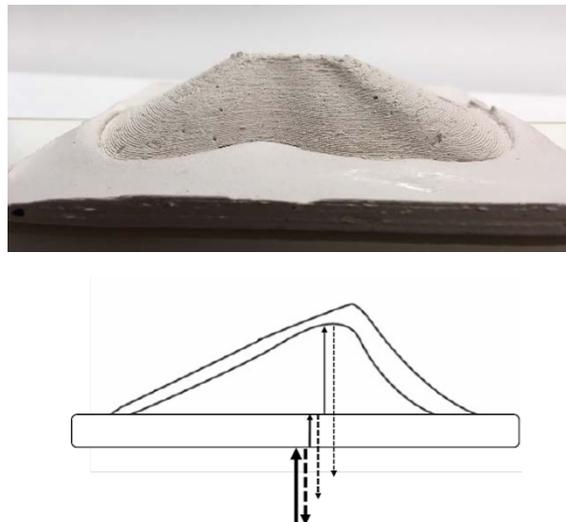
Abb. 131: Links Laboraufbau Hohlraumflutung mit Ozon, rechts Prüfkörperlagerung im Klimaschrank

Zur Überprüfung der Anbindung und Ausbreitung des Hinterfüllmörtels wurden die Prüfkörper anschließend an definierten Messlinien (**Abb. 61**) der zu analysierenden Hohlräume mittels eines Diamantsägeblatts (5 mm) aufgetrennt, fotografisch dokumentiert und die Ergebnisse mit den THZ-Messungen verglichen. Die Stärke des Sägeblattes wurde in den Masseverlust des Sägeprozesses an der Messlinie mit einkalkuliert und diese dementsprechend leicht verschoben.

Der Vorgang der Vermessung wird in Kapitel 7.2 beschrieben.

## 7.2 THz-Untersuchung der Prüfkörper

Die hergestellten Prüfkörper wurden zunächst vor dem Hinterfüllen in Reflexion mit einem roboterbasierten THz-Spektrometer<sup>34</sup> vermessen. Danach wurden die Prüfkörper nach der Ozonbehandlung hinterfüllt und die THz-Untersuchung wurde wiederholt, um festzustellen, ob der Hinterfüllprozess erfolgreich war. Die Prüfkörper wurden immer von der flachen Seite her in einem Rastermuster abgescannt, wie in der **Abb. 60** unten dargestellt. Die Schrittweite betrug 2 mm. Die Untersuchung von der flachen Seite wurde gewählt, um einen Hohlraum zu simulieren, der gewölbt und nicht zur Außenfläche der Wand parallel ist.



**Abb. 132:** Foto des Prüfkörpers in der Seitenansicht (oben) und schematisch dargestellter Probenquerschnitt (unten); die durchgezogenen Pfeile veranschaulichen dabei die Propagationsrichtung der emittierten THz-Strahlung während der Messung, während die gestrichelten Pfeile die an den Grenzflächen reflektierte THz-Strahlung symbolisieren, die schließlich vom Detektor registriert wird

Die an den Grenzflächen reflektierte THz-Strahlung konnte vom Detektor registriert werden. Je tiefer die Grenzfläche in der Probe liegt, desto länger dauert es, bis die reflektierten Pulse den Empfänger erreichen. Ähnlich wie in **Abb. 48** dargestellt können unter gewissen Voraussetzungen in den Zeitbereichsdaten einzelne THz-Pulse erkannt und den Grenzschichten zugeordnet werden.

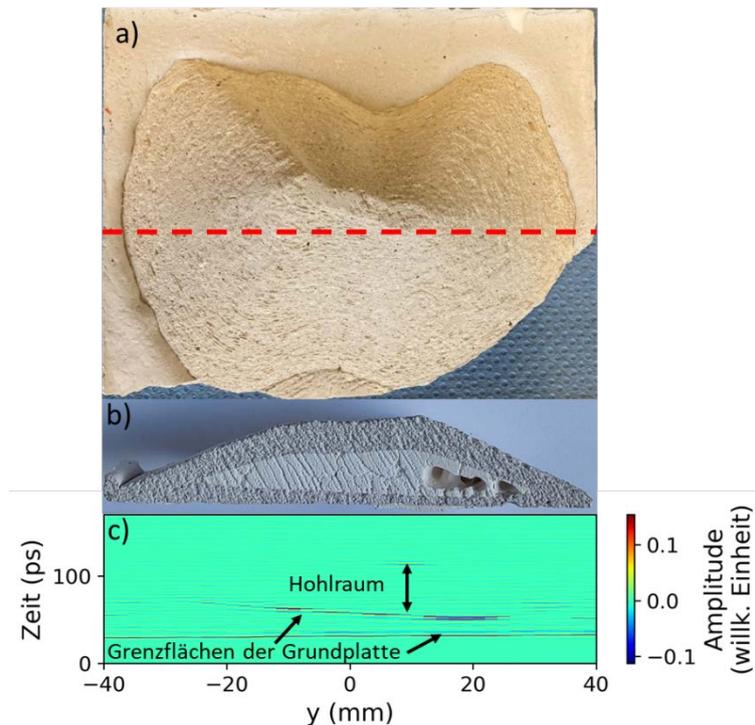
Um das Hohlraumprofil abbilden zu können, werden die Messungen als Querschnitte dargestellt werden, wobei die aufgetragene Zeitachse der Messtiefe entspricht. Die Amplitude des THz-Signals ist dabei farbkodiert. Die einzelnen THz-Aufnahmen wurden zuerst mit einem Butterworth-Filter auf einen Frequenzbereich von 0,15 bis 0,8 THz gefiltert. Um eine bessere grafische Darstellung zu ermöglichen, wurde die Amplitude in den ersten 35 ps des Signals, die den ersten Puls enthalten, um

<sup>34</sup> E. Stübling et.al.

den Faktor 5 reduziert. Dies ist sinnvoll, da der erste THz-Puls, der von der ersten flachen Oberfläche stammt, viel stärker ist als die Reflexionen, die aus der Tiefe stammen.

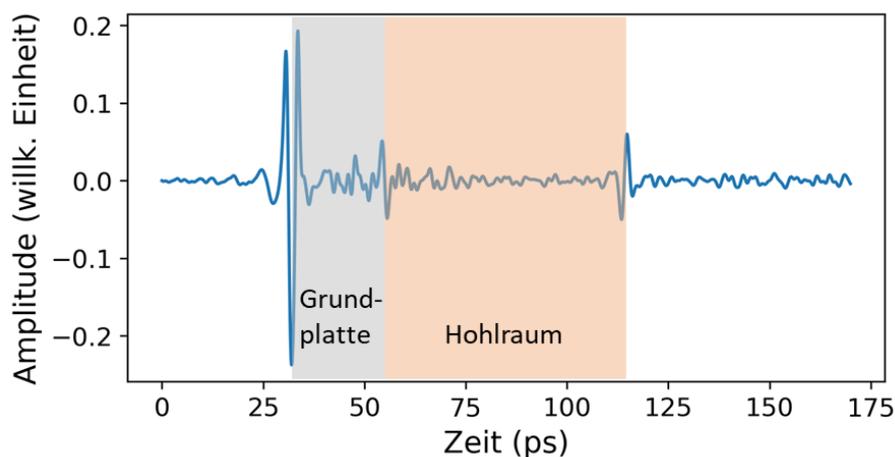
### 7.2.1 Prüfkörper 21A

In **Abb. 61 c** ist ein aus der THz-Untersuchung erzeugter Querschnitt des Prüfkörpers 21 A veranschaulicht, in dem der Hohlraum zu erkennen ist.



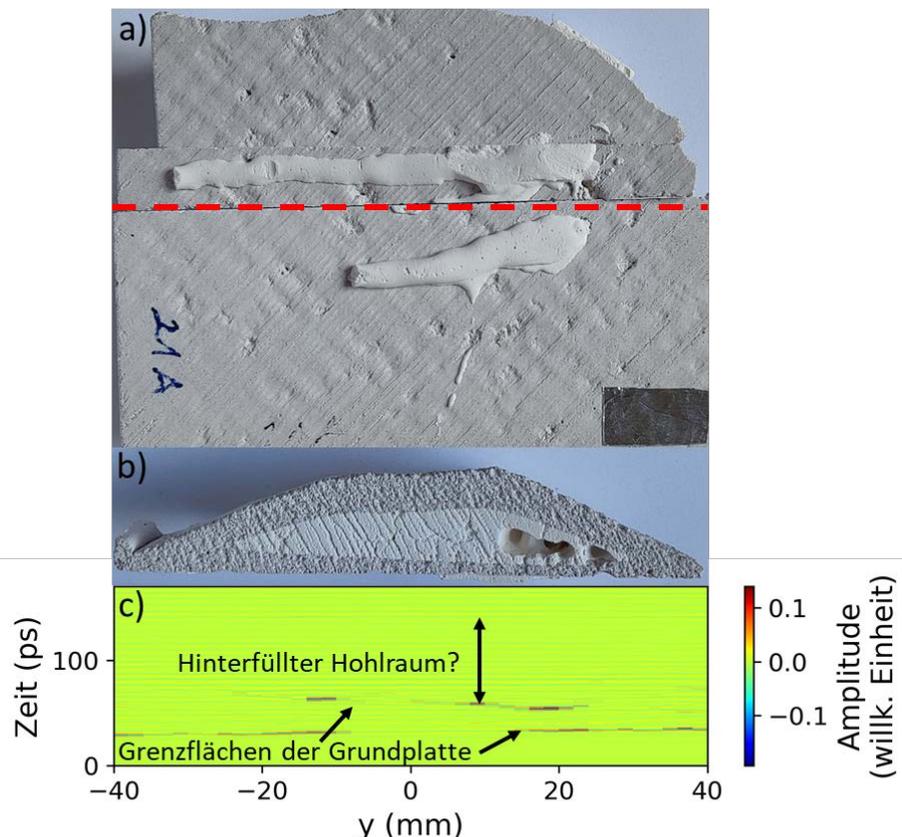
**Abb. 133:** a) Foto des Prüfkörpers 21 A in der Draufsicht von der gewölbten Seite. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die Richtung des analysierten Querschnitts; b) Foto des entsprechenden Querschnittes ( $x = 4$  mm) nach dem Durchsägen des hinterfüllten Prüfkörpers; c) der entsprechende aus der THz-Untersuchung erzeugte Querschnitt des Prüfkörpers vor dem Hinterfüllen

Aus dem THz-Querschnitt lassen sich die Grenzflächen der Grundplatte erkennen. Es kann auch erkannt werden, dass die Grundplatte im linken Bereich (d.h. bei negativen  $y$ -Werten) dicker ist. Dies konnte auch optisch nach dem Zersägen des Prüfkörpers bestätigt werden (siehe **Abb. 61 b**). Zusätzlich konnte beim  $y$ -Wert von etwa 8 mm das Ende des Hohlraums wahrgenommen werden. Ein entsprechendes THz-Messsignal für den nicht hinterfüllten Prüfkörper ist in **Abb. 62** gezeigt.



**Abb. 134:** THz-Messsignal für den nicht hinterfüllten Prüfkörper an der Position  $y = 8$  mm (vgl. Abb. 61c)

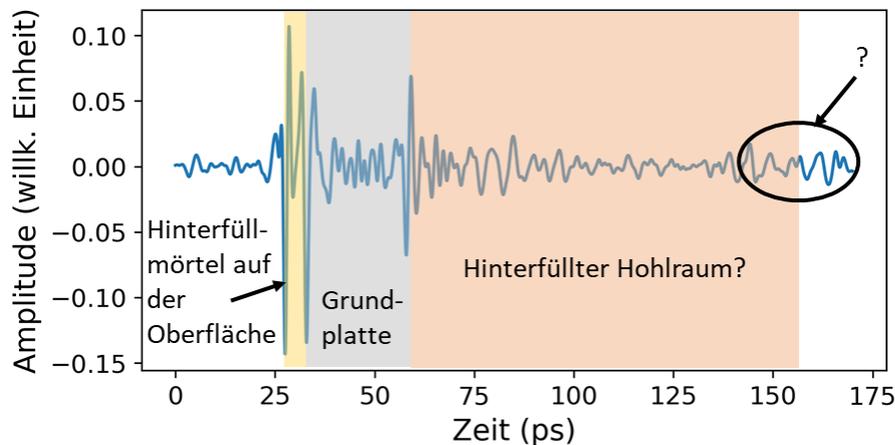
Die Zeitdifferenz zwischen den THz-Pulsen in **Abb. 62**, die von den Reflexionen an unterschiedlichen Phasenübergängen herrührt (siehe Abschnitt 6.3), entsprechen der optischen Dicke der einzelnen Schichten. Da der Hohlraum aus Luft besteht, kann für diesen Bereich ein Brechungsindex von 1 angenommen werden. Daraus ergibt sich, dass die optische Dicke der physikalischen Dicke entspricht. Dadurch konnte die Ausbreitung des Hohlraums in diesem Prüfkörperteil aufgrund der THz-Messung auf etwa 9 mm bestimmt werden, was sich auch mit der optischen Untersuchung des zersägten Prüfkörpers bestätigen lässt. Da der Brechungsindex für das Material, aus dem die Grundplatte besteht, bereits bestimmt wurde (siehe Abschnitt 6.1), konnte auch die Dicke der Grundplatte aus dem THz-Messsignal eingeschätzt werden. Die Einschätzung ergab eine Dicke von etwa 2 mm, was wiederum dem Wert aus der optischen Untersuchung entspricht. So konnte an dieser Stelle der Hohlraum zerstörungsfrei bestätigt werden. Allerdings ist zu beachten, dass aufgrund seiner gewölbten Form nicht der ganze Hohlraum eindeutig identifiziert werden konnte. Dies wurde bereits in Abschnitt 6.2 zur Bestimmung der Messbarkeit von unebenen Oberflächen festgestellt. Nun muss ermittelt werden, ob das Hinterfüllen des Hohlraums auch mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie überprüft werden kann und ob mögliche, nicht hinterfüllte Stellen detektiert werden können. In **Abb. 63 c** ist ein THz-Querschnitt des hinterfüllten Prüfkörpers 21A gezeigt, der dem Querschnitt in **Abb. 61 c** entspricht.



**Abb. 135:** a) Foto des zersägten Prüfkörpers 21 A in der Draufsicht von der flachen Seite (Grundplatte) mit der gestrichelten Linie, die die Richtung des analysierten Querschnitts kennzeichnet; b) Foto des entsprechenden Querschnittes ( $x = 4$  mm) nach dem Durchsägen des hinterfüllten Prüfkörpers; c) der entsprechende aus der THz-Untersuchung erzeugte Querschnitt des Prüfkörpers nach dem Hinterfüllen

Aus dem THz-Querschnitt des hinterfüllten Prüfkörpers lässt sich die Grundplatte wiedererkennen, allerdings nicht ganz so deutlich wie für den nicht hinterfüllten Prüfkörper (**Abb. 61 c**). Dies ist auf das Hinterfüllen zurückzuführen. Ein Teil des Mörtels ist auch auf die Außenfläche geflossen (**Abb. 63 a**), was die Identifikation der ersten Grenzfläche der Grundplatte im Bereich  $-10 < y < 15$  mm im gezeigten

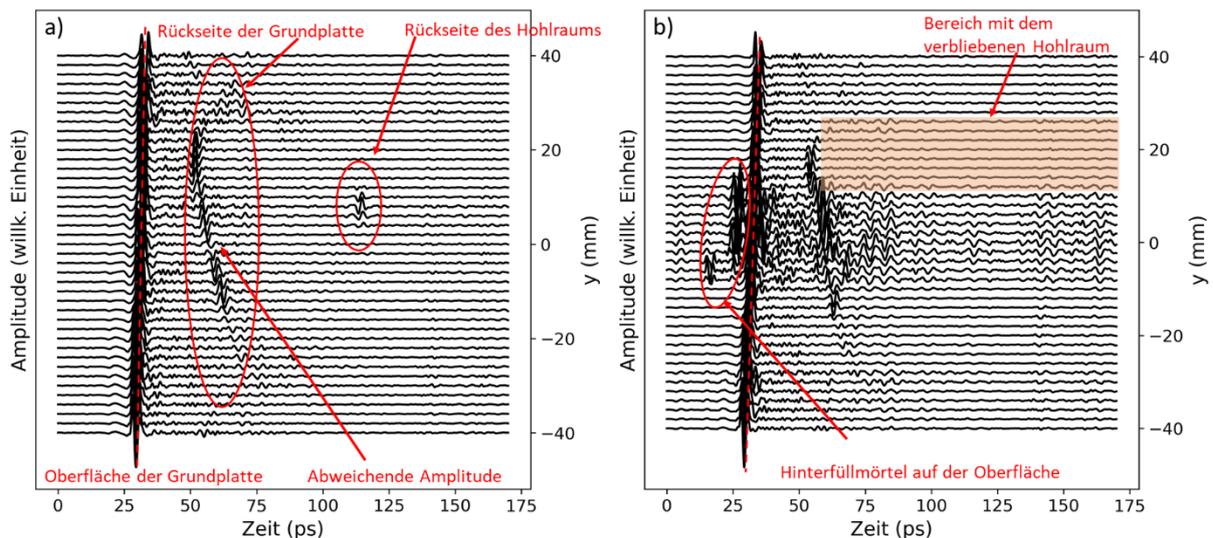
THz-Querschnitt erschwert. Außerdem konnte das Merkmal, welches der von der Oberseite des Hohlraums reflektierten THz-Strahlung entspricht, nach dem Hinterfüllen nicht mehr beobachtet werden, was darauf hindeutet, dass das Hinterfüllen des Prüfkörpers erfolgreich war. Das entsprechende THz-Messsignal ist in **Abb. 64** dargestellt.



**Abb. 136:** Am hinterfüllten Prüfkörper gewonnenes THz-Messsignal an der Position  $y = 8 \text{ mm}$  (vgl. Abb. 63 c)

Im Vergleich zum THz-Messsignal vor dem Hinterfüllen konnte ein zusätzlicher THz-Puls am Signalanfang identifiziert werden. Er resultiert aus der THz-Strahlung, die vom Hinterfüllmörtel auf der Oberfläche des Prüfkörpers reflektiert wurde. Es konnte jedoch kein THz-Puls erkannt werden, der dem Ende des hinterfüllten Hohlraums entspricht. Dies deutet auf eine erfolgreiche Hinterfüllung des Prüfkörpers. Das konnte auch an der Stelle ( $y = 8 \text{ mm}$ ) optisch bestätigt werden (**Abb. 63 b**). Wegen des bekannten Brechungsindex des Hinterfüllmörtels (Abschnitt 6.1) und der aus der optischen Untersuchung bekannten räumlichen Ausbreitung des hinterfüllten Hohlraums hätte man einen schwachen THz-Puls am Ende des Messsignals erwarten können. In dem Bereich gibt es zwar Schwingungen, die einem THz-Puls ähneln könnten, allerdings sind diese Schwingungen auch an den meisten anderen Stellen des Prüfkörpers zu sehen, also auch in Bereichen, in denen nur die Grundplatte und kein Hohlraum gegeben ist (z.B.  $-40 \text{ mm} < y < -30 \text{ mm}$ ). Es ist jedoch nicht wirklich verwunderlich, dass kein klarer Endpuls zu beobachten ist, denn dieser THz-Puls propagiert durch etwa  $9 \text{ mm}$  absorbierenden Hinterfüllmörtel. Er wird dabei zu stark abgeschwächt, um noch detektiert werden zu können.

Nachdem der Prüfkörper 21 A zersägt wurde, wurden nicht erfolgreich hinterfüllte Bereiche sichtbar (siehe **Abb. 63 b**). Diese ließen sich in den THz-Querschnitten leider nicht eindeutig identifizieren. Deswegen wurde in den einzelnen THz-Messsignalen nach Merkmalen gesucht, die dem im Foto klar erkennbaren Hohlraum zugeordnet werden können. Dies führte zu keinem Ergebnis, weil in den THz-Messsignalen zufällige Schwingungen auftreten, die einem THz-Puls ähneln. Eine eindeutige Identifikation in den THz-Zeitspuren ist deswegen nicht möglich. Da sich der im Foto erkennbare Hohlraum über mehrere Messpunkte erstreckt, wurden mehrere Messsignale in einer Auftragung dargestellt; sie entsprechen den gezeigten THz-Querschnitten. Vor dem Zeichnen wurden alle Messsignale normiert und vertikal verschoben, um sie voneinander zu trennen. Diese Darstellung für Prüfkörper 21 A vor und nach dem Hinterfüllen wird in **Abb. 65** gezeigt.



**Abb. 137:** Die normierten und vertikal verschobenen THz-Messsignale a) vor und b) nach dem Hinterfüllen. Die Messsignale entsprechen den THz-Querschnitten in Abb. 61 c) und Abb. 63 c)

Aus so dargestellten THz-Messsignalen lassen sich die gleichen Schlüsse wie bereits aus den THz-Querschnitten ziehen (**Abb. 61 c** und **Abb. 63 c**). Sie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Vor und nach dem Hinterfüllen konnte die Vorderseite und Rückseite der Grundplatte erkannt werden.
- Nach dem Hinterfüllen konnte auch der Hinterfüllmörtel auf der Oberfläche erkannt werden.
- Vor dem Hinterfüllen konnte die Rückseite des Hohlraums erkannt werden.
- Nach dem Hinterfüllen konnte die Rückseite des Hohlraums nicht mehr erkannt werden.
- Nach dem Hinterfüllen konnte der verbliebene Hohlraum nicht erkannt werden.

Da in **Abb. 65 a**) nur an wenigen Stellen Pulse von der Rückseite des Hohlraums erkennbar sind, die nach dem Hinterfüllen als Indiz für eine erfolgreiche Hinterfüllung dienen können, wurde versucht anhand anderer Merkmale auf eine Hinterfüllung zu schließen. Betrachtet man die Form der Amplitude von der Rückseite der Grundplatte, so sollte sich dieser Puls bei einem Übergang von der Mörtelplatte zu Mörtel im Gegensatz zu einem Übergang zu Luft verkleinern. In **Abb. 65 a**) beobachtet man aber, dass die Amplitude schon vor dem Hinterfüllen an manchen Stellen unerwartet abweicht. Deshalb können auch abweichende Amplituden für die Rückseite der Grundplatte bei hinterfüllten Prüfkörpern nicht als sicheres Indiz für anders verlaufenes Hinterfüllen dienen. Deswegen wurde nach anderen Auffälligkeiten in den THz-Messsignalen gesucht, um signifikante Stellen auszuwählen an denen die Prüfkörper zur weiteren Untersuchung zersägt werden sollten.

Als nächstes werden die Ergebnisse der THz-Untersuchung für Prüfkörper 21 B vorgestellt.

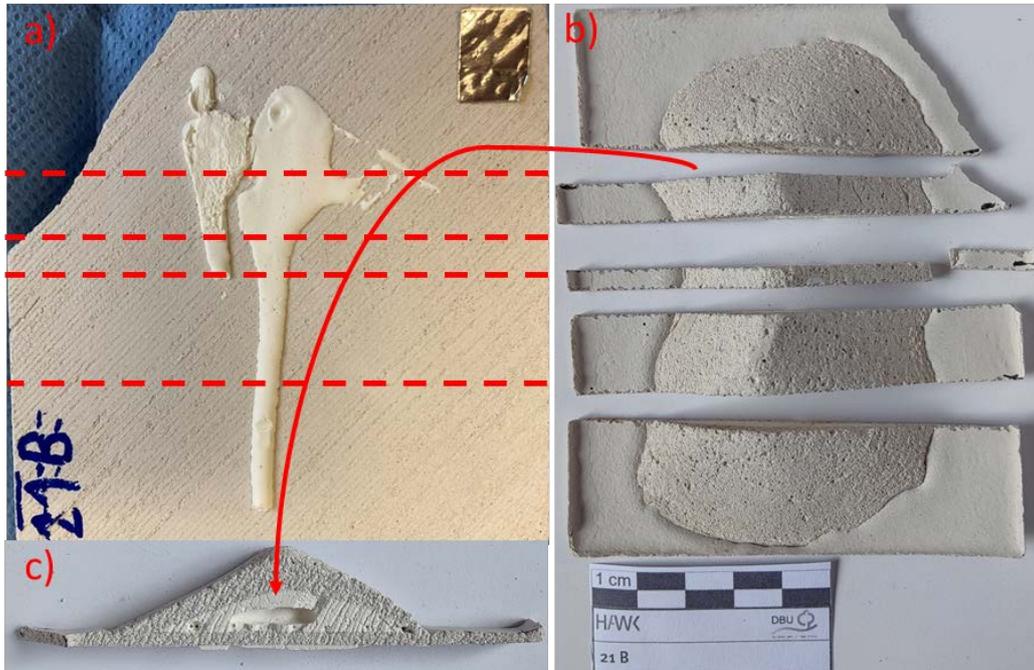
### 7.2.2 Prüfkörper 21B

In **Abb. 66** sind Fotos von dem Prüfkörper 21 B vor und nach dem Zersägen gezeigt. Optisch lässt sich ein Bereich mit verbliebenem Hohlraum beobachten (**Abb. 66 c**). In dem Bereich ist Folgendes zu sehen (von unten nach oben):

- Auf die Oberfläche gelaufener Hinterfüllmörtel (etwa 0,6 mm dick)
- Grundplatte (etwa 2,5 mm dick)
- Hinterfüllmörtelschicht (etwa 1,1 mm dick)

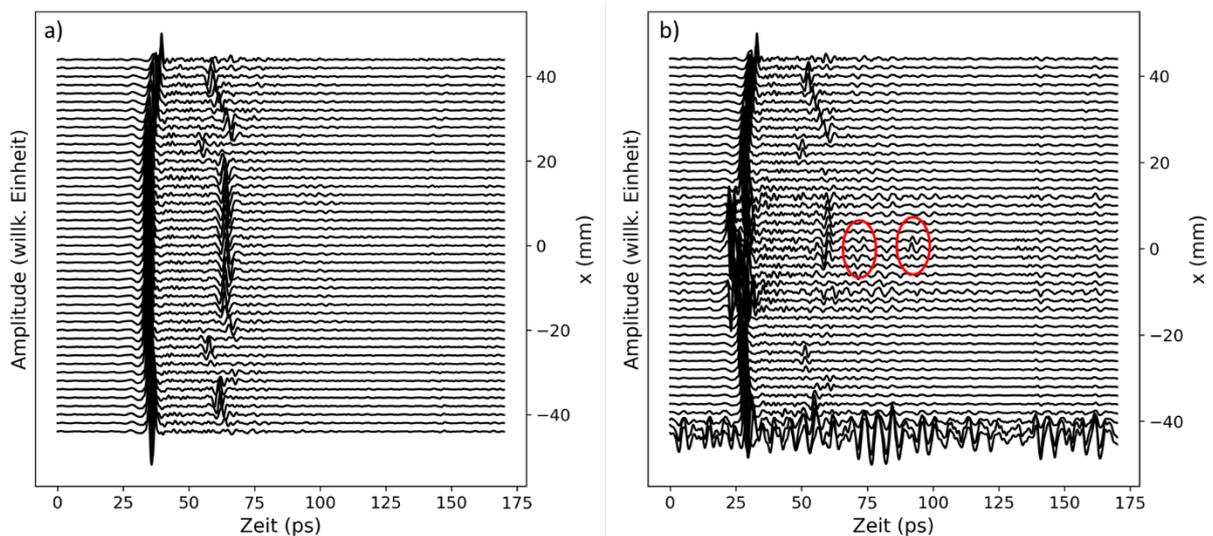
- Verbliebener Hohlraum (etwa 3,1 mm dick)
- Hinterfüllmörtelschicht (etwa 3 mm dick)
- Rückseite des Prüfkörpers

Der beobachtete Hohlraum hat eine Ausdehnung von etwa 14 mm entlang des Schnitts (x-Richtung). Er liegt relativ mittig; der x-Wert beträgt 0 mm.



**Abb. 138:** Fotos von Prüfkörper 21 B a) von der untersuchten Seite nach dem Hinterfüllen, b) von der Rückseite nach dem Zersägen und c) vom Querschnitt mit dem auffälligen Bereich

In **Abb. 67** sind die normierten und vertikal verschobenen THz-Messsignale vor und nach dem Hinterfüllen gezeigt. Sie wurden am in **Abb. 66 c** gezeigten Querschnitt gewonnen. Bei x-Werten von 0 und 2 mm können mehrere THz-Pulse beobachtet werden, die dem im Foto gezeigten Hohlraum zugeordnet werden können (in **Abb. 67 b** rot markiert).

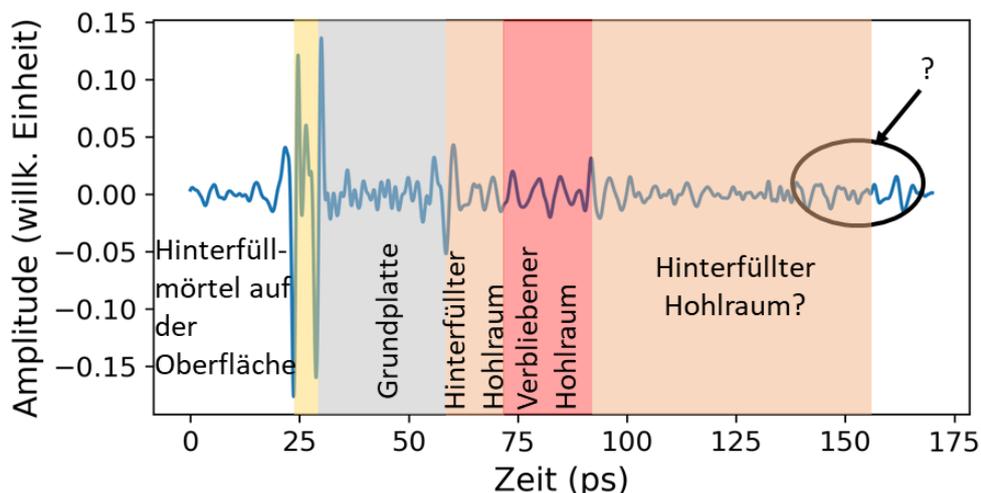


**Abb. 139:** Die normierten und vertikal verschobenen THz-Messsignale a) vor und b) nach dem Hinterfüllen. Die Messsignale wurden am in **Abb. 66 c** gezeigten Schnitt gewonnen

Das THz-Messsignal, das bei  $x = 0$  mm gewonnen wurde, ist in **Abb. 68** gezeigt. In dem Signal lassen sich mehrere THz-Pulse erkennen, die den folgenden Grenzflächen zugeordnet werden können:

- Luft – Hinterfüllmörtel auf der Oberfläche der Grundplatte (bei etwa 23 ps)
- Hinterfüllmörtel auf der Oberfläche der Grundplatte – Grundplatte (bei etwa 29 ps)
- Grundplatte – Hinterfüllmörtel (bei etwa 59 ps)
- Hinterfüllmörtel – Luft (bei etwa 71 ps)
- Luft – Hinterfüllmörtel (bei etwa 92 ps)

Leider konnte kein THz-Puls detektiert werden, der von der Grenzfläche zwischen Hinterfüllmörtel und innerer gewölbter Oberfläche des Prüfkörpers stammt. Dies war zu erwarten, da es bereits im Fall der nicht hinterfüllten Prüfkörper nicht möglich war.



**Abb. 140:** THz-Messsignal für den hinterfüllten Prüfkörper, das dem Signal bei  $x = 0$  mm in Abb. 67 b) entspricht

Die Zeitdifferenz zwischen den Pulsen kann aufgrund der bereits bekannten Materialeigenschaften (siehe Unterkapitel 6.1) in räumliche Abmessungen umgerechnet werden. Ein Vergleich mit der optischen Aufnahme resultiert in einer Übereinstimmung. Das bestätigt das Potenzial von THz-Zeitbereichsspektroskopie zur zerstörungsfreien Detektion von Fehlstellen nach dem Hinterfüllprozess von Hohlräumen. Dennoch muss hier differenziert analysiert werden, denn der verbliebene Hohlraum im Prüfkörper breitete sich über mehr als 10 mm entlang der x-Richtung aus, konnte aber nur über eine Strecke von etwa 4 mm mithilfe der THz-Untersuchung festgestellt werden. Dies bedeutet, dass es nur bedingt möglich war, unter Einsatz von THz-Untersuchungen verbliebene Hohlräume mit Sicherheit oder vollständig zu identifizieren. Dieser Umstand schränkte das Potenzial der THz-Messtechnik für die Vorort-Untersuchung ein.

Bei den verbliebenen Prüfkörpern (21 C, 20 S1, 20 S2) konnten ebenfalls nach dem Zersägen mehrere nicht erfolgreich hinterfüllte Bereiche beobachtet werden. Diese konnten ebenfalls, ähnlich wie beim bereits diskutierten Beispiel des Prüfkörpers 21 B in den THz-Daten erkannt werden.

### 7.3 Resümee des Bearbeitungszyklusses im Labor

Insgesamt konnten innerhalb des Bearbeitungszyklusses die in den Voruntersuchungen erzielten Ergebnisse der Mörtelentwicklung, Hohlraumvermessung, Hohlraumflutung, Mörtelanbindung und Vermessung der Anbindungen umgesetzt werden.

Hierbei ist zunächst zu erwähnen, dass insgesamt die haftschlüssige Anbindung des Mörtels innerhalb der Hohlraumflächen gelungen ist. Zwischen der Verfüllung der Mörtelproben, die mit Ozon (21 A) geflutet wurden und solchen, die ohne Ozon verfüllt wurden (21 B), zeigen sich Unterschiede im Umfang der Hohlraumgrößen durch nicht vollständige Verfüllung des Hohlraums. Während der Prüfkörper 21 A lediglich im Bereich des Einfüllloches und dem darunterliegenden Bereich Hohlräume aufzeigt (**Abb. 69**), ist bei Prüfkörper 21 B ein größerer nicht hinterfüllter Bereich in der Mitte des Prüfkörpers auszumachen (**Abb. 70**), der sich beinahe durch die ganze Länge der Probe erstreckt.



**Abb. 141:** Prüfkörper 21A mit zwei Sägeschnitten mit Hohlräumen an ausgewiesenen THz-Messlinien



**Abb. 142:** Prüfkörper 21 B mit vier Sägeschnitten mit Hohlräumen an ausgewiesenen THz-Messlinien

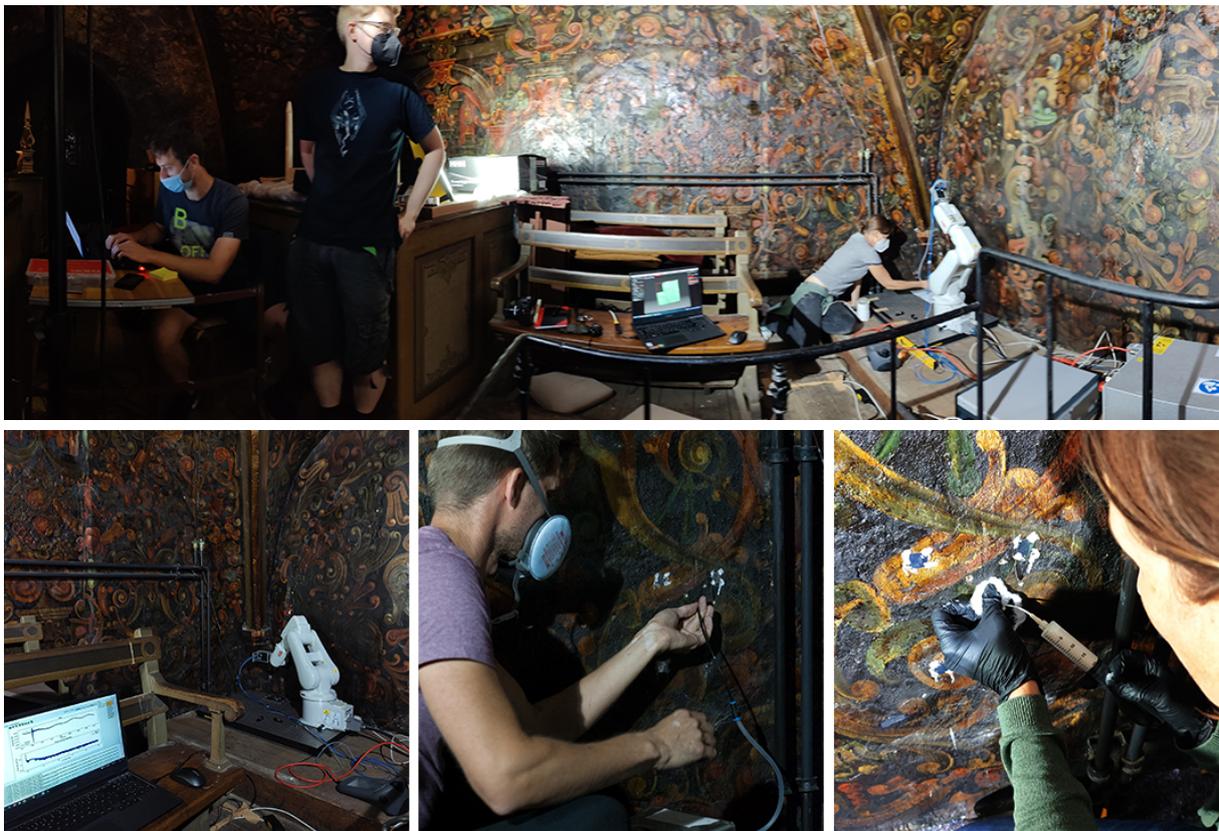
An den Randbereichen beider Prüfkörper zum Hinterfüllmörtel hin zeigt sich bei nachoptischer Begutachtung eine schlüssige Anbindung der Hinterfüllung. Dennoch kann durch die unterschiedlich gute Verteilung des Hinterfüllmörtel auf einen verbessernden Einfluss des Ozons auf das Fließvermögen der Hinterfüllmassen geschlossen werden. Die Ergebnisse zu den Voruntersuchungen der Haftzugfestigkeit (Kapitel 5.8.3) ließen dies schon vermuten. Der Mörtel wirkt insgesamt homogen, durch die Sägeschnitte sind die Oberflächen leicht aufgeraut. Eine Phasentrennung innerhalb des Mörtels ist nicht erkennbar.

Die in diesem Bearbeitungszyklus verwendeten Prüfkörper wurden mit einem roboterbasierten THz-Messsystem in Reflexion untersucht. Die Prüfkörper wurden zuerst vor dem Hinterfüllen einzeln in Gänze vermessen. Dabei konnte der vorhandene Hohlraum erfolgreich erkannt werden. Bereichsweise konnte auch die Rückseite des Hohlraums identifiziert und somit auch die räumliche Ausbreitung des Hohlraums ermittelt werden. Nach der beschriebenen Hinterfüllung wurden die Prüfkörper erneut untersucht und die dadurch gewonnenen THz-Messsignale mit den entsprechenden THz-Messsignalen vor der Hinterfüllung verglichen. Somit konnten in den einzelnen Signalen auffällige Bereiche identifiziert und Messlinien zur Kontrolle der Prüfkörper gekennzeichnet werden. Durch das Zersägen an den entsprechenden Messlinien eines Prüfkörpers konnten diese in THz-Strahlung identifizierten Hohlräume mit den inneren Vorkommen optisch verglichen werden. So war es möglich, mehrere nicht erfolgreich hinterfüllte Bereiche zu erkennen, die aber nur teilweise in den THz-Daten identifiziert werden konnten. Gesamt konnte ein hohe, wenn auch nicht die gesamte Zahl der Einschlüsse im Hinterfüllmörtel detektiert werden. Das roboterbasierte THz-Messsystem zeigte sich somit als durchaus geeignet, um unebene Hohlräume mit Einschlüssen in Hinterfüllmörteln vermessen und darstellen zu können.

Nach den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurden die Mischungsverhältnisse des Mörtels und die technischen Einstellungen der Ozon- und THz-Anlage in der Ausrichtung und Umsetzung für die Messungen am Objekt als Standard festgelegt.

## 8. Ergebnisse zum Bearbeitungszyklus-Schlosskapelle Bückeberg

Umgesetzt wurde der Bearbeitungszyklus in der Schlosskapelle Bückeberg vom 12.7.–16.7.2021. Anders als ursprünglich vorgesehen, wurde die Bearbeitung somit in den Sommer- statt in den Wintermonaten durchgeführt. Die Schlosskapelle Bückeberg zeichnet sich durch ein hohes Vorkommen an Luftfeuchtigkeit aus, die vor allem durch Feuchtigkeitseinträge über die Substanz, aber auch durch den täglichen Besucherstrom beeinflusst wird. Daher war zunächst vorgesehen, den Bearbeitungszyklus im Winter bei durchschnittlich 60 % rLF und ca. 16°C umzusetzen. Vorherige restauratorische Arbeiten im Jahr 2014 haben aufgedeckt, dass vor allem der Gipsputzmörtel bei höheren Temperaturen und bei Feuchtigkeit dazu neigt, strukturell zu quellen und sich folglich eine Hinterfüllung der Hohlräume schwieriger gestaltet. Die Temperatur und Luftfeuchtigkeit lagen während der Arbeitswoche bei 20°C ±2 und 80 % rLF ±2.



**Abb. 143:** Oben: Übersicht über den Arbeitsbereich Schlosskapelle Bückeberg, links unten: THz-Messung an Fläche B, Mitte unten: Ozonbehandlung in Fläche E, rechts unten: Hinterfüllung in Fläche E

Die Bearbeitungsstruktur und der Ablauf gestalteten sich wie folgt:

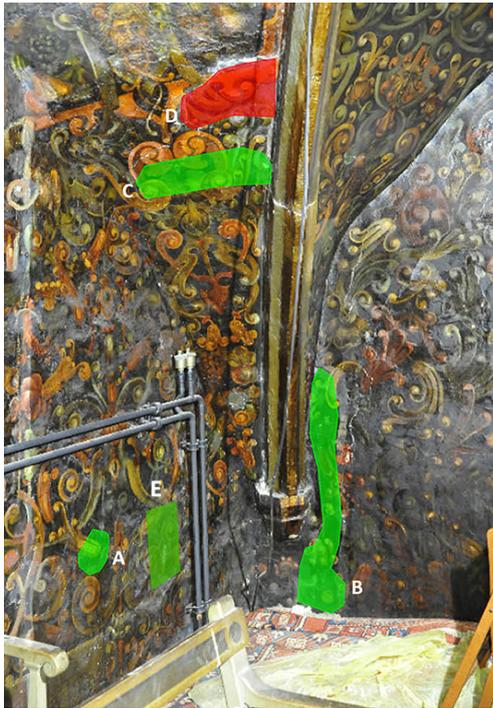
12.7 – Aufbau des THz-Messsystems, Kalibrierung und Vormessungen

13.7 – Vermessung der Testflächen mit Hohlräumen

14.7 – Ozonbearbeitung der Hohlräume und Verfüllung der Hohlräume mit konzipiertem Mörtel

15.7 – Erneute Vermessung der Testflächen mit Hohlräumen

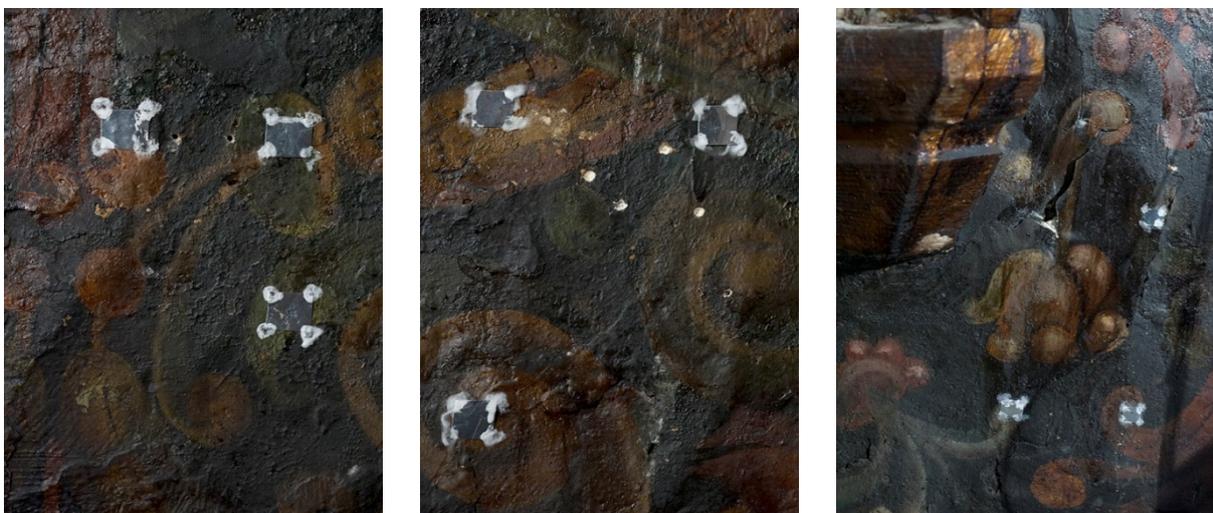
16.7 – Erneute Vermessung der Testflächen mit Hohlräumen/Abbau



**Abb. 144:** Testfelder A, E und B in der Wandfläche

Es wurden drei Messflächen in den Flächen A/B/E (**Abb. 72**) anhand der Perkussionsuntersuchung bestimmt und jeweils unter Anbringung von Aluminiumquadraten begrenzt. Die vormals kartierte Testfläche A wurde dabei um 15 cm nach rechts verschoben, da das Klangbild sich zur vormaligen Kartierung verändert hatte. Die Aluminiumquadrate wurden mittels reversibler Cyclododecanschmelze auf der Oberfläche angebracht. Das Aluminium diente zum einen für die Referenzmessung zur Oberflächenorientierung mittels THz-TDS, zum anderen für die spätere Zuordnung der Messorientierung des THz-Messkopfes bei den einzelnen Messungen.

Des Weiteren wurden in Vorbereitung für die Ozonbehandlung und anschließende Hinterfüllung zwei Bohrlöcher am oberen Rand der potentiellen Hohlräume gesetzt. Um Abplatzungen durch werden; in Fläche B war ein Einleiten des Ozons und Verfüllen des Hohlraumes über die Flanken der abgelösten Putzfläche möglich.

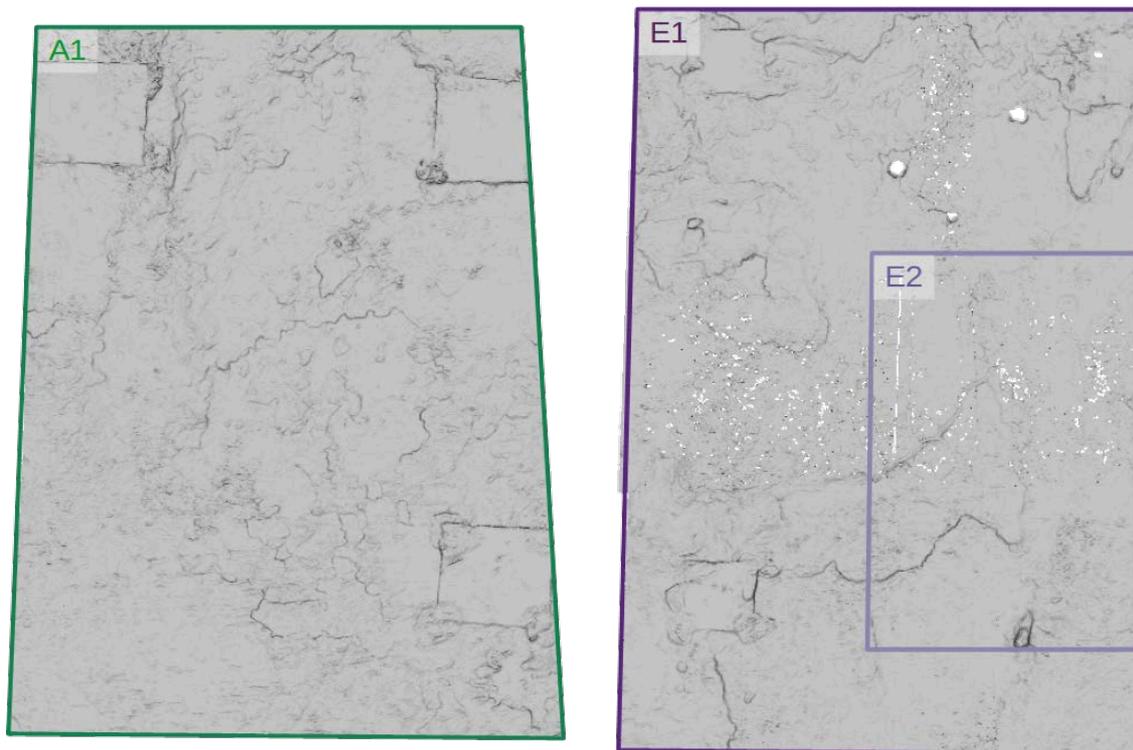


**Abb. 145:** Messfelder in der Testfläche von links A, E, B

## 8.1 Ergebnisse der Roboterarm-THz-Scans

Das zur Messung verwendete bildgebende roboterbasierte THz-System<sup>35</sup> wurde, wie in Kapitel 6.4 beschrieben, in Bückeberg aufgebaut und dort die drei Flächen A, E und B aus **Abb. 73** vermessen.

Die folgenden Abbildungen (**Abb. 74** und **Abb. 75**) zeigen die mit dem Streifenscanner aufgenommenen Oberflächenprofile der Testflächen, auf denen bereits die späteren THz-Messbereiche A1, E1 und E2 sowie B1 und B2 markiert sind. In den Flächen A1 und E1 kann man die angebrachten Aluminiumquadrate erkennen. Bei der Fläche B1 bzw. B2 erkennt man diese nicht, da hier der Oberflächenscan bereits vor dem Anbringen der Quadrate stattgefunden hat. In all diesen Oberflächenscans kann man die starke Unebenheit und die zum Teil sehr ausgeprägten Wölbungen der Wände äußerst genau erkennen.

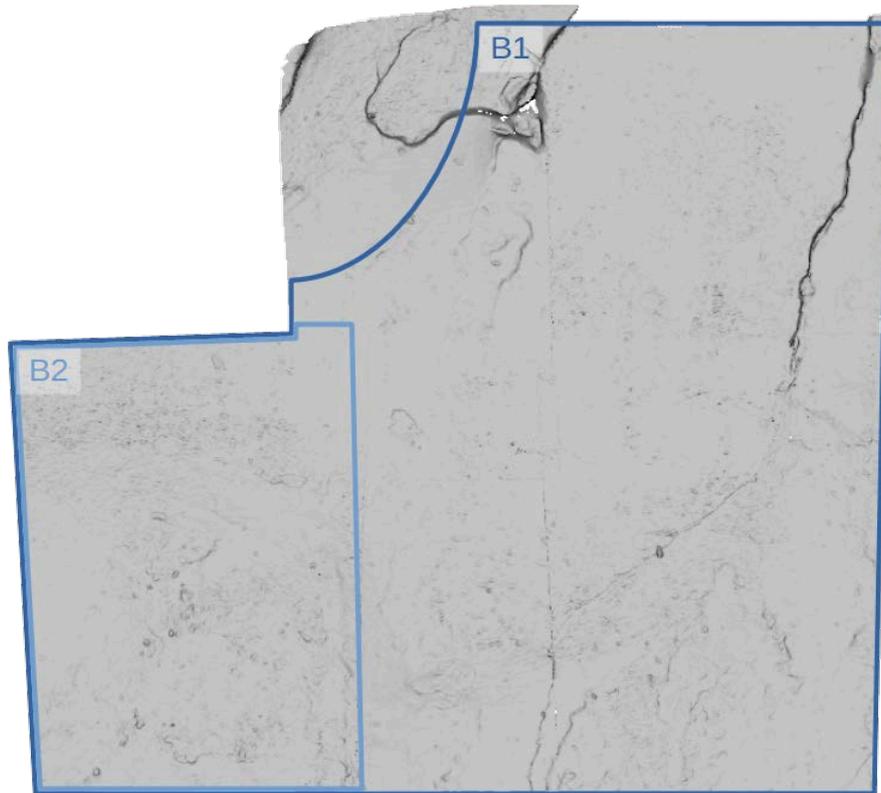


**Abb. 146:** Ermittelte Oberflächenprofile der Testflächen A und E mit eingezeichneten THz-Messbereichen

Alle größeren Messflächen A1, E1 und B1 wurden jeweils einmal vor und einmal nach dem Hinterfüllen aufgenommen. Die Fläche E2 wurde nach dem Hinterfüllen, aber noch vor der zweiten Messung von E1, zunächst abgescannt, dann ein weiteres Mal hinterfüllt und nach dem Trockenvorgang noch einmal gemessen. An Fläche B2 wiederum wurde nach der zweiten Messung von B1 ein weiteres Mal hinterfüllt und nach der Trocknung der Hinterfüllmasse am nächsten Tag wurde eine Messung des Bereichs durchgeführt. Alle Messflächen wurden dabei in einem Punktraster mit 3 mm Abstand aufgenommen.

---

<sup>35</sup> E. Stübling et.al.

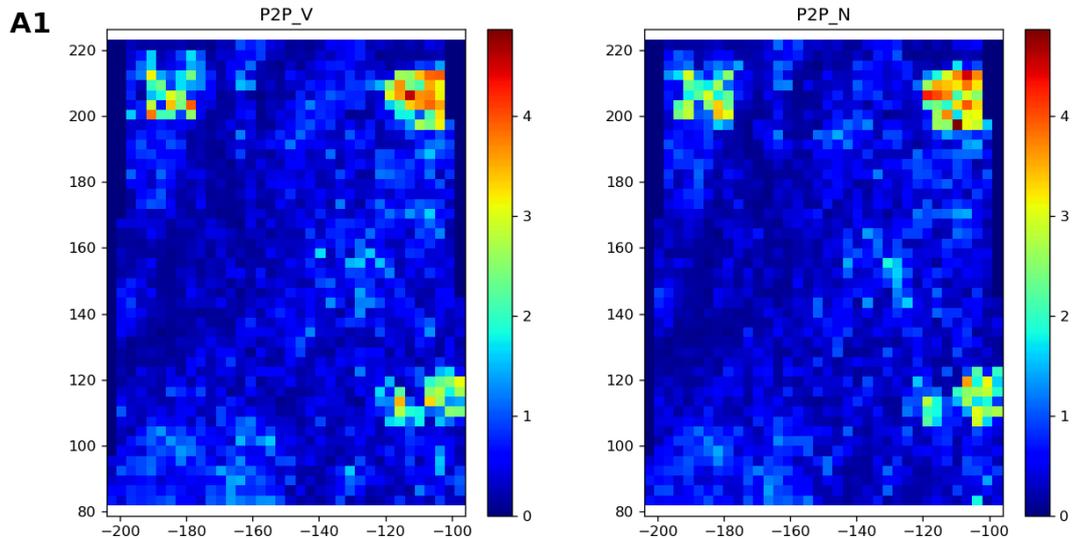


**Abb. 147:** Ermittelte Oberflächenprofile der Testfläche B mit eingezeichneten THz-Messbereichen

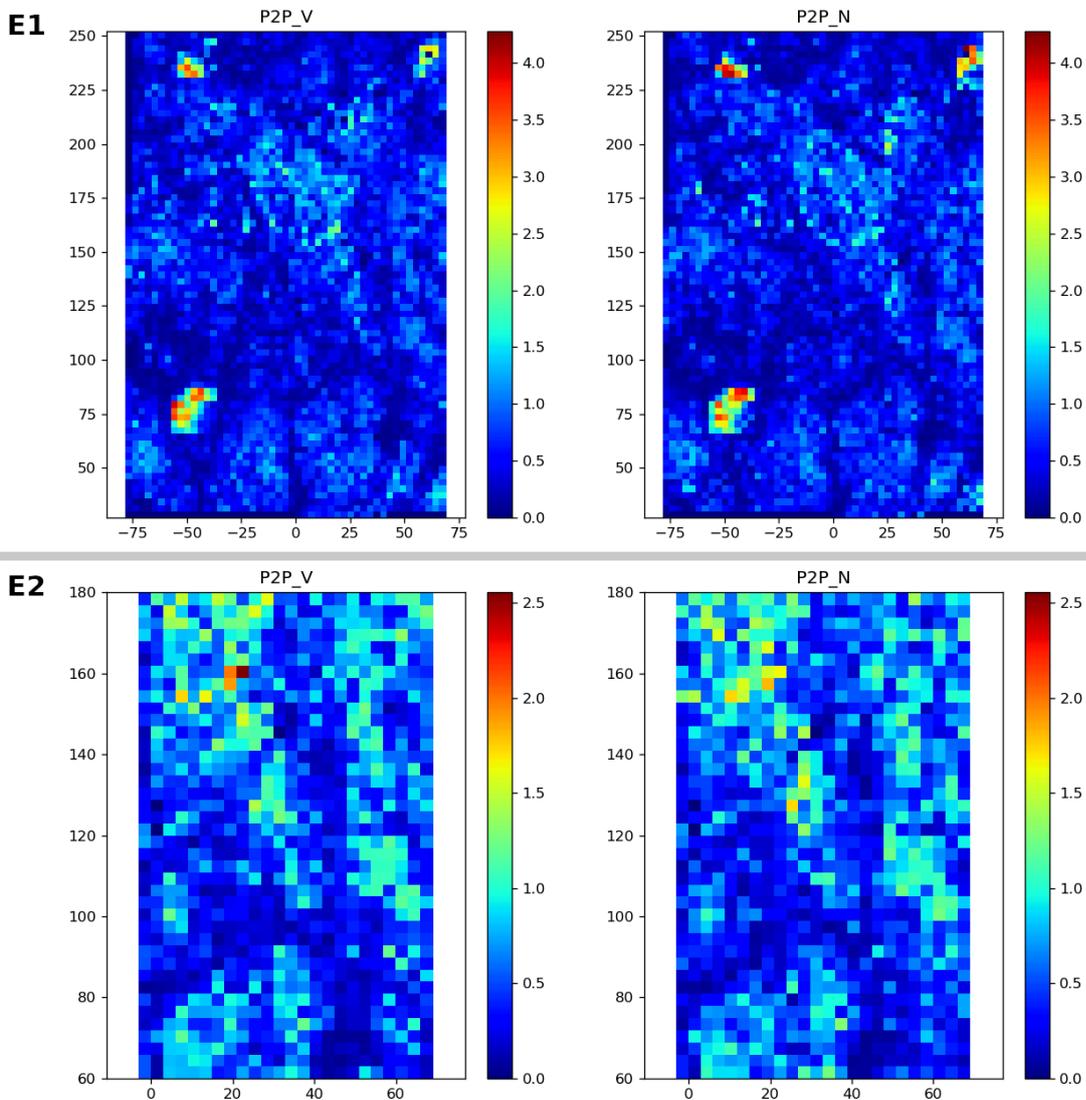
Die bei diesen Messungen aufgenommenen THz-Daten wurden jeweils mithilfe eines Butterworth-Bandpassfilters auf einen Frequenzbereich von 0,1 bis 1,8 THz gefiltert, um Rauschen und Störsignale zu minimieren.

Die sich dann ergebenden Peak-zu-Peak-Amplituden (P2P) sind in den folgenden Abbildungen (**Abb. 76**, **Abb. 77** und **Abb. 78**) für die einzelnen Messbereiche jeweils einmal vor und einmal nach dem Hinterfüllvorgang als Farbplots dargestellt. In den Abbildungen ist der Messzeitpunkt durch die Buchstaben V für vor und N für nach dem Hinterfüllprozess gekennzeichnet. Die x- und y-Achse beschreiben die Position des jeweiligen Messpunktes im Bezugssystem des Roboterarms mit Abständen in Millimetern. Anhand der durch die Farben beschriebenen Amplitudendifferenz kann man in allen Abbildungen gut die angebrachten Metallreferenzflächen erkennen, da diese das ausgesendete THz-Signal am besten reflektieren. Weiterhin kann man einige Merkmale der Oberflächenstruktur aus den Streifenscans wiedererkennen.

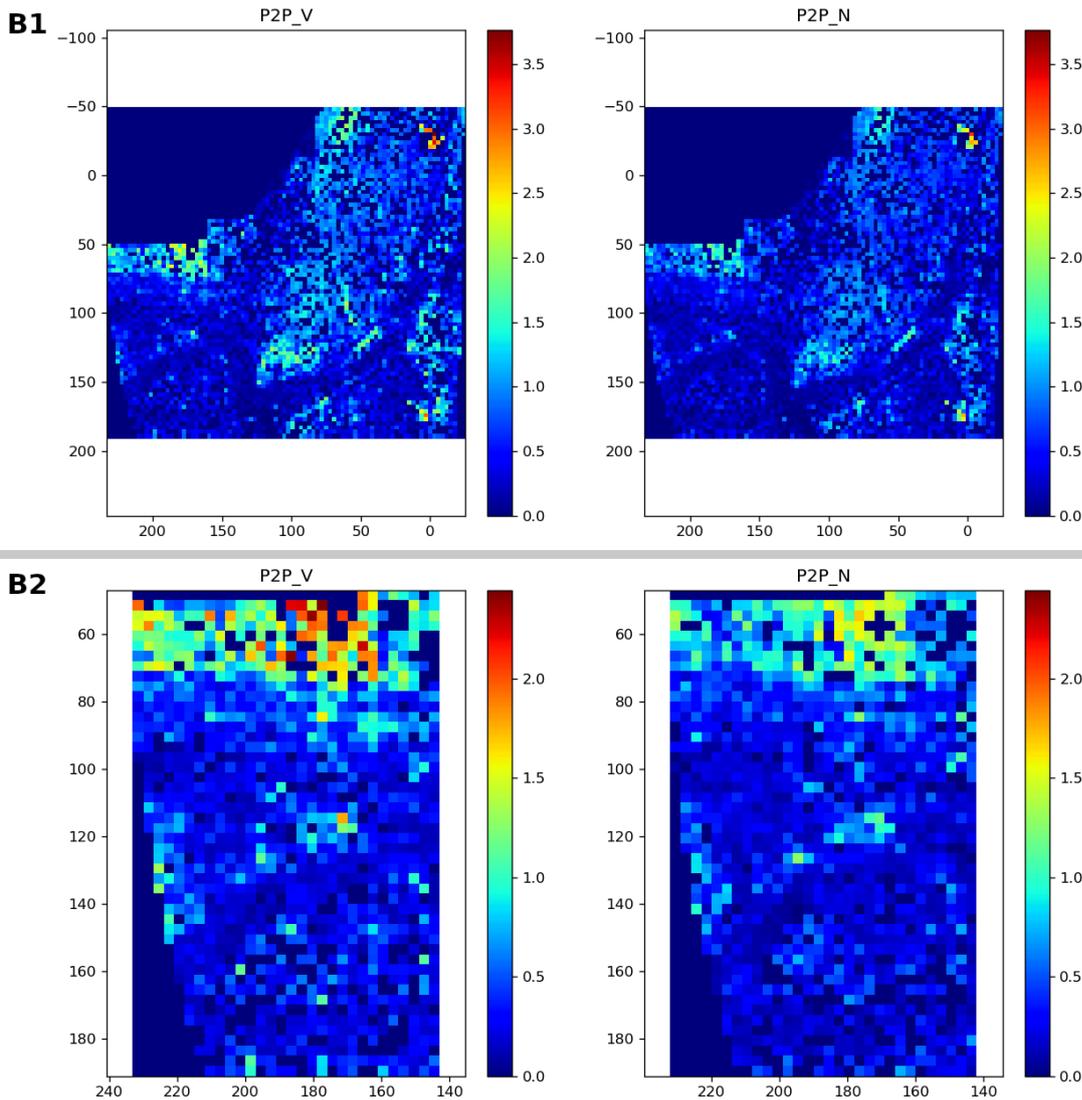
In diesen Peak-zu-Peak-Amplituden-Bildern kann man erwartungsgemäß keine wirklichen Unterschiede zwischen den Messungen vor und nach dem Hinterfüllen feststellen, da die stärksten Reflexionen stets von der Oberfläche der Wand stammen und sich die erkennbaren Unterschiede aus veränderten Umwelt- und Messbedingungen wie zum Beispiel einer leicht veränderten Roboterposition oder Veränderung der Luftfeuchtigkeit ergeben.



**Abb. 148:** THz-Peak-zu-Peak-Amplituden-Bild für Messbereich A1 vor und nach dem Hinterfüllen



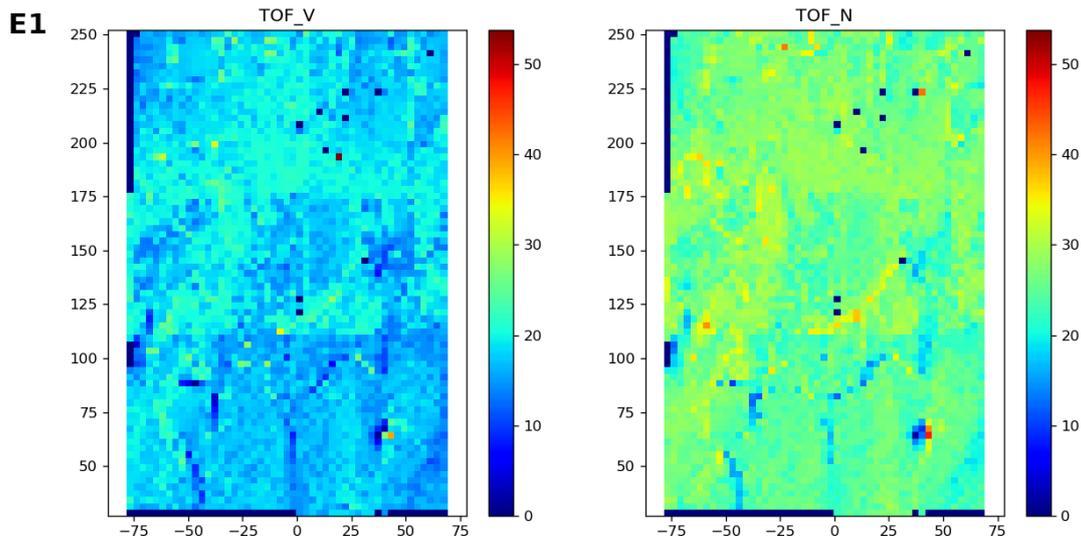
**Abb. 149:** THz-Peak-zu-Peak-Amplituden-Bild für die Messbereiche E1 und E2 vor und nach dem Hinterfüllen



**Abb. 150:** THz-Peak-zu-Peak-Amplitude für die Messbereiche B1 und B2 vor und nach dem Hinterfüllen

Da zwischen den Messungen vor und nach dem Hinterfüllen das Roboterarmsystem bewegt werden musste, um Platz für die Durchführung der Restaurierungsmaßnahmen zu schaffen, konnten die Messungen nicht an den exakt gleichen Positionen vorgenommen werden. Dies erkennt man besonders, wenn man die Flugzeit (TOF) des THz-Pulses betrachtet. Denn schon eine um einen Millimeter veränderte Entfernung sorgt beim reflektierten THz-Puls für einen Flugzeitunterschied von etwa 7 ps.

Diese Verschiebung kann man exemplarisch sehr gut in **Abb. 79** nachvollziehen. Hier ist die Flugzeit des THz-Pulses in Pikosekunden in Abhängigkeit der Messposition für den Messbereich E1, jeweils für die Messung vor und nach dem Hinterfüllen, als Farbplot dargestellt. Man erkennt gut, dass bei der Messung nach der Hinterfüllung die Flugzeit an allen Messpunkten um etwa 12 ps größer ist als bei der Messung vor dem Hinterfüllen. Daraus kann man in diesem Fall auf eine um etwa 2 mm weiter von der Wand entfernte Messposition bei der zweiten Messung schließen. Aus den fast gleichen Mustern und den gleichen Positionen der Metallreferenzflächen für beide Messungen in den Peak-zu-Peak-Abbildungen kann man aber schließen, dass sich die Messposition an der Wand nur wenig geändert hat.

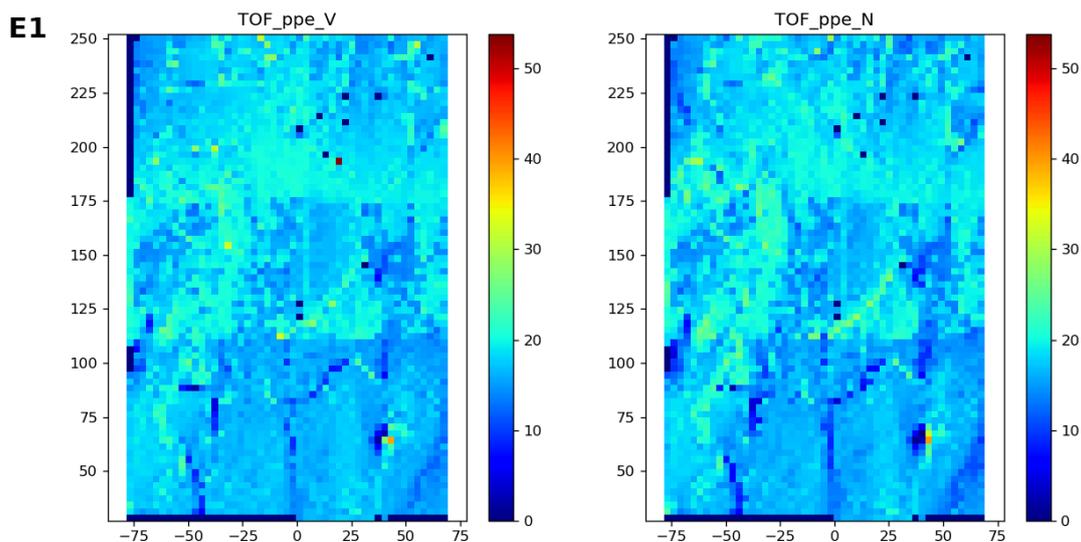


**Abb. 151:** Flugzeit des reflektierten THz-Pulses in Pikosekunden für den Messbereich E1 vor und nach dem Hinterfüllen

Um nun aus den THz-Daten abzuleiten, ob Hohlräume hinterfüllt wurden, müssen zuerst die Zeitbereiche angeglichen werden. Dafür wird die Zeitdifferenz zwischen den beiden Messungen anhand der Oberflächenreflexionspeaks der Metallreferenzflächen, deren Position anhand der Peak-zu-Peak-Amplitudenabbildungen bekannt ist, bestimmt. Die Zeitpositionen der Peaks beider Messungen werden dann mithilfe dieser Differenz für die gesamte Messfläche angeglichen.

Das Ergebnis dieser Vorgehensweise ist in **Abb. 80** gezeigt. Hier ist erneut die Flugzeit in Pikosekunden in Abhängigkeit der Messposition für den Messbereich E1 als Farbplot dargestellt, diesmal mit angeglichenen Peak-Positionen für die Messungen vor und nach dem Hinterfüllen.

Man erkennt deutlich, dass diese Methode erfolgreich ist, denn die beiden vor und nach dem Hinterfüllen aufgenommenen Aufnahmen ähneln jetzt einander deutlich.



**Abb. 152:** THz-Flugzeit des reflektierten THz-Pulses in Pikosekunden für den Messbereich E1 vor und nach dem Hinterfüllen bei angeglichenen Peakpositionen

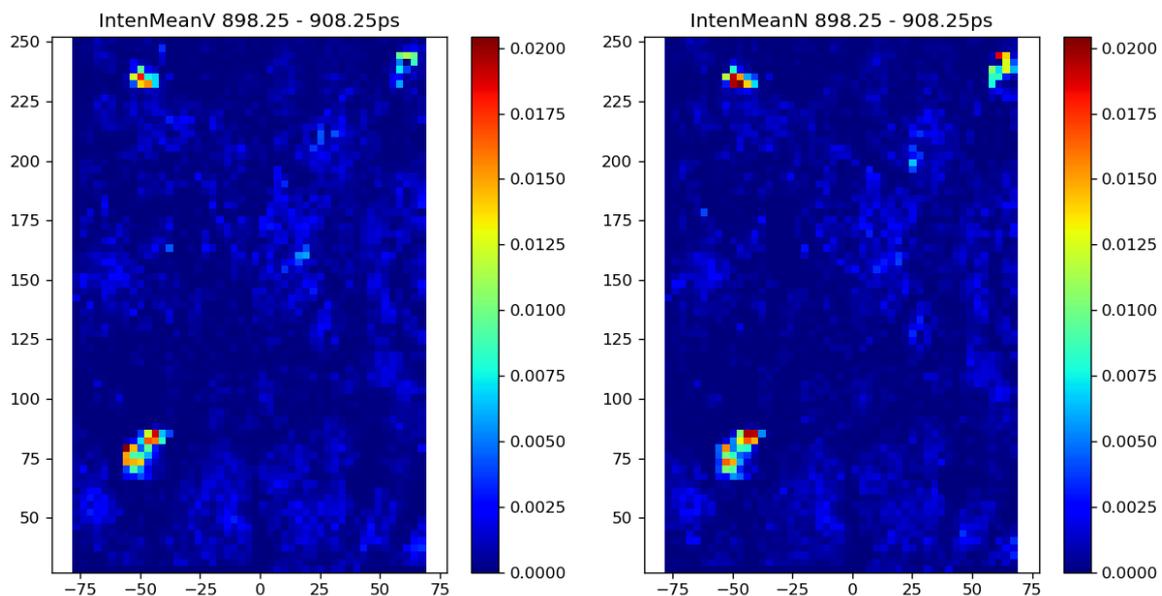
Wie schon in Kapitel 7 diskutiert, ist die eigentliche Auswertung in Bezug auf Hohlräume anspruchsvoll und führt auch bei bekannten dünnen Mörtel- und Wanddicken nicht immer zu klaren Ergebnissen.

Bei diesen in Bückeberg vorgenommenen Messungen sind im Gegensatz zu den Laborversuchen die Wände wesentlich dicker und zusätzlich mit Farben und einer ungleichmäßigen Schicht aus Wachs überzogen. Zudem sind sie aufgrund der hohen Luftfeuchtigkeit sehr feucht. Feuchtigkeit absorbiert jedoch die THz-Strahlung, weswegen die THz-Pulse stärker gedämpft werden als bei den Probemessungen im Labor.

All dies erschwert es, in den Messdaten die Reflexionspulse von Hohlräumen zu erkennen, da diese geringer ausfallen, sich oftmals kaum vom Rauschen unterscheiden lassen oder leicht von Störsignalen überlagert werden. Dennoch konnten auf den Messflächen zwei Stellen identifiziert werden, an denen sehr wahrscheinlich vorhandene Hohlräume erfolgreich hinterfüllt wurden.

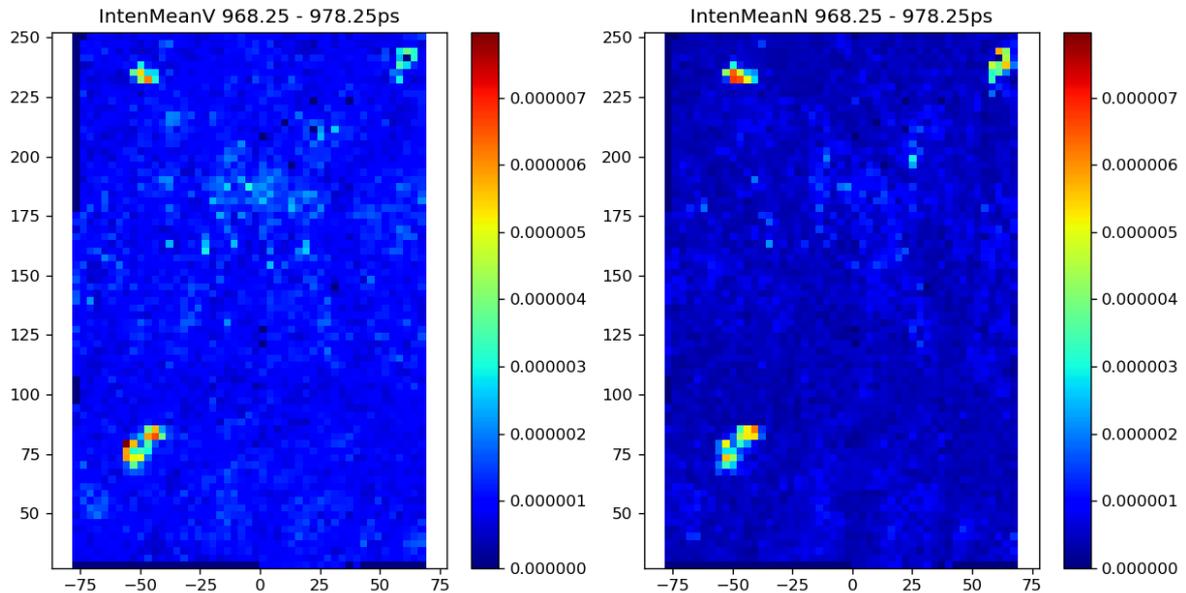
### 8.1.1 Messfeld E1

Die erste dieser möglichen Stellen befindet sich im Messbereich E1. In **Abb. 81** ist die gemittelte Intensität im Zeitbereich von 898,25 bis 908,25 ps in Abhängigkeit der Messposition jeweils vor und nach dem Hinterfüllprozess für den Messbereich E1 als Farbplot dargestellt. Die Darstellungen der beiden Messungen ähneln sich sehr stark, da sich in diesem Zeitbereich die Reflexionen der Oberfläche befinden. In **Abb. 82** ist die gemittelte Intensität im Zeitbereich von 968,25 bis 978,25 ps in Abhängigkeit der Messposition jeweils vor und nach dem Hinterfüllprozess für den Messbereich E1 als Farbplot dargestellt. Im Bereich der oberen Mitte bei der Messung vor der Hinterfüllung lässt sich ein helleres Muster erkennen. Dieses Muster ist bei der Messung nach der Hinterfüllung zum größten Teil verschwunden. Dieses Muster lässt sich als Hohlraum interpretieren der nach der Hinterfüllung nicht mehr vorhanden ist. Nun gilt es zu überprüfen, ob es sich tatsächlich um einen Hohlraum handelt.



**Abb. 153:** Gemittelte Intensität im Zeitbereich der Oberfläche im Messbereich E1 jeweils vor und nach der Hinterfüllung

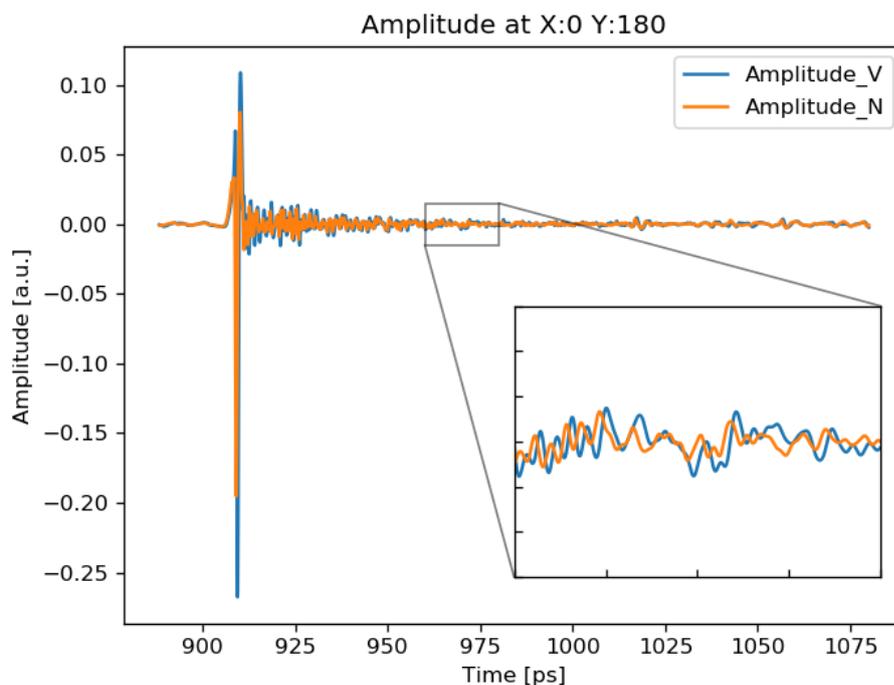
Im Vergleich mit **Abb. 81** erkennt man, dass es sich hierbei sehr wahrscheinlich nicht um eine Nachreflexion von Oberflächenstrukturen handelt, da das Muster kein Äquivalent in dieser Abbildung besitzt.



**Abb. 154:** Gemittelte Intensität im Zeitbereich eines vermutlichen Hohlrums im Messbereich E1 jeweils vor und nach der Hinterfüllung

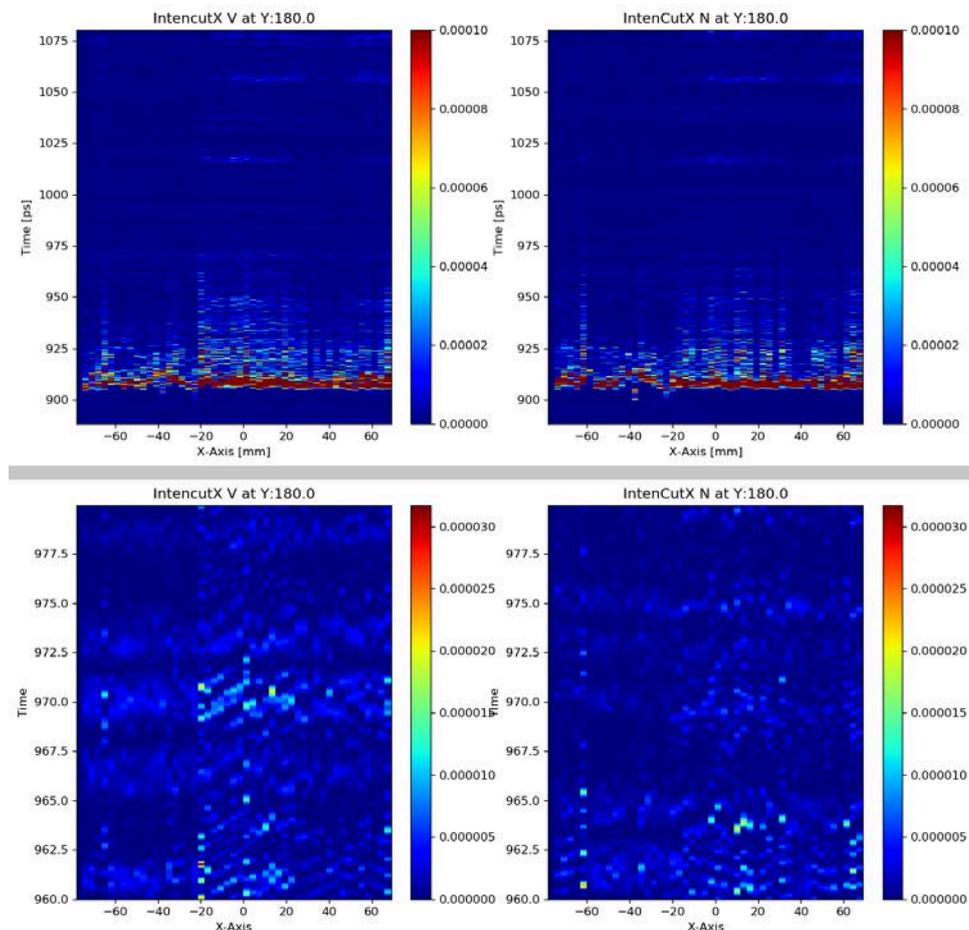
Als nächstes wird ein zentraler Punkt aus dem Bereich des Musters ausgewählt und in **Abb. 83** werden dessen Messdaten betrachtet. In der Abbildung sieht man die gemessene Amplitude des THz-Pulses, in willkürlichen Einheiten (a.u.) am Punkt  $x = 0$  und  $y = 180$  angegeben, sowohl für die Messung vor als auch nach dem Hinterfüllprozess in Abhängigkeit der Messzeit in Pikosekunden. Weiterhin ist der Zeitbereich von 960 bis 980 ps vergrößert dargestellt.

In der Abbildung kann man gut den Oberflächenpeak am Anfang erkennen, dicht gefolgt von wesentlich schwächeren Peaks, die vermutlich von Reflexionen an dicht unter der Oberfläche liegenden Schichten stammen, demnach von den Unterseiten der Wachs- und/oder der Farbschichten.



**Abb. 155:** Gemessene THz-Signale in Abhängigkeit der Zeit an einem Punkt des identifizierten Hohlrums in Messbereich E1

Weiterhin erkennt man im späteren Zeitbereich, z.B. bei 1013 ps und bei 1060 ps, deutliche Pulse, die aber bei allen Messpunkten und allen Messungen immer im selben zeitlichen Abstand zum Oberflächenpeak auftreten. Es handelt sich dabei also nicht um Reflexionen der Messflächen, sondern vermutlich um Reflexionen innerhalb des THz-Messkopfes, die etwas später austreten und deren Reflexionen von der Oberfläche der Wand stärker sind als andere Peaks und diese zum Teil auch überlagern. In der als Innenbild gezeigten Vergrößerung kann man gerade noch einen Puls erkennen, der dem identifizierten Hohlraum entsprechen könnte. Dieser Puls könnte aber auch nur ein Produkt leicht veränderter Messeigenschaften sein, was noch einmal die Schwierigkeit bei der Auswertung und Interpretation dieser Daten verdeutlicht. Da diese an einem einzelnen Punkt der Wand gewonnenen THz-Daten weder einen ausreichenden, noch einen sicheren Hinweis auf einen Hohlraum, der erfolgreich hinterfüllt wurde, geben, werden in den nächsten Abbildungen einige Linienscans gezeigt, die durch diesen Punkt laufen.



**Abb. 156:** Intensität in Abhängigkeit der Zeit entlang eines Schnitts parallel zur x-Achse um den Punkt  $y = 180$ . Gezeigt sind zwei Messungen, die vor (links) und nach dem Hinterfüllen (rechts) von Messbereich E1 gewonnen wurden

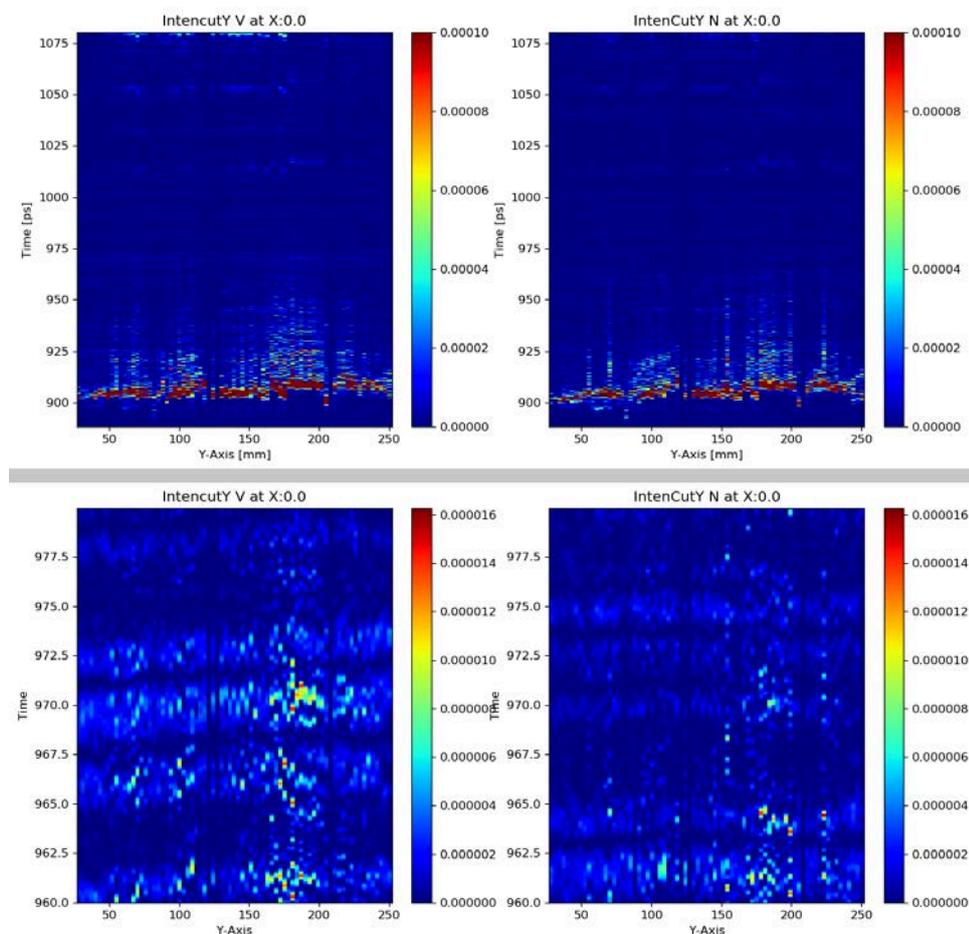
In **Abb. 84** ist ein solcher Linienscan, der entlang der x-Achse durch den Punkt  $y = 180$  läuft, dargestellt. Aufgetragen ist dort nicht die Signalamplitude, sondern die Intensität (quadrierte THz-Signalamplitude) in Abhängigkeit der Zeit in Pikosekunden und der X-Position in Millimetern. Die beiden Teilbilder zeigen die vor und nach dem Hinterfüllprozess gewonnenen Messdaten. Die oberen Grafiken zeigen die Messdaten über den gesamten Zeitbereich, die unteren nur den Zeitbereich, in dem der identifizierte Hohlraum liegt.

In den oberen Abbildungen erkennt man die Reflexion von der Oberfläche als roten Bereich entlang des gesamten Schnitts bei etwa 905 ps besonders deutlich. In den unteren Darstellungen erkennt man

im Bereich um 970 ps bei der Messung vor der Hinterfüllung einen Bereich größerer Intensität. Er erstreckt sich entlang der x-Achse von etwa -20 bis +20 mm. Dieser Bereich ist nach dem Hinterfüllprozess verschwunden. Diese Abbildung gibt demnach einen wesentlich deutlicheren Hinweis auf einen Hohlraum, der erfolgreich hinterfüllt wurde.

In **Abb. 85** sieht man einen entsprechenden Schnitt dieses Bereichs, nun jedoch entlang der y-Achse am Punkt  $x = 0$ . Aufgetragen ist also die Intensität in Abhängigkeit der Zeit in Pikosekunden und als Funktion der y-Position in Millimetern; wieder jeweils einmal für die Messung vor und die Messung nach dem Hinterfüllen. Die oberen Grafiken zeigen erneut die Intensität über den gesamten Zeitbereich und die unteren zeigen den Zeitbereich, in dem der identifizierte Hohlraum liegt.

In den oberen Abbildungen erkennt man auch hier stark ausgeprägt die Reflexion von der Oberfläche als roten Bereich entlang des gesamten Schnitts bei etwa 905 ps. In der linken unteren Darstellung, die vor dem Hinterfüllprozess aufgenommen wurde, erkennt man im Bereich um 970 ps einen Bereich größerer Intensität, der auf einen Hohlraum hindeutet. Dieser erstreckt sich von etwa 160 bis 200 mm auf der y-Achse. Dieser Bereich ist nach der Hinterfüllung (rechtes unteres Teilbild) größtenteils verschwunden. Somit deutet auch diese Abbildung auf einen Hohlraum, der erfolgreich hinterfüllt wurde.



**Abb. 157:** Intensität in Abhängigkeit der Messzeit entlang eines Schnitts der y-Achse am Punkt  $x = 0$  für Messungen vor und nach dem Hinterfüllen von Messbereich E1

Insgesamt lässt sich also sagen, dass sich im Messbereich E1 im Messgebiet zwischen ca. -20 und +20 mm auf der x-Achse und ca. 160 und 200 mm auf der y-Achse sehr wahrscheinlich ein Hohlraum

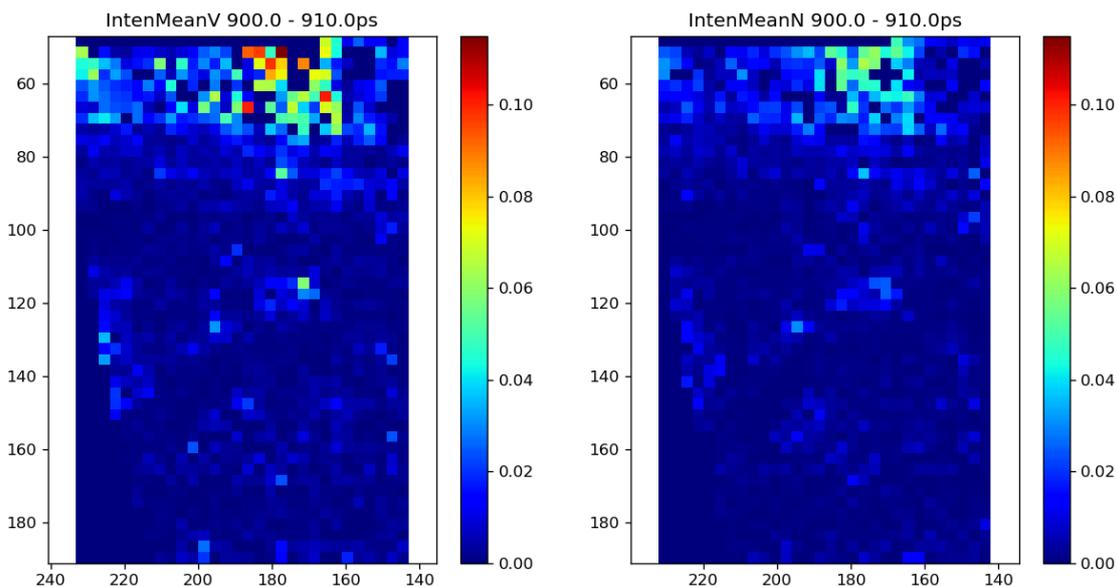
befunden hat, der im Rahmen der Restaurierungsmaßnahmen hinterfüllt wurde. Diese Einschätzung scheint sich zusätzlich dadurch zu bestätigen, dass sich direkt in der Nähe des Hohlraums die für die Hinterfüllung erzeugten Bohrlöcher befinden.

Die erkannten Oberflächenpulse dieses also etwa 4 x 4 cm großen Hohlraums liegen bei etwa 970 ps und damit etwa 65 ps nach dem von der Oberfläche reflektierten Puls, der bei etwa 905 ps liegt. Aus diesem Zeitunterschied lässt sich unter der Annahme eines Brechungsindex der Wand von 1,5 darauf schließen, dass sich dieser Hohlraum oder zumindest dessen Oberfläche in einer Tiefe von etwa 6,5 mm unter der Oberfläche der Wand befunden hat, bevor er hinterfüllt wurde.

Damit ist der in Messbereich E1 identifizierte Hohlraum beschrieben. Es ließ sich aber auch noch in Messbereich B2 ein weiterer Hohlraum identifizieren. Die Daten werden im folgenden Kapitel in analoger Weise diskutiert.

### 8.1.2 Messfeld B2

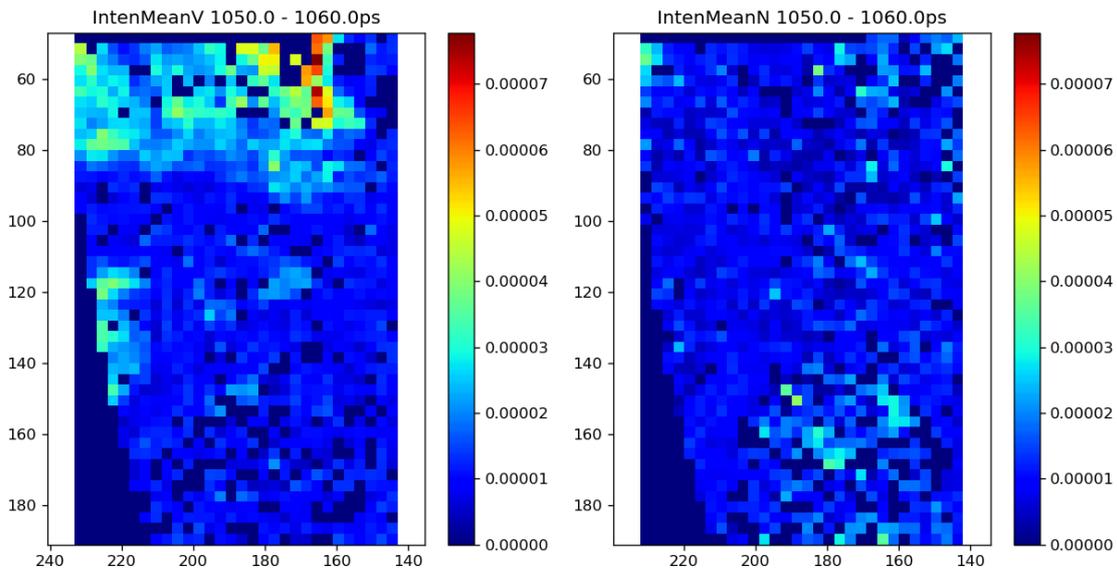
Zunächst ist in **Abb. 86** die gemittelte Intensität im Zeitbereich von 900 bis 910 ps in Abhängigkeit der Messposition jeweils vor und nach der Hinterfüllung für den Messbereich B2 als Farbplot dargestellt. Die Darstellungen der beiden Messungen ähneln sich sehr stark, da sich in diesem Zeitbereich wieder die Reflexionen von der Oberfläche befinden. Oben in der Mitte erkennt man gut die Reflexion der Metallreferenzfläche.



**Abb. 158:** Gemittelte Intensität im Zeitbereich der Oberfläche im Messbereich B2 jeweils vor und nach der Hinterfüllung

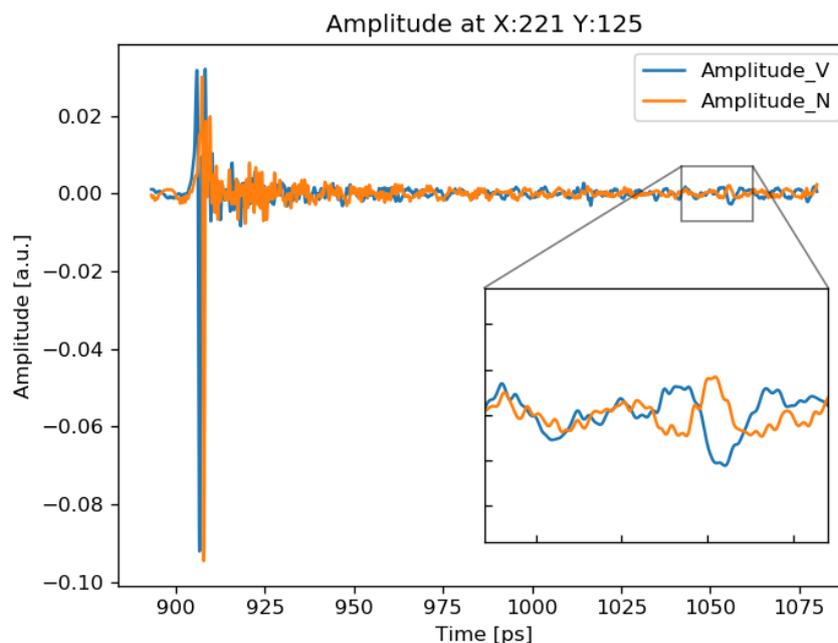
In **Abb. 87** ist die gemittelte Intensität im Zeitbereich von 1050 bis 1060 ps in Abhängigkeit der Messposition jeweils vor und nach dem Hinterfüllprozess für den Messbereich B2 als Farbplot dargestellt. Im Bereich des linken Randes lässt sich in mittlerer Höhe bei der Messung vor der Hinterfüllung (linkes Teilbild) ein helles Muster erkennen. Dieses Muster ist bei der Messung, die nach dem Hinterfüllprozess vorgenommen wurde (rechtes Teilbild), fast vollständig verschwunden.

Auch in diesem Fall kann man dieses Muster als Hohlraum identifizieren, der nach der Hinterfüllung nicht auffindbar ist. Nun gilt es, wie schon beim erkannten Hohlraum von Messbereich E1, zu überprüfen, ob es sich hierbei tatsächlich um einen Hohlraum handelt. Im Vergleich mit **Abb. 86** erkennt man, dass es sich hierbei sehr wahrscheinlich nicht um eine Nachreflexion von Oberflächenstrukturen handelt. Dies lässt sich jedoch nicht völlig ausschließen.



**Abb. 159:** Gemittelte Intensität im Zeitbereich eines mutmaßlichen Hohlraums im Messbereich B2 jeweils vor und nach der Hinterfüllung

Als nächstes werden wieder die THz-Pulse vor und nach dem Hinterfüllprozess für einen einzelnen zentralen Punkt aus dem Bereich des möglichen Hohlraums diskutiert. Diese Pulse sind in **Abb. 88** dargestellt. In der Abbildung aufgetragen ist die gemessene Amplitude des THz-Pulses in Abhängigkeit der Zeit in Pikosekunden am Punkt  $x = 221$  mm und  $y = 125$  mm, sowohl für die Messung vor als auch nach dem Hinterfüllprozess. Weiterhin ist der Zeitbereich von 1040 bis 1060 ps vergrößert dargestellt. In der Abbildung kann man den Beginn des Oberflächenpeaks gut erkennen. Da die Peaks der beiden Messungen nicht übereinander liegen kann man schließen, dass hier der Angleich der Peak-Positionen nicht vollkommen funktioniert hat. Nach den Oberflächenpeaks erkennt man wieder die wesentlich schwächeren Peaks, die vermutlich von den Unterseiten der Wachs- und/oder der Farbschichten stammen. Die immer auftretenden Nachpeaks liegen hier für beide Messungen auch nicht deckungsgleich übereinander.



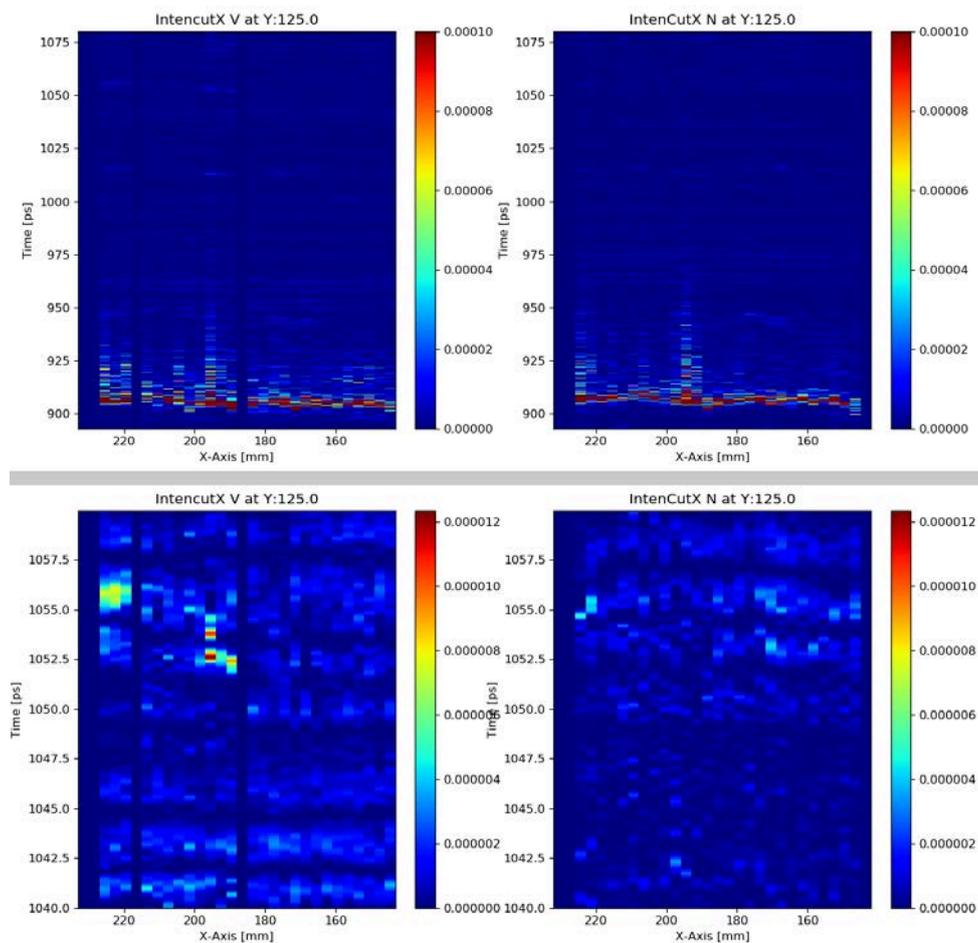
**Abb. 160:** Gemessene Amplituden in Abhängigkeit der Zeit an einem Punkt des identifizierten Hohlraums in Messbereich B2

Trotzdem sieht man in der Vergrößerung bei etwa 1055 ps in der Messung vor der Hinterfüllung einen Puls, der sich zwar zum Teil mit diesen Nachpeaks überlagert, aber dennoch eine andere Form besitzt. Dieser teilweise überlagerte Puls sollte dem identifizierten Hohlraum entsprechen, ist vermutlich aber viel kleiner als es den Anschein hat.

Zur weiteren Überprüfung ob es sich wirklich um einen hinterfüllten Hohlraum handelt werden wieder Schnitte entlang der beiden Achsen analysiert.

In **Abb. 89** ist der Schnitt entlang der x-Achse bei  $y = 125$  mm dargestellt. Dort sieht man wieder die Intensität, aufgetragen in Abhängigkeit der Zeit in Pikosekunden und der x-Position in Millimetern; jeweils einmal für die Messung vor und die Messung nach dem Hinterfüllen. Die oberen Grafiken zeigen die Intensität über den gesamten Zeitbereich und die unteren zeigen den Zeitbereich, in dem der identifizierte Hohlraum liegt.

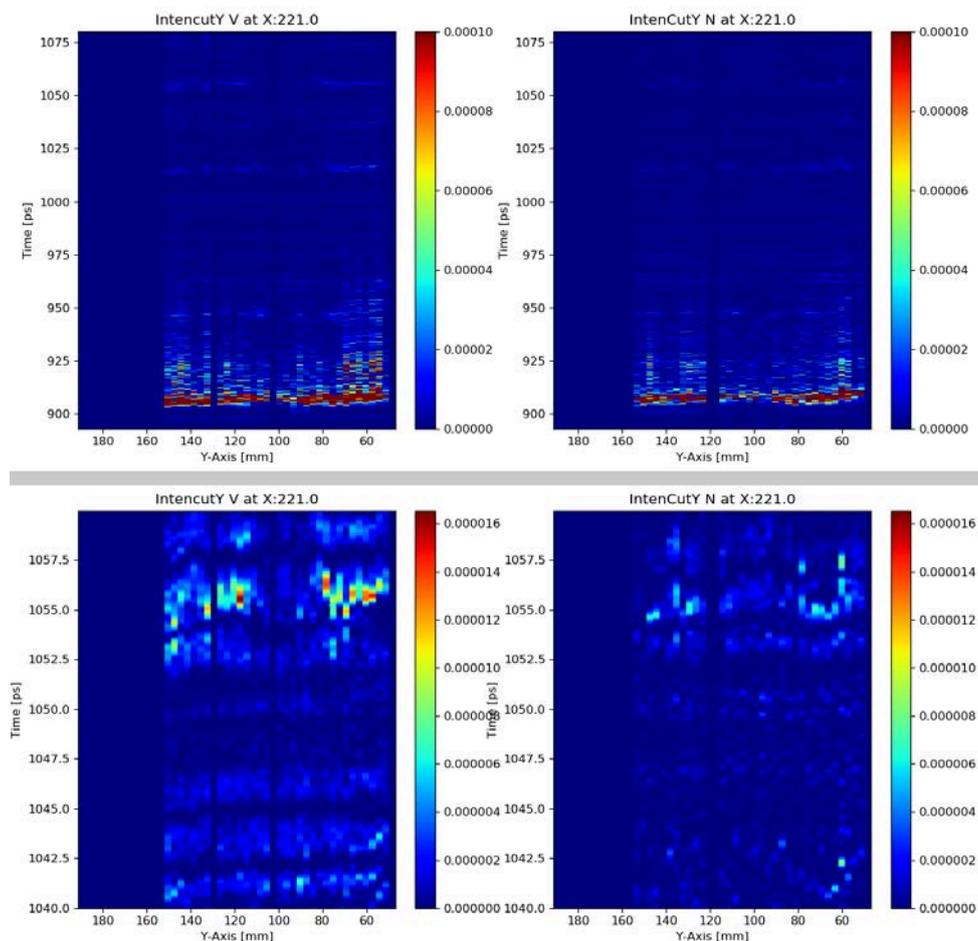
In den oberen Abbildungen erkennt man sehr deutlich die Reflexion von der Oberfläche als roten Bereich entlang des gesamten Schnitts bei etwa 905 ps. In den unteren Darstellungen erkennt man im Bereich um 1055 ps bei der Messung vor der Hinterfüllung einen kleinen Bereich größerer Intensität im Gebiet von 230 bis 218 mm auf der x-Achse. Dieser Bereich ist nach der Hinterfüllung größtenteils verschwunden, was ein Indiz für einen hinterfüllten Hohlraum ist. Zusätzlich deutet sich ein weiterer möglicher Hohlraum im Bereich um 1052 ps und zwischen 200 und 190 mm auf der x-Achse an.



**Abb. 161:** Intensität in Abhängigkeit der Zeit entlang eines Schnitts der x-Achse bei  $y = 125$  mm für Messungen vor und nach dem Hinterfüllen des Messbereichs B2

In **Abb. 90** sieht man den entsprechenden Schnitt entlang der y-Achse bei  $x = 221$  mm. Wieder sieht man die Intensität in Abhängigkeit der Zeit in Pikosekunden, jeweils einmal für die Messung vor und die Messung nach dem Hinterfüllen. Die oberen Grafiken zeigen ebenfalls die Intensität über den gesamten Zeitbereich und die unteren zeigen wieder den Zeitbereich, in dem der identifizierte Hohlraum liegen sollte.

In den oberen Abbildungen kann man auch hier sehr deutlich die Reflexion von der Oberfläche als roten Bereich entlang des gesamten Schnitts bei etwa 905 ps erkennen. In den unteren Darstellungen findet man wieder im Bereich um 1055 ps bei der Messung vor dem Hinterfüllprozess Bereiche größerer Intensität. Der eine liegt im Gebiet von etwa 80 bis 45 mm auf der y-Achse. Dieser Bereich ist aber auch bei der Messung nach der Hinterfüllung zu sehen. Er ist zwar weniger intensiv, aber immer noch vorhanden. Der andere Bereich liegt im Gebiet von 150 bis 110 mm auf der y-Achse in der Messung vor der Hinterfüllung. In der Messung nach dem Hinterfüllprozess kann man aber im Bereich von 150 bis 130 mm ein sehr ähnliches Muster erkennen, woraus man schließen kann, dass dort entweder kein Hohlraum vorliegt oder dass ein Hohlraum vorliegt, dieser aber nicht oder nicht vollständig hinterfüllt wurde. Den vermutlich hinterfüllten Bereich kann man also auf das Gebiet von 130 bis 110 mm begrenzen, da die Intensität dort nach der Hinterfüllung drastisch gesunken ist.



**Abb. 162:** Intensität in Abhängigkeit der Zeit entlang eines Schnitts der y-Achse bei  $x = 221$  mm für Messungen vor und nach dem Hinterfüllen des Messbereichs B2

Davon ausgehend, dass es sich bei dem identifizierten Gebiet im Messbereich B2 tatsächlich um einen Hohlraum gehandelt hat, lag dieser zwischen 230 und 215 mm auf der x-Achse und zwischen 130 und 110 mm auf der y-Achse. Damit hätte dieser mögliche Hohlraum also eine Größe von  $1,5 \times 2$  cm. Mit

einer Peak-Position bei etwa 1055 ps und der Oberfläche bei etwa 905 ps ergibt sich eine Zeitdifferenz von 150 ps, was unter der Annahme eines Brechungsindex von 1,5 für die Wand einer Tiefe von etwa 15 mm entsprechen würde. Da in den Messungen nach der Hinterfüllung die Muster stärkerer Intensität verschwunden sind, wurde dieser mögliche Hohlraum höchstwahrscheinlich hinterfüllt.

Insgesamt kann man durch diese Untersuchungen erkennen, dass es schwierig ist, an derartig stark unebenen und für THz-Strahlung absorptiven Wänden mit bereits mehreren ungleichmäßigen Schichten an der Oberfläche tatsächliche und zumeist tiefliegende Hohlräume zu identifizieren bzw. zu ermitteln, ob diese auch hinterfüllt wurden.

Bei den Laboruntersuchungen ließen sich noch an einigen Stellen klar abgehobene Pulse von Zwischenflächen erkennen. Bei den Untersuchungen an der zu restaurierenden Wand gehen sie meist im Rauschen unter oder werden von Nachreflexionen der Oberfläche überlagert, denn schon die in den Beispielen betrachteten Intensitäten sind oft hundert- bis zehntausendmal kleiner als die Reflexionspulse der Oberfläche. Das sorgt dafür, dass sich selten mit Sicherheit feststellen lässt, ob man in den THz-Daten einen tatsächlichen Hohlraum, der hinterfüllt wurde, entdeckt hat oder ob es sich nur um einen anders gebrochenen Nachreflex von der Oberfläche handelt.

Im Rahmen der hier gegebenen Möglichkeiten wurde also anhand der identifizierten hinterfüllten Hohlräume in den Messbereichen E1 und B2 gezeigt, wie man einen Hohlraum in den Daten erkennen kann und auf welche Weise sich überprüfen lässt, ob es sich tatsächlich um einen solchen handelt.

## **8.2 Resümee des Bearbeitungszyklusses am Objekt und des Projektes**

Wie einleitend in Kapitel 8 beschrieben, wirkten die klimatischen Voraussetzungen mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit für die Hinterfüllmaßnahmen aber auch für die THz-Analysen deutlich erschwerend auf die Umsetzung des Bearbeitungszyklus. Die Restaurierungsmaßnahmen 2014 hatten bereits gezeigt, dass der Eintrag von Mörtelmasse vor allem in geringe Risse im Putz durch den bei hoher Luftfeuchte stark quellenden Gips in der Umsetzung herausfordern ist. Insgesamt hat sich der entwickelte Hinterfüllmörtel in seinen Variationsmöglichkeiten als praxisorientiert, besonders auf die Problemstellung der Anbindung an verschiedene Untergründe hin gezeigt. Vor allem auch für große Hohlräume, wie in Bückeberg vorhanden, ist er je nach Herstellung (Handrührung oder Stabmixer) unterschiedlich in Volumen und Fließgeschwindigkeit einzustellen. In der praktischen Umsetzung zeigte sich, dass das Vornässen der zu hinterfüllenden Hohlräume für den Fluss des Hinterfüllmörtels notwendig war, die Saugfähigkeit der Putzflächen war erheblich. Basierend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen mit Ozon, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Saugfähigkeit nochmals durch dessen Einsatz erhöht hat. Eine Beeinflussung der hohen Luftfeuchte auf den Einsatz des Ozons konnte nicht festgestellt werden. Zwar sinkt mit steigender Luftfeuchtigkeit allmählich die Ozonproduktion. Jedoch nicht so stark, dass es einen negativen Effekt auf die Wirkung am Objekt haben sollte. [7] Allgemein ist für den Prozess des Hinterfüllens jedoch anzumerken, dass aus der praktischen restauratorischen Erfahrung heraus bei optimaleren klimatischen Voraussetzungen eine bessere Maßnahmenumsetzung hätte erfolgen können.

Für die Ozonbehandlung von Putzoberflächen kann nach den Untersuchungsergebnissen auf Potential in dessen Anwendung geschlossen werden. Vor allem bei Hinterfüllmörteln, wie die der Reihe 9, die

durch ihre Konzeption ein schwächeres Anbindeverhalten zeigten, konnte dieser Mörtel durch die Ozonbehandlung des Putzuntergrundes in seinem Anbindeverhalten optimiert werden. Hier könnten sich weitere Untersuchungsreihen mit handelsüblichen Mörteln als durchaus interessantes Forschungsfeld zeigen

Mit dem Einsatz des mobilen THz-Roboterarmsystems vor Ort ließen sich THz-Messungen in Bückeberg auch an schwierigen Positionen, wie zum Beispiel unterhalb des Rippenbogens, gut durchführen. Auch die Unebenheit der Wand stellte kein Problem für die Messungen mit dem Robotersystem dar. Wegen der hohen Luftfeuchtigkeit und deren Einfluss auf den Putz der Wände wurden die ausgesendeten THz-Signale stark absorbiert. Dadurch wurden die Reflexionspulse von Hohlräumen stark abgeschwächt oder vollständig absorbiert, was deren Identifikation erschwert hat. In der Auswertung der THz-Daten ließen sich dennoch zwei Muster von Hohlräumen erkennen, welche im Rahmen der Hinterfüllmaßnahmen verschwunden sind, was auf eine Verfüllung hindeutet. Damit konnten solche Hohlräume zwar nur bei einem kleinen Teil der untersuchten und hinterfüllten Flächen erkannt werden. Man sieht aber trotzdem, dass die robotergestützte THz-Spektroskopie ein Werkzeug darstellen kann, mit dem bei passenden klimatischen Bedingungen auch an verwinkelten Stellen sowohl Hohlräume zerstörungsfrei identifiziert als auch durchgeführte Restaurierungsmaßnahmen nachfolgend überprüft werden können.

Gesamt hat sich gezeigt, dass der Bearbeitungszyklus in seiner anvisierten Form durchführbar war. Komponenten der Vermessung, Bearbeitung und Verfüllung greifen ineinandergreifen und bei einer Verfüllung von Hohlräumen von schwer zu verbindenden Putzen kann dies als ein gutes Verfahren der optimierten und kontrollierten Hohlraumverfüllung gesehen werden.

## 9. Literaturnachweis

- [1] M. Arandigoyen und J. I. Alvarez, „Pore structure and mechanical properties of cement–lime mortars“, *Cem. Concr. Res.*, Bd. 37, Nr. 5, S. 767–775, 2007.
- [2] M. Meyer, „Dissertation: Synthese und Charakterisierung neuartiger Silica-Gele“, Herdecke: GCA-Verl., 2004.
- [3] T. Lehmkuhl, „Injektionsfähige Hinterfüllmassen auf der Basis kolloidaler Kieselsäuredispersion zur Fixierung dünner Schuppen und Schalen an verwitterten Steinobjekten“, *Arbeitsblätter für Restaur. Grup. 6. Stein*, Bd. 27, Nr. 2, Gruppe 6, S. 319–322, 1994.
- [4] P. Egloffstein und C. Kenner, „Hinterfüllmörtel für die Konservierung mittelalterlicher Verputze“, *Restaurierungsmörtel der Denkmalpfl.*, Bd. 3, S. 178–199, 2000.
- [5] D. Knöfel und P. Schubert, *Handbuch – Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege*. Berlin, 1993.
- [6] E. Stübling, Y. Bauckhage, E. Jelli, B. Fischer, B. Globisch, M. Schell, A. Heinrich, J. C. Balzer, and M. Koch, "A THz Tomography System for Arbitrarily Shaped Samples," *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, Bd. 38, Nr. 10, S. 1179–1182, 2017.
- [7] L. C. Cuong, N. H. Nghi, T. V. Dieu, D. T. Y. Oanh, und D. D. Vuong, „Influence of oxygen concentration, feed gas flow rate and air humidity on the output of ozone produced by corona discharge“, *Vietnam J. Chem.*, Bd. 57, Nr. 5, S. 604–608, 2019.

## 10. Quellennachweis

- [1] Büttner, M., Hinterfüllmörtel zur Anbindung von historischen Kalkmörteln auf gipsbelasteten Lehmuntergründen, Bachelorthesis HAWK Hildesheim/Holminden/Göttingen, 2017.
- [2] D’ham, G., Fixierung keramischer Glasuren an witterungsexponierter engobierter Terrakotta-Untersuchung zur Eignung verschiedener Hinterfüllstoffe und Festigungsmittel, unveröffentl. Diplomarbeit Hochschule für angewandte Kunst Hildesheim, 2003.
- [3] Drewello, R. und Weißmann, R., „Analyseergebnis: AN 2703“, Bamberg, 2014.
- [4] Droste, R., „Bericht über die Restaurierung der Schlosskapelle in Bückeberg“, Hannover, 1954.
- [5] Hentschel, B., Die Wandmalereien von Adolf Quensen im Chor der St. Lorenzkirche in Schöningen, Entwicklung eines Konzepts zur Konservierung/Restaurierung, Diplomarbeit Hochschule für angewandte Kunst Hildesheim, 2001.
- [6] Jaschko, B. et al., Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF-Nr. 16855 N, Einfluss der Zusammensetzung Formulierter Kalke (FL) auf die Mörtel Eigenschaften Bildung eines Korrelationsmodells zur Mischungsoptimierung, 2013.
- [7] Lehmkuhl, T., Injektionsfähige Hinterfüllmassen auf der Basis kolloidaler Kieselsäuredispersion zur Fixierung dünner Schuppen und Schalen an Objekten aus Baumberger Sandstein. unveröffentl. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, 1990.
- [8] Leupold, C. und Belter, F., „Unveröffentlichter Bericht: Bestands- und Zustandsaufnahme sowie statische Notsicherung an den Gewölbemalereien der Schlosskapelle in Bückeberg“, 2014.
- [9] Müller, K., Untersuchung und Musterapplikation von Injektionsmassen auf Kieselsol- und Kieselsäureesterbasis zur Wiederanbindung von Schalen an den Apsara Reliefs des Tempels Angkor Wat in Kambodscha. Unveröffentl. Diplomarbeit Fachhochschule Köln, 1999.
- [10] Riedl-Siedow, N., „Bückeberg, Schlosskapelle; Unveröffentlichte Restauratorische Befundsicherung und Stellungnahme; Gutachten zum Zustand der Gewölbe und Wandmalereien“, Hildesheim, 2014.

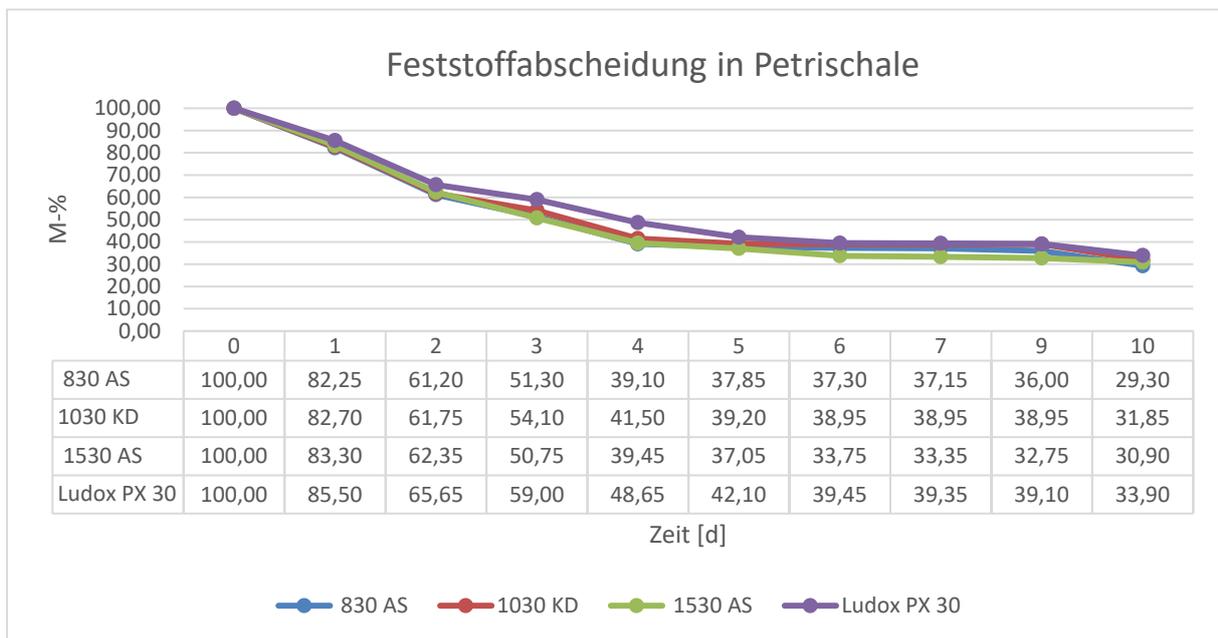
## 11. Anhang

### 11.1 Analyseergebnisse Konzeption

#### 11.1.1 Feststoffabscheidung Kieselzol



Abb. 163: Petrischalentest der Kieselzol nach 9 Tagen



Diagr. 20: Feststoffabscheidung der Kieselsole

## 11.1.2 Hinterfüllmörtelprotokolle

### 11.1.2.1 Mörtelreihe 1

#### Rezeptur Reihe Nr.1

INJEKTIONSMATERIAL:/BINDEMITTEL		Benennung:
Kieselsoł Köstrosol® 830 AS		KS 1.1/830
Trockenanteile:		
5 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)	
0,2 g	Cap-O-Sil	
32 g	Marmormehl 0-90 µm	
12,5 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ 1,2:1
30 g	Kieselsoł	
12 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,18 g	Tween 20® (Polysorbat 20)	

#### Herstellung der Injektionsmasse

Geräte: Stabmixer der Firma Braun  
Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 23° C und 48 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels Stabmixer	2 min
Eindispersieren des Zuschlags Hohlgaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispersierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

#### Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	51	74
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	51	74
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	52	73
Median	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	51,00	74,00
arithmetisches Mittel	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	51,33	73,67
Standardabweichung	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,58	0,58
Variationskoeffizient	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,33	0,33
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

#### Messung der Fließfähigkeit an der Schräge

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	8	30	10 ml
Bemerkung	Läuft gleichmäßig über die ganze Länge und bleibt in der Rinne stehen			

#### Messung der Fließfähigkeit an der Wand

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	5	85	10 ml
Bemerkung	Fließt gleichmäßig, Höhenprofi verbleibt gleichmäßig auf der gesamten Laufstrecke.			

### Messung des Penetrationsvermögens

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Röhrchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	/	0	0	1	1	/	> 98	2
Messung 2	/	/	/	0	0	1	1	/	> 98	2
Messung 3	/	/	/	0	0	1	1	/	> 98	1
Median	/	/	/	0	0	1	1	/	> 98	2
arithmetisches Mittel	/	/	/	0,00	0,00	1,00	1,00	/	> 98	1,67
Standardabweichung	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,58
Variationskoeffizient	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,33

### Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften



#### Gipsuntergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: nein  
 Verformung: Leichte Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gut  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche



#### PE Untergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: sehr gering  
 Verformung: nein  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

**Rezeptur Reihe Nr.1**

INJEKTIONSMATERIAL:/BINDEMITELE		Benennung:
Kieselsoł Köstrosol® 830 AS		KS 1.1/830B
Trockenanteile:		
5 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)	
0,2 g	Cap-O-Sil	
32 g	Marmormehl 0-90 µm	
12,5 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ 1,2:1
30 g	Kieselsoł	
12 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,18 g	Tween 20® (Polysorbat 20)	

**Herstellung der Injektionsmasse**

Geräte: Handmischung mit Spatel, Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 23° C und 48 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels händischer Mischung	2 min
Eindispersieren des Zuschlags Hohlgaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispersierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

**Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit**

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Median	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
arithmetisches Mittel	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
Standardabweichung	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
Variationskoeffizient	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

**Messung der Fließfähigkeit an der Schräge**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	4	30	10 ml
Bemerkung	Läuft gleichmäßig über die ganze Länge und bleibt in der Rinne stehen			

**Messung der Fließfähigkeit an der Wand**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	5	180	10 ml
Bemerkung	Fließt gleichmäßig, geringes Höhenprofil verbleibt gleichmäßig auf der gesamten Laufstrecke.			

**Messung des Penetrationsvermögens**

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Rörchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	1
Messung 2	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	1
Messung 3	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	1
Median	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	2
arithmetisches Mittel	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	1,00
Standardabweichung	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00
Variationskoeffizient	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00

**Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften****Gipsuntergrund**

Schwindmaß: nein  
 Risse: nein  
 Verformung: nein  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: Sehr gut  
 Bemerkung: Leichte Schaubildung an der Oberfläche

**PE Untergrund**

Schwindmaß: gering  
 Risse: sehr gering  
 Verformung: nein  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung: leichte Schaubildung an der Oberfläche

## Rezeptur Reihe Nr.1

INJEKTIONSMATERIAL:/BINDEMITEMEL		Benennung:
Kieselzol Ludox® PX 30		KS 1.1/LU
Trockenanteile:		
5 g	Hohlglasskugeln (Scotchlite 29-53 µm)	
0,2 g	Cap-O-Sil	
32 g	Marmormehl 0-90 µm	
12,5 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ 1,2:1
30 g	Kieselzol	
12 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,18 g	Tween 20® (Polysorbat 20)	

## Herstellung der Injektionsmasse

Geräte: Stabmixer der Firma Braun  
Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 23° C und 48 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels Stabmixer	2 min
Eindispargieren des Zuschlags Hohlglasskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispergierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

## Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	59	62
Messung 2	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	59	61
Messung 3	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	59	62
Median	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	59,00	62,00
arithmetisches Mittel	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	59,00	61,67
Standardabweichung	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,00	0,58
Variationskoeffizient	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,00	0,33
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

## Messung der Fließfähigkeit an der Schräge

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	6	30	10 ml
Bemerkung	Läuft gleichmäßig über die ganze Länge und bleibt in der Rinne stehen			

## Messung der Fließfähigkeit an der Wand

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	4	90	10 ml
Bemerkung	Fließt gleichmäßig, Höhenprofi verbleibt gleichmäßig auf der gesamten Laufstrecke.			

**Messung des Penetrationsvermögens**

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Rörchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	/	0	0	2	2	/	> 98	2
Messung 2	/	/	/	0	0	2	2	/	> 98	2
Messung 3	/	/	/	0	0	2	2	/	> 98	1
Median	/	/	/	0	0	2	2	/	> 98	2
arithmetisches Mittel	/	/	/	0,00	0,00	2,00	1,00	/	> 98	2
Standardabweichung	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00
Variationskoeffizient	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00

**Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften****Gipsuntergrund**

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: Leichte Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: nein  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gut  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

**PE Untergrund**

Schwindmaß: gering  
 Risse: sehr gering  
 Verformung: Leichte Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

**Rezeptur Reihe Nr.1**

INJEKTIONSMATERIAL:/BINDEMITELE		Benennung:
KieselsoL Ludox® PX 30		KS 1.1/LU B
Trockenanteile:		
5 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)	
0,2 g	Cap-O-Sil	
32 g	Marmormehl 0-90 µm	
12,5 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ 1,2:1
30 g	KieselsoL	
12 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,18 g	Tween 20® (Polysorbat 20)	

**Herstellung der Injektionsmasse**

Geräte: Handmischung mit Spatel, Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 23° C und 48 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels händischer Mischung	2 min
Eindispersieren des Zuschlags Hohlgaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispergierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

**Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit**

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	50	75
Messung 2	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	50	74
Messung 3	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	50	75
Median	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	50,00	75,00
arithmetisches Mittel	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	50,00	74,67
Standardabweichung	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,00	0,58
Variationskoeffizient	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,00	0,33
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

**Messung der Fließfähigkeit an der Schräge**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	7	30	10 ml
Bemerkung	Läuft gleichmäßig über die ganze Länge und bleibt in der Rinne stehen			

**Messung der Fließfähigkeit an der Wand**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	23	5	180	10 ml
Bemerkung	Fließt gleichmäßig, geringes Höhenprofi verbleibt gleichmäßig auf der gesamten Laufstrecke.			

**Messung des Penetrationsvermögens**

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Rörchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	1
Messung 2	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	1
Messung 3	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	1
Median	/	/	/	0	0	0	0	/	> 98	2
arithmetisches Mittel	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	1,00
Standardabweichung	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00
Variationskoeffizient	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00

**Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften****Gipsuntergrund**

Schwindmaß: nein  
 Risse: nein  
 Verformung: nein  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: Sehr gut  
 Bemerkung: Leichte Schaubildung an der Oberfläche

**PE Untergrund**

Schwindmaß: gering  
 Risse: sehr gering  
 Verformung: nein  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

### 11.1.2.2 Mörtelreihe 5

#### 1. Rezeptur Reihe Nr.5

INJEKTIONSMATERIAL:/BINDEMittel		Benennung:	
KieselsoL Köstrosol® 830 AS		KS 5.1/830	
Trockenanteile:			
3 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)		
2 g	Cap-O-Sil		
32 g	Marmormehl 0-90 µm		
12,5 g	Marmormehl 0-32 µm		
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ 1:1,28	
45 g	KieselsoL		
5 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser		
0,18 g	Tween 20® (Polysorbat 20)		

#### 2. Herstellung der Injektionsmasse

Geräte: Stabmixer der Firma Braun  
Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 22° C und 45 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels Stabmixer	2 min
Eindispersieren des Zuschlags Hohlgaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispersierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

#### 3. Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	32	92	32	90	32	89	32	86
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	31	93	31	89	31	88	31	86
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	32	92	32	90	32	88	32	86
Median	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	32,00	92,00	32,00	90,00	32,00	88,00	32,00	86,00
arithmetisches Mittel	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	31,67	92,33	31,67	89,67	31,67	88,33	31,67	86,00
Standardabweichung	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,00
Variationskoeffizient	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

#### 4. Messung der Fließfähigkeit mit an der Schräge

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	22	15	30	10 ml
Bemerkung	Stockt in der Laufrinne plötzlich und läuft in die Breite über den Rand der Rinne.			

## Messung der Fließfähigkeit an der Wand

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	22	5	180	10 ml
Bemerkung	Fließt gleichmäßig, kaum Höhenprofil des Mörtels an der Wand.			

## Messung des Penetrationsvermögens

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Rörchchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	/	1	1	1	1	/	> 98	4
Messung 2	/	/	/	1	1	1	1	/	> 98	4
Messung 3	/	/	/	0	1	1	1	/	> 98	5
Median	/	/	/	1	1	1	1	/	> 98	4
arithmetisches Mittel	/	/	/	0,67	1,00	1,00	1,00	/	> 98	4,33
Standardabweichung	/	/	/	0,58	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,58
Variationskoeffizient	/	/	/	0,33	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,33

## Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften

**Gipsuntergrund**

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: ja  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gut  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

**PE Untergrund**

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

## Rezeptur Reihe Nr.5

INJEKTIONSMATERIAL;/BINDEMITEMEL Kieselzol /Ludox® PX 30		Benennung: KS 5.1/LU
Trockenanteile:		
3 g	Hohlglaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)	
2 g	Cap-O-Sil	
32 g	Marmormehl 0-90 µm	
12,5 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Bindemittel + Anmachwasser ~ 1:1,28
45 g	Kieselzol	
5 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,18 g	Tween 20® (Polysorbat 20)	

## Herstellung der Injektionsmasse

Geräte: Stabmixer der Firma Braun  
Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 22° C und 45 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels Stabmixer	2 min
Eindispersieren des Zuschlags Hohlglaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispersierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

## Messung der Fließfähigkeit mit an der Schräge

	Temperatur [°C]	Laufzeit [sek]	Laufweite [cm]	ausgeflossenes Mörtelvolumen [ml]
Messung 1	22	20	30	10 ml
Bemerkung	Stockt in der Laufrinne plötzlich und läuft in die Breite über den Rand der Rinne.			

## Messung der Fließfähigkeit mit an der Wand

	Temperatur [°C]	Laufzeit [sek]	Laufweite [cm]	ausgeflossenes Mörtelvolumen [ml]
Messung 1	22	6	180	10 ml
Bemerkung	Fließt gleichmäßig, kein Höhenprofil des Mörtels an der Wand.			

## Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	4,4	4,6	4,3	4,2	4,4	4,2	4,4	4,2
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	4,4	4,6	4,4	4,1	4,4	4,1	4,4	4,1
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	4,4	4,5	4,4	4,2	4,4	4,2	4,4	4,2
Median	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	4,40	4,60	4,40	4,20	4,40	4,20	4,40	4,20
arithmetisches Mittel	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	4,40	4,57	4,37	4,17	4,40	4,17	4,40	4,17
Standardabweichung	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,00	0,06	0,06	0,06	0,00	0,06	0,00	0,06
Variationskoeffizient	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	n.e.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

### Messung des Penetrationsvermögens

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Rörchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtel-spiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	/	1	1	2	1	/	> 98	2
Messung 2	/	/	/	1	1	2	1	/	> 98	2
Messung 3	/	/	/	1	1	2	1	/	> 98	2
Median	/	/	/	1	1	2	1	/	> 98	2
arithmetisches Mittel	/	/	/	1,00	1,00	2,00	1,00	/	> 98	2,00
Standardabweichung	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00
Variationskoeffizient	/	/	/	0,00	0,00	0,00	0,00	/	> 98	0,00

### Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörtel Eigenschaften



#### Gipsuntergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: ja  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gut  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche



#### PE Untergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: Absenkung in der Mitte  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung: Schaubildung an der Oberfläche

**Rezeptur/Reihe Nr.5**

INJEKTIONSMATERIAL/BINDEMITELE: Formulierter Kalk Tubag		Benennung: FK 5.1B
Trockenanteile:		
40 g	Formulierter Kalk Tubag	
3 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)	
10 g	Marmormehl 0-90 µm	
10 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Anmachwasser ~ 1:1,8
35 g	Wasser	
35 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,06 g (3 Tropfen)		WPC Romstedt

**Herstellung der Injektionsmasse**

Geräte: Handmischung mit Spatel, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
Umgebungsparameter: 22° C und 45 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Dispergieren der Mischung per Hand	2,0 m/s; 2 min
Eindispergieren des Zuschlags Hohlgaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Eindispergieren des Zusatzes WPC	10 sek
Nach Abschluss des Dispergierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

**Messung der Fließfähigkeit an der Schräge**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	22	84	16,1	10 ml
Bemerkung	Stockt in der Laufrinne plötzlich und läuft in die Breite über den Rand der Rinne.			

**Messung der Fließfähigkeit mit an der Wand**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	22	15	162	10 ml
Bemerkung	Läuft langsam an der Wand und nicht über die ganze Strecke, Höhenprofil von 3 mm			

**Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit**

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Median														
arithmetisches Mittel														
Standardabweichung														
Variationskoeffizient														

n.e. = nicht erkennbar

## 5. Messung des Penetrationsvermögens

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Röhrchen 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	1	1	2	2	5	/	65	> 95	5
Messung 2	/	1	1	1	2	5	/	65	> 95	5
Messung 3	/	1	1	2	3	4	/	67	> 95	4
Median	/	1	1	2	2	5	/	65	> 95	5
arithmetisches Mittel	/	1,00	1,00	1,67	2,33	4,67	/	65,67	> 95	4,67
Standardabweichung	/	0,00	0,00	0,58	0,58	0,58	/	1,15	> 95	0,58
Variationskoeffizient	/	0,00	0,00	0,33	0,33	0,33	/	1,33	> 95	0,33

Nach 1 und Stunde war eine Durchfeuchtung bis zum Boden sichtbar.

## 6. Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften



### Gipsuntergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: keine  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ohne  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gut  
 Bemerkung:



### PE Untergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: keine  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung:

**1. Rezeptur Reihe Nr.5**

INJEKTIONSMATERIAL/BINDEMittel:		Benennung:
Formulierter Kalk Tubag		FK 5.2
Trockenanteile:		
40 g	Formulierter Kalk Tubag	
3 g	Hohlgaskügelchen (Scotchlite 29-53 µm)	
10 g	Marmormehl 0-90 µm	
10 g	Marmormehl 0-32 µm	
Flüssiganteile/Anmachwasser:		Verhältnis Trockenmörtel zu Anmachwasser ~ 1:1,8
35 g	Wasser	
35 g	Tylose 30.000, 5 % in Wasser	
0,06 g (3 Tropfen)	WPC Romstedt	

**Herstellung der Injektionsmasse**

Geräte: Stabmixer der Firma Braun  
 Mischgefäß der Fa. VMA/Getzmann, Volumen 500 ml, Durchmesser 85 mm  
 Umgebungsparameter: 22° C und 45 % rLF

Mischvorgang	Parameter
Vermischung des Trockenmörtel mit dem Anmachwasser per manuellem Mischvorgang	0,5 min
Mischung mittels Stabmixer	2 min
Eindispersieren des Zuschlags Hohlgaskugeln per manuellem Mischvorgang	1min
Nach Abschluss des Dispersierens, vor jeder Mörtelentnahme Aufrühren des Mischansatzes von Hand mit einem Metallspatel	

**Messung der Fließfähigkeit mit an der Schräge**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	22	72	13,1	10 ml
Bemerkung	Stockt in der Laufrinne plötzlich und läuft in die Breite über den Rand der Rinne.			

**Messung der Fließfähigkeit mit an der Wand**

	Temperatur	Laufzeit	Laufweite	ausgeflossenes Mörtelvolumen
	[°C]	[sek]	[cm]	[ml]
Messung 1	22	12	147	10 ml
Bemerkung	Läuft langsam an der Wand und nicht über die ganze Strecke, Höhenprofil von 5 mm			

**Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit**

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Median														
arithmetisches Mittel														
Standardabweichung														
Variationskoeffizient														

n.e. = nicht erkennbar

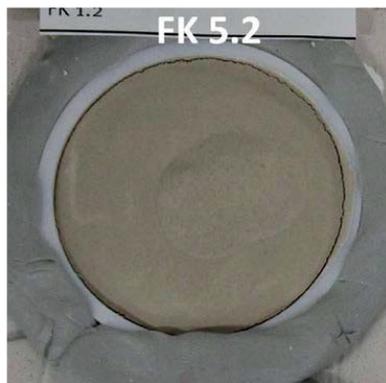
### Messung des Penetrationsvermögens

**Versuchsbedingungen:** Befüllung Greiner Röhren 14 ml mit einem ca. 1 mm großen Loch am Boden mit (Quarzsand GL 23/ Werk Neindorf) in der Körnung von 0,063-0,710 mm; Verdichtung der Sandfüllung für 5 sek. auf Vibrationstisch, Stufe 2, Füllstand bis auf 3,5 cm der Skala; Aufgegebenes Mörtelvolumen auf 0 der Skala aufgefüllt, Aufgabe innerhalb von 10 Sekunden

	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens		
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min]	[%]	[mm]
Messung 1	/	/	1	1	3	4	/	65	> 95	4
Messung 2	/	/	1	2	3	4	/	65	> 95	4
Messung 3	/	/	1	1	3	5	/	67	> 95	5
Median	/	1	1	1	3	4	/	65	> 95	4
arithmetisches Mittel	/	1,00	1,00	1,33	3,00	4,33	/	65,67	> 95	4,33
Standardabweichung	/	0,00	0,00	0,58	0,00	0,58	/	1,15	> 95	0,58
Variationskoeffizient	/	0,00	0,00	0,33	0,00	0,33	/	1,33	> 95	0,33

Nach 1 und 5 Minuten Stunde war eine Durchfeuchtung bis zum Boden sichtbar.

### Abschätzung von Erhärtungsschwinden, Haftung und weiteren Festmörteleigenschaften



#### Gipsuntergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: keine  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: nein  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gut  
 Bemerkung:



#### PE Untergrund

Schwindmaß: gering  
 Risse: gering  
 Verformung: keine  
 Phasentrennung: keine  
 Glanz: ja  
 Verfärbung: nein  
 Haftung: gering  
 Bemerkung:

### 11.1.2.3 Mörtelreihe 9

#### Messung der Sedimentationsgeschwindigkeit

##### KS LU 9.1

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	35	74	35	74	28	72
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	28	74	28	74	27	73
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	28	73	28	73	27	72
Median									28,00	74,00	28,00	74,00	27,00	72,00
arithmetisches Mittel									30,33	73,67	30,33	73,67	27,33	72,33
Standardabweichung									4,04	0,58	4,04	0,58	0,58	0,58
Variationskoeffizient									16,33	0,33	16,33	0,33	0,33	0,33
Bemerkung														

n.e. = nicht erkennbar

##### KS LU-B 9.1

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	20	84	20	84
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	21	82	21	82
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	22	82	22	82
Median											21,00	82,00	21,00	82,00
arithmetisches Mittel											21,00	82,67	21,00	82,67
Standardabweichung											1,00	1,15	1,00	1,15
Variationskoeffizient											1,00	1,33	1,00	1,33
Bemerkung	Flockt nach 2 h leicht aus, trennt sich nach 2 d													

##### KS 830 9.1

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	35	74	26	72	26	72	26	72
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	35	73	26	71	26	72	25	71
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	36	74	25	72	25	72	25	71
Median							35,00	74,00	26,00	72,00	26,00	72,00	25,00	71,00
arithmetisches Mittel							35,33	73,67	25,67	71,67	25,67	72,00	25,33	71,33
Standardabweichung							0,58	0,58	0,58	0,58	0,58	0,00	0,58	0,58
Variationskoeffizient							0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,00	0,33	0,33
Bemerkung														

##### KS /830 B

Meßzeitpunkt nach Befüllung	0,25 h		0,5 h		1 h		2 h		1 d		2 d		7 d	
	[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]		[mm]	
↑ oben; ↓ unten	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Messung 1	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 2	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Messung 3	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e	n.e
Median														
arithmetisches Mittel														
Standardabweichung														
Variationskoeffizient														
Bemerkung	Flockt nach 2 h leicht aus. Zustand besteht nach 7 d													

## Penetrationsvermögens

KS 9.1 LU	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens			Eindringtiefe 2d
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h		2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min:sek]	[%]	[mm]	
Messung 1	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	9
Messung 2	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	12
Messung 3	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	22
Median	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	12
arithmetisches Mittel	/	/	/	/	0,50	0,50	0,50	/	/	/	14,33
Standardabweichung	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	6,81
Variationskoeffizient	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	46,33

KS 9.1 LU-B	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens			Eindringtiefe 2d
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h		2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min:sek]	[%]	[mm]	
Messung 1	/	/	/	/	0,5	1	1	/	/	/	13
Messung 2	/	/	/	/	0,5	1	1	/	/	/	12
Messung 3	/	/	/	/	0,5	1	1	/	/	/	14
Median	/	/	/	/	0,5	1	1	/	/	/	13
arithmetisches Mittel	/	/	/	/	0,50	1,00	1,00	/	/	/	13,0
Standardabweichung	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	1,00
Variationskoeffizient	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	1,00

KS 9.1 830	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens			Eindringtiefe 2d
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h		2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min:sek]	[%]	[mm]	
Messung 1	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	8
Messung 2	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	8
Messung 3	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	9
Median	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	8
arithmetisches Mittel	/	/	/	/	0,50	0,50	0,50	/	/	/	8,33
Standardabweichung	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	0,58
Variationskoeffizient	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	0,33

Bei 2,2 cm trennt sich die Masse nach zwei Stunden.

KS 9.1 830 -B	Absinken des Injektionsmörtelspiegels						Eindringtiefe	Erreichen des Reagenzglasbodens			
	3 min	8 min	15 min	30 min	1 h	2 h	2 h	Zeitpunkt	Grad der Verfüllung	Stand des Mörtelspiegels	Eindringtiefe 2d
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[min:sek]	[%]	[mm]	[mm]
Messung 1	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	9
Messung 2	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	8
Messung 3	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	9
Median	/	/	/	/	0,5	0,5	0,5	/	/	/	9
arithmetisches Mittel	/	/	/	/	0,50	0,50	0,50	/	/	/	8,67
Standardabweichung	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	0,58
Variationskoeffizient	/	/	/	/	0,00	0,00	0,00	/	/	/	0,33

Nach 2 Tagen ist ein Eindringen in den Sand ersichtlich



Foto 1



Foto 2



Foto 3

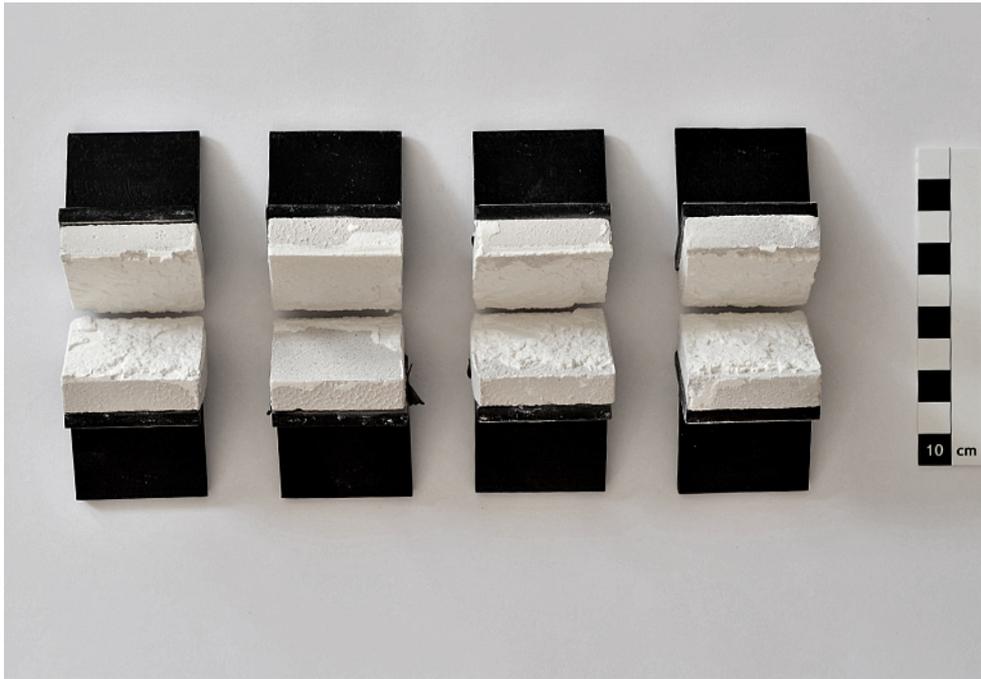


Foto 4

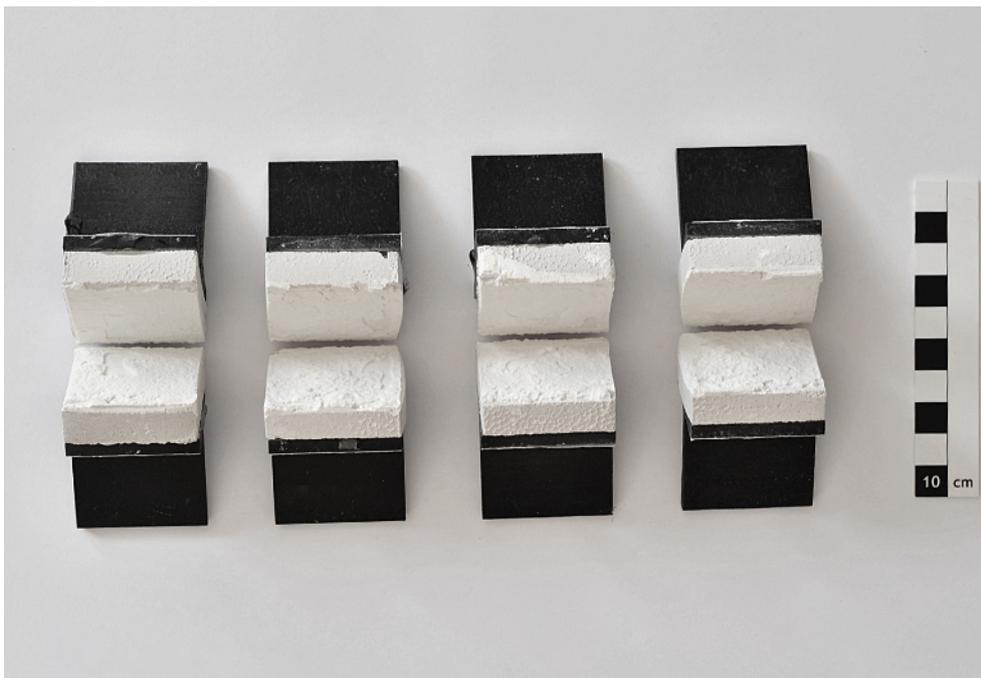


Foto 5



Foto 6

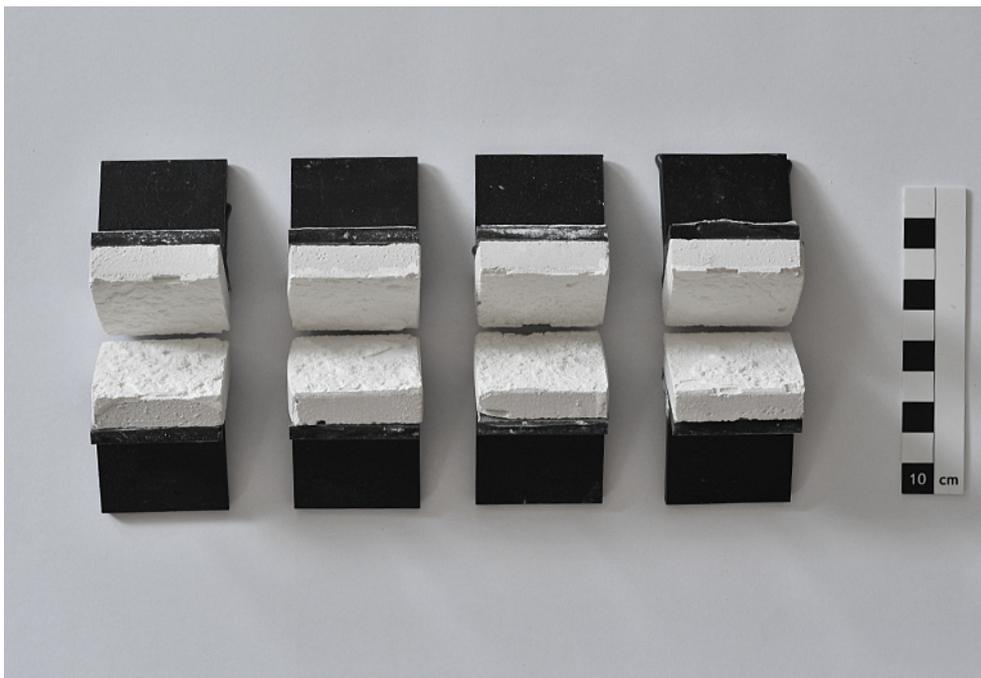


Foto 7

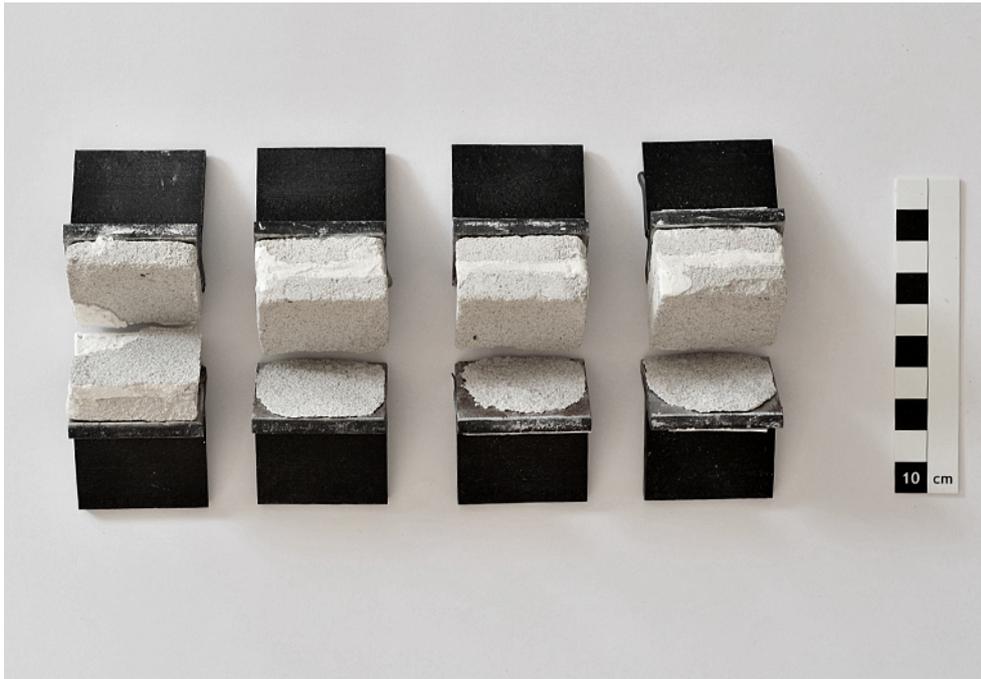


Foto 8



Foto 9



Foto 10



## Prüfeinrichtung



### 11.3 Technische Merkblätter Kieselsole

# deffner & Johann

Produkte für RESTAURIERUNG | DENKMALPFLEGE | ART HANDLING – SEIT 1880.

## TECHNISCHES DATENBLATT

[info@deffner-johann.de](mailto:info@deffner-johann.de) | +49 9723 9350-0

Die in diesem Produktdatenblatt genannten Spezifikationen dienen nur zur Produktbeschreibung und beziehen sich auf den Zeitpunkt unmittelbar nach der Produktion bzw. Import des Produktes. Sie entsprechen den Angaben des Herstellers. Eine rechtsverbindliche Zusicherung bestimmter Eigenschaften oder der Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck kann hieraus nicht abgeleitet werden. Durch unsachgemäßen Transport und / oder unsachgemäße Lagerung können sich Änderungen ergeben. Die Angaben in diesem Produktdatenblatt entbinden den Verarbeiter nicht von eigener Prüfung der Eigenschaften des Produktes und dessen Eignung für die vorgesehene Verwendung.

## Technisches Datenblatt

### Ludox PX 30

Ludox PX 30 ist eine wässrige Kieselsäuredispersion mit 30 %, 1200 g/Liter. Beim Trocknen verfestigt sich die Dispersion zu einer Trockengelstruktur mit hoher chemischer Bindekraft. Ludox PX 30 wird wegen seiner hohen chemischen Beständigkeit und wegen seiner Temperaturbeständigkeit verwendet als

- Bindemittel in Mörteln
- Oberflächen-Modifiziermittel, erhöht auf praktisch jeder Oberfläche den Reibwert
- Füllstoff

Ludox PX 30 wird zum Beispiel verwendet für

- schmutzabweisende Anstriche auf Wänden, schmutzabweisende Ausrüstung von Textilien
- zum Griffigmachen von Wachs-Dispersionen, dabei verliert das Wachs nicht seinen Glanz
- zum Schönen und Klären von Wein und Fruchtsäften
- bei Emulsionsfarben bewirkt die Zugabe von 5-10 % Ludox PX 30 im Pigmentanteil eine deutliche thixotropische Strukturverbesserung und eine Verringerung der Pigmentabscheidung beim Lagern
- für Steinersatzmassen hat sich Ludox PX 30 besonders bewährt: Die Werte für Festigkeit und Elastizität sind günstig.

Ludox PX 30 ist kein Gefahrgut. Die Wassergefährdung ist WGK 0. Das getrocknete Ludox PX 30 in Pulverform, z.B. als Aerosol, ist atemweggefährdend, Schutzmaske empfohlen.

#### **Analysenzertifikat:**

Dichte (20°C, g/cm <sup>3</sup> ):	1,203
pH (20°C):	10,0
Rückstand ( % m/m):	28,9
Viskosität (20°C):	5,0 mPa.s
Na <sub>2</sub> O (% m/m):	0,34
Spec. Surface appearance - SSA (m <sup>2</sup> /g SiO <sub>2</sub> ):	265
Sediment (% v/v):	0,5 max

# KÖSTROSOL<sup>®</sup> 0830 AS

Köstrosol<sup>®</sup> 0830 AS is a opalescent aqueous dispersion of amorphous silicon dioxide nanoparticles. This small-size colloidal silica has a negatively charge surface (anionic) which is stabilized by Ammonia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

<b>CHEMICAL MARKING:</b>	aqueous, colloidal silica dispersion
<b>CHEMICAL FORMULA:</b>	SiO <sub>2</sub> x H <sub>2</sub> O
<b>STABILIZATION:</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ; negatively charged surface
<b>(SURFACE-) MODIFICATION:</b>	without
<b>PROTECTION AGAINST BIO-ORGANISMS:</b>	without; suppressed by ammonia himself
<b>PROTECTION AGAINST FREEZING:</b>	without
<b>APPEARANCE:</b>	opalescent liquid
<b>MSDS NO.:</b>	KS030201
<b>RECOMMENDATION FOR STORAGE AND HANDLING:</b>	Transportation and storage in closed original container; protect from permanent light. Frost-susceptible Material! Ideal storage temperature between 5 - 25 °C. Shelf life (in unopened original packaging): 6 months

## CHARACTERISTIC PROPERTIES

Köstrosol<sup>®</sup> 0830 AS is a pure colloidal silica without any organic additives.

PROPERTY	UNIT	VALUE
Specific Surface Area	m <sup>2</sup> /g	290
Residue	% (w/w)	29.5
Alkalinity as Na <sub>2</sub> O	% m/m	0.05
Viscosity, dynamic (@ 25 °C)	mPa s	8
pH value (@ 25 °C)		9.6
Density (@ 20 °C)	g/cm <sup>3</sup>	1.2

Special customer related specifications can be agreed.

## REGISTRATION

<b>CAS NO.</b>	7631-86-9
<b>EINECS NO.</b>	231-545-4
<b>REACH</b>	01-2119379499-16-0065



## APPLICATION

<b>CATALYST MANUFACTURE</b>	<b>Ceramic catalysts</b> High-purity, inert, temperature-resistant binder for catalysts, granules and active materia - especially alkaline free products.
<b>ENERGY INDUSTRY, INSULATORS</b>	<b>Insulation</b> Binder in insulation applications (heat or electricity) in power line and transformer construction (High-voltage isolators).

## PACKAGING

Following standard packaging is available:

- Road Tanker: ~ 24 mt
- Intermediate Bulk Container (IBC): 1000 L
- plastic bung hole drum: 220 L

Further packaging available on request.

## HEALTH AND SAFETY

No dangerous goods

No hazardous material as defined by the transport regulations.

Material Safety Data Sheet available on request.

## CERTIFICATES

CWK is certified according to ISO 9001, ISO 14001 and ISO 50001.

# KÖSTROSOL<sup>®</sup> 1030 KD

Köstrosol<sup>®</sup> 1030 KD is a opalescent aqueous dispersion of amorphous silicon dioxide nanoparticles. This intermediate small-size colloidal silica has a negatively charge surface (anionic) which is stabilized by a low level of Alkaline (Na<sup>+</sup>).

<b>CHEMICAL MARKING:</b>	aqueous, colloidal silica dispersion
<b>CHEMICAL FORMULA:</b>	SiO <sub>2</sub> x H <sub>2</sub> O
<b>STABILIZATION:</b>	Na <sup>+</sup> ; negatively charged surface
<b>(SURFACE-) MODIFICATION:</b>	without
<b>PROTECTION AGAINST BIO-ORGANISMS:</b>	without
<b>PROTECTION AGAINST FREEZING:</b>	without
<b>APPEARANCE:</b>	opalescent liquid
<b>MSDS NO.:</b>	KS030104
<b>RECOMMENDATION FOR STORAGE AND HANDLING:</b>	Transportation and storage in closed original container; protect from permanent light. Frost-susceptible Material! Ideal storage temperature between 5 - 25 °C. Shelf life (in unopened original packaging): 12 months

## CHARACTERISTIC PROPERTIES

Köstrosol<sup>®</sup> 1030 KD is a pure colloidal silica without any organic additives.

PROPERTY	UNIT	VALUE
Specific Surface Area	m <sup>2</sup> /g	240
Residue	% (w/w)	30.1
Density (@ 20 °C)	g/cm <sup>3</sup>	1.205
Free Alkalinity (as Na <sub>2</sub> O)	% (w/w)	0.27
pH value (@ 25 °C)		9
Viscosity, dynamic (@ 25 °C)	mPa s	5

Special customer related specifications can be agreed.

## REGISTRATION

<b>CAS NO.</b>	7631-86-9
<b>EINECS NO.</b>	231-545-4
<b>REACH</b>	01-2119379499-16-0065



### PACKAGING

Following standard packaging is available:

- Road Tanker: ~ 24 mt
- Intermediate Bulk Container (IBC): 1000 L
- plastic bung hole drum: 220 L

Further packaging available on request.

### HEALTH AND SAFETY

No dangerous goods

No hazardous material as defined by the transport regulations.

Material Safety Data Sheet available on request.

### CERTIFICATES

CWK is certified according to ISO 9001, ISO 14001 and ISO 50001.

# KÖSTROSOL<sup>®</sup> 1530 AS

Köstrosol<sup>®</sup> 1530 AS is a opalescent aqueous dispersion of amorphous silicon dioxide nanoparticles. This middle-size colloidal silica has a negatively charge surface (anionic) which is stabilized by Ammonia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

<b>CHEMICAL MARKING:</b>	aqueous, colloidal silica dispersion
<b>CHEMICAL FORMULA:</b>	SiO <sub>2</sub> x H <sub>2</sub> O
<b>STABILIZATION:</b>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ; negatively charged surface
<b>(SURFACE-) MODIFICATION:</b>	without
<b>PROTECTION AGAINST BIO-ORGANISMS:</b>	without; suppressed by ammonia himself
<b>PROTECTION AGAINST FREEZING:</b>	without
<b>APPEARANCE:</b>	opalescent liquid
<b>MSDS NO.:</b>	KS030202
<b>RECOMMENDATION FOR STORAGE AND HANDLING:</b>	Transportation and storage in closed original container; protect from permanent light. Frost-susceptible Material! Ideal storage temperature between 5 - 25 °C. Shelf life (in unopened original packaging): 6 months

## CHARACTERISTIC PROPERTIES

Köstrosol<sup>®</sup> 1530 AS is a pure colloidal silica without any organic additives.

PROPERTY	UNIT	VALUE
Specific Surface Area	m <sup>2</sup> /g	204
Residue	% (w/w)	30.1
Density (@ 20 °C)	g/cm <sup>3</sup>	1.203
Alkalinity as Na <sub>2</sub> O	% m/m	0.1
pH value (@ 25 °C)		9.4
Viscosity, dynamic (@ 25 °C)	mPa s	4
Chloride content (as NaCl)	% (w/w)	0.01

Special customer related specifications can be agreed.

## REGISTRATION

<b>CAS NO.</b>	7631-86-9
<b>EINECS NO.</b>	231-545-4
<b>REACH</b>	01-2119379499-16-0065



## APPLICATION

<b>CATALYST MANUFACTURE</b>	<b>Ceramic catalysts</b> High-purity, inert, temperature-resistant binder for catalysts, granules and active materia - especially alkaline free products.
<b>ENERGY INDUSTRY, INSULATORS</b>	<b>Insulation</b> Binder in insulation applications (heat or electricity) in power line and transformer construction (High-voltage isolators).

## PACKAGING

Following standard packaging is available:

- Road Tanker: ~ 24 mt
- Intermediate Bulk Container (IBC): 1000 L
- plastic bung hole drum: 220 L

Further packaging available on request.

## HEALTH AND SAFETY

No dangerous goods

No hazardous material as defined by the transport regulations.

Material Safety Data Sheet available on request.

## CERTIFICATES

CWK is certified according to ISO 9001, ISO 14001 and ISO 50001.