gefördert durch

DBU

Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Aktenzeichen: 35765/01
Projektlaufzeit: 2021-2025



DBU- Abschlussbericht: „Optimierung der Einsatzmöglichkeit von Lasertechnik zur Reinigung von historischen Oberflächen von Ablagerungen sowie von mikrobiologisch aktiven Besiedlungen am Halberstädter Dom“

Kurztitel: „Optimierung von Lasertechnik zur Reinigung und Desinfektion von historischen Oberflächen“

Bewilligungsempfänger: Kulturstiftung Sachsen- Anhalt, Leitzkau

Kooperationspartner: Corinna Grimm-Remus, Prof. Dr., Dipl. Restauratorin (FH), Magdeburg
Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle/Saale
Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie, Halle/Saale
Ulrich Bauer-Bornemann, Bamberg

Fachbeirat: Prof. Dr. Jeannine Meinhardt, Fachhochschule Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung

Inhalt

Projektkennblatt 15
1 Sybille Weigelt-Röseler: Vorwort und Danksagung 17
2 Karsten Böhm: Vorwort 19
3 Jeannine Meinhardt: Grußworte 21
2 Corinna Grimm-Remus: Einführung 23
2.1 Ausgangslage und Ziele des Projektes 23
2.2 Methodische Vorteile und Wirkungsweise 24
3 Ulrich Bauer-Bornemann: Reinigungslaser in der Steinrestaurierung - 30 Jahre Anwendung in Deutschland 28
4 Corinna Grimm-Remus, Lale von Baudissin Auswahl geeigneter Lasergeräte 37
5 Auswahl der Musterflächen 47
5.1 Corinna Grimm-Remus: Dom Halberstadt 48
5.2 Claudia Böttcher: Dom Magdeburg 53
5.3 Corinna Grimm-Remus: Dom Halle 59
6 Corinna Grimm-Remus: Exemplarische Ergebnisse der Reinigung von Naturstein aus restauratorischer Sicht 60
6.1 Vorgehen und Bewertung 60
6.2 Halberstädter Dom 62
6.2.1 Kalksteinoberfläche mit ausgeprägter schwarzer Umwandlungskruste, Musterfläche HBS_IV 62
6.2.1.1 Ergebnisse mit CleanLaser CL50 bei stark ausgeprägter Umwandlungskruste (Musterfläche HBS_IV) 64
6.2.1.2 Ergebnisse mit Infinito bei stark ausgeprägter Umwandlungskruste (Musterfläche HBS_IV) 68
6.2.1.3 Ergebnisse mit Soliton bei stark ausgeprägter Umwandlungskruste (Musterfläche HBS_IV) 71
6.2.1.4 Übertragbarkeit auf weitere Protalbereiche 72
6.2.2 Kalksteinoberflächen mit beginnender Umwandlungskruste, HBS_I 74
6.2.3 Kalksteinoberflächen mit Fassungsresten, HBS_III 76
6.2.4 Sandsteinoberflächen mit Auflagerungskruste, HBS_II 78
6.3 Magdeburger Dom 81
6.3.1 Sandstein und Kalkstein mit Kalkschlämme, stark verschmutzt, Musterfläche MD_I 81
6.3.2 Sandstein mit Auflagerungskruste, Musterfläche MD_II 84
6.3.3 Sandstein mit Auflagerungs- und Salzkruste, Musterfläche MD_III 87
6.4 Versuche zur Entfernung biogenen Bewuchses – Dom Halle, Dom Magdeburg und Dom Halberstadt 88
6.5 Fazit 95
7 Matthias Zötzl, Henning Kersten: Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Begleitung des Forschungsprojekts 96

7.1 Einleitung ... 96
7.2 Naturstein- und Kennwertbestimmung ... 97
7.3 Untersuchungen von Auflagen und Krusten aus dem Halberstädter Dom ... 98
7.4 Untersuchungen von Sandstein-Auflagen und -krusten aus dem Halberstädter Dom ... 104
7.5 Untersuchung der Auflagen, Kontrolle der Reinigung mittels Mikro-RFA ... 111
7.6 REM-EDX-Untersuchungen nach Laserreinigung an Sandsteinmustern ... 116
7.6.1 Sandsteinmusterfläche am Dom in Halberstadt ... 117
7.6.2 Sandsteinmusterfläche am Dom in Magdeburg ... 120
7.6.3 Sandsteinmusterfläche am Dom in Halle ... 123
7.6.4 Zusammenfassung ... 125
7.7. Bewertung der Musterflächen ... 126
7.7.1 Einleitung ... 126
7.7.2 Messverfahren ... 127
7.7.3 Dom Halberstadt ... 128
7.7.4 Dom Magdeburg ... 142
7.7.5 Dom Halle ... 152
7.7.6 Zusammenfassung und Fazit ... 155
7.8 Untersuchungen zur Laserreinigung mikrobiologisch aktiver Besiedlungen ... 156
7.8.1 Einleitung ... 156
7.8.2 Messverfahren ... 156
7.8.3 Dom Halberstadt ... 156
7.8.4 Dom Halle ... 157
7.8.4 Zusammenfassung und Fazit ... 160
8 Jeannine Meinhardt: Einsatz des Luft-Permeameters zur Bewertung der Laserreinigung ... 161
9 Julia Laposi: Laserreinigung von Alabaster: Machbarkeit und Risiken mit besonderem Hinblick auf den thermischen Einfluss ... 168
9.1 Einführung ... 168
9.2 Materialcharakteristik und Voruntersuchungen ... 168
9.3 Versuchsaufbau ... 170
9.4 Beginn der Untersuchungen ... 170
9.5 Untersuchungen zur Thermischen Belastung bei der Laserreinigung ... 172
9.6 Fazit ... 176
10 Helena Sophie Weßling: Reinigung von Verrußungen auf Holz mittels Lasertechnik: Vergleichende Betrachtung von Parametern auf verschiedenen Beschichtungen und Holzarten ... 179
10.1 Einleitung und Problemstellung ... 179

10.2 Forschungsstand und theoretische Grundlagen 179
10.3 Zielsetzung und Fragestellungen 180
10.4 Material und Methodik 180
10.5 Ergebnisse 180
10.6 Diskussion 181
10.7 Fazit und Ausblick 181
11 Gregor Heinrich: Graffiti auf lackiertem Holz: Möglichkeiten der Entfernung durch Lasertechnik 183
11.1 Einführung 183
11.2 Methodik 183
11.3 Ergebnisse /Diskussion der Ergebnisse 185
11.3.1 Auswirkungen der Schichtenabnahme auf die Oberfläche 187
11.3.2 Einfluss der Untergrundfarbe und der Graffitifarbe 189
11.3.3 Auswirkung des Lack- und Graffitibindemittels 190
11.3.4 Vergleich optischer und technischer Methoden 191
11.4 Fazit 192
11.5 Ausblick 193
12 Lale von Baudissin, Nicolai Bach: Das Erstellen der Datenbank LADIS 195
13 Zusammenfassung 208
14 Öffentlichkeitsarbeit 209
15 Fotodokumentation Musterflächen Halberstadt, Magdeburg, Halle (Auflösung Onlineveröffentlichung) 214

Abbildungen

Abbildung 1: Darstellung des Reinigungsprinzips, KI-generiertes Bild 25
Abbildung 2 28
Abbildung 3 29
Abbildung 4 29
Abbildung 5 30
Abbildung 6 30
Abbildung 7 31
Abbildung 8 31
Abbildung 9 32
Abbildung 10 33
Abbildung 11 33
Abbildung 12 34
Abbildung 13 35
Abbildung 14 35

Abbildung 15 36
Abbildung 16*: Auswahl der Laser im Forschungsprojekt (v. l.): Der lightCASE CL 50, der Infinito, der Smart 300 und der Thunder Compact Reinigungslaser. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.* 37
Abbildung 17*: Das Handstück vom lightCASE CL 50. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.* 38
Abbildung 18*: Das Bedienfeld vom Infinito 1054C1. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.* 38
Abbildung 19*: Das Handstück vom Quanta Thunder Compact. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025./* 40
Abbildung 20*: Der Soliton LT300. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.* 41
Abbildung 21*: Der Smart 300. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.* 42
Abbildung 22: Das Handstück vom Flaser Hulk 500. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025. 43
Abbildung 23: Blick auf den Halberstädter Dom von Südosten. 48
Abbildung 24: Musterfläche im südlichen Kreuzgang des Halberstädter Domes. 49
Abbildung 25: Musterfläche im östlichen Kreuzgarten des Halberstädter Domes. 50
Abbildung 26: Musterfläche im sog. Alten Kapitelsaal des Halberstädter Domes. 51
Abbildung 27: Musterfläche am Nordquerhausportal des Halberstädter Domes. 52
Abbildung 28: Musterfläche im Bischofsgang des Magdeburger Domes. 53
Abbildung 29: Musterfläche an der Tonsurkapelle des Magdeburger Domes. 55
Abbildung 30: Musterfläche an der Nordfassade des Magdeburger Domes. 57
Abbildung 31: Musterfläche an der Nordseite des Domes in Halle. 59
Abbildung 32: Typisches Spektrum von Patinierungen beim Halberstädter Muschelkalk, auch organgerote neben hellen oder schwarzen Bereichen. 61
Abbildung 33, Abbildung 34: Unterschiedliche Krustenausprägung auf Kalksteinoberflächen. Umwandlungskruste am Nordquerhausportal (links) und überwiegend aufliegende Kruste im Kreuzgang. 63
Abbildung 35: Erste Musterflächen zur Ermittlung geeigneter Einstellparamater. 65
Abbildung 36: Beispielhafte Darstellung des Reinigungsergebnisses mithilfe einer mikroskopischen Betrachtung. .. 67
Abbildung 37: Beispiel der Reinigungsmuster mittel Infinito- Laser. 69
Abbildung 38: Beispielhafte Darstellung des Reinigungsergebnisses mithilfe einer mikroskopischen Betrachtung. .. 70
Abbildung 39: Probeflächen für den Einsatz des Soliton- Lasers. 71
Abbildung 40: Beispielhafte Darstellung des Reinigungsergebnisses mithilfe einer mikroskopischen Betrachtung. .. 72
Abbildung 41: Lasergereinigte Musterfläche am Nordquerhausportal. 73
Abbildung 42: Musterflächen an der Nordfassade des Halberstädter Domes. 73
Abbildung 43: Musterfläche mit CleanLaser im Halberstädter Kreuzgang. 74
Abbildung 44: Musterfläche mit Infinito im Halberstädter Kreuzgang. 75
Abbildung 45: Musterflächen mit Smart300 im Halberstädter Kreuzgang. 75
Abbildung 46: Kämpferstein aus Kalkstein im Bereich des sog. Alten Kapitalsaals, mit erkennbarerer Rotfassung unterhalb der Krustenauflagerungen. 76

Abbildung 47: Bestimmung mittels Röntgenfluoreszenzanalysators Niton XL3t (durch Prof. Steffen Laue (FH-Potsdam) ... 76
Abbildung 48: Angelegte Musterflächen an einem Kämpferstein im sog. Alten Kapitelsaal. ... 77
Abbildung 49: Mikroskopische Aufnahme vor Ort, mit erhalten Rotfassung und Resten der Krustenauflage. ... 78
Abbildung 50: Angelegte Musterflächen mit dem Smart 300 (50, 75 und 100% Leistung). ... 79
Abbildung 51: *Bereich mit schwarzer Auflage (rechts) neben lasergereinigtem Bereich (links) (Videomikro-skop) (Foto: KÖBERLE, 2025. A*uch unter der ungereinigten Kruste ist die gelb-orange Schicht zu erkennen. ... 79
Abbildung 52: Gelborange Patinierung am Involutus-Sandstein am Halberstädter Dom, ungereinigter Zustand. ... 80
Abbildung 53: Blick auf die Wand im oberen Bischofgang. ... 81
Abbildung 54: Musterflächen mit CleanLaser CL50. ... 82
Abbildung 55: Detail einer Musterfläche mit CleanLaser CL50. ... 82
Abbildung 56: Teile der Musterflächen mit Infinito-Reinigungslaser. ... 83
Abbildung 57: Detail einer Musterfläche mit dem Infinito- Reinigungslaser. ... 83
Abbildung 58: Musterfläche an der äußeren Tonsurkapelle im Magdeburger Dom. ... 84
Abbildung 59: Musterflächen an der Tonsurkapelle mit Infinito (50, 75, 100 Watt, von re. nach li.) Links trocken, rechts nass. ... 85
Abbildung 60: Partielle Überreinigung mit 100Watt. ... 85
Abbildung 61: Reinigungsmuster mit CleanLaser CL50. ... 86
Abbildung 62: Reinigungsmuster mit Smart300 (oben) und Thunder Compact (unten). ... 86
Abbildung 63: Bereich der Musterfläche auf der Nordseite des Magdeburger Domes. ... 87
Abbildung 64: Reinigungsmuster an der Nordseite des Magdeburger Domes. ... 87
Abbildung 65: Typisches Reinigungsergebnis mit erhaltener Salzkruste. ... 88
Abbildung 66: Musterfläche am Dom Magdeburg. ... 89
Abbildung 67: Musterfläche 5 an der Tonsurkapelle des Magdeburger Domes. ... 89
Abbildung 68: Musterfläche an der Nordseite des Magdeburger Domes. ... 90
Abbildung 69: Musterfläche im Sockelbereich des Halberstädter Domes (Kalkstein oben, Sandstein unten). ... 91
Abbildung 70: Mikroskopische Aufnahmen vor und nach der Reinigung, Kalkstein oben, Sandstein unten. ... 91
Abbildung 71: Probeplatte zur Reinigung von biogenem Bewuchs. ... 92
Abbildung 72: Musterfläche am Dom in Halle. ... 93
Abbildung 73: Musterflächen mit dem CleanLaser CL50. ... 93
Abbildung 74: Detail der Musterfläche. ... 94
Abbildung 75: Die drei am besten bewerteten Lasergeräte für die gestellten Reinigungsaufgaben: CleanLaser CL50, Infinito, Smart300 (von li. Nach re.) ... 95
Abbildung 76: Buntsandsteine des Magdeburger Doms. Bohrkerne der Ostfassade (aus ZÖTZL, 2019) ... 97
Abbildung 77: *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)* ... 98

Abbildung 78 *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)* 98
Abbildung 79: *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)* 98
Abbildung 80: *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)* 98
Abbildung 81: *Kreuzgang, Strebepfeiler mit Reinigungsmusterflächen* 99
Abbildung 82: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, Probe MF_II_K1 (oben, wenig Kruste), MF_II_K3 (dicke Kruste)* 99
Abbildung 83: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, Probe MF_II_K1 (oben, wenig Kruste)* 99
Abbildung 84: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, MF_II_K3 (3. von oben, dicke Kruste)* . 99
Abbildung 85: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, Probe MF_II_K1 (oben, wenig Kruste)* 99
Abbildung 86: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, MF_II_K3 (3. von oben, dicke Kruste)* 99
Abbildung 87: *Bohrkern MF I K1 Vorderseite (Foto: KÖBERLE, 2024)* 100
Abbildung 88: *Bohrkern MF I K1 Rückseite (Foto: KÖBERLE, 2024)* 100
Abbildung 89: *Bohrkern MF I K1 Rückseite (Foto: KÖBERLE, 2024)* 100
Abbildung 90: *Bohrkern MF I K2 Rückseite (Foto: KÖBERLE, 2024)* 100
Abbildung 91: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024) 101
Abbildung 92: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S (Foto: KÖBERLE, 2024) 101
Abbildung 93: REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 91 101
Abbildung 94: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1, Detail der Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024) 102
Abbildung 95: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S, aus mehreren Mapping-Bildern zusammengesetzte Abb. (Foto: KÖBERLE, 2024) 102
Abbildung 96: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 103
Abbildung 97: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S (Foto: KÖBERLE, 2025) 103
Abbildung 98: *REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 96* 103
Abbildung 99: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca, Si, S, C und Al (Foto: KÖBERLE, 2024) 104
Abbildung 100: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S, aus mehreren Mapping-Bildern zusammengesetzte Abb. (Foto: KÖBERLE, 2024) 104
Abbildung 101: *Bohrkern MF II K1 Vorderseite (Foto KÖBERLE, 2024)* 105
Abbildung 102: *Bohrkern MF II K1 Rückseite (Foto KÖBERLE, 2024)* 105
Abbildung 103: *Bohrkern MF II K3 Vorderseite (Foto KÖBERLE, 2024)* 105
Abbildung 104: *Bohrkern MF II K3 Rückseite (Foto KÖBERLE, 2024)* 105

Abbildung 105: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K2 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024) 105
Abbildung 106: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K1 mit oberflächennahen Einlagerungen von Ca-, Si-, Al-, und C- haltigen Partikeln (EDX-Mapping) (Foto: KÖBERLE, 2024) 105
Abbildung 107: REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 105. 106
Abbildung 108: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K1 mit oberflächennahen Einlagerungen von Si und S, zusammengesetztes REM-EDX Mapping (Foto: KÖBERLE, 2024) 106
Abbildung 109: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K3 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024) 107
Abbildung 110: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K3 (REM-BSE), EDX-Mapping von Si und S (Foto: KÖBERLE, 2024) 107
Abbildung 111: REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 109. 107
Abbildung 112: Probe MF II K3 mit oberflächennahen Einlagerungen von Ca-, Si-, Al-, und C- haltigen Partikeln (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024) 109
Abbildung 113: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K3 (REM-BSE), zusammengesetztes EDX-Mapping von Si und S (Foto: KÖBERLE, 2024) 109
*Abbildung 114: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 113
*Abbildung 115: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 113
*Abbildung 116: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 113
*Abbildung 117: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 113
*Abbildung 118: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 113
*Abbildung 119: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)* 113
*Abbildung 120: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 114
*Abbildung 121: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)* 114
*Abbildung 122: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 114
*Abbildung 123: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)* 114
*Abbildung 124: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)* 114

*Abbildung 125: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)* 114
*Abbildung 126: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **Hbs**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)* 115
*Abbildung 127: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **Hbs**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)* 115
*Abbildung 128: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **MD**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)* 115
*Abbildung 129: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **MD**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)* 115
*Abbildung 130: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **HAL**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)* 115
*Abbildung 131: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **HAL**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)* 115
Abbildung 132: Magdeburg, Dom, Tonsur, Strebepfeiler, Sandstein-Musterfläche, mit Reinigungsmustern ... 116
Abbildung 133: Halle, Dom, Strebpfeiler, Sandstein-Musterfläche, mit Reinigungsmustern..... 116
Abbildung 134: Halberstadt, Dom, Strebpfeiler, Sandstein-Musterfläche, mit Reinigungsmustern 116
Abbildung 135: Bohrkernproben der Sandsteine HAL, Hbs, MD, Seitenansicht (Foto: KÖBERLE, 2025) 117
Abbildung 136: Bohrkernproben der Sandsteine HAL, Hbs, MD, Aufsicht mit ungereinigter und gereinigter Oberfläche (Foto: KÖBERLE, 2025) 117
Abbildung 137: Bohrkernanschliff HAL mit Bezeichnung der untersuchten Bereiche (Foto: KÖBERLE, 2025) 117
Abbildung 138: Bohrkernanschliff Hbs mit Bezeichnung der untersuchten Bereiche (Foto: KÖBERLE, 2025) 117
Abbildung 139: Bohrkernanschliff Hbs mit Bezeichnung der untersuchten Bereiche (Foto: KÖBERLE, 2025) 117
Abbildung 140: Hbs-Bohrkernunterseite (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)..... 118
Abbildung 141: Hbs- Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Si und Zr (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 118
Abbildung 142: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Auflage (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)..... 118
Abbildung 143: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Auflage nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 118
Abbildung 144: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 142 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 119
Abbildung 145: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung, Detail aus Abb 67 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 119
Abbildung 146: Bereich mit schwarzer Auflage (rechts) neben lasergereinigtem Bereich (links) (Videomikroskop) (Foto: KÖBERLE, 2025)..... 119

Abbildung 147: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 120
Abbildung 148: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68, REM-EDX-Mapping von Si und K (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 120
Abbildung 149: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68, REM-EDX-Mapping von Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 120
Abbildung 150: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68, REM-EDX-Mapping von Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 120
Abbildung 151: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 121
Abbildung 152: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 121
Abbildung 153: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 121
Abbildung 154: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung, REM-EDX-Mapping von Si, Ca und Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 121
Abbildung 155: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, REM-EDX-Mapping von P (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 122
Abbildung 156: MD-Bohrkernunterseite (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 122
Abbildung 157: MD-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von P (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 122
Abbildung 158: MD-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Ca (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) ... 122
Abbildung 159: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 122
Abbildung 160: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, REM-EDX-Mapping von Si, Ca und Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 122
Abbildung 161: HAL-Bohrkernunterseite (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 123
Abbildung 162: HAL-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Si und K (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 123
Abbildung 163: HAL-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von S (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 123
Abbildung 164: HAL-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Mg (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 123
Abbildung 165: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 124
Abbildung 166: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 124
Abbildung 167: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 124
Abbildung 168: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 124

Abbildung 169: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste aus Abb. 165 (REM-BSE), zerstörte Komponenten Qz und Fsp, zerstörtes Quarzkorn, tiefschwarze Bereiche zeigen präparationsbedingte Ausbrüche im Bereich der Kruste (Foto: KÖBERLE, 2025) 125
Abbildung 170: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste aus Abb. 165, REM-EDX-Mapping von Si und K (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 125
Abbildung 171: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste Abb. 165, REM-EDX-Mapping von S (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 125
Abbildung 172: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste aus Abb. 165, REM-EDX-Mapping von Ca und Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025) 125
Abbildung 173: Beispiel für Farbmessungen mit dem ColorReader: Bedienoberfläche am Smartphone (links), Beispiel für Messungen an Musterflächen des Strebepfeilers am Halberstädter Dom (rechts) 127
Abbildung 174, Abbildung 175: Halberstadt, Dom, südlicher Kreuzgang, Zustand nach Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen (rechts) Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS 129
Abbildung 176, Abbildung 177: Halberstadt, Dom, südlicher Kreuzgang, Voruntersuchung der ungereinigten Flächen (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts) 131
Abbildung 178: Halberstadt, Dom, südlicher Kreuzgang, digitalmikroskopische Aufnahmen: Reinigungsfläche 2.2.3 (oben links: ungereinigt, oben Mitte: Thunder Compact 0,2 J, trocken, oben rechts: Thunder Compact 0,2 J, nass; Reinigungsfläche 2.3.2 (unten links: ungereinigt, unten Mitte: Thunder Compact 0,45 J, trocken, unten rechts: Thunder Compact 0,45 J, nass; besonders bei Nassreinigung und hoher Reinigungsleistung treten Verfärbungen auf 133
Abbildung 179, Abbildung 180: Halberstadt, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Ostflügel, Zustand nach Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen (rechts), Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS 134
Abbildung 181, Abbildung 182: Halberstadt, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Ostflügel, Voruntersuchung der ungereinigten Flächen (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts): 135
Abbildung 183: Halberstadt, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Ostflügel, digitalmikroskopische Aufnahmen: Reinigungsfläche 2.3_1, Smart 300, 100% (links), Reinigungsfläche 2.3_2, Smart 300, 75% (Mitte), Reinigungsfläche 2.4_1, Smart 300, 50% (rechts), deutlich ist die zunehmende Verfärbung bei steigender Leistung und Nassreinigung zu beobachten 137
Abbildung 184, Abbildung 185: Halberstadt, Dom, Kapitelsaal, Kämpfer, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen 138
Abbildung 186, Abbildung 187: *Halberstadt, Dom, Kapitelsaal, Kämpfer, Voruntersuchung der ungereinigten Flächen (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts)* 139
Abbildung 188, Abbildung 189: Halberstadt, Dom, Nordportal, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen 140

Abbildung 190: *Halberstadt, Dom, Nordportal, digitalmikroskopische Aufnahmen: ungereinigte Fläche (Fläche 3.1, links), gereinigte Fläche (Fläche 2.3, Soliton Laser, maximale Leistung), deutlich ist die stärkere gelblich-braune Verfärbung sichtbar* 142
Abbildung 191: Röntgenpulverdiffraktogramm der Probe P1/2025 aus dem Bischofsgang 143
Abbildung 192, Abbildung 193: Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Südseite, Musterfläche I, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen: Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS 143
Abbildung 194, Abbildung 195: Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Südseite, Musterfläche I, ungereinigter Zustand (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts) 145
Abbildung 196, Abbildung 197: Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Südseite, digitalmikroskopische Aufnahmen: mit dem CL50 gereinigte Flächen, 60% Leistung (links), 80% Leistung (Mitte), 100% Leistung (rechts): die auffällige Streifentextur trat bei allen getesteten Leistungsstufen auf: 146
Abbildung 198, Abbildung 199: Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen: Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS 146
Abbildung 200, Abbildung 201 *Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, ungereinigter Zustand (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts)*..... 148
Abbildung 202: *Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, digitalmikroskopische Aufnahmen: Reinigungsfläche 2.1, Smart 300, 50% (links), Reinigungsfläche 2.2, Smart 300, 75% (Mitte), Reinigungsfläche 2.3, Smart 300, 100% (rechts), deutlich ist die zunehmende Verfärbung bei steigender Leistung zu beobachten* 149
Abbildung 203: *Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, digitalmikroskopische Aufnahmen: mit dem CL50 trocken gereinigte Flächen, 60% Leistung (oben links), 80% Leistung (oben Mitte), 100% Leistung (oben rechts), sowie nass gereinigte Flächen, 60% Leistung (unten links), 80% Leistung (unten Mitte), 100% Leistung (unten rechts): auch hier trat die auffällige Streifentextur bei allen getesteten Leistungsstufen auf*. 149
Abbildung 204: *Röntgenpulverdiffraktogramm der Probe MD_ES_NF (Musterfläche, Nordfassade)*..... 150
Abbildung 205, Abbildung 206 *Magdeburg, Dom, Nordfassade, Musterfläche III, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen: Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS*..... 150
Abbildung 207: *Magdeburg, Dom, Nordfassade, Entfernung mikrobiologisch aktiver Besiedlung (links ungereinigter, rechts gereinigter Zustand nach ca. 6 Monaten)* 152
Abbildung 208, Abbildung 209: Halle, Dom, Strebepfeiler Nordseite, Musterfläche III, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen 152
Abbildung 210: Halberstadt, Dom, „Aschegang“, Fläche mit biogener Besiedlung nach der Laserreinigung... 157
Abbildung 211: Halle, Dom, Sandsteinplatte: Vergleich der verschiedenen Reinigungsflächen..... 158
Abbildung 212: Halle, Dom, Sandsteinplatte: Vergleich der verschiedenen Reinigungsflächen, mikroskopische Aufnahmen: ungereinigt (links oben und unten), CL50, 100% (oben Mitte), Thunder Compact, 100% (oben rechts), Infinito Laser, 100% (unten Mitte), Smart 300 Laser 100% (unten rechts)..... 159
Abbildung 213: Messaufbau der Permeations-Widerstandsmessung (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann)..... 163

Abbildung 214: Musterflächen am Pfeiler der Tonsur im Kreuzgarten des Magdeburger Doms. Die blau umrahmten Sandsteinflächen wurden vor dem Lasern befeuchtet. 164
Abbildung 215: Musterflächen am Pfeiler im Kreuzgarten des Halberstädter Doms (Sandstein). 164
Abbildung 216: Musterflächen zur Laserreinigung von Auflagerungskrusten auf Sandstein am Magdeburger Dom (Tonsur, Kreuzgarten) mit geringer, mäßiger und starker Intensität, auf befeuchteter (links) und trockener Steinoberfläche (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann) 165
Abbildung 217: Musterflächen zur Laserreinigung von Auflagerungskrusten auf Sandstein am Halberstädter Dom (links) und von Umwandlungskrusten auf Halberstädter Muschelkalk (rechts) mit den Lasereinstellungen geringe und starke Intensität (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann) 166
Abbildung 218: Graffiti auf einer Berliner Haustür 183
Abbildung 219: Schichtenaufbau nach DIN 18363, Graffiti (Cyan) auf lichtgrauem Alkydharzlack 184
Abbildung 220*: Probeplatte der Phasen 1-3, PU-Acrylharzlack Lichtgrau* 185
Abbildung 221*: Probeplatte der Phase 4, Alkydharzlack links Feuerrot, rechts Enzianblau, mitte Holzsichtig* 185
Abbildung 222: Glanzwertverteilung der Proben nach der Schichtenabnahme 187
Abbildung 223*: Phase 2 und 3, Molotow Magenta auf PU-Acryllack* 188
Abbildung 224*: Reinigungserfolg aller Proben nach dem ΔE-Wert auf den verschiedenen Untergründen* 189
Abbildung 225*: Reinigungserfolg aller Proben nach dem ΔE -Wert der verschiedenen Graffitifarben* 190
Abbildung 226*: Phase 2, Proben 171 und 172, Molotow™ Cyan auf Alkydharzlack* 191
Abbildung 227: Phase 2, Proben 212 und 213, mtn™ Cyan auf Alkydharzlack 191
Abbildung 228*: Erster Entwurf beispielhafte Benutzeroberfläche Laserdatenbank.* 196
Abbildung 229*: Zwischenstand des Datenmodells als EER (Enhanced Entity-Relationship-Modell, eine erweiterte Form des ERM) in MySQLWorkbench. Quelle: Bach, von Baudissin 2025.* 201
Abbildung 230*: Oberfläche Webauftritt Laserdatenbank. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.* 202
Abbildung 231*: Eingabemaske zur Projektanlegung. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.* 204
Abbildung 232: Direkte Dateiensuche. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025. 205
Abbildung 233 205
Abbildung 234*: Suchmöglichkeiten der User*innen. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.* 205
Abbildung 235*: Beispielhafte Anzeige für den Infinito Laser (Abbildung aufgenommen während des Arbeitsprozesses). Quelle: Nicolai Bach 2025* 205
Abbildung 236*: Materialansicht Eiche. Quelle: Bach 2025.* 206
Abbildung 237: Beispiel eines Beitrages in der Lokalpresse. 209
Abbildung 238: Während der theoretischen Einführung. 211
Abbildung 239: Während des Praxisteils. 211

Abbildung 240: Tagungsflyer. 214

Tabellen

Tabelle 1 Probenbeschreibung: 100
Tabelle 2: Probenbeschreibung 104
Tabelle 3: Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an einer **ungereinigten** Sandsteinoberfläche eines Bohrkerns der Musterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Angabe in Elementprozent 111
Tabelle 4: Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an einer **gereinigten** Sandsteinoberfläche eines Bohrkerns der Musterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Angabe in Elementprozent 112
Tabelle 5: Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an der Unterseite eines Sandsteinbohrkerns (im Stein) der Musterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Angabe in Elementprozent 112
Tabelle 6: Proben 117
Tabelle 7: Halberstadt, Dom, Kreuzgang, Kennwerte der Reinigungsflächen 129
Tabelle 8: *Halberstadt, Dom, Kreuzgang, Bewertung der Laserreinigungsgeräte* 132
Tabelle 9: Halberstadt, Dom, Strebepfeiler, Kennwerte der Reinigungsflächen 134
Tabelle 10: Halberstadt, Dom, Strebepfeiler, Bewertung der Laserreinigungsgeräte 136
Tabelle 11: Halberstadt, Dom, Alter Kapitelsaal, Kennwerte der Reinigungsflächen 138
Tabelle 12: *Halberstadt, Dom, Alter Kapitelsaal, Bewertung der Laserreinigungsgeräte* 139
Tabelle 13: Halberstadt, Dom, Nordportal, Kennwerte der Reinigungsflächen 140
Tabelle 14: Halberstadt, Dom, Nordportal, Bewertung der Laserreinigungsgeräte 141
Tabelle 15: *Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Kennwerte der Reinigungsflächen* 144
Tabelle 16: *Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Bewertung der Laserreinigungsgeräte* 145
Tabelle 17: *Magdeburg, Dom, Strebepfeiler Tonsur, Kennwerte der Reinigungsflächen* 147
Tabelle 18: *Magdeburg, Dom, Strebepfeiler Tonsur, Bewertung der Laserreinigungsgeräte* 148
Tabelle 19: Magdeburg, Dom, Nordfassade, Kennwerte der Reinigungsflächen 151
Tabelle 20: Halle, Dom, Strebepfeiler, Kennwerte der Reinigungsflächen 153
Tabelle 21: Halle, Dom, Strebepfeiler, Bewertung der Laserreinigungsgeräte 154
Tabelle 22: Halle, Dom, Sandsteinplatte, Kennwerte der Reinigungsflächen 155
Tabelle 23: Bewertung der Reinigungsflächen 157
Tabelle 24: *Bewertung der Reinigungsflächen* 158

Tabelle 25: Tonsur, Kreuzgarten, Magdeburger Dom. Übersicht der Permeationswiderstandswerte der krustenreduzierten Flächen mit der jeweiligen Lasereinstellung im Vergleich zum Wert der ungereinigten Kruste (Fläche 1) (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann) 165
Tabelle 26*: Die besten Proben der verschiedenen Graffitmarken und deren Farben* 186
Tabelle 27*: Erster Entwurf Beispieldatensatz Laserdatenbank.* 195
Tabelle 28*: Auflistung der Materialien von Träger und Fassung/Beschichtung innerhalb des Forschungsprojektes* 198
Tabelle 29*: Auflistung der Schadbilder innerhalb des Forschungsprojektes.* 199

Projektkennblatt

06/02

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

AZ	**35765/01**	Referat	**45**	Fördersumme:	**124.993 €**

Antragstitel	**„Optimierung der Einsatzmöglichkeit von Lasertechnik zur Reinigung von historischen Oberflächen von Ablagerungen sowie von mikrobiologisch aktiven Besiedlungen am Halberstädter Dom“**			
Stichworte	Denkmal/Kulturgüterschutz			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)	
3 Jahre, 10 Monate	**01.11.2021**	**30.09.2025**	**-**	
Zwischenberichte	halbjährlich			
Bewilligungsempfänger	Kulturstiftung Sachsen- Anhalt Am Schloss 4 39279 Gommern OT Leitzkau		Tel	039241/93452
			Fax	039241/93462
			Projektleitung	
			Hr. R. Lindemann Fr. S. Weigelt-Röseler	
			Bearbeiter	
			Fr. C. Michaelis	
Kooperationspartner	Corinna Grimm-Remus, Prof. Dr., Dipl. Restauratorin (FH), Magdeburg Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Halle/Saale (IDK e.V.) Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie, Halle/Saale Ulrich Bauer-Boremann, Bamberg			

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Seit den 1990iger Jahren ist der Halberstädter Dom ein wichtiger zentraler Forschungsgegenstand im Rahmen der Restaurierung von Bauzier und Ausstattungsschmuck aus Kalkstein.
Kernproblem ist die Umwandlung des Kalksteines in Gips verursacht durch schwefelsaure Luftverschmutzung der Industrialisierung und des Hausbrandes in Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte. Die Verwitterungsmechanismen sowie die sich daraus ergebenden Schadensbilder sind vielfältig und waren wiederholt Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten auch am Dom in Halberstadt. Als entscheidende Voraussetzung für die Konservierbarkeit dieser Oberflächen ist kontrollierte Dünnung bis hin zur Abnahme der aufliegenden Schmutzkrusten sowie die Öffnung der in Gips umgewandelten informationstragenden originalen Natursteinoberflächen. In diesem Zusammenhang spielt die Reinigungstechnologie für den Substanzerhalt der Oberfläche aber auch die Verbesserung der physikalischen Eigenschaften wie der Verbesserung der Penetrationsfähigkeit sowie die Reduzierung der hygrischen und thermischen Dehnung eine zentrale Rolle. Als eine der am häufigsten eingesetzten Reinigungstechnologie nimmt in diesem Zusammenhang die Laserreinigung einen immer höheren Stellenwert ein. Darüber hinaus zeigen die Erfahrungen der letzten Jahre, dass auf dem Gebiet der Laserreinigung am Denkmal und Kunstgut spezifischer gerätetechnischer sowie technologischer Optimierungs- und Anpassungsbedarf besteht. Leider liegen bisher keine auf die Art der Schmutzkrusten schriftlichen Parameterempfehlungen der Lasertechnik vor. Zusätzlich erschwert wird dies durch die Weiterentwicklung verschiedenster Geräte, welche im Bereich der Denkmalpflege zu Einsatz kommen. An dieser Stelle will das Forschungsvorhaben ansetzen und einen ersten Entwicklungsschritt vollziehen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Projekt wurden aktuell in der Denkmalpflege für verschiedene Reinigungsaufgaben eingesetzte Lasergeräte anhand von unterschiedlichen Musterflächen vergleichend getestet. Welches Gerät ist für welchen Zweck geeignet und was sind erfolgversprechende Einstellparamater? Im Mittepunkt der Betrachtungen stand der Halberstädter Dom mit seinen stark verkrusteten Kalksteinoberflächen. Aber auch Sandsteine an den Domen in Magdeburg und Halle sowie Alabasteruntergründe wurden systematisch untersucht. Ein wesentlicher Pfeiler für die Erfassung umfassender Ergebnisse bildeten verschiedene Qualifikationsarbeiten im Studiengang Konservierung und Restaurierung der FH Potsdam.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche Lasersysteme sowie variierende Prozessparameter an verschiedenen Natursteinen, insbesondere Sand- und Kalkstein, erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Laserreinigung grundsätzlich eine hohe Wirksamkeit hinsichtlich der Entfernung von Schmutzauflagerungen sowie mikrobiologischen Besiedlungen aufweist. Insbesondere bei moderaten Leistungsparametern konnten reproduzierbar gute Reinigungsergebnisse erzielt werden. Demgegenüber führte eine Erhöhung der Energiedichte vereinzelt zu unerwünschten Nebenwirkungen, wie ggf. Farbveränderungen oder auch einer zu hohen Öffnung des Porenraums, vor allem beim Sandstein. Hier besteht jedoch weiterer Untersuchungsbedarf.
Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war der Vergleich zwischen Trocken- und Nassreinigung. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Nassreinigung in vielen Fällen eine höhere Reinigungsleistung erzielt, jedoch zugleich mit einer stärkeren Veränderung der oberflächennahen Materialstruktur einhergehen kann. Der Reinigungserfolg erwies sich stark abhängig von den jeweiligen Ausgangsbedingungen der Oberflächen. Insbesondere bei stark salzbelasteten, durch kompakte Krusten überprägten Bereichen waren die erzielten Ergebnisse teilweise eingeschränkt. Ergänzend wurden physikalische Parameter wie die kapillare Wasseraufnahme und der Luftpermeationswiderstand untersucht, um Veränderungen der Materialeigenschaften infolge der Laserbehandlung zu quantifizieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Reinigung häufig mit einer Zunahme der Porosität einhergeht, was konservatorische Chancen impliziert. Zudem erweist sich die Untersuchungsmethode des Luftpermeationswiderstands als weiteres Instrument der Bewertung des Reinigungserfolges.
Ergänzend erfolgten Untersuchung zur Laserabnahme von Graffiti auf lackierten Holzoberflächen sowie verrußten Holzoberflächen. Hier zeigt sich, dass diese Methode grundsätzlich sehr effektiv sein kann. Im Vergleich zu traditionellen Reinigungsverfahren wie z.B. dem Einsatz von Lösemitteln bietet die Laserablation entscheidende Vorteile. Dazu zählen die selektive und kontrollierte Entfernung, die Möglichkeit, die Reinigungseinstellungen präzise zu wiederholen, und ein geringer Umwelteinfluss. Besonders vorteilhaft ist die berührungslose Bearbeitung, wodurch der Untergrund nur minimal beschädigt wird.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Regelmäßig wurde in der regionalen und überregionalen Presse durch abgehaltene Pressetermine über das Projekt informiert. Es erfolgten zudem Radio- und Fernsehbeiträge.
Um diese Technologie einem noch größeren Kreis anwendender Restaurator*innen zugänglich zu machen, bedarf es eines systematischen Erfahrungstransfers, der im Rahmen des DBU-Projekts im Sommer 2024 mit den „Laser-Tagen“ an der FH-Potsdam erfolgreich begonnen wurde Die für viele Anwender*innen interessanten Ergebnisse sind zusätzlich in vorbildlicher Weise in eine Datenbank im Sinne eines „Offenen Anwendungskataloges“ eingeflossen,
Die Ergebnisse wurden insgesamt in einem öffentlichkeitswirksamen Abschlusskolloquium am 20.11.2025 vorgestellt

Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Laserreinigung ein hohes Potenzial für die Anwendung in der Denkmalpflege besitzt. Gleichzeitig erfordert ihr Einsatz eine differenzierte, material- und schadensabhängige Anwendung. Die Auswahl geeigneter Geräte sowie die präzise Abstimmung der Prozessparameter sind entscheidend für den Erhalt der Originalsubstanz und die Qualität des Reinigungsergebnisses. Das Projekt leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung praxisorientierter Leitlinien und fördert den Wissenstransfer innerhalb der restauratorischen Fachpraxis.

1 Sybille Weigelt-Röseler: Vorwort und Danksagung

Die Antragstellung für das Laserprojekt resultiert aus dem vorherigen von der DBU finanzierten Forschungsprojekt, welches ebenfalls mit den Kooperationspartnern Frau Prof. Dr. Grimm-Remus und dem Institut für Diagnostik und Konservierung und weiteren Partnern beantragt und durchgeführt wurde. Der Titel des Projekts lautete: „Praxisorientierte Vorversuche sowie Notsicherungen zu modellhaften Fassungssicherung mit Hilfe einer Facing Technologie stark geschädigter, unrestaurierter, mittelalterlicher Skulpturen“.

Im vorgenannten DBU-Skulpturenprojekt sollten die wertvollen historischen Farbfassungen untersucht und gesichert werden. Die Farbfassungen der Skulpturen enthielten kaum noch Bindemittel, so dass die Farbpigmente, zusammen mit dem Staub verbacken auf den Oberflächen lagen. Außerdem gab es große Bereiche, bei denen sich die Farbfassungen in dünnen Schollen abgelöst hatten. Das Problem bestand nun darin, die starken Schmutzauflagerungen zu entfernen, ohne die wertvolle gefährdete Fassung zu reduzieren oder zu schädigen. Mit üblicher Methodik war den Jahrzehnten dicken Staubablagerungen nicht beizukommen. Hierbei stellte sich als schonende Reinigungsmethode zur Staubabnahme der Einsatz von Lasertechnik heraus.

Entscheidende Voraussetzung für die Konservierbarkeit der historischen Oberflächen ist eine kontrollierte Dünnung bis hin zur Abnahme der aufliegenden Schmutzkrusten. In diesem Zusammenhang spielt die Reinigungstechnologie für den Substanzerhalt der Oberfläche aber auch die Verbesserung der physikalischen Eigenschaften sowie die Reduzierung der hygrischen und thermischen Dehnung eine zentrale Rolle. Als eine der am häufigsten eingesetzten Reinigungstechnologie nimmt in diesem Zusammenhang die Laserreinigung einen immer höheren Stellenwert ein.

Ziel der praktischen Denkmalpflege und des Laser Forschungsprojektes ist es, den Umgang mit dieser Technologie einem größeren Anwenderkreis an Restauratoren zugänglich zu machen. Dazu bedarf es eines systematischen Erfahrungsaustausches.

Darüber hinaus zeigen die Erfahrungen der letzten Jahre, dass auf dem Gebiet der Laserreinigung am Denkmal (beispielsweise Fassaden, Portalen) und Kunstgut spezifischer, gerätetechnischer sowie technologischer Optimierungs- und Anpassungsbedarf besteht.

Hier setzt das Forschungsvorhaben an und wird einen ersten Entwicklungsschritt vollziehen.

2021 beantragte die Kulturstiftung Sachsen-Anhalt unter federführender Unterstützung von Frau Prof. Dr. Grimm-Remus sowie Herrn Dipl. Ing. Uwe Kalisch vom Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. das Forschungsprojekt: „Optimierung der Einsatzmöglichkeit von Lasertechnik zur Reinigung von historischen Oberflächen von Ablagerungen sowie von mikrobiologisch aktiven Besiedlungen am Halberstädter Dom“ bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt. Das eingereichte Projekt wurde positiv bewertet und genehmigt. Die Projektlaufzeit endete inklusive genehmigter Verlängerung am 30.09.2025.

In das Projekt brachten 4 Kooperationspartner ihr Know-how ein. Beteiligte des Projektes waren Frau Prof. Dr. Grimm-Remus, das vorgenannte Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen, Herr Bauer-Bornemann, das LDA mit Herrn Böhm und die Kulturstiftung Sachsen-Anhalt.

Mit der Funktion des Fachbeirates in diesem Projekt sowie bereits durch eine seit mehreren Jahren währende fruchtbare Zusammenarbeit mit Frau Prof. Dr. Jeannine Meinhardt und Studenten der FH Potsdam, Studiengang Konservierung und Restaurierung – Stein, hat sich eine hilfreiche Unterstützung bzw. Kooperation im Laserprojekt ergeben. Studenten konnten in Praxisseminaren, Bachelorarbeiten beispielsweise am Nordportal oder dem Kannenberg-Epitaph im Halberstädter Dom Erfahrungen und Erkenntnisse für das Projekt sammeln und haben das Laserprojekt beispielsweise mit dem Anlegen von Musterflächen, Untersuchungen, Auswertungen sowie technischem Know-how tatkräftig unterstützt. Auch dem Fachbereich Informationswissenschaften sei für die Unterstützung bei der Erstellung einer Datenbank ausdrücklich gedankt.

Ohne die Möglichkeit der Durchführung solcher Forschungsprojekte und der finanziellen Unterstützung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, könnte die Kulturstiftung solche Projekte nicht finanzieren. Diese Forschungen leisten einen wichtigen Beitrag zur Planung von dringend notwendigen Sanierungsleistungen, bei denen gerade die Reinigung verschiedener Oberflächen immer eine besondere Herausforderung darstellt. Damit dient diese Förderung dem Erhalt der wertvollen Denkmale und des Kulturgutes für die Nachwelt. Ich danke für die bereits seit mehreren Jahren sehr konstruktive Zusammenarbeit.

Ebenfalls möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. Grimm-Remus für Ihr Engagement im und über das Projekt hinaus, die Organisation von Informationsveranstaltungen zum laufenden Projektstand sowie der Organisation des Abschlusskolloquiums bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank Frau Prof. Dr. Jeannine Meinhardt, der FH Potsdam, Fachbereich Konservierung und Restaurierung – Stein; für die Unterstützung des Forschungsprojektes sowie der zur Verfügung Stellung von Räumlichkeiten für Termine im Projekt sowie die Bereitstellung der Räumlichkeiten und des technischen Equipments für die Abschlussveranstaltung. Ohne Ihre tatkräftige Hilfe wäre Vieles im Projekt so nicht umsetzbar gewesen.
Im Weiteren bedanke ich mich bei allen Kooperationspartnern für die Unterstützung, Bereitstellung des notwendigen Equipments und wissenschaftlichen Untersuchungen und Erfahrungen.

Sybille Weigelt-Röseler
Kulturstiftung Sachsen-Anhalt

2 Karsten Böhm: Vorwort

Die Laserstrahlreinigung hat sich in den letzten Jahren fest in der restauratorischen Praxis etabliert. Zahlreiche erfolgreiche Anwendungsbeispiele an Denkmalobjekten belegen ihr Potenzial. Durch Fortschritte in der Gerätetechnik stehen heute mobile, robuste und leistungsfähige Systeme zur Verfügung. Beispielsweise haben Faserlichtwellenleiter die optischen Komponenten weitaus weniger störanfällig gemacht. Besonders im Hinblick auf die Mobilität sind sogenannte „Backpack-Laser“ zu nennen, die sowohl im Atelier als auch unter Baustellenbedingungen eingesetzt werden können. Mit dem technischen Fortschritt erweitert sich das Einsatzspektrum der Lasertechnik, vor allem wenn es darum geht, fragile oder komplex verschmutzte Oberflächen an Kunst- und Kulturgut berührungsfrei zu reinigen.

Parallel dazu haben systematische Untersuchungen von Naturwissenschaftlern und Restauratoren das Verständnis der physikalischen Wechselwirkungen des Lasers mit den unterschiedlichen Materialien erheblich vertieft. Diese Forschung hat wesentlich dazu beigetragen, anfängliche Skepsis in der Denkmalpflege abzubauen. Heute lassen sich Möglichkeiten, Grenzen und Risiken der Laseranwendung deutlich besser einschätzen. Gleichwohl erfordert der Einsatz von Lasertechnik bei der Bearbeitung von Kunst- und Kulturgut eine gründliche Voruntersuchung und eine qualifizierte Anwendung durch geschulte Fachkräfte. Thermische Nebenwirkungen wie Verfärbungen oder Strukturschäden sind insbesondere bei farbigen Fassungen oder empfindlichen Oberflächen möglich. Wie bei allen Verfahren in der Konservierung und Restaurierung ist eine verantwortungsbewusste Eignungsprüfung unabdingbar.

Beispielhaft sei das Projekt zur Fassungssicherung an den mittelalterlichen Skulpturen im Halberstädter Dom genannt, das 2024 mit einem in Fachkreisen hoch beachteten Kolloquium abgeschlossen wurde. Nur durch den Einsatz der Laserstrahltechnik konnte die äußerst fragile, bindemittelarme und stark verschmutzte Fassung der Pfeilerfiguren im Chor schonend gereinigt und anschließend konserviert werden. Vor einigen Jahren wäre dieses Ergebnis in der gezeigten Qualität nicht erreichbar gewesen.

Ich freue mich, dass es gelungen ist, ein weiteres Projekt in Sachsen-Anhalt zu initiieren, das die Möglichkeiten der Laserstrahltechnik zur Reinigung historischer Oberflächen einem breiteren Anwenderkreis von Restauratorinnen und Restauratoren zugänglich machen soll. Ziel ist es, anwendungsbezogene Daten und praktische Erfahrungen systematisch zu erfassen, die Datenbasis kontinuierlich zu erweitern, Erfahrungen zu bündeln sowie Risiken transparent zu benennen.

Das Projekt wurde gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt Bewilligungsempfänger war die Kulturstiftung Sachsen-Anhalt. Als Projektbeteiligte wirkten mit:

Frau Prof. Corinna Grimm-Remus,

Herr Ulrich Bauer-Bornemann,

das Institut für Diagnostik und Konservierung *an Denkmalen in* Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) namentlich Uwe Kalisch (i.R.), Henning Kersten und Matthias Zötzl.

Die denkmalfachliche Begleitung oblag dem Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie in Sachsen-Anhalt. Mein herzlicher Dank gilt allen, die zum Entstehen und Gelingen des Projekts beigetragen haben. Ein besonderer Dank geht an Frau Prof. Jeannine Meinhardt für ihre engagierte Projektbegleitung im Fachbeirat.

Gern erinnere ich mich an das erste Kolloquium im Mai vergangenen Jahres. Zahlreiche Kolleginnen und Kollegen folgten der Einladung nach Potsdam an die Fachhochschule und zeigten sich sehr angetan von dem Anwenderseminar zur Erprobung verschiedener Lasergeräte. Mit der Anschaffung eines eigenen Lasergeräts für den Fachbereich Konservierung/Restaurierung hält die Lasertechnik nun auch ganz unmittelbar Einzug in die Lehre. Nichts ist wertvoller, als theoretische Inhalte durch praktische Anwendungen zu ergänzen. So wächst hier eine Generation von Restauratorinnen und Restauratoren heran, die bereits im Studium mit diesem Werkzeug vertraut gemacht wird. Folgerichtig widmeten sich mehrere studentische Projekte der praktischen Anwendung des Laserverfahrens. Schon ein Blick in das Programm der heutigen Tagung zeigt die große Bandbreite der umgesetzten Projekte.

Wie steht es um den Einsatz der Lasertechnik in der restauratorischen Praxis? Häufig wird die Laserstrahlreinigung mit dem Verweis auf ökonomische Zwänge von vornherein zurückgestellt. Gerade hier sind die Restauratorinnen und Restauratoren gefordert, eine objektive Sicht und fachlich begründete Auswahl geeigneter Reinigungsverfahren zu treffen. Risiken und Nutzen der verschiedenen Methoden müssen stets im Sinne des Objekts sorgfältig abgewogen werden. Meine Erfahrungen in der Steinkonservierung zeigen, dass die Kombination unterschiedlicher Reinigungsverfahren unter Einbeziehung der Laserstrahltechnik häufig besonders überzeugende Lösungsansätze bietet. Gleichzeitig stellen die hohen Anschaffungskosten für Lasergeräte eine erhebliche Hürde für freiberuflich tätige Restauratorinnen und Restauratoren dar. Es bedarf grundsätzlicher Überlegungen, wie diese Hürde überwunden werden kann - etwa durch Sharing-Modelle im Kollegenkreis oder in Kooperation mit Kultureinrichtungen. Die Entwicklungen der vergangenen Jahre im Bereich der Laserstrahlreinigung sind jedenfalls bemerkenswert: Gerätetechnik, denkmalpflegerische Akzeptanz, wachsende Anwendungsaufgaben und die Ausbildungsbasis haben sich deutlich weiterentwickelt. Um die Technik jedoch einem breiteren Anwenderkreis zugänglich zu machen, sind weiterhin gezielte Anstrengungen erforderlich.

Karsten Böhm
Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt

3 Jeannine Meinhardt: Grußworte

Der Ansatz, ein von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördertes Forschungsvorhaben ins Leben zu rufen, das die derzeit auf dem Markt verfügbaren Reinigungslaser in Bezug auf ihre Reinigungsleistung und Effektivität miteinander vergleicht, um daraus einen praxisorientierten Leitfaden zu entwickeln, erwies sich als äußerst zeitgemäß. Das ursprüngliche Projektdesign wurde von der Restauratorin Prof. Dr. Corinna Grimm-Remus und Uwe Kalisch vom Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt entwickelt. Es sah die vergleichende Untersuchung verschiedener Verschmutzungsgrade auf unterschiedlichen Gesteinen an den Domen in Magdeburg, Halberstadt und Halle/Saale vor. Zahlreiche Musterflächen sind dort jeweils systematisch mit verschiedenen Reinigungslasern im Vergleich angelegt worden. Zur Halbzeit des Projekts wurden an der FH Potsdam, im Studiengang Konservierung und Restaurierung, die Lasertage veranstaltet, an denen sowohl Praktiker*innen als auch Studierende teilnahmen - an einen Ort, an dem Theorie, Praxis und Ausbildung seit vielen Jahren eng miteinander verbunden sind. Dieser Erkenntnistransfer zu den verschiedenen Geräten und der Möglichkeit, an eigenen Objekten Reinigungsversuche zu machen, fand bei allen Teilnehmenden großes Lob. Methodisch-analytisch sollte mit dem Projekt angeknüpft werden an das umfassende Forschungsvorhaben „Laserstrahlreinigung“ (AZ 18701-01), das knapp 20 Jahre zuvor bereits von der DBU gefördert worden war. Leider ging jedoch Uwe Kalisch in der Frühphase des Projekts in den Ruhestand, so dass analytisch an seine solide und kreative Vorgehensweise erst wieder versucht werden musste, anzuknüpfen. An dieser Stelle gelang es durch die Beteiligung des Studienganges Konservierung und Restaurierung der FH Potsdam, sowohl messtechnisch als auch durch zusätzliche Materialstudien, die im Rahmen qualitätsvoller Bachelor- und Masterthesen erarbeitet worden sind, das Projekt inhaltlich zu unterstützen und anzureichern. In meiner Funktion als wissenschaftliche Fachbeirätin dieses Projekts war es mir möglich, eine wertvolle Verbindung herzustellen und eine Win-Win-Situation zu schaffen. So sichern praxisrelevante Fragestellungen ergänzend zu unseren spezialisierten Studienangebot die Qualität unserer Ausbildung. Neben den im Projekt ursprünglich vorgesehenen verschiedenen Fassadenflächen sind am Halberstädter Dom verschiedene Objekte unterschiedlicher Materialien in das DBU-Projekt integriert worden. Zu nennen ist die Bachelorarbeit von Julia Laposí zu *Machbarkeit und Risiken der Laserreinigung von Alabaster am Beispiel des Epitaphs für den Domdekan Caspar von Kannenberg im Dom zu Halberstadt* sowie das Masterprojekt von Toni Lorenz, das u.a. die Laserreinigung an den vergoldeten Metallelementen des Friedrich-Epitaphs des Halberstädter Doms umfasste. Auch in der Fachrichtung Holz sind zwei Qualifikationsarbeiten dem Einsatz des Reinigungslasers gewidmet worden. Zum einen die Masterthesis von Gregor Heinrich *Graffiti auf lackiertem Holz. Möglichkeiten der Entfernung durch Lasertechnik* und die Bachelorthesis von Helena-Sophie Weßling *Reinigung von Verrußungen auf Holz mittels Lasertechnik - Vergleichende Betrachtung von Parametern auf verschiedenen Beschichtungen und Holzarten.*

Im konservatorischen Sinne geht es bei der Laserreinigung, so wie bei anderen Verfahren auch, um die Entfernung reaktiver, schädigender Substanzen. Dabei kann es sich einerseits um lose auflagerndes Material oder fest verbackene Substanzen oder Krusten handeln. Das Ziel der Reinigung, unter Wahrung restaurierungsethischer

Aspekte, konzentriert sich im konservatorischen Sinn auf die Öffnung des Porenraums und die Reduktion von thermischem und hygrischem Stress, indem dunkle Verfärbungen bzw. diese Krusten dezimiert werden. Zwischen konservatorischer Notwendigkeit und ästhetischen Ansprüchen liegt natürlich ein spannungsreiches Feld, in dem auch eine Diskussion der Denkmalwerte Berücksichtigung finden muss. An dieser Stelle setzt die Bachelorarbeit von Susann Hofmann *Validierung und Praxistauglichkeit des Luft-Permeameters zur Bestimmung der oberflächennahen Luftdurchlässigkeit* an, ein hochsensibles Messverfahren, mit dem die Veränderungen im oberflächennahen Porenraum zerstörungsfrei bestimmt und bewertet werden können. Weiterhin hat die Masterstudentin Lale von Baudissin zusammen mit Prof. Dr. Corinna Grimm-Remus in Kooperation mit dem Fachbereich Informationswissenschaften der FH Potsdam die Erstellung einer Datenbank zur zukünftigen anwendungsfreundlichen Nutzung der zahlreichen Projektdaten entwickelt.

Die Kooperation zwischen Praxis und Hochschule unter der Schirmherrschaft der Kulturstiftung Sachsen-Anhalt, die stets um einen reibungslosen Projektablauf bemüht war, und für deren Vertrauen ich mich an dieser Stelle ebenso bedanken möchte wie für das große Engagement von Prof. Dr. Corinna Grimm-Remus und allen beteiligten Studierenden der FH-Potsdam, hatte sehr gute Resultate zur Folge. Gemeinsam sind aus der Projektidee praxisrelevante, umfassende Ergebnisse entwickelt worden. Wir haben uns sehr gefreut, dass die Kulturstiftung Sachsen-Anhalt die FH Potsdam auch als Austragungsort für das Abschlusskolloquium ausgewählt hat, das in einem prall gefüllten Hörsaal im November 2025 stattfand. Im Zeichen der Laserreinigung wurde die FH Potsdam so wiederholt zum Ort des fachlichen Austauschs und der Vernetzung.

Prof. Dr. Jeannine Meinhardt
Fachrichtung Stein
Studiengang Konservierung und Restaurierung
FH Potsdam
Wissenschaftliche Fachbeirätin DBU-Projekt

2 Corinna Grimm-Remus: Einführung

2.1 Ausgangslage und Ziele des Projektes

Seit den 1990er Jahren ist die Laserreinigung in der Restaurierung und Denkmalpflege intensiv untersucht worden, unter anderem in mehreren von der Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekten (1996–1999, 1998–2001). Insbesondere naturwissenschaftliche Untersuchungen haben wesentlich dazu beigetragen, anfängliches Misstrauen gegenüber dem Verfahren abzubauen. Vor allem in der Natursteinreinigung konnten Sicherheit, Erfahrung und methodische Standards deutlich erweitert werden. Dennoch bestehen in der Praxis weiterhin Vorbehalte, etwa hinsichtlich einer vermeintlich zu starken Aufhellung *(„so hell nicht“*), hoher Kosten oder der schwierigen Berücksichtigung in Ausschreibungen.

Der Einsatz von Reinigungslasern bleibt daher häufig auf Einzelobjekte beschränkt oder ist davon abhängig, ob eine staatliche oder private Restaurierungswerkstatt über ein eigenes Lasergerät verfügt. In vielen Leistungsverzeichnissen wird die Methode nach wie vor nicht explizit berücksichtigt. Zudem erschweren unterschiedliche Gerätetypen mit variierenden Leistungs- und Einsatzspektren eine verlässliche Kalkulation.
Ziel des geplanten Projekts ist keine weitere Grundlagenforschung, sondern ein praxisorientierter Vergleich verschiedener Anwendungsfälle. Unterschiedliche Reinigungsziele sollen unter Einsatz verschiedener Lasersysteme untersucht und gegenübergestellt werden. Dabei werden diverse Substrate wie Stein, Holz oder Metall berücksichtigt und perspektivisch erweitert. Ein besonderer Fokus liegt auf der Unterstützung freiberuflicher Restauratorinnen und Restauratoren, die sich in der praktischen Anwendung häufig unsicher sind: Welches Gerät eignet sich für welches Material und welche Art von Verschmutzung? Welche Einstellparameter versprechen ein optimales Ergebnis?

Zur Verbesserung des Wissenstransfers soll insbesondere eine projektspezifisch entwickelte Datenbank beitragen, in der Anwendungsbeispiele, Parameter und Ergebnisse systematisch dokumentiert und zugänglich gemacht werden. Begleitend waren „Laser-Tage“ im Jahr 2024 integriert, um den fachlichen Austausch zu fördern. Darüber hinaus soll die Laserreinigung verstärkt als Bestandteil der restauratorischen Lehre etabliert werden, etwa durch die Präsentation einschlägiger Abschlussarbeiten.

2.2 Methodische Vorteile und Wirkungsweise

Die Laserreinigung bietet in der Konservierung und Restaurierung von Kulturgut zahlreiche Vorteile: Sie ermöglicht das berührungslose Entfernen von Schmutzauflagerungen und ist somit besonders für geschädigte oder entfestigte Untergründe geeignet. Die Abtragung erfolgt präzise und selektiv, dünne Schichten können im Mikrometerbereich (bis etwa 10 µm) kontrolliert entfernt werden. In vielen Fällen ist das Verfahren effizienter als konventionelle Methoden.
Zudem gilt es als umweltfreundlicher als chemische oder abrasive Verfahren, da keine Verbrauchsmaterialien erforderlich sind. Trotz hoher Anschaffungskosten können sich Lasergeräte langfristig als kosteneffizient erweisen; zudem besteht die Möglichkeit der Gerätemiete.
Voraussetzung für den sicheren Einsatz sind geeignete persönliche Schutzausrüstung (PSA), da es sich in der Regel um Laser der Klasse 4 handelt, sowie eine fundierte Schulung der Anwenderinnen und Anwender.

Die Wirkungsweise der Laserreinigung basiert auf der kurzzeitigen Energieeinwirkung gepulster Laserstrahlung. Die vom Schmutz absorbierte Energie führt zu schneller Verdampfung, Sublimation oder unmittelbarer thermischer Ausdehnung, wodurch die Adhäsionskräfte zwischen Verunreinigung und Untergrund überwunden werden – ein Prozess, der als Laserablation bezeichnet wird. Mit zunehmender thermischer Energie geraten die Schmutzpartikel in starke Schwingungen und lösen sich schließlich von der Oberfläche.
Dabei wirken photothermische und photomechanische Effekte zusammen. Der photothermische Effekt beschreibt die Umwandlung von Lichtenergie in Wärme, die zur Verdampfung, Zersetzung oder thermischen Ausdehnung der Schmutzpartikel führt. Der photomechanische Effekt umfasst die Entstehung von Stoßwellen und Mikroschockfronten, die Vibrationen an der Substratoberfläche erzeugen und die Ablösung der Verunreinigungen unterstützen. Die Kombination beider Effekte bestimmt die sogenannte Ablationsschwelle.
Während des Ablationsprozesses bildet sich an der Grenzfläche kurzzeitig ein Plasma. Es treten hohe, jedoch sehr kurzzeitige Temperaturspitzen auf, die in der Regel nicht vollständig in den Untergrund übertragen werden – abhängig von dessen Wärmeleitfähigkeit. Die Stabilität und Steuerbarkeit des Prozesses hängen maßgeblich von der Fluenz (Energie pro Fläche, J/cm²) sowie von der Oberflächenabsorptivität ab. Da der Träger beziehungsweise das Substrat einen Teil der Energie reflektiert oder ableitet, wird eine selektive Abtragung ermöglicht.

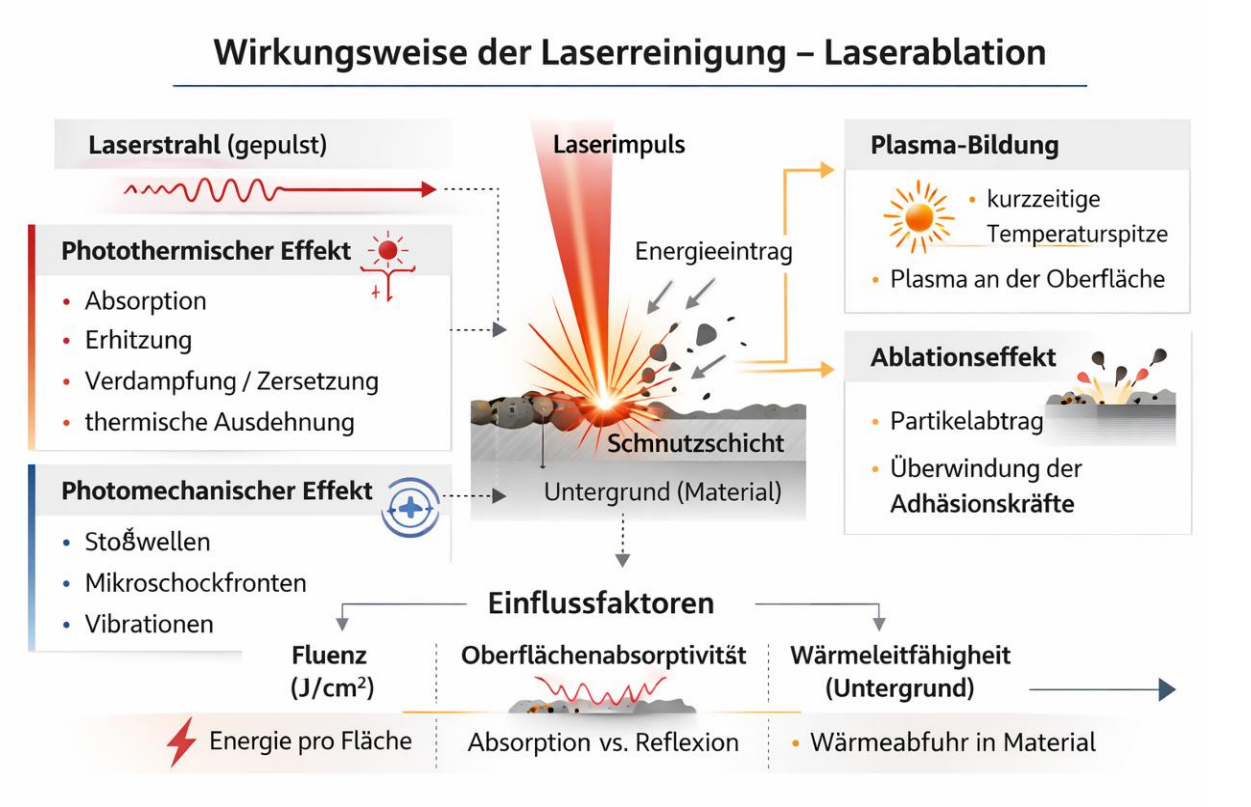


Abbildung 1: Darstellung des Reinigungsprinzips, KI-generiertes Bild.

Literatur:

AURAS et al. 2018:
Michael Auras, Ellen Riemer, Karin Schinken, Anna Steyer, Matthias Steyer: Die Große Mainzer Jupitersäule. Von der Computertomografie zum Restaurierungskonzept. In: Die Denkmalpflege. Thema: Restaurierung. Jahrgang 76/Heft 1. 111. Jahrgang. Hrg. Deutscher Kunstverlag. Berlin 2018. S. 16-24.

BRINKMANN, GRAUE, VERBEEK 2009:
Susanne Brinkmann, Birte Graue, Christina Verbeek: Anwendung eines Faserlasers zur Reinigung altägyptischer Wandmalereien und farbig gefasster Kalksteinoberflächen. In: Laseranwendung in Restaurierung und Denkmalpflege. Grundlagen, Chancen, Perspektiven (Osnabrück 30.-31.-1.2009). Hrg. Günter Wiedemann, Udo Klotzbach, Ulrich Bauer-Bornemann. Stuttgart 2009., S. 67-82.

A. Dajnowski: Laser cleaning of the Nickerson Mansion: The first building in the US entirely cleaned using laser ablation. In: LACONA VII proceedings, Lasers in the Conservation of Artworks VII, Madrid 17.-21 September 2007. S. 209-2014.

DAJNOWSKI, JENKINS, LINS 2009:

Andrzej Dajnowski, Adam Jenkins, Andrew Lins: The use of Lasers for Cleaning Large Architectural Structures. In: APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology. Vol. 40, No. 1, 2009. Hrg. Association for Preservation Technology International (APT).

DONGES 2007:
Axel Donges: Physikalische Grundlagen der Lasertechnik. Aachen 2007.

EICHHORN 2013:
Marc Eichhorn: Laserphysik. Grundlagen und Anwendungen für Physiker, Maschinenbauer und Ingenieure. Berlin Heidelberg 2013.

EICHLER, EICHLER 2015:
Jürgen Eichler, Hans Joachim Eichler: Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen. Berlin Heidelberg 82015.

EIPPER 2013:
Paul-Bernhard Eipper: Reinigung von Farboberflächen mit Laserstrahlen. In: Handbuch der Oberflächenreinigung. Hrg. Paul-Bernhard Eipper. München ³2013, S. 147-152.

ETTL 2014:
Hans Ettl: Reinigung der Porta Nigra aus naturwissenschaftlicher Sicht. In: Reinigung der Porta Nigra?. Naturwissenschaftliche und restauratorische Aspekte zur Verschwärzung und Reinigung der Sandsteine. IFS-Bericht 47/2014. Hrsg. Institut für Steinkonservierung E.V. Mainz 2014. S. 63-76.

GORETZKI 1998:
Lothar Goretzki: Laserreinigung in der Denkmalpflege. Untersuchungen zum Abtrag von Krusten und Filmen von mineralischen Oberflächen. Stuttgart 1998.

HARTLEITNER 2014:
Walter Hartleitner: Reinigung der Port Nigra? – Restauratorische Zustandsbewertung und Methodenerprobung zur Natursteinreinigung. In: Reinigung der Porta Nigra?. Naturwissenschaftliche und restauratorische Aspekte zur Verschwärzung und Reinigung der Sandsteine. IFS-Bericht 47/2014. Hrsg. Institut für Steinkonservierung E.V. Mainz 2014. S. 29-48.

KLOTZBACH 2009:

Udo Klotzbach: Verfahrensgrundlagen / Gerätetechnik. In: Laseranwendung in Restaurierung und Denkmalpflege. Grundlagen, Chancen, Perspektiven. Hrsg. Günter Wiedemann, Udo Klotzbach, Ulrich Bauer-Bornemann. Stuttgart 2009. Osnabrück 2009

NIMMRICHTER 1998:
Johann Nimmrichter: Erfahrungen mit der Lasertechnik in der Konservierung von Steinskulpturen und Farbfassungen. In: Restauratorenblätter Bd 18. Gefasste Skulpturen 1. Mittelalter. Hrsg. Österreichische Sektion des IIC (International institute for conservation of historic and artistic works). Klosterneuburg, Wien 1998, S. 107-118.

SEBALD 2014:
Eduard Seebald: „…ein Tor …aus außerordentlichen Steinen…“ Bemerkungen zur Bau- und Restaurierungsgeschichte der Porta Nigra und der Kirche St. Simeon. In: Reinigung der Porta Nigra?. Naturwissenschaftliche und restauratorische Aspekte zur Verschwärzung und Reinigung der Sandsteine. IFS-Bericht 47/2014. Hrg. Institut für Steinkonservierung E.V. Mainz 2014. S. 1-14.

WIEDEMANN, KUSCH 2002:
Günter -Wiedemann, Hans-Günter Kusch: Der Laserstrahl als Werkzeug für den Restaurator. In: Laserstrahlreinigen von Natursteinen. Hrg. Heiner Siedel, Günter Wiedemann. Stuttgart 2002, S. 25-43.

3 Ulrich Bauer-Bornemann: Reinigungslaser in der Steinrestaurierung - 30 Jahre Anwendung in Deutschland

Länder wie Italien und Frankreich hatten schon einen Erfahrungsvorsprung, als 1994 die ersten Geräte in Deutschland kommerziell zum Einsatz kamen. Seit den 60-iger Jahren kamen bei der Steinreinigung aus der industriellen Anwendung stammende Reinigungslaser zum Einsatz, die gute Ergebnisse vor allem bei den dort vorherrschenden hellen Denkmalgesteinen lieferten. Das Interesse, diese neuartige Technologie auch in Deutschland einzusetzen, wuchs in Fachkreisen, aus Frankreich wurden für probeweise Reinigungen entsprechende Geräte herangezogen. Auch bei unseren Gesteinen gab es vielversprechende Resultate, die zu einer Kaufentscheidung führten. Der beginnende Markt war geprägt von Unsicherheit, Unwissenheit und einer gewissen Aufbruchstimmung. Einige Firmen (und Hersteller) versprachen damals eine neue Ära der Flächenreinigung mittels Laser, die gezeigten Resultate waren aber leider oft mit Schäden verbunden.

Schon bald kam der Ruf nach einer systematischen Überprüfung der Einsatzmöglichkeiten mit naturwissenschaftlicher Begleitung von Seiten der Denkmalpflege und der Restauratoren.

Nicht die größtmögliche Flächenleistung, sondern das bestmögliche Ergebnis sollte angestrebt werden. Die Grenzen und Gefahren der Laseranwendung sollten natürlich dabei ebenso erkannt werden.

Das wir heute über Laserreinigung als restauratorisches Werkzeug mit überwiegend gelungenen Ergebnissen reden, verdanken wir aus mehreren Gründen vor allem der DBU. Mit einer Vielzahl von geförderten Projekten ermöglichte sie die seriöse Einführung dieser Technologie in Deutschland, restauratorisch und wissenschaftlich abgesichert auf hohem Niveau. Schon 2002 konnten erste Ergebnisse der geförderten Zusammenarbeit in einem Leitfaden veröffentlicht werden. (Abbildung 2)



Abbildung 2

Dank der Unterstützung der DBU seit 1997 und einer Fördersumme von 2.5 Millionen Euro, konnte auf einer Tagung 2009 in Osnabrück die ganze Bandbreite der Laseranwendung vorgestellt und publiziert werden. (Abbildung 3)

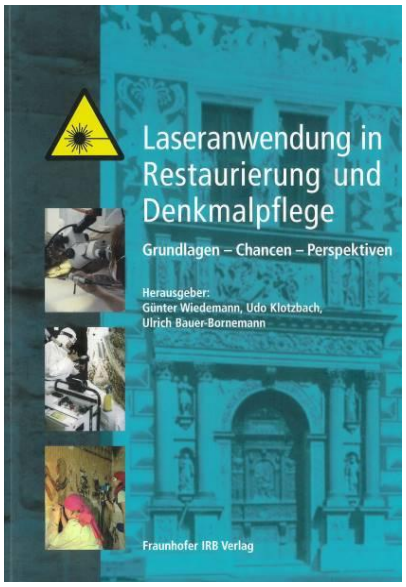


Abbildung 3

Parallel dazu fand national der Erfahrungsaustausch im ‚Laserforum‘ statt, das von Günter Wiedemann (Fraunhofer Institut Dresden) und mir ins Leben gerufen wurde. International sorgten die ‚LACONA‘-Tagungen für eine breite Vernetzung der Erkenntnisse.

Während anfangs überwiegend Geräte aus Frankreich Verwendung fanden, erweiterte sich bald mit dem wachsenden Markt das Angebot. (Abbildung 4-6)

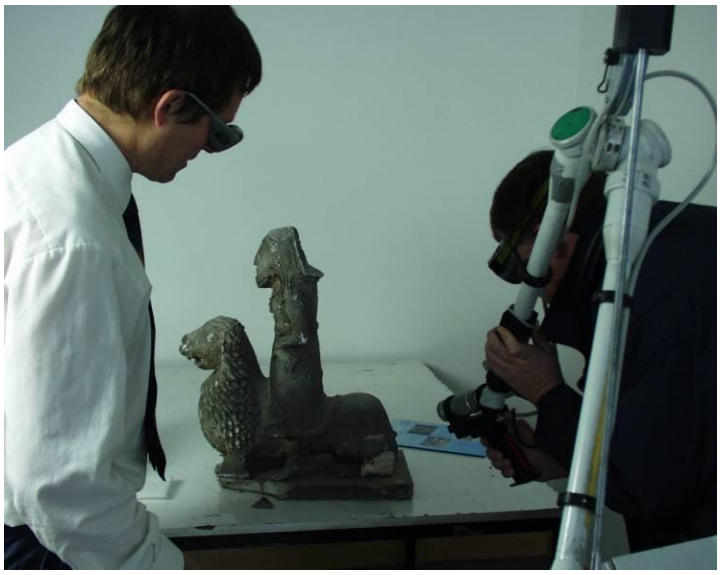


Abbildung 4



Abbildung 5

Hersteller / Laserparameter	Lynton Laser (England)	Quanta Systems / El. En SpA (Italien)				
Typ	Phönix R10	Palladio Compact	smart clean2	EOS 1000	Bramante	Thunder Art
Wellenlänge [nm]	1064; 532	1064; 532	1064	1064	1064	1064; 532; 355
Pulsdauer [ns]	5 bis 10	8	50000 bis 110000	60000 bis 120000	6	6; 5; 4
Pulsenergie [mJ]	360	450	2000	50-500	1600	1000; 550; 200
Pulsspitzenleistung [W]	$5*10^7$	$5,625*10^7$	$4*10^8$	$8,3*10^9$	$2,66*10^8$	$1,66*10^8$
max. Pulsfrequenz [Hz]	50	20	30	20	20	20
mittl. Leistung [W]	2,5 bis 25	9	60	10	32	20
Funktionsprinzip	qs - lampengepumpt	qs - lampengepumpt				
Abbildung (ähnlich)						
Link	http://www.lynton.co.uk	http://www.elengroup.com/				

clean lasersystem (Deutschland)		Lambda Scientifica (Italien)			
CL 20 BackPack	CL 150, CL 300, CL 500	ARTLASER	ARTLIGHT II	ARTDUO	ARTINY
1050 bis 1064	1064	1064	1064	1064 (532)	1064 (532)
> 100	> 100	10	8 (oder 500µs)	10	20
~ 0,25	< 100	< 350	150	350	300
< $2,5*10^7$		$2,5*10^7$	$1,875*10^{10}$	$3,5*10^{10}$	$1,5*10^{10}$
40000 bis 150000	> 1000	33	20	10	5
20	> 150 bis 500	11,55	3	3,5	1,5
Faserlaser	qs - cw - gepumpt	qs - lampengepumpt			
 		   			
http://www.clean-lasersysteme.de/		http://www.lambdascientifica.com/default.asp?lingua=eng			

Quantel S.A. (Frankreich)		Solition (Deutschland)	
Laserblast 60	Laserblast 500	LT 300	Artlight NL 102, NL 201
1064		1064	
20	10	7 bis 8	6
< 200	< 350	< 300	> 300; > 1000
$8*10^8$			> $5*10^7$; $1,67*10^8$
		< 30	20
8	20	10	6; 20
qs - lampengepumpt		qs - lampengepumpt	
 		 (Vertrieb und Wartung von Gebrauchtgeräten)	
www.quantel-laser.com		www.soliton-gmbh.de	

Abbildung 6

Eigentlich immer handelte es sich um Nd:Yag Laser mit 1064 nm Wellenlänge, meist mit Spiegelarm, aber auch mit Glasfaserkabel zum Transportieren der Lichtengerie. Von der Konzeption her vergleichbare Reinigungslaser kamen nicht nur aus Frankreich, Hersteller in Italien und England brachten ebenfalls relativ baustellentaugliche Geräte auf den Markt.

Bei den Punktlasern mit Spiegelarm (Abbildung 7) lieferte eine Blitzlampe die Lichtenergie, zu deren Kühlung bei allen Gerätetypen eine Wasserkühlung meist in einer gesonderten Komponente erforderlich war. Die gleiche Laserquelle lieferte den Strahl in die Glasfaserkabel, auch hier war eine externe Kühlung Standard.

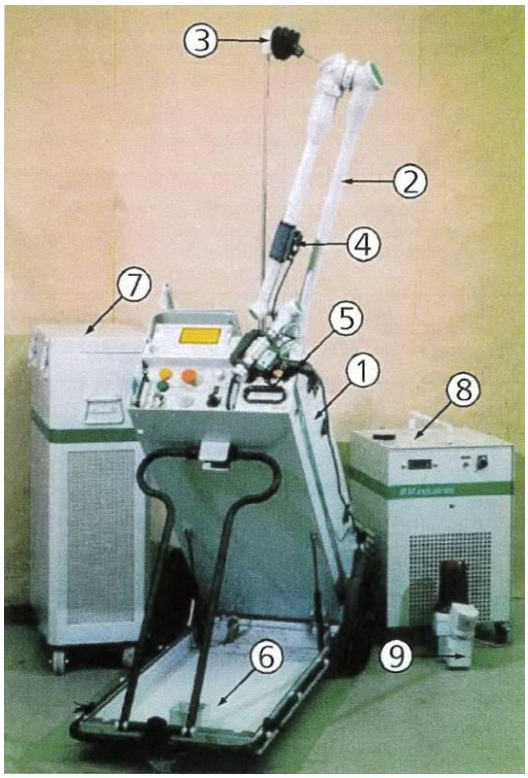


Abbildung 7

Die Übertragung mit Glasfasern (Abbildung 8) bringt besseres Handling durch meterlange Zuleitungen, die verfügbare Energie ist jedoch pro Faser limitiert und wird auf mehrere Glasfasern verteilt, um eine vergleichbare Gesamtleistung zu erhalten.

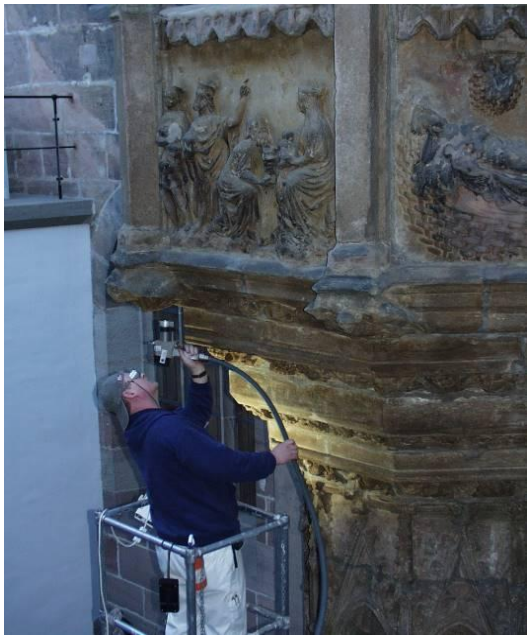


Abbildung 8

Die höhere Energiedichte der ersten Kategorie wird mit dem Nachteil der Unhandlichkeit und Empfindlichkeit der Spiegeljustierung erkauft, was beim mobilen Einsatz auf Gerüsten nicht zu unterschätzen ist.

Damals lagen die Kosten eines Gerätes zwischen 65.000 und 100.000 Euro. Durch die sperrigen Formate und das hohe Gewicht war der Einsatz mit aufwändiger Logistik verbunden, Transporte zum Einsatzort verlangten entsprechende Fahrzeuge und geeignete Gerüste. (Abbildung 9)



Abbildung 9

Bei jeder Laserreinigung war immer die Arbeitssicherheit (Abbildung 10, 11) ein wichtiger Aspekt. Die Schutzausrüstung der Anwender mit Spezialbrille und Atemmaske, die Absaugung des abgereinigten Staubes und die Absicherung des Umfeldes waren zwingende Vorgaben. Bei den bereits genannten Forschungsprojekten der DBU war dieses Thema Gegenstand ausführlicher Untersuchungen, die Gefahr durch lungengängige Feinstäube konnte deutlich nachgewiesen werden.



Abbildung 10



Abbildung 11

Der Wunsch nach einer Verbesserung der Gerätetechnik wurde bei der DBU-Tagung 2009 formuliert, die Geräteentwicklung hat seither einiges in dieser Richtung realisiert.

Die Steuerungen erfolgten früher mit Schaltern und Drehknöpfen, inzwischen ist die Bedienung mit Touchscreen weit unempfindlicher. Die Abmessungen und der Preis konnten reduziert werden, speziell für die restauratorische Reinigung konzipierte Lasergeräte kosten heute ca. 35.000 – 50.000 Euro. (Abbildung 12)



Abbildung 12

Der Punktlaser wurde durch den Einbau einer Luftkühlung kleiner und handlicher, was für den Gerüsteinsatz von großem Vorteil ist.

Einen deutlichen Fortschritt brachte der Faserlaser mit Dioden als Lichtquelle. Die dotierte Lichtleitfaser als aktives Medium kann viel mehr Energie transportieren, die erforderliche Kühlung muss weniger Leistung erbringen, dadurch sind Format und Gewicht deutlich geschrumpft. Darüber hinaus ermöglicht das meterlange Kabel einen flexiblen Einsatz z.B. auf Gerüsten und über Kopf.

Das Handstück bei diesen Geräten ist ergonomisch verbessert worden und wiegt ca. 1 Kilogramm, einige Hersteller haben die Steuerung in dieses Bauteil integriert. Der anfangs allein verfügbare Zeilenstrich (Abbildung 13, 14) eines horizontal hin und her bewegten Laserstrahls wurde durch vielerlei Konfigurationen der Bewegung abgelöst. Die Einwirkzeit kann variabel von 10 bis über 200 ns eingestellt werden, die Größe des Arbeitsfeldes reicht inzwischen bis etwa 70 x 70 mm und die Repetitionsrate von 1 – 500 kHz, die verfügbare Lichtenergie reicht von etwa 10 - 300 Watt. (Abbildung 15)



Abbildung 13



Abbildung 14



Abbildung 15

Eine Besonderheit stellt der in Deutschland entwickelte ‚Rucksacklaser‘ dar, der für kleinteilige Abreinigung leichter Verschmutzung bei niedriger Lichtenergie eingesetzt wird und besonders flexible Anwendung durch geringes Gewicht und Format ermöglicht.

Fazit:

Die in den letzten Jahren erfolgte Weiterentwicklung der Spiegelarm-Systeme zu besserer Baustellentauglichkeit und ihre variable Führung des Brennflecks machen sie zur guten Wahl bei sehr bewegten Oberflächen und bei kleinflächigem Einsatz. Bei Figuren und Ornamenten mit starker Unterschneidung können tief liegende Verschmutzungen gezielt angesteuert und beseitigt werden, da der Brennfleck von 1-10 mm Ø verändert werden kann. Die Geräte mit Lichtleitkabel erzeugen harmonische Wirkflächen, sind flexibel, aber in der Leistung systembedingt limitiert. Einige Hersteller bündeln deshalb die Glasfasern zu größeren Gruppen, um trotz der im Vergleich geringeren Lichtenergie zufriedenstellende Flächenleistungen zu ermöglichen.

Die Faserlaser der neueren Generation sind kompakt, robust und die Kabelführung flexibel, der Einsatz ist besonders im flächigen Bereich von Vorteil. Die heute mögliche Strahlführung erzeugt unterschiedliche Zeilenbewegungen, die die früher fast unvermeidlichen Systemspuren verwischt und durch die enorme verfügbare Lichtenergie gute Flächenleistungen ermöglicht.

Der heute erreichte Stand der Kenntnisse und der Technik ist für die Anwendung in der Steinreinigung, die in vielen Fällen direkt am Objekt auf Gerüsten auszuführen ist, zu einem Stadium gelangt, der gegenüber den Anfängen in den 90iger Jahren zu einer Akzeptanz in der Denkmalpflege und Reduzierung der Kosten geführt hat. Die Lasertechnik ist inzwischen ‚Stand der Technik‘ für anspruchsvolle Steinreinigungen und Bestandteil einer großen Zahl von praktischen Restaurierungsvorhaben in Deutschland geworden.

4 Corinna Grimm-Remus, Lale von Baudissin Auswahl geeigneter Lasergeräte

Die Auswahl der im Forschungsprojekt eingesetzten Lasersysteme basierte auf praktischen Erfahrungen sowie auf der Verfügbarkeit verschiedener Geräte innerhalb der Konservierungs- und Restaurierungspraxis in Deutschland. Insgesamt wurden sechs unterschiedliche Lasermodelle für die Anlage der Probeflächen herangezogen: der Cleanlaser CL 50 (lightCASE CL 50), der Infinito I054C1 (100 W), der Quanta Thunder Compact, der Soliton LT300, der Smart 300 sowie der Flaser Hulk 500.



Abbildung 16*: Auswahl der Laser im Forschungsprojekt (v. l.): Der lightCASE CL 50, der Infinito, der Smart 300 und der Thunder Compact Reinigungslaser. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.*

Die unterschiedlichen Lasergeräte haben neben einer Reihe von Ähnlichkeiten, auch deutliche Unterschiede im Aufbau, ihren Eigenschaften und ihren möglichen Parameterkonfigurationen. Je nach Möglichkeiten eigenen sie sich somit für jeweilige Fragestellungen, Untergründe und Reinigungsanforderungen.

Aufgebaut und zu unterscheiden sind alle Geräte nach folgendem Prinzip:

- Laserquelle: z.B. Festkörper (Nd:YAG-Laser), Dioden (Faser-Laser), Gas (CO_2-Laser)
- Strahlführungssystem (Spiegelarm oder Glasfaser)
- Fokussieroptik (Scankopf oder Linse)
- Steuereinheit (Pulsfrequenz, Scanfrequenz, Leistung)

Das **lightCASE CL 50** (CleanLaser CL 50) der deutschen Firma Clean-Lasersysteme GmbH, ist ein luftgekühltes, diodengepumptes Lasersystem mit einer Leistung von 50 Watt. Mit kompaktem Gehäuse (46,7 x 26,5 x 51,7 cm ohne Transportwagen) und einem geringen Gesamtgewicht von etwa 29 kg und einem Transportwagen, (64,3 x 47,8 x 89,7 cm), ist der Laser gleichermaßen für stationäre wie auch für mobile Einsätze geeignet. Für die Stromversorgung benötigt der CL 50 mit 100 - 240 V (50/60 Hz), 16 A, N, PE eine einfache 230-V-Schuko-Steckdose. Die maximale Leistungsaufnahme beträgt 550 W. Der Laser arbeitet auf Basis eines Nd:YAG-Kristalls (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat) und emittiert bei einer Wellenlänge von 1064 nm im infraroten Spektralbereich. Die Pulsfrequenz lässt sich je nach Bedarf zwischen 5 und 200 kHz einstellen, die minimale Pulsdauer wird mit 120 ns angegeben. Die Scanfrequenz kann zwischen 30 und 180 Hz angepasst werden und die Pulsenergie wird mit 1 mJ angegeben. Er ist als Zeilenlaser spezifiziert. Je nach Anwendungsbereich ist das Handstück und die Linsenoptik anpassbar. Im Forschungsprojekt wurde das Optiksystem OS 20 eingesetzt. Das System kann mit verschiedenen Festbrennweiten zwischen f = 100 mm und f = 380 mm ausgestattet werden, welche die jeweils erreichbare Scanbreite vorgeben. Der Auslöser befindet sich am Handstück, das mit einem 2,8 m langem Glasfaserkabel an den Laser gekoppelt ist. Die Einstellungen können über ein integriertes Touchpanel oder über eine App vorgenommen werden.[1]



Abbildung 17*: Das Handstück vom lightCASE CL 50. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.*

Der **Infinito p/n I054C1 (100 W)** der italienischen Firma El.En. S.p.A, vertrieben über die Firma Light for Art. ist ein luftgekühltes *Ytterbium*-Faser-Lasersystem mit einer Emissionswellenlänge von 1064 nm im infraroten Spektralbereich. Das Gerät weist beim 100-W-Modell ein Gewicht von rund 30 kg sowie kompakte Abmessungen von 63 × 45 × 26 cm auf, wodurch es auch für mobile Einsätze geeignet ist.



Abbildung 18*: Das Bedienfeld vom Infinito 1054C1. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.*

[1] Clean-Lasersysteme GmbH 2019a; 2019b; 2021.

Für die Stromversorgung genügt eine herkömmliche 230-V-Steckdose (100–230 V; 50–60 Hz); der maximale Leistungsbedarf wird seitens des Herstellers mit 800 W angegeben. Das etwa 1,2 kg schwere Handstück ist über ein 3 m langes Glasfaserkabel mit dem Lasersystem verbunden und mit einem integrierten Auslöser ausgestattet. Bei dem Gerät handelt es sich um einen Flächenlaser. Es kann mit drei unterschiedlichen Objektiven betrieben werden, die jeweils verschiedene Festbrennweiten und damit korrespondierende Scangrößen ermöglichen: Bei f = 250 mm beträgt die max. Scanbreite 40 x 40 mm, bei f=355 mm 55 x 55 mm und bei f = 500 mm Brennweite liegt die Scangröße bei 80 x 80 mm. Je nach Anwendungsanforderung können unterschiedliche Strahlgeometrien erzeugt werden, darunter Linien (Scanraster), Lissajous-Figuren, Kreise und Brush. Die Pulsfrequenz ist im Bereich zwischen 20 und 200 kHz einstellbar; die Pulsdauer beträgt 100 ns. Ein integrierter Positionslaser (1 mW; 660 nm beim 100-W-Modell) unterstützt die präzise Ausrichtung des Strahls.[2]

Der **Quanta Thunder Compact** der italienischen Firma Quanta System S.p.A. ist ein Q-Switched Nd:YAG/KTP-Lasersystem, das sowohl die Grundwelle im infraroten Spektralbereich (1064 nm) als auch die frequenzverdoppelte grüne Wellenlänge (532 nm) erzeugen kann. Durch den Q-Switch-Betrieb werden ultrakurze und energiereiche Pulse generiert. Das Gerät nutzt ein kombiniertes Wasser-Luft-Kühlkonzept. Mit einem Gewicht von etwa 60 kg und Abmessungen von 24 × 79 × 92 cm ist es deutlich größer und schwerer als die zuvor beschriebenen Systeme, bleibt durch integrierte Rollen jedoch mobil einsetzbar.

Die Stromversorgung erfolgt über eine herkömmliche 230-V-Steckdose (230 V, 50/60 Hz, 10 A). Es handelt sich bei dem Laser um einen Punktlaser mit einem Durchmesser von 10 mm, die Pulsdauer wird mit etwa 6 ns angegeben. Statt einer maximalen mittleren Leistung wird vom Hersteller die maximale Energie angegeben, die auf die Oberfläche einwirken kann. Diese beträgt 1 J bei 1064 nm und 500 mJ bei 532 nm. Die Scanfrequenz beträgt 1, 2, 5,10 ,20 Hz (Je nach Wellenlänge 20 Hz bis 500 mJ - 10 Hz von 500 mJ bis1 J). Das Strahlprofil wird als gaußförmig beschrieben. Das System ist mit einem Spiegel- bzw. Gelenkarm ausgestattet, der die Strahlführung unterstützt. Die Auslösung kann sowohl über einen Auslöser am Handstück als auch über ein Fußpedal erfolgen. Die Parametrierung wird über ein integriertes Touchfeld vorgenommen.[3]

[2] El.En. S.p.A. 2024a; Phase Restauro S.r.l. 2025; El.En. S.p.A. 2024b.
[3] El.En. S.p.A. 2024c; Quanta System S.p.A. 2025; El.En. S.p.A. 2024d; Quanta System S.p.A. 2019.



Abbildung 19*: Das Handstück vom Quanta Thunder Compact. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025./*

Der **Soliton LT300** der deutschen Firma Soliton Laser und Messtechnik GmbH weist mit einer mittleren Leistung von 10 W eine deutlich geringere Leistung auf als die zuvor beschriebenen Systeme. Es nutzt ein bodenstehendes Systemgehäuse (ca. 100,0 x 50,0 x 113,5 cm) und hat ein Gewicht von rund 32 kg. Einseitige Rollen ermöglichen es, das Gerät auch mobil zu nutzen. Der Strombedarf wird auch hier über eine herkömmliche Steckdose gedeckt (220-250V AC, 50-60Hz). Ebenso wie der LightCASE handelt es sich um einen blitzlampengepumpten Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm. Die Pulsdauer beträgt 8 ns und die Pulsleistung ist mit 300 mJ bei einer Pulsfrequenz von 30 Hz angegeben. Das System arbeitet als Punktlaser und ermöglicht Spotdurchmesser zwischen 1 mm und 8 mm. Die Strahlführung erfolgt über einen Spiegelarm (Gelenkarm), dessen Magnethalterungen eine flexible Justierung ermöglichen. Die Steuerung erfolgt über ein Fußpedal, was eher auf einen stationären Betrieb ausgelegt ist.[4]

[4] SOLITON Laser und Messtechnik GmbH 2025



Abbildung 20*: Der Soliton LT300. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.*

Der **Smart 300** der italienischen Firma El.En. S.p.A., vertreiben über die Firma Light for Art ist ein Ytterbium-dotierter aktiver Faserlaser mit einer mittleren Ausgangsleistung von 300 W und gehört damit zu den leistungsstärkeren Geräten im Vergleichsfeld. Mit einem Gewicht von ca. 82 kg und Abmessungen von 57 × 48 × 99 cm zählt er zu den größeren Systemen, kann jedoch über ein rollbares Koffergehäuse dennoch mobil eingesetzt werden. Für die Stromversorgung genügt eine Standardsteckdose im Bereich von 100–230 V bei 50–60 Hz. Die maximale Leistungsaufnahme wird mit 1500 W angegeben. Er hat eine Wellenlänge von 1064 nm, mit einer Pulsdauer von 2-500 ns. Der Smart 300 ist ein Flächenlaser mit einer maximalen Scanbreite von 170 x 170 mm. Die Pulsfrequenz kann je nach Bedarf zwischen 20 und 4000 kHz angepasst werden. Für unterschiedliche Anwendungsanforderungen stehen verschiedene Scanformen zur Verfügung, darunter Linien, Lissajous-Muster, Kreise sowie brush- und cross-brush-Geometrien. Für eine präzise Strahlführung bietet der Laser einen Positionslaser (1 mW; 660 nm). Die Auslösung erfolgt über einen Auslöser am Handstück, das an einem 5 m Glasfaser Strahlführsystem mit dem Laser verbunden ist.[5]

[5] El.En. S.p.A. 2024e; 2025.



Abbildung 21*: Der Smart 300. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.*

Der **Flaser Hulk 500** der polnischen Firma Flaser sp. z o.o. ist ein gepulster Faserlaser mit einer Emissionswellenlänge von 1064 nm und einer mittleren Ausgangsleistung von 500 W. Im Unterschied zu den zuvor beschriebenen Systemen verwendet er eine Flüssigkeitskühlung, was eine hohe Dauerleistung ermöglicht, jedoch mit einem vergleichsweise hohen Gewicht von 160 kg einhergeht.[6] Die Abmessungen betragen 120 × 56 × 90 cm. Rollen unter dem Gehäuse gewährleisten dennoch einen eingeschränkt mobilen Einsatz. Außerdem bietet der Hersteller für das Handstück ein 10-50m[7] langes Faserkabel an, was einen mobilen und flexiblen Einsatz ermöglicht. Für die Stromversorgung wird hier für eine Spannung zwischen 90 und 153 V ebenfalls eine herkömmliche Steckdose angesetzt. Die Angabe 24 V DC deutet auf ein externes Netzteil zur Bereitstellung eines Gleichstroms hin. Die maximale Leistungsaufnahme wird mit 2400 W angegeben. Die Pulsfrequenz kann zwischen 2 und 100 kHz variiert werden, ebenso die Pulsdauer, die zwischen 25 und 100 ns einstellbar ist. Der Laser gehört zu den Flächenlasern, als maximale Pulsenergie werden 100 mJ angegeben. Eine Besonderheit des Lasers ist das *Flat Top-Hat /Flat-Top-Verfahren* zeichnet sich durch die Verwendung eines Laserstrahls aus, dessen Intensitätsverteilung über die gesamte Strahlfläche nahezu konstant ist, wodurch eine gleichmäßige Bearbeitung der Oberfläche ermöglicht wird (≠Gaußsches Strahlprofil). Ein mechanisch geführter Laserstrahl wird in den X- und Y-Richtungen über die zu bearbeitende Fläche bewegt, um eine präzise und homogene Abtragung der Oberfläche zu gewährleisten.[8]

Die sechs untersuchten Lasersysteme unterscheiden sich auf Grundlage der Herstellerangaben in Leistung, Pulscharakteristik, Kühlung und Mobilität und eignen sich dadurch für unterschiedliche Anwendungen. Betrachtet man die Leistung, so reicht die Bandbreite vom Soliton LT300 mit einer eher geringen Ausgangsleistung von 10 W über die mittleren Systeme LightCASE CL 50 (50 W) und Infinito I054C1 (100 W) bis hin zu den

[6] Laut Webseite 160 kg, laut Katalog 170 kg. (Flaser Sp. z.o.o. 2024; 2025).
[7] Laut Webseite 10-50 m, laut Katalog 15 m. (Flaser Sp. z.o.o. 2024; 2025).
[8] Flaser Sp. z.o.o. 2024; BlueStream Laser Scandinavia 2022; Flaser Sp. z.o.o. 2025.

Hochleistungsgeräten Smart 300 (300 W) und Flaser Hulk 500 (500 W). Beim Quanta Thunder Compact liegen keine direkten Angaben zur Leistung vor; auf Basis der Herstellerangaben zu Pulsenergie und Frequenz kann jedoch auf eine geringe Leistung von etwa 10 W geschlossen werden.[9]

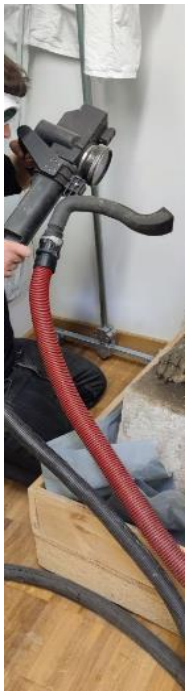


Abbildung 22: Das Handstück vom Flaser Hulk 500. Quelle: Corinna Grimm-Remus 2025.

Auch bei den Kühlkonzepten zeigen sich klare Unterschiede. Während der LightCASE CL50, der Infinito und der Smart 300 luftgekühlt sind und dadurch kompakter und leichter ausfallen, nutzt der Quanta Thunder Compact eine Kombination aus Wasser- und Luftkühlung und der Flaser Hulk 500 sogar ein vollständig flüssigkeitsgekühltes System, das auf hohe Dauerleistung ausgerichtet ist, jedoch zu einem deutlich höheren Gewicht führt. In Bezug auf Mobilität und Gewicht sind alle Laser auch für den mobilen Einsatz ausgelegt. Gerade der LightCASE CL50 (29 kg) und der Infinito 50 W (25 kg) sind von den Maßen und dem Gewicht die transportfreundlichsten Systeme. Der Soliton LT300 ist mit 32 kg ebenfalls vergleichsweise leicht, allerdings aufgrund seiner Größe und einseitigen Rollen weniger flexibel. Hinzu kommt der Gelenkarm, den auch den auch der Quanta Thunder Compact aufweist. Auch wenn sich dadurch die Handhabung des Handstückes erleichtern und die Strahlführung präzisieren lässt, so kann er je nach räumlichen Gegebenheiten einschränkend wirken. Deutlich flexibler sind da Glasfaserkabel zwischen Lasergerät und Handstück. Allgemein ermöglichen Rollen und kompakte Gehäuse bei allen Lasern einen mobilen Einsatz. Alle Geräte sind mit handelsüblichen 230-V-Schuko-Steckdosen kompatibel, wodurch sie einfach vor Ort betrieben werden können.

Große Unterschiede weisen die Geräte vor allem bezüglich ihrer Strahlgeometrie auf. Der Quanta Thunder Compact und der Soliton LT300 sind Punktlaser, die einen einzelnen, eng begrenzten Spot erzeugen. Dadurch eignen sie sich hauptsächlich für präzise Arbeiten auf kleineren Flächen. Dem gegenüber stehen Laser mit Linien- oder

[9] Leistung (W) = Energie pro Puls (J) x Pulswiederholrate (Hz). (HAILTEC GmbH 2025).

Flächenstrahlprofilen wie der LightCASE CL50, der Infinito, der Smart 300 und der Flaser Hulk 500. Der LightCASE CL50 arbeitet mit einer Zeile, die beim Abfahren der Oberfläche eine homogene Streifenbearbeitung ermöglicht. Der Infinito, der Flaser, wie auch der Smart 300 erzeugen dagegen flächenhafte Scanmuster, die je nach eingesetzter Optik Linien, Lissajous-Figuren, Kreise oder ganze Rechteckflächen abdecken können. Dadurch sind sie deutlich effizienter bei der Reinigung größerer Oberflächen, dafür ggf. jedoch nicht so präzise, wenn es zu komplexeren Flächengeometrien der Objektoberfläche kommt.
Die Pulscharakteristik verstärkt die funktionalen Unterschiede. Besonders kurze Pulse, wie sie der Quanta Thunder Compact mit etwa 6 ns oder der Soliton LT300 mit 8 ns erzeugen, ermöglichen eine sehr hohe Spitzenleistung bei gleichzeitig minimaler thermischer Belastung des Untergrunds. Dies ist besonders vorteilhaft bei temperaturempfindlichen Werkstoffen. Die beiden Laser LightCASE CL50 und der Infinito Laser arbeiten mit längeren Pulsdauern im zweistelligen bis mehrhundert Nanosekundenbereich. Längere Pulse führen zu stärkeren thermischen Effekten, was den Abtrag zwar weniger impulsiv, aber gleichmäßiger und flächenwirksamer macht. Gerade bei temperaturempfindlichen Oberflächen können lange Pulsdauern jedoch zu ungewollten Schäden führen. Beim Flaser Hulk 500 und beim Smart 300 lassen sich die Pulsdauern je nach Bedarf einstellen. Gerade beim Smart 300 Laser können die langen Pulsdauern (500 ns) mit einer hohen Pulsfrequenz von bis zu 4000 kHz kombiniert werden und ermöglichen dadurch eine sehr schnelle Scanbewegung.

Quellen:

BLUESTREAM LASER SCANDINAVIA, 2022. Flaser HULK 500. *BlueStream Laser* [online]. 7 Februar 2022. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://bluestreamlaser.com/laser/hulk-500/

CLEAN-LASERSYSTEME GMBH, [kein Datum]. *Technische Daten lightCase*. Technisches Datenblatt. Herzogenrath: Clean-Lasersysteme GmbH

CLEAN-LASERSYSTEME GMBH, [kein Datum]. *Technische Daten Optiksystem OS20*. Technisches Datenblatt. Herzogenrath: Clean-Lasersysteme GmbH

CLEAN-LASERSYSTEME GMBH, 2019a. Low Power Lasersysteme für kleine Flächen - cleanLASER. *IPG | cleanLASER* [online]. 2019. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.cleanlaser.de/de/produkte/lasersysteme/low-power/

CLEAN-LASERSYSTEME GMBH, 2019b. lightCASE - der handliche Kompaktlaser von cleanLASER. *IPG | cleanLASER* [online]. 2019. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.cleanlaser.de/de/produkte/lasersysteme/lightcase-kompaktlaser/

CLEAN-LASERSYSTEME GMBH, 2021. *Betriebsanleitung Laserbearbeitungssystem lightCASE*. Betriebsanleitung. Herzogenrath: Clean-Lasersysteme GmbH

EL.EN. S.P.A., 2024a. Infinito Laser. *Light for Art* [online]. 2024. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.lightforart.com/en/laser-infinito-en/

EL.EN. S.P.A., 2024b. *Infinito Laser* [online]. Produktdatenblatt. Calenzano, Italien: light for Art. Verfügbar unter: https://www.lightforart.com/wp-content/uploads/2019/11/Infinito-Laser_ENG-con-codice.pdf

EL.EN. S.P.A., 2024c. Thunder Compact. *Light for Art* [online]. 2024. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.lightforart.com/en/thunder-compact-en/

EL.EN. S.P.A., 2024d. *Thunder Compact* [online]. Produktdatenblatt. Calenzano, Italien: light for Art. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.lightforart.com/wp-content/uploads/2019/11/THUNDER_COMPACT_eng.pdf

EL.EN. S.P.A., 2024e. Smart Laser. *Light for Art* [online]. 2024. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.lightforart.com/en/smart-laser-2/

EL.EN. S.P.A., 2025. *Smart Laser* [online]. Produktdatenblatt. Calenzano Firenze, Italien: light for Art. Verfügbar unter: https://www.lightforart.com/wp-content/uploads/2025/01/SMART-ENG.pdf

FLASER SP. Z.O.O., 2024. FLASER - Die Laserreinigung. *Flaser* [online]. 2024. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://flaser.de/oferta/

FLASER SP. Z.O.O., 2025. *Flaser Katalog_2025* [online]. Katalog. Radziejowice, Polen: Flaser Sp. z.o.o. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://flaser.de/media/Katalog_2025.pdf

HAILTEC GMBH, 2025. Pulsenergie. [online]. 2025. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.hailtec.de/glossary/pulsenergie/

HEINRICH, Gregor, 2025a. *Graffiti auf lackiertem Holz - Möglichkeiten der Entfernung durch Lasertechnik*. Masterarbeit. Potsdam: Fachhochschule Potsdam

HEINRICH, Gregor, 2025b. *Persönlicher Erfahrungsaustausch zum Einsatz von Lasern auf lakiertem Holz zur Entfernung von Graffiti*. 12 Dezember 2025

PHASE RESTAURO S.R.L., 2025. Laser infinito - Per la pulizia di vaste superfici | Phase Restauro. *Phase Italia* [online]. 2025. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.phaseitalia.it/negozio/laser-infinito/

QUANTA SYSTEM S.P.A., 2019. *Thunder Compact - Extremely Powerful and Compact YAG / KTP Q-Switched Laser for Restoration* [online]. Produktdatenblatt. El.En. S.p.A. Verfügbar unter: https://www.quantasystem.com/wp-content/uploads/2019/02/THUNDER_COMPACT_rev001_ROTW_LD.pdf

QUANTA SYSTEM S.P.A., 2025. Thunder Compact - Laser technology for fine art conservation and industrial cleaning. *Quanta System* [online]. 2025. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://www.quantasystem.com/laser/thunder-compact/

SOLITON LASER UND MESSTECHNIK GMBH, [kein Datum]. *Soliton LT300 Nd:YAG Laserreinigungssystem*. Produktdatenblatt. Gilching: SOLITON Laser- und Meßtechnik GmbH

SOLITON LASER UND MESSTECHNIK GMBH, 2025. Reinigungslaser Nd:YAG LT-300. *Soliton Laser- und Messtechnik GmbH* [online]. 2025. [Zugriff am: 12 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://soliton-gmbh.de/produkt/reinigungslaser/

5 Auswahl der Musterflächen

Für die Auswahl geeigneter Untersuchungs- und Demonstrationsobjekte werden klare Kriterien definiert, die sowohl praxisnah als auch zukunftsorientiert sind. Die Untersuchungen sollen im Innen- wie im Außenbereich stattfinden, um die Bandbreite realer Restaurierungssituationen abzubilden. Dabei orientiert sich die Objektauswahl gezielt an zukünftigen Restaurierungsaufgaben, sodass die gewonnenen Erkenntnisse unmittelbar auf zukünftige Projekte übertragbar sind.

Ein wesentliches Kriterium ist die Berücksichtigung unterschiedlicher Gesteinsuntergründe. Verschiedene Natursteine reagieren aufgrund ihrer spezifischen mineralogischen Zusammensetzung, Porosität und Wärmeleitfähigkeit unterschiedlich auf die Laserbehandlung. Ebenso sollen verschiedene Verschmutzungsgrade einbezogen werden – von leichten Auflagerungen bis hin zu stark verkrusteten Oberflächen.

Darüber hinaus wird auf eine differenzierte Betrachtung der Verschmutzungsarten Wert gelegt. Untersucht werden sollen unter anderem Umwandlungskruste (z. B. Gipskrusten), Auflagerungskruste, biogen induzierte Krusten sowie biogener Bewuchs. Diese unterscheiden sich in ihrer Haftung, Dichte, Absorptionsfähigkeit und thermischen Reaktion und stellen daher jeweils eigene Anforderungen an Gerätewahl und Parameter.

Sowohl gefasste als auch ungefasste Bereiche werden in die Untersuchungen einbezogen, um die Eignung der Laserreinigung auch für polychrome oder anderweitig gestaltete Oberflächen zu prüfen.

Praktische Aspekte spielen ebenfalls eine wichtige Rolle: Die Flächen sollen gut erreichbar sein und möglichst ohne aufwendige Gerüststellungen bearbeitet werden können. Dies erleichtert nicht nur die Durchführung der Versuchsreihen, sondern ermöglicht auch eine langfristige Beobachtung der gereinigten Bereiche unter realen Bedingungen.

Schließlich ist vorgesehen, möglichst größere zusammenhängende Flächen (> 1 m²) zu untersuchen. Nur so kann eine belastbare Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Geräten und variierenden Geräteparametern gewährleistet werden. Größere Testflächen erlauben zudem eine differenzierte Bewertung hinsichtlich Reinigungswirkung, Homogenität, Arbeitsgeschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit.

5.1 Corinna Grimm-Remus: Dom Halberstadt

Der Dom St. Sixtus und St. Stephanus in Halberstadt zählt zu den bedeutendsten gotischen Kirchenbauten in Deutschland und stellt ein herausragendes Beispiel mittelalterlicher Architektur in Sachsen-Anhalt dar. Mit dem Bau wurde um das Jahr 1230 begonnen, im Jahr 1492 wurde der Dom feierlich geweiht.

Besonders bemerkenswert ist der Erhaltungszustand des Doms. Seit seiner Weihe wurde er kaum grundlegend baulich verändert, sodass er bis heute einen authentischen Eindruck der mittelalterlichen Baukunst vermittelt. Viele originale Ausstattungselemente sind erhalten geblieben, darunter z.B. der farbig gefasste Chorfigurenzyklus.

Darüber hinaus beherbergt der Halberstädter Domschatz einen der bedeutendsten Kirchenschätze Europas, der zahlreiche wertvolle Reliquien, liturgische Geräte und Kunstwerke aus dem Mittelalter umfasst. Insgesamt stellt der Halberstädter Dom somit ein einzigartiges kulturhistorisches Zeugnis dar, das sowohl die architektonische Entwicklung der Gotik in Deutschland als auch die religiöse und künstlerische Welt des Mittelalters eindrucksvoll widerspiegelt.



Abbildung 23: Blick auf den Halberstädter Dom von Südosten.

Seit den 1990iger Jahren ist der Halberstädter Dom ein wichtiger zentraler Forschungsgegenstand im Rahmen der Restaurierung von Bauzier und Ausstattungsschmuck aus dem sog. Halberstädter Muschelkalk sowie dem regional anstehenden Involutus Sandstein. So stand er auch in diesem Projekt im Mittelpunkt mit seinen sehr unterschiedlichen Reinigungsaufgaben.

Im Folgenden werden die unterschiedlich ausgewählten Oberflächen, sowie die Referenzflächen an den Domen in Magdeburg und Halle vorgestellt.

Musterfläche HBS_I

Hier wurde ein zugesetzter ehemaliger Durchgang im südlichen unteren Kreuzgang ausgewählt. Bearbeitet wurde hier ausschließlich das Gewände, welches aus Halberstädter Muschelkalk, in unterschiedlichen Varietäten, besteht. Die Oberflächen sind ungefasst und mit einer kompakten, verbackene Schmutzkruste belegt, (keine stark verschwärzte Umwandlungskruste).



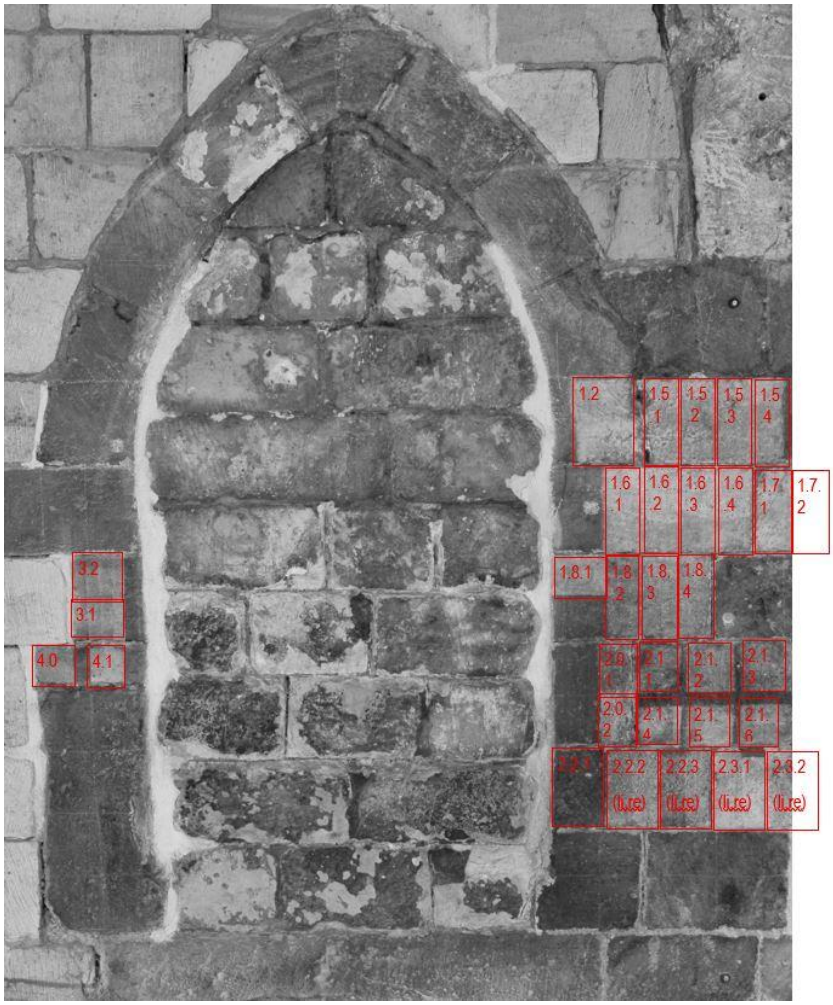


Abbildung 24: Musterfläche im südlichen Kreuzgang des Halberstädter Domes.

Musterfläche HBS_II

Hier wurde ein Strebepfeiler im östlichen Kreuzgarten ausgewählt. Die Oberflächen des Involutus- Sandsteines sind mit schwarzen Krusten unterschiedlicher Ausprägung belegt.

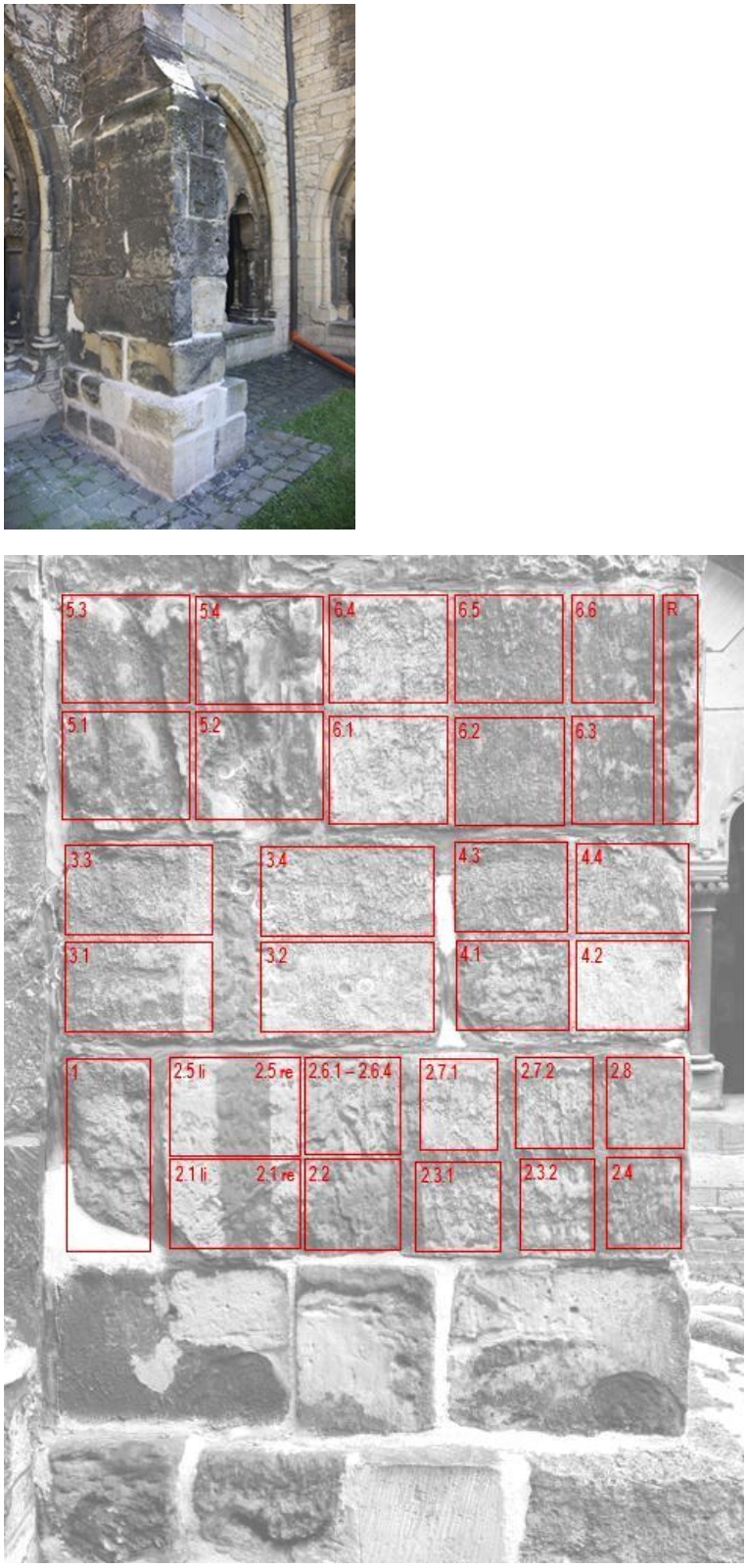


Abbildung 25: Musterfläche im östlichen Kreuzgarten des Halberstädter Domes.

Musterfläche HBS_IIIB

Hier wurden zwei Kämpfersteine aus Kalkstein mit verkrusteten Fassungsresten im sog. Alten Kapitelsaal, an der Wand zur Stephanuskapelle, ausgewählt. Der Ort ist durch geschütztes Außenklima gekennzeichnet.





Abbildung 26: Musterfläche im sog. Alten Kapitelsaal des Halberstädter Domes.

Musterfläche HBS_IV

Als vierte Fläche wurde ein Bereich des Nordquerhausportals (dat. um 1430) ausgewählt. Die Flächen sind durch massive Umwandlungskrusten auf Kalkstein gekennzeichnet.

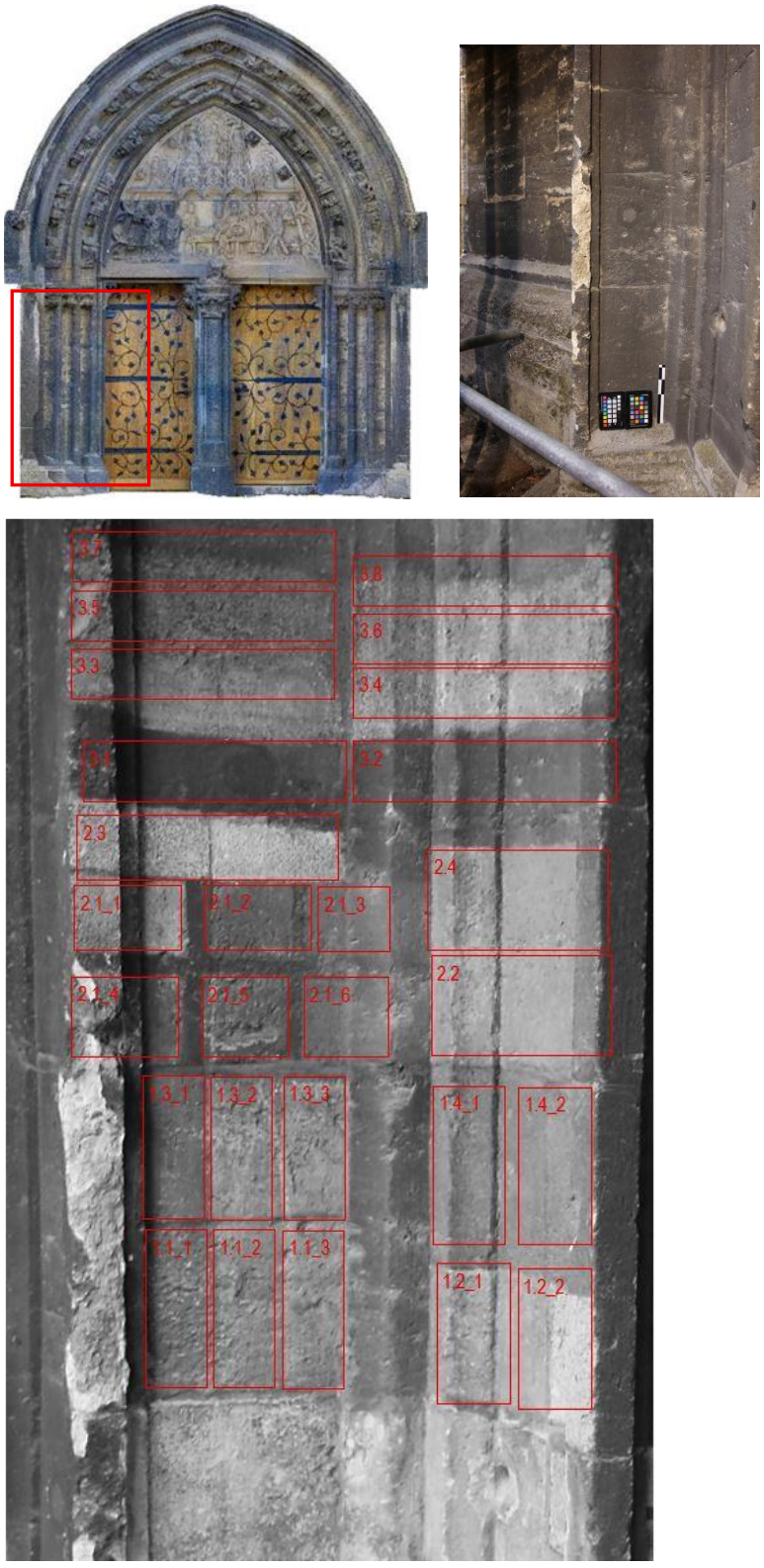


Abbildung 27: Musterfläche am Nordquerhausportal des Halberstädter Domes.

5.2 Claudia Böttcher: Dom Magdeburg

Am Magdeburger Dom wurden im Zusammenhang mit dem Untersuchungsprojekt zur Laserreinigung 3 Musterflächen angelegt. Kriterien für die Auswahl waren das Vorhandensein charakteristischer Baugesteine und typischer Auflagerungen, deren Entfernung getestet werden sollte.

Musterfläche MD_I





Abbildung 28: Musterfläche im Bischofsgang des Magdeburger Domes.

Dieser Bereich wurde in einer frühen Bauphase des Magdeburger Dombaues errichtet. Als Baumaterial wurden sowohl graugrüner Bernburger Buntsandstein als auch hellgrauer Muschelkalk verwendet, dessen Herkunft noch nicht eindeutig geklärt werden konnte. Bernburger Buntsandstein bildete in den frühen Bauphasen das Hauptbaugestein des Magdeburger Domes, es wurden sowohl graugrüne als auch ockerfarbene und rötliche Varietäten verwendet. Warum in den ersten Bauphasen des Domes zusätzlich Muschelkalk verbaut wurde, ist nicht klar, offenbar waren nicht gestalterische Hintergründe ausschlaggebend, sondern die Verfügbarkeit des Materials. Der obere Chorumgang, der sogenannte „Bischofsgang“ steht aktuell im Fokus der Bautätigkeit am Magdeburger Dom. Im Zuge der umfassenden Sanierung des Ostchores zeigt das Mauerwerk des Bischofsganges sowohl im Außen- als auch im Innenbereich sehr starke Schadbilder. Ausschlaggebend für diesen Schadprozess ist die seit der grundlegenden Überarbeitung im 19. Jh. unzureichende Abdichtung des Daches des Bischofsganges. Der Belag mit Natursteinplatten und später zusätzlich mit einer Kupferdeckung ermöglichte über Risse und undichte Fugen über Jahrzehnte hinweg das massive Eindringen von Feuchtigkeit in die Wände und Gewölbe, die nur sehr langsam wieder entweichen konnte. Salze konnten gelöst und über weite Strecken transportiert werden, bis sie an den Sandsteinoberflächen oder im Steininneren wieder auskristallisierten und dabei entsprechende Schadbilder verursachten. Neben Schäden im Außenbereich sind auch die Innenwände und Gewölbekappen stark angegriffen, es kommt zu einer erheblichen Rückwitterung der Sandsteinoberflächen der Außenwände und Gewölberippen. Die Wandflächen weisen im Außen- aber auch im Innenbereich dunkle Krusten auf. In den Jahren 2025-2027 ist die grundlegende Sanierung der Außenwände des Bischofsganges nach der Abdichtung des Daches geplant, wann der Innenbereich saniert werden kann, ist noch nicht geklärt. In Vorbereitung der sehr dringend erforderlichen Innenraumsanierung des Chorbereichs des Magdeburger Domes wurde eine Wandfläche im Bischofsgang für die Probeflächen ausgewählt. Der Bereich ist nicht unmittelbar einsehbar, da der Bischofsgang nicht vom normalen Besucherverkehr erreichbar ist.

Bei dem Baumaterial handelt es sich um graugrünen Bernburger Buntsandstein, Muschelkalk kam in der Referenzfläche nicht vor. Auf den dunkel verkrusteten Steinoberfläche finden sich Reste eines hellen Anstrichs. Dieser kann zeitlich aktuell nicht eindeutig zugeordnet werden, es handelt sich vermutlich um unpigmentierte Kalkfarbe (wird vom IDK noch untersucht). Reste dieses Anstrichs finden sich im gesamten Innenbereich des Chores. Es wird angenommen, dass dieser egalisierende Anstrich dazu dienen sollte, die Farbunterschiede zwischen Buntsandstein und Muschelkalk zu vermindern, seine Datierung ist nicht sicher. Sowohl Steinoberfläche als auch Anstrich sind stark verdunkelt, an der Probefläche sollte unter anderem untersucht werden, ob der Anstrich bei einer Oberflächenreinigung erhalten werden kann und wie dieser sich verändert.

Musterfläche MD_II





Abbildung 29: Musterfläche an der Tonsurkapelle des Magdeburger Domes.

Die zweite Probefläche wurde im Außenbereich des Magdeburger Domes, im Kreuzgang angelegt. Der nördliche Flügel hat eine sogenannte „Tonsurkapelle“, mit durch Spitzbogenfenster durchbrochenen Wandflächen und Strebepfeilern aus Sandstein. Die Proben wurden an einem südlichen Strebepfeiler angelegt. Errichtet wurde die Tonsurkapelle nach empirischer optischer Einschätzung aus hellgrauem Bernburger Buntsandstein und in der Vergangenheit kaum überarbeitet, so dass es sich um ein sehr homogenes Material handelt. Die Steinoberflächen weisen durch die Umwelteinwirkungen im 19. und 20. Jh. schwarze Filmkrusten auf, durch die die Steinoberfläche sich noch abzeichnet. In den vergangenen Jahren erfolgte die systematische Überarbeitung der zum Kreuzhof hin orientierten Wandflächen des Kreuzgangs des Magdeburger Domes. Ost-, Süd- und Westwand wurden bis zum Jahr 2025 saniert, die Bearbeitung der Nordwand begann im Jahr 2025 und soll sich in den nächsten Jahren fortsetzen. Dabei soll auch die Tonsurkapelle bearbeitet werden. In Vorbereitung der Maßnahmenplanung wurden die Proben an einem Strebepfeiler dieser Kapelle angelegt, um die Möglichkeiten und Grenzen der Laserreinigung, auch im Vergleich zum Partikelstrahlverfahren, auszuloten.

Musterfläche MD_III





Abbildung 30: Musterfläche an der Nordfassade des Magdeburger Domes.

Dieser Bereich wurde vermutlich im 19. Jh. bei der umfassenden Domsanierung überarbeitet. Charakteristisch für diese Sanierungsphase ist die Verwendung von Elbsandsteinen als Austauschgestein sowie der Einsatz großer Steinformate, entweder als Blöcke oder Platten. In diesem Bereich könnte das ursprünglich kleinteiligere Sockelmauerwerk aufgrund gravierender Schäden mit großformatigen Platten aus Elbsandstein verkleidet worden sein (Aufgrund des charakteristischen Erscheinungsbildes könnte Reinhardtsdorfer Sandstein verwendet worden sein). Die Steinoberflächen sind stark verschwärzt, partiell finden sich Auflagerungen von Salzen in Form einzelner

Körnchen, zusammenhängender Pusteln und flächiger Krusten, sowohl hell als auch verschwärzt. Die Auflagerungen sind häufig so dick, dass die Steinoberfläche nicht mehr erkennbar ist. Nach der letzten Sanierung 1826-1834 wurde dieser Wandbereich nicht mehr grundlegend überarbeitet, er zeigt demnach noch das charakteristische Schadbild durch die Einflüsse erhöhter Schadstoffemissionen im Zuge der Industrialisierung und des starken ruß- und schwefelhaltigen Hausbrandes (Braunkohlefeuerung). Während über längere Bauperioden hinweg keine Oberflächenreinigung an den Sandsteinen des Magdeburger Domes im Außenbereich durchgeführt wurde, wurden die zuletzt überarbeiteten Bauteile (Türme, Chorbereich) mittels Partikelstrahlverfahren und zunehmend auch partiell mittels Laserreinigung gereinigt. Meistens fand zunächst eine Reinigung im Partikelstrahlverfahren statt und anschließend mittels Laser an Flächen, die durch Partikelstrahlverfahren nur unzureichend gereinigt werden konnten. Dies betraf sehr häufig Elbsandsteine der Sanierungsphase des 19. Jh. Die Probefläche wurde gewählt, um die Wirksamkeit der Laserreinigung ohne vorherige Strahlreinigung sowohl auf das Erscheinungsbild als auch die physikalischen Parameter beurteilen zu können.

5.3 Corinna Grimm-Remus: Dom Halle

Musterfläche HAL_I

Die Musterfläche an einem Strebepfeiler auf der Nordseite des Doms in Halle zeigte eine kompakte schwarze, biogen induzierte Kruste. In jüngerer Zeit erfolgte hier eine Neuverfugung, allerdings ohne erkennbare Reinigungsmaßnahmen am Sandstein.





Abbildung 31: Musterfläche an der Nordseite des Domes in Halle.

6 Corinna Grimm-Remus: Exemplarische Ergebnisse der Reinigung von Naturstein aus restauratorischer Sicht

6.1 Vorgehen und Bewertung

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt >250 Musterflächen auf Naturstein mit einer Größe von jeweils ca. 50 cm² systematisch angelegt und dokumentiert. Ziel war es, den Einfluss unterschiedlicher Geräte- und Einstellparameter auf das Reinigungsergebnis vergleichbar zu untersuchen. **Alle Einstellparameter und die dazugehörige Dokumentation (Makrofotos und digitalmikroskopische Aufnahmen aller Musterflächen) sind zukünftig über die Datenbank “LADIS“[10] abrufbar.**

Zu den zentralen Variablen zählen die Leistung des Lasers (z. B. 50 Watt) beziehungsweise die eingebrachte Energie (J), die Pulsfrequenz sowie die Scanfrequenz (Repetition). Ebenso berücksichtigt wurden die Scanbreite und das Scanraster (z. B. line, brush oder Lissajous), da sie maßgeblich die Energieverteilung auf der Oberfläche beeinflussen. Die Brennweite des Objektivs – und damit der Arbeitsabstand – wurde ebenfalls dokumentiert, da sie Einfluss auf Spotgröße und Energiedichte hat.

Ein entscheidender Vergleichswert ist die berechnete Energiedichte (J/cm²), die sogenannte Fluenz. Sie bestimmt, ob die Ablationsschwelle der jeweiligen Verschmutzung erreicht oder überschritten wird. Zusätzlich wurde erfasst, ob eine Vorreinigung beziehungsweise eine Kombination mit anderen Reinigungsmethoden erfolgte und ob der Untergrund trocken oder nass vorbereitet wurde.

Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Untersuchung der sogenannten Nasslaserreinigung. Dabei wird vor der Laserbehandlung ein dünner Flüssigkeitsfilm – in der Regel Wasser – auf die Substratoberfläche aufgetragen. Trifft der hochenergetische, gepulste Laserstrahl auf diesen Flüssigkeitsfilm, kommt es zu einer schnellen lokalen Erhitzung und einer explosionsartigen Verdampfung. Die plötzliche Phasenänderung erzeugt eine starke Stoßwelle an der Grenzfläche zwischen Substrat und Flüssigkeit. Die daraus resultierende mechanische Kraft unterstützt die Ablösung von Verunreinigungen.

Durch diesen Synergieeffekt aus Laserenergie und Flüssigkeitsverdampfung kann die Reinigungseffizienz im Vergleich zu trockenen Verfahren deutlich erhöht werden. Voraussetzung ist jedoch, dass der jeweilige Untergrund Feuchtigkeit toleriert, beziehungsweise kapillar aufnehmen kann, ohne Schaden zu nehmen.

Die Bewertung der Musterflächen erfolgte anhand klar definierter Kriterien: Wurde das angestrebte Reinigungsziel erreicht? Integriert sich die gereinigte Fläche visuell in ihr Umfeld? Ist ein selektiver Oberflächenabtrag möglich und

[10] Vgl. Kapitel 12

das Reinigungsniveau gut kontrollierbar? Zudem wurde geprüft, ob unerwünschte Farbveränderungen auftraten, wobei gerade dieses Bewertungskriterium sich als schwierig in der insitu Beurteilung erwies, da auch das ungereinigte Material häufig partielle gelbliche oder orange Patinierungen zeigt, so auch beim Halberstädter Muschelkalk.



Abbildung 32: Typisches Spektrum von Patinierungen beim Halberstädter Muschelkalk, auch gelbe bis organgegelbe neben hellen oder schwarzen Bereichen.

Weitere Beurteilungsmaßstäbe waren die Effizienz (Flächengröße im Verhältnis zur benötigten Zeit) sowie die Praktikabilität im Hinblick auf Baustellensituation oder Werkstattbedingungen, etwa den Aufwand für Gerüststellungen. Schließlich wurde untersucht, inwiefern durch die Reinigung materialtypische Gesteinseigenschaften wiederhergestellt werden konnten, beispielsweise durch ein „Öffnen“ der Oberfläche im Sinne einer Freilegung der ursprünglichen Textur und Porosität.

6.2 Halberstädter Dom

6.2.1 Kalksteinoberfläche mit ausgeprägter schwarzer Umwandlungskruste, Musterfläche HBS_IV

Die beiden Hauptwerkgesteine des Halberstädter Domes sind ein Kreidesandstein (Involutus Sandstein) und der sog. Halberstädter Muschelkalk.

Bei Kalkstein tritt häufig eine sogenannte Umwandlungskruste auf, die sich entscheidend von einer reinen Auflagerungskruste unterscheidet. Während Letztere als äußerlich angelagerte Schicht auf dem Stein haftet bzw. nur wenige Millimeter tiefe Auswirkungen einer Verdichtung zeigt, entsteht die Umwandlungskruste durch einen chemischen Reaktionsprozess innerhalb der oberflächennahen Gesteinsschicht selbst. Diese Krustenart kann mehrere Millimeter (bis >30mm) tief im Kalkstein nachgewiesen werden.

Schadprozess bei Kalkstein:

Ausgangspunkt ist die Reaktion von Luftschadstoffen mit dem karbonatischen Gestein. Vereinfacht lässt sich der Prozess folgendermaßen darstellen:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2$$

Calcit (Calciumcarbonat), der Hauptbestandteil von Kalkstein, reagiert mit schwefelhaltigen Luftschadstoffen unter Bildung von Gips (Calciumsulfat-Dihydrat) und Kohlenstoffdioxid. Das entstehende Gipsgefüge bildet sich aus der Substanz des Steins heraus – es handelt sich daher um eine innige, stoffliche Verbindung zwischen Kruste und Gestein.

Im Gegensatz zur Auflagerungskruste ist die Umwandlungskruste nicht “aufgesetzt“, sondern Ergebnis eines mineralogischen Transformationsprozesses. Eine klare Trennlinie zwischen „Kruste“ und „Stein“ existiert oft nicht mehr. Häufig wird die ursprüngliche Oberflächeninformation – etwa Werkspuren oder Reliefdetails – nur noch durch die verhärtete Kruste zusammengehalten. Ihre vollständige Entfernung kann daher mit Substanz- und Informationsverlust einhergehen.

Um eine beginnende Umwandlungskruste und eine bereits stark ausgeprägte Umwandlungskruste im Projekt abzubilden, wurde dies mit den Musterflächen HBS_I und HBS_IV klar unterschieden.





Abbildung 33, Abbildung 34: Unterschiedliche Krustenausprägung auf Kalksteinoberflächen. Umwandlungskruste am Nordquerhausportal (links) und überwiegend aufliegende Kruste im Kreuzgang.

Restauratorische Zielsetzungen:

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel nicht in einer vollständigen Abnahme, sondern in einer zerstörungsarmen Reduzierung der auflagernden beziehungsweise umgewandelten Gipskruste. Die originale Oberfläche soll möglichst unbeeinträchtigt bleiben – idealerweise ohne zuvor notwendige Vorfestigung.

Weitere Zielsetzungen sind:

- Einschränkung des Schädigungsprozesses, insbesondere durch Reduzierung zusätzlicher thermischer Belastungen während der Reinigung
- „Öffnen“ der Oberfläche, um beispielsweise die Zugänglichkeit für Konservierungsmittel zu verbessern, denn die Kruste führt häufig zur nahezu vollständigen Unterbindung der kapillaren Wasseraufnahme (w-Werte des Halberstädter Muschelkalkes ohne Kruste: ca. 1-3 kg/(m^2 ▪ √h)[11]
- Freilegung verdeckter Befunde und Schäden, die unter der Kruste nicht erkennbar sind
- Wiederherstellung der Lesbarkeit von Formverläufen und Reliefs, sodass Inhalte und ästhetische Qualitäten wieder erfahrbar werden

[11] Eigene Messungen an unterschiedlichen Bereichen des Dombaus.

Gleichzeitig sind dabei klare Grenzen zu beachten: Farbveränderungen – insbesondere ein unerwünschter Yellowing-Effekt – sind zu vermeiden. Ebenso soll die gewachsene „Patina“ erhalten bleiben. Die gereinigten Bereiche müssen sich in ihr Umfeld beziehungsweise in nicht verschwärzte Partien einer Fassade integrieren. Ziel ist nicht die Neuwertigkeit, sondern der Erhalt des Alterswertes.

In diesem Zusammenhang ist auf die methodischen Überlegungen von Barbara Appelbaum in *Conservation Treatment Methodology* hinzuweisen: **Nicht alles, was technisch möglich ist, ist auch konservatorisch angemessen.** Restaurierung bewegt sich stets im Spannungsfeld zwischen dem Anspruch, materialtechnische Eigenschaften möglichst „wiederherzustellen“, und dem Respekt vor historischer Authentizität und Altersspuren.

Das „Heilen“ eines Schadens ist daher immer eine Abwägung. Objektiv messbare Werte – etwa Salzgehalte, Festigkeit, w- Werte oder Farbmetriken – bieten dabei eine wichtige Entscheidungsgrundlage. Sie können jedoch die letztlich notwendige fachliche und ethische Bewertung nicht vollständig ersetzen. Entscheidend ist das Finden eines angemessenen Reinigungsgrades, der sowohl materialtechnischen als auch denkmalpflegerischen Anforderungen gerecht wird.

6.2.1.1 Ergebnisse mit CleanLaser CL50 bei stark ausgeprägter Umwandlungskruste (Musterfläche HBS_IV)

Der CleanLaser CL50 erwies sich am Halberstädter Dom aus restauratorischer Sicht als ein für viele Anwendungsfälle geeignetes, praxisnah einsetzbares Reinigungssystem. Als geeignete Parameter wurden insbesondere eine Pulsfrequenz von 70–100 kHz, eine Scanfrequenz von 90–120 Hz sowie eine Leistung von 50 Watt in Kombination mit einer 150-mm-Linse identifiziert. Diese Konfiguration ermöglicht eine kontrollierte, gleichmäßige Abtragung bei zugleich guter Flächenleistung.

Ein wesentliches Merkmal des Geräts ist der stark anwendergesteuerte Ablationsprozess. Durch die vergleichsweise kleine Brennweite ist der Arbeitsabstand des Laserkopfes präzise definiert. Bereits geringe Abweichungen vom optimalen Abstand führen unmittelbar zu einer Verringerung der Intensität beziehungsweise der Energiedichte auf der Oberfläche. Dies erlaubt es der Anwenderin oder dem Anwender, sehr sensibel auf fragile oder geschädigte Bereiche zu reagieren. Die Steuerung erfolgt somit nicht ausschließlich über technische Parameter, sondern auch über die bewusste Führung des Laserkopfes – ein Vorteil insbesondere bei inhomogenen oder substanzgeschwächten Untergründen.

Darüber hinaus zeichnet sich das System durch seine gute Transportfähigkeit und Baustellentauglichkeit aus. Das vergleichsweise kompakte und mobile Gerät kann flexibel eingesetzt werden und eignet sich daher sowohl für Werkstattsituationen als auch für Anwendungen im Außenbereich.

Zunächst wurden kleinere Probeflächen angelegt, um geeignete Einstellparameter systematisch zu ermitteln. Auf dieser Grundlage konnten Pulsfrequenz, Leistung, Scanparameter und Arbeitsabstand schrittweise angepasst und auf das jeweilige Material sowie die Art der Verschmutzung abgestimmt werden.

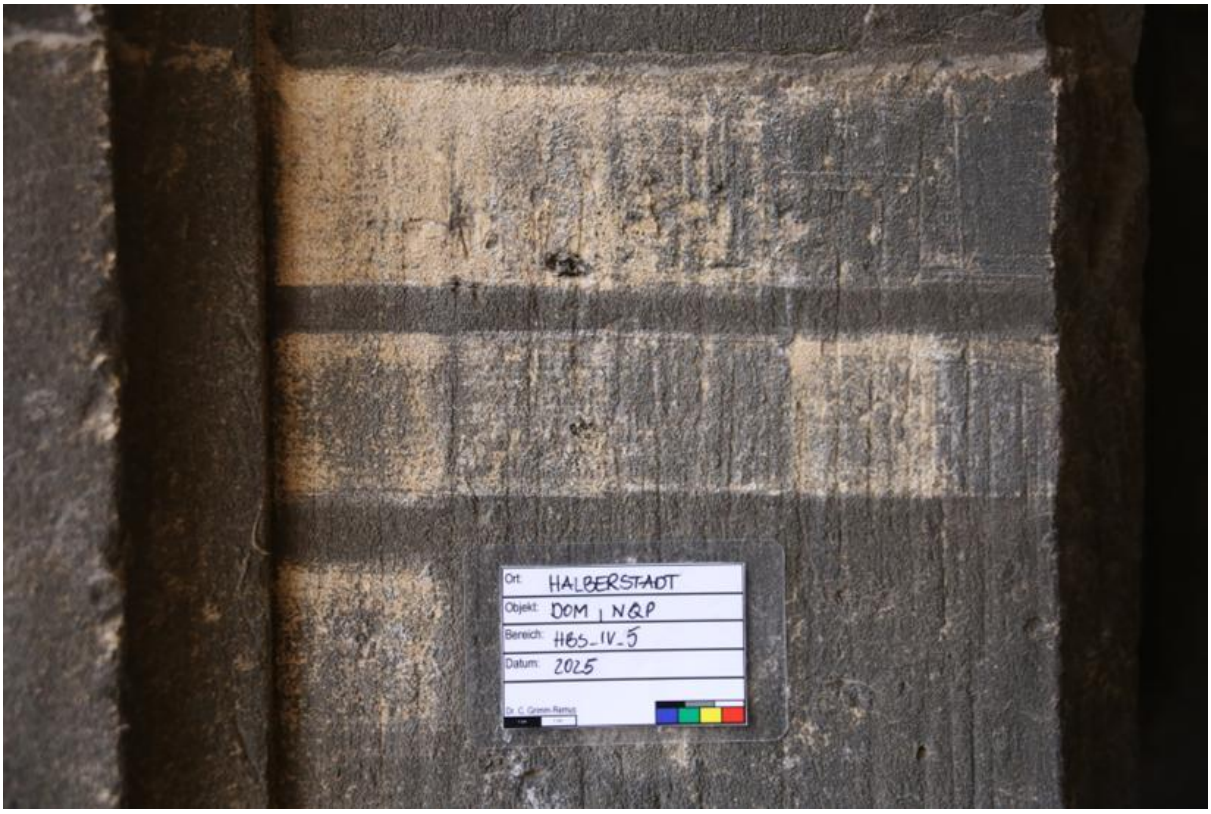
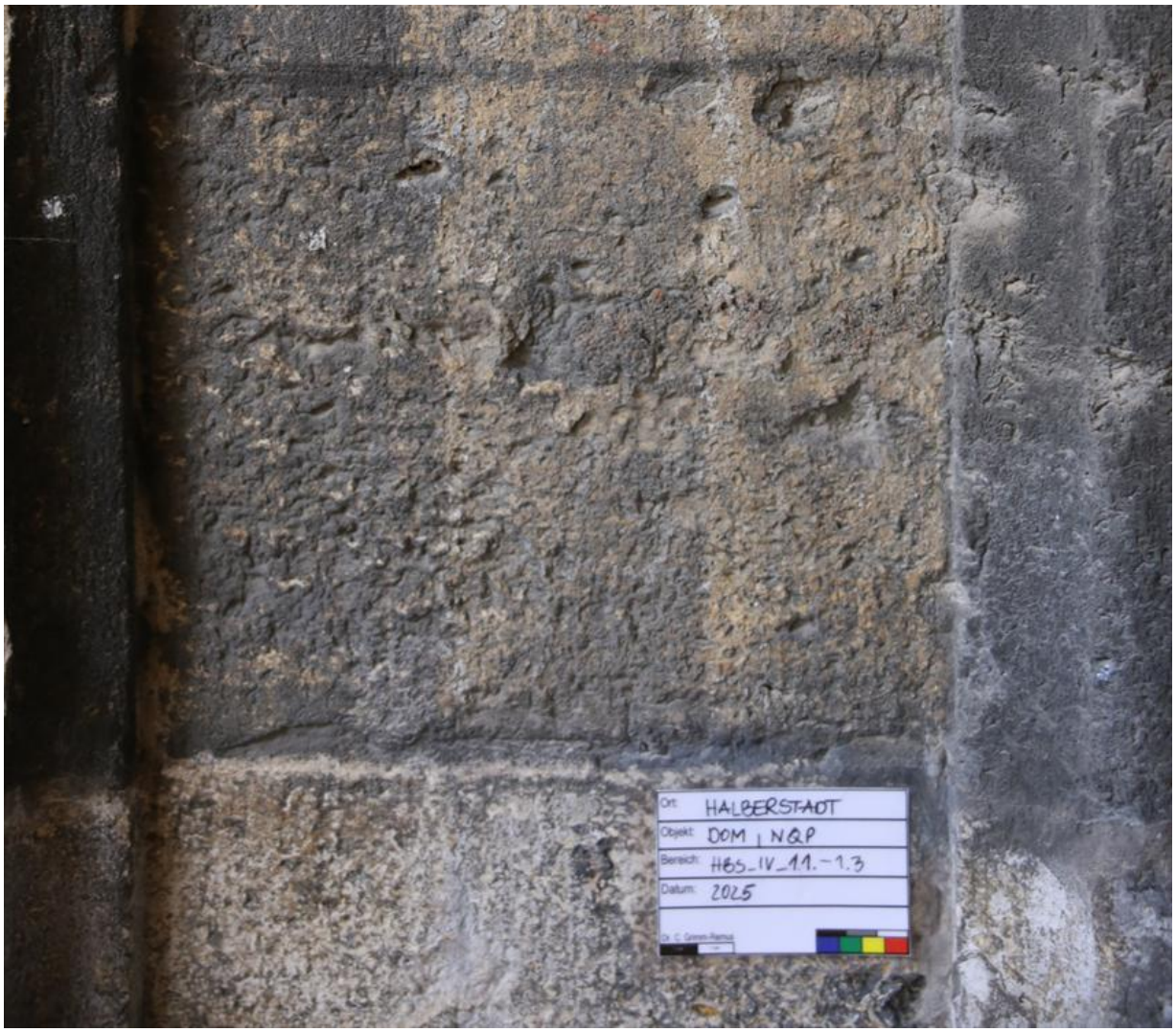


Abbildung 35: Erste Musterflächen zur Ermittlung geeigneter Einstellparamater.

In einem zweiten Schritt wurden die so identifizierten Parameter weiter verfeinert und auf größeren Flächen erprobt. Ziel war es dabei insbesondere, graduelle Abstufungen im Reinigungsniveau zu erzielen. Durch gezielte Variation einzelner Parameter konnten differenzierte Reinigungsgrade eingestellt werden – von einer vorsichtigen Reduzierung der Kruste bis hin zu einer weitergehenden Freilegung.

Dieses stufenweise Vorgehen ermöglichte nicht nur eine bessere Kontrolle des Prozesses, sondern auch eine präzisere Annäherung an den jeweils angemessenen Reinigungsgrad im Sinne der restauratorischen Zielsetzung.



- Leistung 30 Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanfrequenz: 90Hz

- Leistung 40 Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanfrequenz: 90Hz

- Leistung 50 Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanfrequenz: 90Hz

Die Ergebnisse wurden ergänzend mit einem Digitalmikroskop der Marke Dino-Lite dokumentiert. Auf diese Weise konnten die behandelten Bereiche in starker Vergrößerung untersucht und feinste Veränderungen an der Oberfläche sichtbar gemacht werden.

Ziel dieser mikroskopischen Kontrolle war es insbesondere, eine mögliche Schädigung von historischen Bearbeitungsspuren oder der originalen Oberflächenstruktur auszuschließen. Durch den Vergleich von Vorher- und Nachheraufnahmen ließ sich überprüfen, ob Werkspuren, Korngefüge oder patinabildende Schichten erhalten geblieben sind und ob die Abtragung tatsächlich selektiv auf die Kruste begrenzt werden konnte.

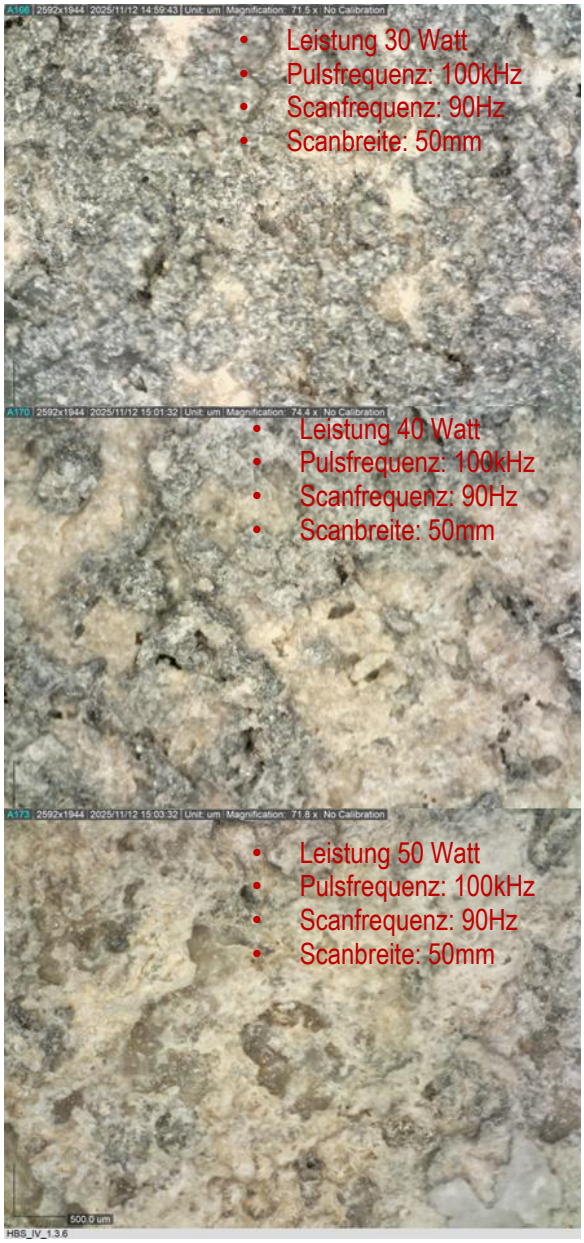


Abbildung 36: Beispielhafte Darstellung des Reinigungsergebnisses mithilfe einer mikroskopischen Betrachtung.

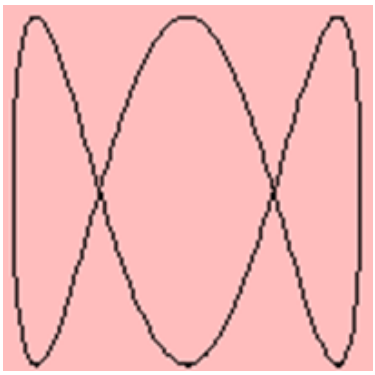
Neben dieser optischen Bewertung konnte bereits mit einem einfachen „Tropfentest“ geprüft werden, dass die Oberflächen wieder kapillar geöffnet sind, was sich mit den folgenden w-Wert- Bestimmungen bestätigen ließ.[12]

6.2.1.2 Ergebnisse mit Infinito bei stark ausgeprägter Umwandlungskruste (Musterfläche HBS_IV)

Neben dem CleanLaser CL50 erwies sich auch der Infinito- Reinigungslaser als äußerst geeignetes Gerät zur Bearbeitung der Umwandlungskruste auf Kalkstein in Halberstadt.

Mit dem Infinito- Reinigungslaser konnten insbesondere bei folgenden Einstellungen sehr gute Ergebnisse erzielt werden:

Leistung: 50, 72 und 100 Watt, je nach Verschmutzungsgrad und angestrebtem Reinigungsniveau
Scanbreite: 10 × 10 mm im Lissajous-Raster



Der Vergleich zwischen trockener und nasser Anwendung zeigte eine spürbare Effizienzsteigerung im Nassverfahren, insbesondere bei stärker ausgeprägten Gipskrusten. Die zusätzliche mechanische Wirkung durch die impulsartige Verdampfung des Wasserfilms unterstützte die Ablösung der Kruste und ermöglichte ein homogeneres Reinigungsergebnis.

Die durchschnittliche Flächenleistung lag bei etwa 1 m² pro Stunde, abhängig von Krustenstärke, gewünschtem Reinigungsgrad und gewählter Leistung. Damit erwies sich das Gerät nicht nur als präzise, sondern auch als praktikabel im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit größerer Maßnahmen.

[12] Vgl. Kapitel 7



Abbildung 37: Beispiel der Reinigungsmuster mittel Infinito- Laser.

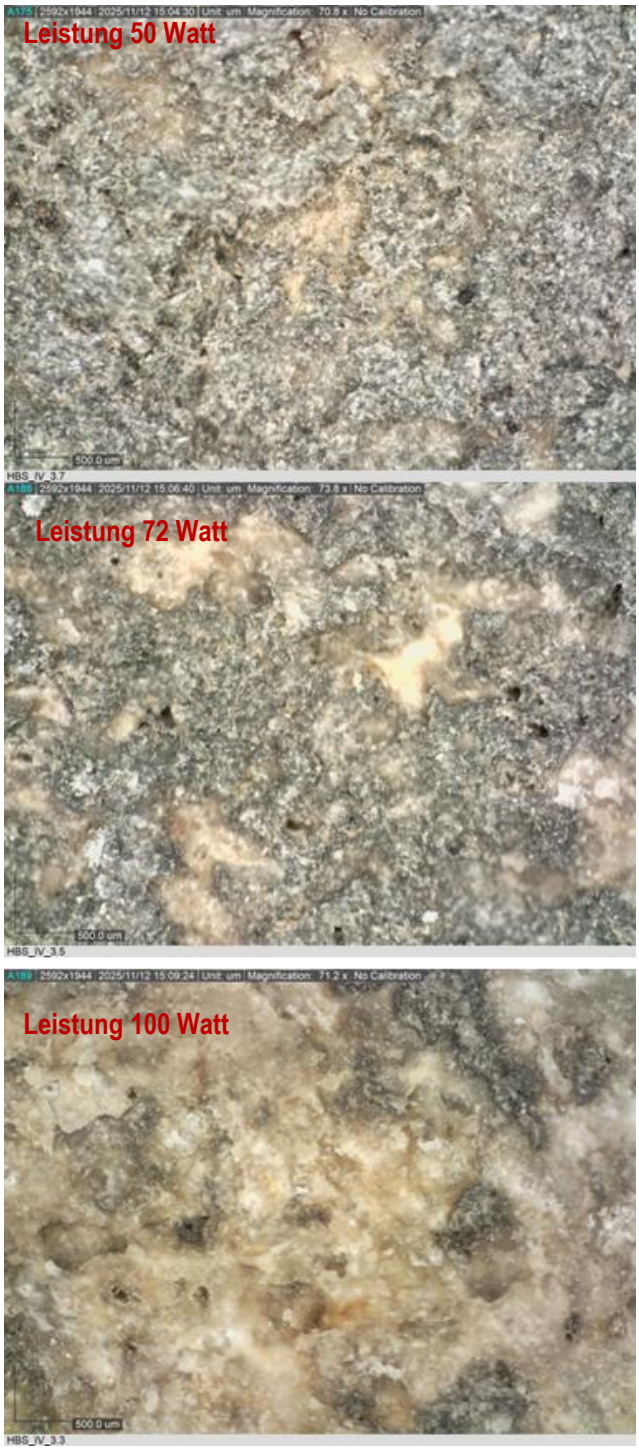


Abbildung 38: Beispielhafte Darstellung des Reinigungsergebnisses mithilfe einer mikroskopischen Betrachtung.

6.2.1.3 Ergebnisse mit Soliton bei stark ausgeprägter Umwandlungskruste (Musterfläche HBS_IV)

Der Soliton- Reinigungslaser wurde im Projekt ebenfalls untersucht, zeigte jedoch im Vergleich zu anderen getesteten Systemen deutliche Einschränkungen im restauratorischen Einsatz.

Das Gerät arbeitet mit einer Leistung von 300 Watt bei einer eingestellten Fluenz von etwa 0,7 J/cm². Hier erwies sich die Erzielung einer gleichmäßig gereinigten Oberfläche als schwierig. Insbesondere bei sensiblen oder inhomogenen Krusten führte die hohe Energieeinbringung zu einer geringeren Steuerbarkeit des Abtrags. Die differenzierte Einstellung gradueller Reinigungsniveaus – etwa im Sinne einer kontrollierten Reduktion statt vollständiger Entfernung – war damit nur eingeschränkt möglich.

Darüber hinaus zeigte sich das System als weniger baustellengeeignet. Größe, Handhabung und Mobilität stellten im praktischen Einsatz Nachteile dar, insbesondere im Vergleich zu kompakteren und flexibler einsetzbaren Geräten. Für Werkstattsituationen oder spezielle Anwendungen kann das System geeignet sein, im denkmalpflegerischen Kontext mit wechselnden Einsatzorten und sensiblen Oberflächen erwies es sich jedoch als weniger praktikabel.



Abbildung 39: Probeflächen für den Einsatz des Soliton- Lasers.



Abbildung 40: Beispielhafte Darstellung des Reinigungsergebnisses mithilfe einer mikroskopischen Betrachtung.

6.2.1.4 Übertragbarkeit auf weitere Protalbereiche

Im Ergebnis aller durchgeführten Musterflächen wurde die **Laserreinigung mit dem CleanLaser CL50** am **Nordquerhausportal** umgesetzt. Dabei konnten sämtliche restauratorisch gesetzten Ziele sehr gut demonstriert und erreicht werden.

Die Behandlung zeigte, dass die Methode eine **selektive und kontrollierte Abtragung** der Verschmutzungen und Krusten erlaubt, ohne die originale Oberflächenstruktur oder historische Bearbeitungsspuren zu beeinträchtigen. Auch graduelle Abstufungen im Reinigungsniveau ließen sich präzise steuern, sodass sowohl die visuelle Integration in das Umfeld als auch der Erhalt der Patina gewährleistet waren. Auch die häufig bemängelte Streifentextur der gereinigten Oberfläche ließ sich durch mehrmaliges Abfahren der Oberflächen mit geringerer Leistung hervorragend steuern bzw. vermeiden.

Zudem bestätigte sich die **Praktikabilität des Geräts** im Baustelleneinsatz: Arbeitsabstand, Handhabung und Mobilität ermöglichten eine sichere Bearbeitung auch größerer Flächen bei gleichzeitig hoher Effizienz. Insgesamt lieferte der Einsatz am Nordquerhausportal ein **anschauliches und praxisnahes Beispiel für die erfolgreiche Anwendung der Laserreinigung in der Denkmalpflege**.



Abbildung 41: Lasergereinigte Musterfläche am Nordquerhausportal.



An zusätzlichen Musterflächen an der Nordfassade des Dom St. Sixtus und St. Stephanus wurden ergänzend verschiedene Reinigungsverfahren sowie kombinierte Methoden vergleichend untersucht. Im Fokus standen dabei abrasive Strahlverfahren, die Kombination aus Laserreinigung und Strahltechnik sowie eine chemische Reinigung unter Einsatz von Anionentauscherharzen (Powdex).

Die Ergebnisse dieser Bemusterung zeigten deutlich, dass insbesondere die Laserreinigung sowohl als eigenständiges Verfahren als auch in Kombination mit einer vorgeschalteten Strahlreinigung eine hohe Wirksamkeit und Eignung aufweist. Sie erwies sich als besonders vorteilhaft, da sie eine gezielte und zugleich materialschonende Entfernung von Verunreinigungen ermöglicht.

Abbildung 42: Musterflächen an der Nordfassade des Halberstädter Domes.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Laserreinigung im Vergleich zu den anderen getesteten Methoden die besten Resultate hinsichtlich Reinigungsleistung und Substanzerhalt erzielte und daher als bevorzugtes Verfahren für die konservatorische Behandlung der Fassadenoberflächen angesehen werden kann.

6.2.2 Kalksteinoberflächen mit beginnender Umwandlungskruste, HBS_I

Bei den Flächen handelt es sich um Kalksteinoberflächen mit beginnender Umwandlungskruste, d.h. die Gips- bzw. Schmutzkruste liegt im Wesentlichen auf der Kalksteinoberfläche verbacken auf. Diese Krustenform der Kreuzgangoberflächen (Innenseiten des Kreuzgangs, geschütztes Außenklima) konnten aus restauratorischer Sicht mit allen getesteten Laserreinigungsgeräten sehr gut reduziert werden. Häufig waren dabei niedrige Fluenzen (<0,5J/cm²) völlig ausreichend. Dies spiegelt sich nicht nur in der nur optischen Veränderung der Oberfläche wieder, die w-Werte wurden nur marginal verändert.

Allerdings führte ein lediglich einmaliges Abfahren der Oberflächen mit dem CleanLaser CL 50 vereinzelt zu der bereits beschriebenen, typischen Streifentextur. Diese Erscheinung konnte jedoch durch ein wiederholtes, gleichmäßiges Überarbeiten der betreffenden Flächen problemlos reduziert beziehungsweise vollständig vermieden werden. Auf diese Weise ließ sich ein homogenes und optisch ausgewogenes Reinigungsbild erzielen.



Abbildung 43: Musterfläche mit CleanLaser im Halberstädter Kreuzgang.

Auch mit dem Infinito- Reinigungslaser konnten wiederum sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

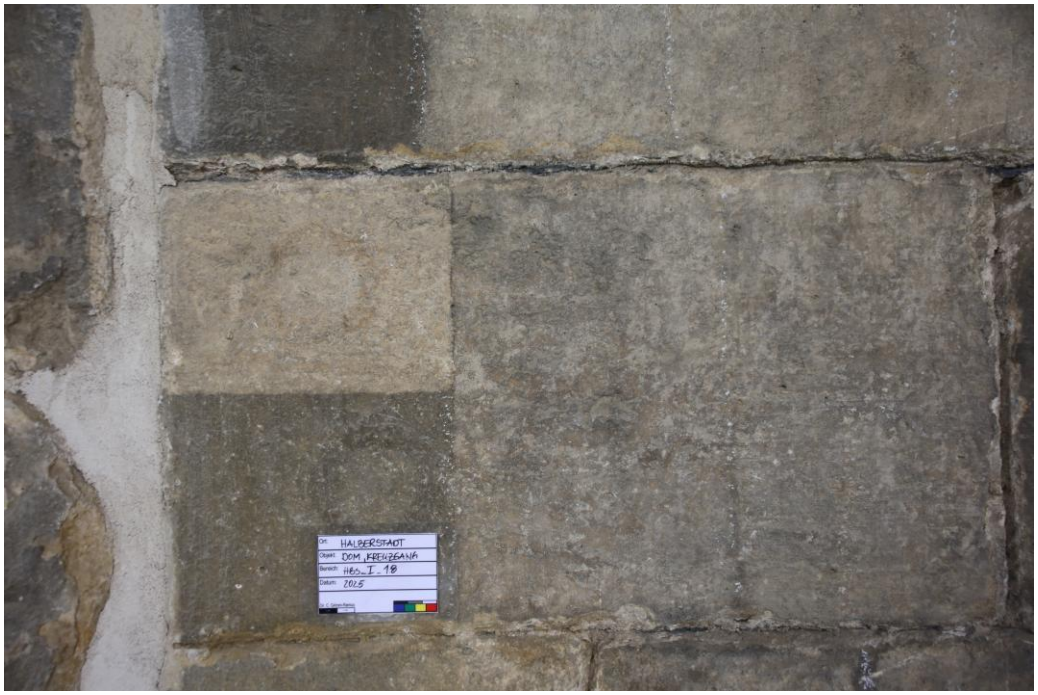


Abbildung 44: Musterfläche mit Infinito im Halberstädter Kreuzgang.

Auch mit dem Smart300- Reinigungslaser war ein abgestuftes, homogenes Reinigungsniveau umzusetzen.



Abbildung 45: Musterflächen mit Smart300 im Halberstädter Kreuzgang.

Für alle Geräte kann gesagt werden, dass sich der Unterschied zwischen einer Nass- und Trockenreinigung hier, im Gegensatz zur starken Umwandlungskruste am Nordquerhausportal, nur marginal bemerkbar machte.

6.2.3 Kalksteinoberflächen mit Fassungsresten, HBS_III

In einer weiteren Musterfläche sollten die Ergebnisse an gefassten Oberflächen dargestellt und bewertet werden. Hierbei handelt es sich um einen Kalkstein mit aufliegender Rotfassung, welche mit verbackenen Schmutzauflagen belegt ist.



Abbildung 46: Kämpferstein aus Kalkstein im Bereich des sog. Alten Kapitalsaals, mit erkennbarerer Rotfassung unterhalb der Krustenauflagerungen.

Hierzu erfolgte zunächst die materialanalytische Bestimmung der vorhandenen Pigmente, um thermisch nicht stabile Pigmente wie z.B. Bleimennige auszuschließen. Die Analyse wurde mittels eines Röntgenfluoreszenzanalysators (Niton XL3t) durchgeführt (Messungen durch Prof. Steffen Laue, FH Potsdam).

Die Untersuchung ergab das alleinige Vorhandensein von Eisenoxidpigmenten (Fe_2O_3), die eine thermische Stabilität von über 1000 °C aufweisen. Aufgrund dieser hohen Temperaturbeständigkeit konnte die Anwendung der Laserreinigung als materialverträglich und technisch geeignet eingestuft werden.

731	alter Kapitelsaal, Stephanus-Kapelle, südl. Kämpferstein, rötlich	Ca, S, Fe, Si	Gips und roter Ocker

Abbildung 47: Bestimmung mittels Röntgenfluoreszenzanalysators Niton XL3t (durch Prof. Steffen Laue (FH- Potsdam)

Die hier angelegten Muster beschränkten sich auf das Gerät CleanLaser CL50 mit verschiedenen Einstellparametern.

- Leistung 20-30 Watt, nass und trocken
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanfrequenz: 90Hz
- Scanbreite: 40mm

Hier kann man zusammenfassen, dass die Reinigungsmuster alle sehr gute Ergebnisse zeigen. Ein Reduzieren der Auflagen ist sehr gut möglich, ohne die Rotfassung zu beeinträchtigen. Ein Unterschied zwischen Feucht- und Trockenreinigung war kaum feststellbar.



Abbildung 48: Angelegte Musterflächen an einem Kämpferstein im sog. Alten Kapitelsaal.

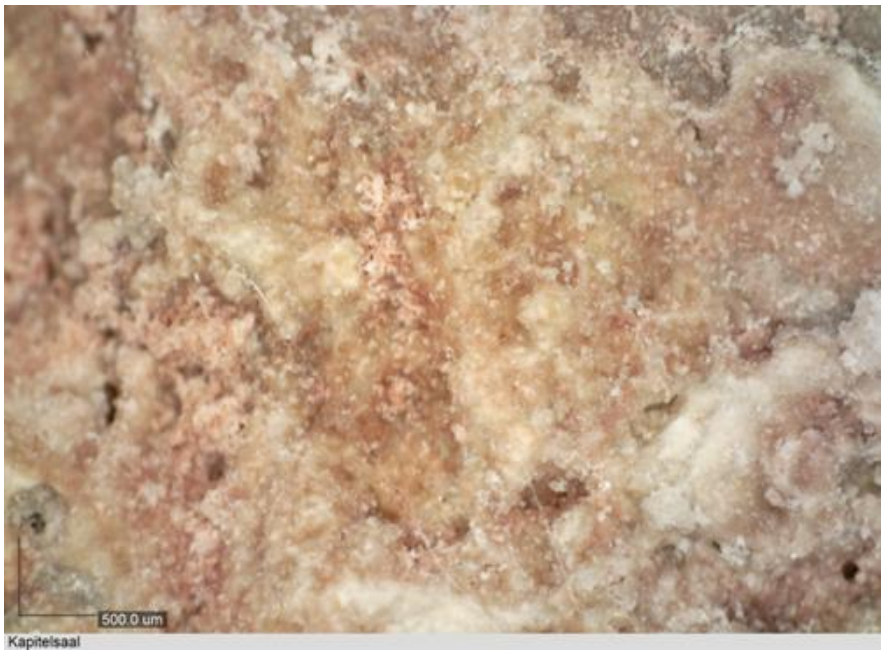


Abbildung 49: Mikroskopische Aufnahme vor Ort, mit erhalten Rotfassung und Resten der Krustenauflage.

6.2.4 Sandsteinoberflächen mit Auflagerungskruste, HBS II

Das Natursteinmaterial der Musterfläche im Kreuzgarten ist ein heller, gelblich gefärbter Involutus- Sandstein mit sehr unterschiedlicher Körnung. Er zeigt zumeist eine kompakte, grau bis schwarze Auflagerungskruste mit oberflächennaher Gipsbildung (1mm). Vereinzelt hat diese bereits zu einer Schalenbildung, z.T. mit Fehlstellen, geführt, hier ist von einer Gipsbildung in tieferen Bereichen auszugehen.
Ohne Kruste sind für das Gestein w-Werte >20 kg/(m2 ▪ √h) typisch[13], mit Kruste sind die Werte deutlich niedriger. Restauratorisch ist deshalb eine Aufhellung und Wiederangleichung an ursprüngliche w-Werte wünschenswert, um große Unterschiede innerhalb einer Fassadefläche zu reduzieren.

Auch hier zeigten alle getesteten Laserreinigungsgeräte gute Reinigungserfolge. Häufig waren jedoch deutlich höhere Fluenzen (>1J/cm²) notwendig, um ein sichtbares Reduzieren der Kruste zu erzielen.

[13] Eigene Messungen an verschiedenen Bereichen des Dombaus.

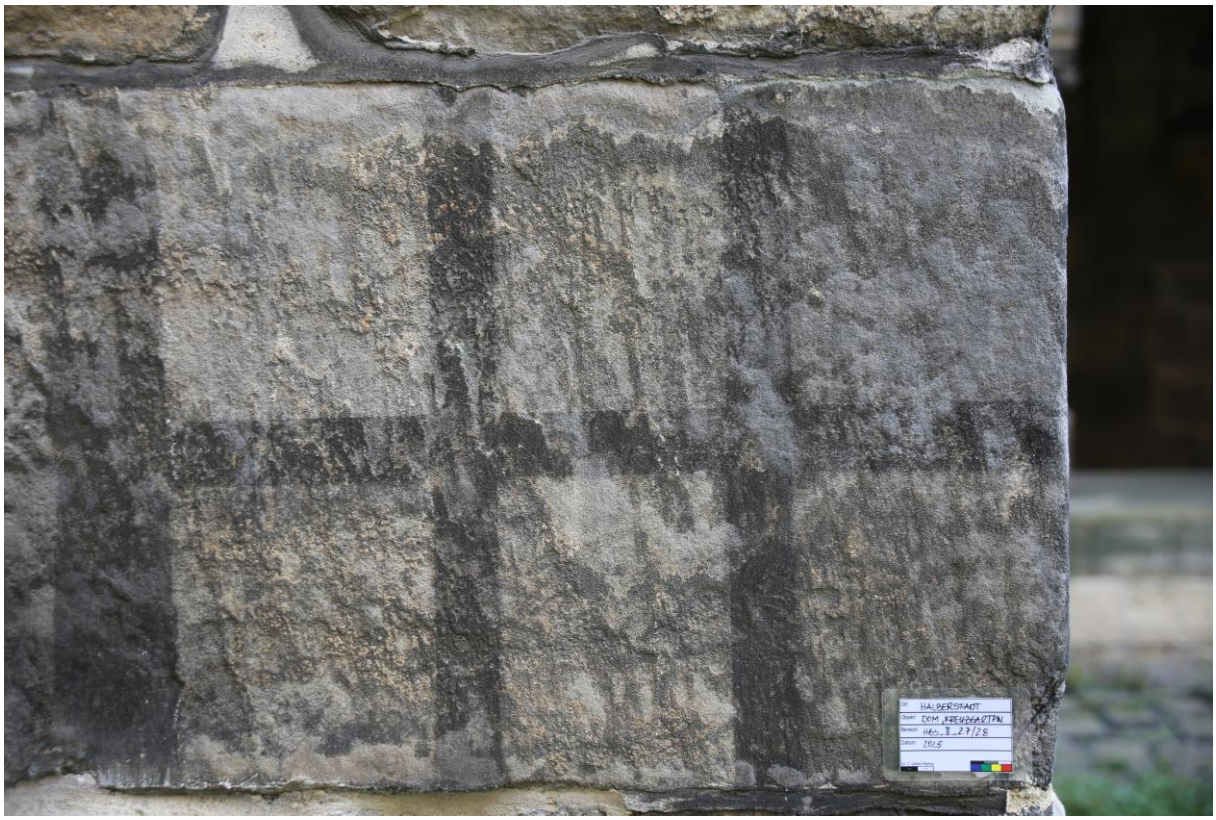


Abbildung 50: Angelegte Musterflächen mit dem Smart 300 (50, 75 und 100% Leistung).

Bei der Reinigung, vor allem mit dem Smart300- Reinigungslaser, gab es den Verdacht auf Farbveränderungen, wobei nicht überzeugend geklärt ist, ob diese tatsächlich durch die Einwirkung des Lasers entstanden oder zur gealterten Oberfläche gehören. Auch unter der noch erhaltenen Kruste ist eine gelborange Schicht gut erkennbar. Also auch im ungereinigten Bereich ist dies so mikroskopisch und makroskopisch unter der Kruste partiell festzustellen.

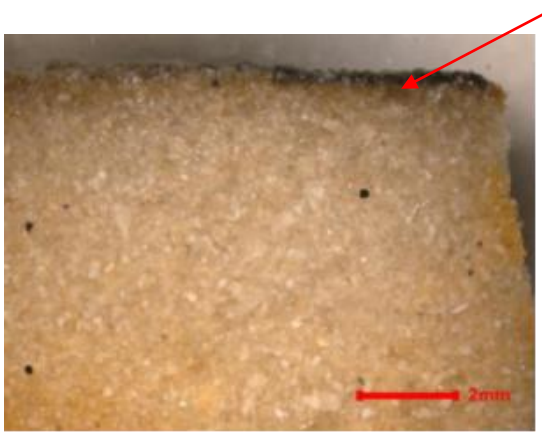


Abbildung 51: Bereich mit schwarzer Auflage (rechts) neben lasergereinigtem Bereich (links) (Videomikro-skop) (Foto: KÖBERLE, 2025. Auch unter der ungereinigten Kruste ist die gelb-orange Schicht zu erkennen.

Da der Involutus- Sandstein vereinzelt auch ohne Krustenbildung eine orangerote Patina am Bauwerk zeigt, ist diese Bewertung insitu erschwert.

Diese orangerote Patinierung kann an mehreren Bereichen des Dombaus beobachtet werden. Hierzu wären weiterführende, systematische Untersuchungen an genormten Probekörpern wünschenswert.

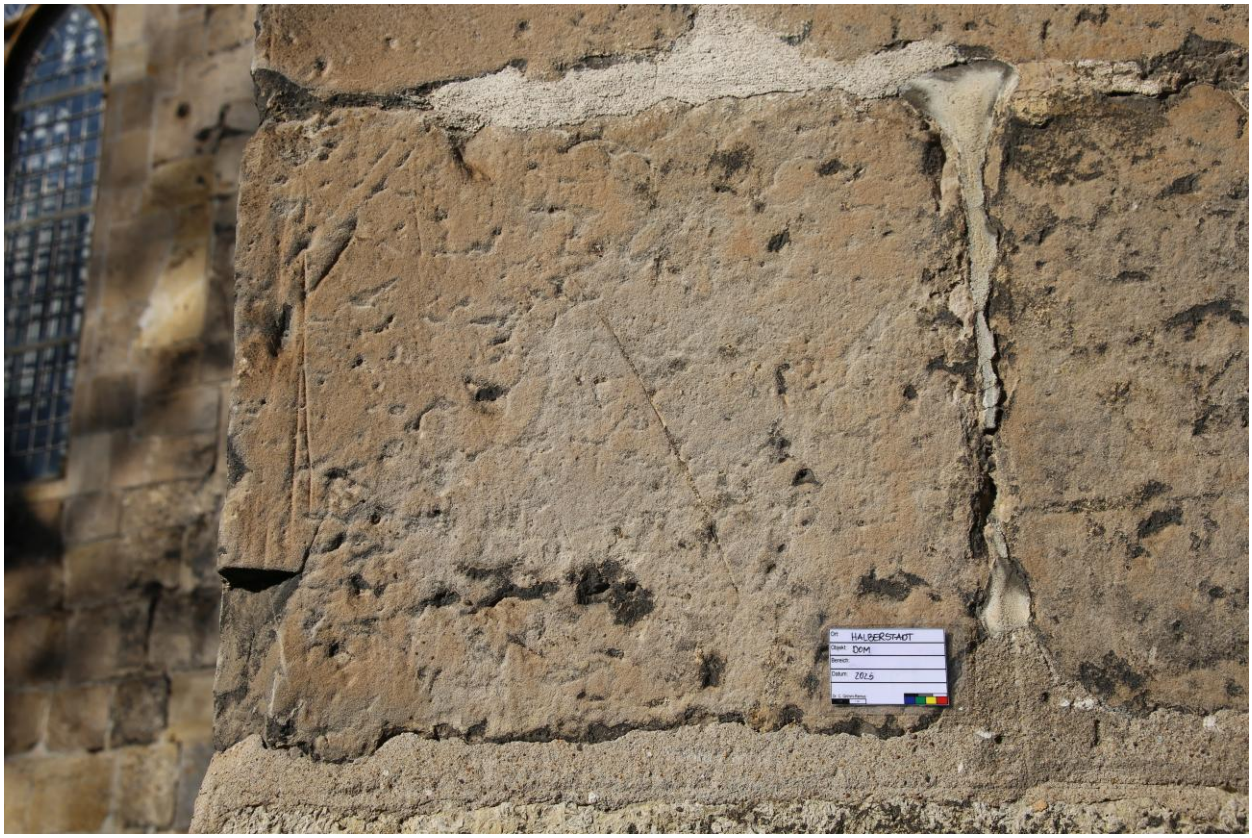


Abbildung 52: Gelborange Patinierung am Involutus-Sandstein am Halberstädter Dom, ungereinigter Zustand.

6.3 Magdeburger Dom

6.3.1 Sandstein und Kalkstein mit Kalkschlämme, stark verschmutzt, Musterfläche MD_I

Die Musterfläche I im oberen Bischofsgang ist mit einer Kalkschlämme bedeckt. Diese ältere Maßnahme sollte vermutlich Inhomogenitäten bzw. den Wechsel unterschiedlicher Natursteine (Sandstein und Kalkstein) egalisieren. Die Schlämme ist zudem mit einer verbackenen Schmutzauflage belegt. Hier war zu klären, ob es möglich ist, die bereits stark entfestigte und z.T. auch sich ablösende Schlämme zu reinigen. Diese berührungslose Möglichkeit der Laserreinigung stellt vermutlich die einzige Option einer Reinigung dar, ohne die Schlämme abzunehmen.

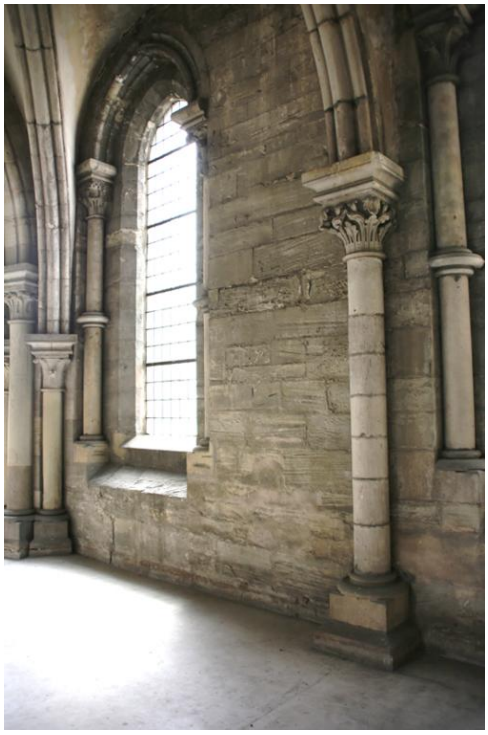


Abbildung 53: Blick auf die Wand im oberen Bischofgang.

Hier wurden lediglich zwei Lasergeräte eingesetzt, was der Erreichbarkeit der Ebene ohne Gerüst/Kran o.ä. geschuldet ist. Lediglich das Gerät CleanLaser CL50 und der Infinito-Reinigungslaser konnten die schmale Treppe hinauf transportiert werden.

Überzeugt haben beide Geräte. Eine leichte, mikroskopisch gut sichtbare, Steifigkeit mit dem CleanLaser CL50 (da auch hier häufig nur ein einmaliges Abfahren der Oberfläche ausreichte) ist mit dem Auge kaum wahrnehmbar und keineswegs störend.

Es ist also durchaus möglich effektiv und schadfrei die Schlämme zu reinigen und ggf. damit auch gut zu erhalten.

Sehr gute Einstellparameter waren hier z.B. mit CleanLaser CL50:

- Leistung 30-40 Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanfrequenz: 70Hz
- Scanbreite: 40mm



Abbildung 54: Musterflächen mit CleanLaser CL50.



Abbildung 55: Detail einer Musterfläche mit CleanLaser CL50.



Abbildung 56: Teile der Musterflächen mit Infinito-Reinigungslaser.

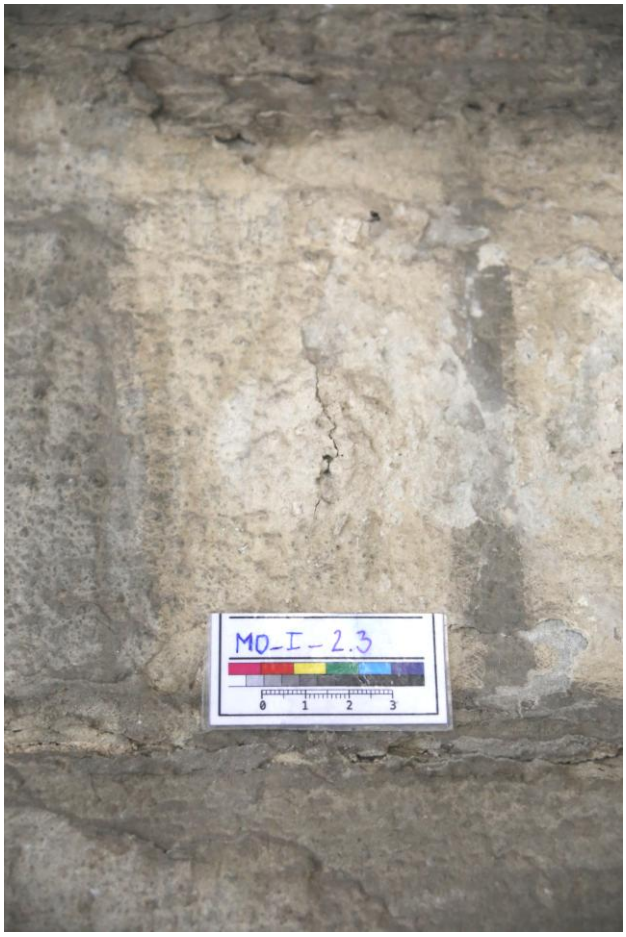


Abbildung 57: Detail einer Musterfläche mit dem Infinito- Reinigungslaser.

6.3.2 Sandstein mit Auflagerungskruste, Musterfläche MD_II

Der ausgewählte Strebefeiler der Tonsurkapelle zeigte eine typische dünne Auflagerungskruste auf einem (Bernburger) Buntsandstein.



Abbildung 58: Musterfläche an der äußeren Tonsurkapelle im Magdeburger Dom.

Auch hier zeigten alle Lasergeräte sehr gute Ergebnisse und lassen eine hohe Variabilität des Reinigungsgrades zu. Zwischen einer Nass- und Trockenreinigung waren bei allen Geräten kaum Unterschiede feststellbar.

Vor allem der CleanLaser CL50 und der Infinito haben wiederholt in Handhabung und Wirtschaftlichkeit (ca. 1h/m²) sehr gute Ergebnisse geliefert. Im Reinigungsergebnis überzeugen dagegen vor allem der Infinito- Reinigungslaser und der Thunder Compact- Reinigungslaser bei mittleren Leistungen.

Für den Infinito- Reinigungslaser haben sich bereits bei 50-75Watt sehr gute Ergebnisse gezeigt. Überzeugt haben hier folgende Einstellparamater:

- Leistung 50, max. 75 Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanbreite: 10x10mm (Lissajous)
- Linse: 250mm

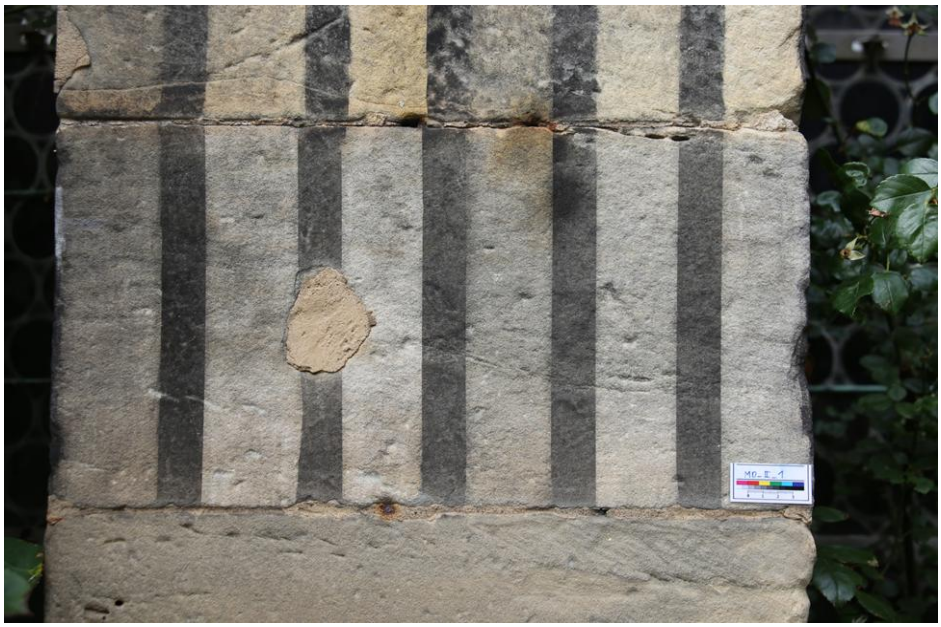


Abbildung 59: Musterflächen an der Tonsurkapelle mit Infinito (50, 75, 100 Watt, von re. nach li.) Links trocken, rechts nass.

Die Einstellungen mit 100Watt führten hier schnell zu einer sehr hellen (partiell nach restauratorischer Bewertung bereits überreinigten) Oberfläche.

- Leistung 100Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanbreite: 10x10mm (Lissajous)



Abbildung 60: Partielle Überreinigung mit 100Watt.

Der CLeanLaser CL50 lässt hier in der Fläche wieder eine gewisse Streifigkeit erkennen, die sich teilweise mit Bearbeitungsspuren auf der Steinoberfläche und Schichtung überlagert bzw. zu verstärken scheint.



Abbildung 61: Reinigungsmuster mit CleanLaser CL50.

Der direkte Vergleich zwischen Smart300-Reinigungslaser und dem ThunderCompact-Reinigungslaser zeigt bei hohen Energiedichten eine gelbliche Verfärbung mit dem ThunderCompact (unten, Mitte). Hier wären wieder Untersuchungen an genormten Proben sinnvoll, da die realen Probeflächen z.T. durch Reste ablaufender Korrosionsprodukte (korrodierte Metallteile) gestört sind und eine Bewertung aus restauratorischer Sicht hier nicht eindeutig möglich ist.

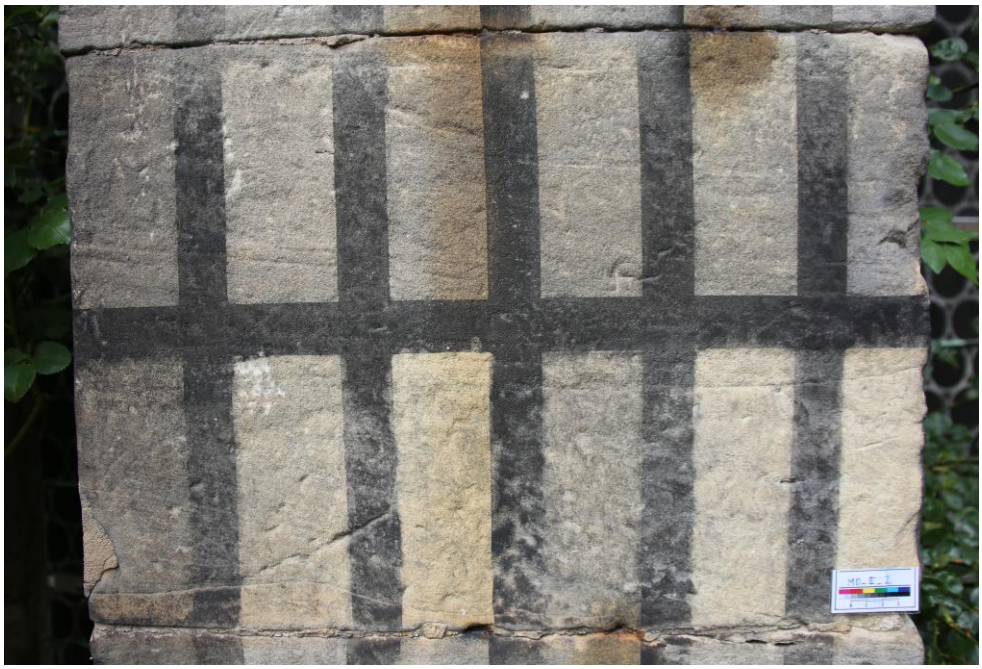


Abbildung 62: Reinigungsmuster mit Smart300 (oben) und Thunder Compact (unten).

6.3.3 Sandstein mit Auflagerungs- und Salzkruste, Musterfläche MD_III

Die Musterfläche an der Nordfassade des Magdeburger Doms zeigte eine vergleichsweise kompakte schwarze Auflagerungskruste, die zusätzlich mit einer massiven, leicht weißlich, opaken Salzkruste (Gips) kombiniert war.



Abbildung 63: Bereich der Musterfläche auf der Nordseite des Magdeburger Domes.

Keines der eingesetzten Geräte konnte für dieses Anwendungsfall einen ausreichenden Reinigungserfolg erzielen. Lediglich in Bereichen ohne ausgeprägte Krusten- oder Salzablagerungen war eine Reduzierung der Auflagen feststellbar. Aus restauratorischer Sicht ist die Laserreinigung daher als ungeeignet zu bewerten, da insbesondere helle, opake Salzkrusten die Laserstrahlung reflektieren und somit keine ausreichende Absorption erfolgt. Erfolgversprechender erscheinen abrasive Verfahren sowie Methoden zur gezielten Salzreduzierung.



Abbildung 64: Reinigungsmuster an der Nordseite des Magdeburger Domes.



Abbildung 65: Typisches Reinigungsergebnis mit erhaltener Salzkruste.

6.4 Versuche zur Entfernung biogenen Bewuchses – Dom Halle, Dom Magdeburg und Dom Halberstadt

Vor allem die Musterflächen am Dom in Halle, aber auch untergeordnet in Magdeburg und Halberstadt sollte auf die Möglichkeiten einer Laserreinigung von biogenem Bewuchs eingehen. Diesen Bewuchs abzureinigen, ist eine gängige restauratorische Praxis, da Algen, Flechten, Moose und Bakterien (saure Stoffwechselprodukte) sich negativ auf das Gesteinsgefüge auswirken können. Durch die Adsorption von Schadstoffen, Stäuben und Feuchte erhöht durch Mikrobiologie entstehen neben diesen häufig deutlich sichtbaren Bewuchs auch klebrige Filme, sog. Biofilme. In der Folge entstehen häufig kompakte, biogen induzierte Krusten.

Die Versuche an den Objekten erfolgten überwiegend mit dem CleanLaser CL50.

Erste Versuche Magdeburger Dom, z.T. mit Flechten bewachsen, waren wenig überzeugend:



Abbildung 66: Musterfläche am Dom Magdeburg.

Weitere Versuche mit Grünalgen in dünner Auflage, kombiniert mit schwarzen Auflagerungskrusten zeigten deutlich bessere Ergebnisse:



Abbildung 67: Musterfläche 5 an der Tonsurkapelle des Magdeburger Domes.

Stärker aufliegender biogener Bewuchs an der Nordseite des Magdeburger Domes war ebenso nicht vollends überzeugend zu reinigen.



Abbildung 68: Musterfläche an der Nordseite des Magdeburger Domes.

So zeigte sich nach diesen Vorversuchen die Tendenz, dass vor allem dünne Beläge mit Grünalgen (häufig an Sockelprofilen anzutreffen) mittels Laser abgereinigt werden können.

Eine weitere Musterfläche im Sockelbereich des Halberstädter Domes bestätigte dieses Ergebnis sehr gut, auf Kalkstein sowie auf Sandstein. Der Reinigungserfolg war nicht nur optisch, sondern auch klar mittels ATP-Messungen nachweisbar.[14]

[14] Vgl. Kapitel 7



Abbildung 69: Musterfläche im Sockelbereich des Halberstädter Domes (Kalkstein oben, Sandstein unten).

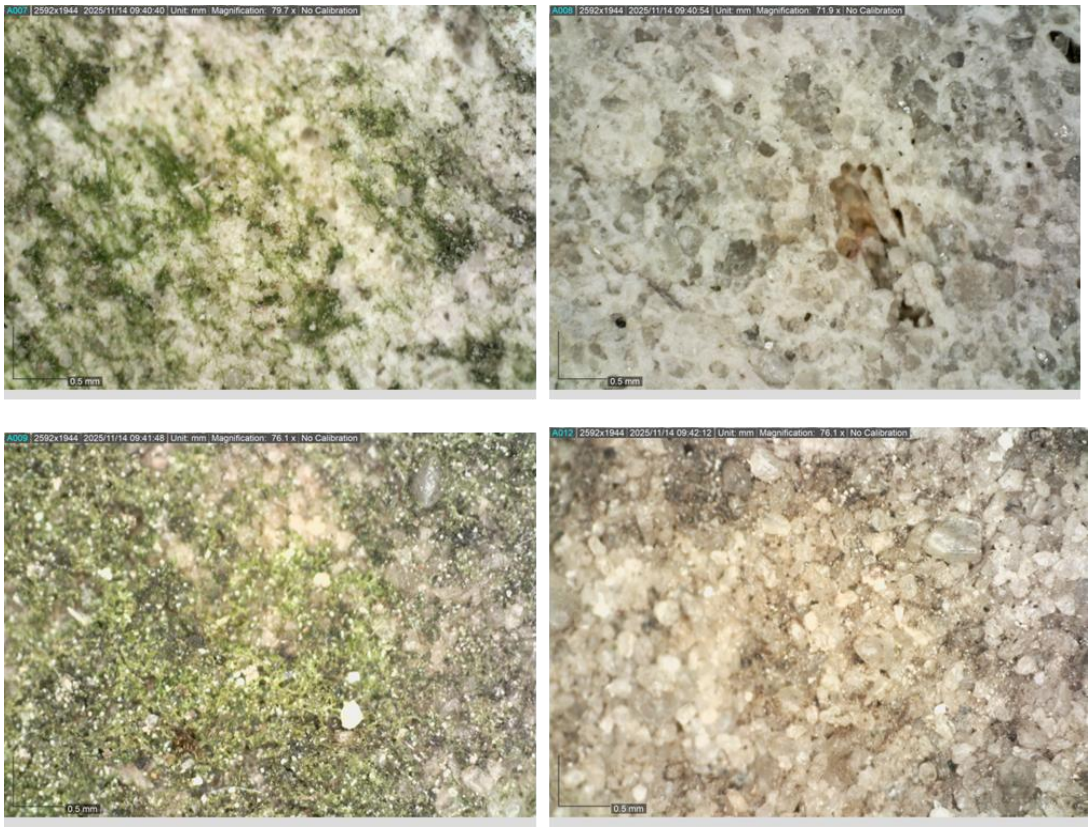


Abbildung 70: Mikroskopische Aufnahmen vor und nach der Reinigung, Kalkstein oben, Sandstein unten.

Dies wurde ebenso auf einer ausgelagerten Sandsteinplatte am Dom in Halle wiederholt, hier probeweise mit Maximaleinstellungen.

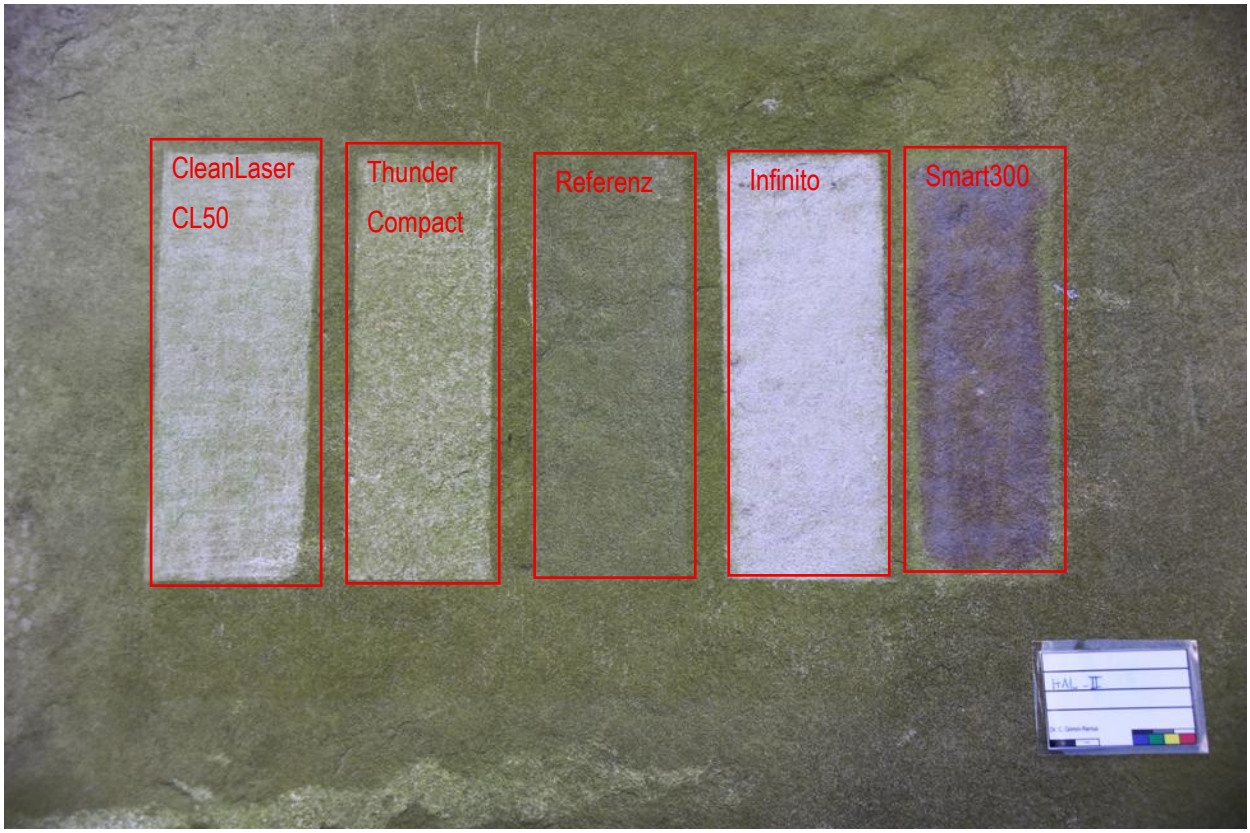


Abbildung 71: Probeplatte zur Reinigung von biogenem Bewuchs.

Hier zeigten der Infinito- Reinigungslaser und der CLeanLaserCL50 gute Ergebnisse, die sich auch in den gemessenen ATP- Werten (vgl. Kapitel 7) widerspiegeln. Bei zu hohem Energieeintrag, wie mit dem Smart300 demonstriert, ergeben sich deutlich violette Verfärbungen des Sandsteines.

Im Gegensatz dazu standen die Reinigungen am Strebepfeiler in Halle, bestehend aus Buntsandstein mit einer massiven biogen induzierten Kruste auf der Nordseite des Domes.



Abbildung 72: Musterfläche am Dom in Halle.

Hier waren mit keinem der eingesetzten Lasergeräte zufriedenstellenden Ergebnisse zu erreichen.

Beispielhaft sei hier das Ergebnis mit CleanLaserCL 50 gezeigt.

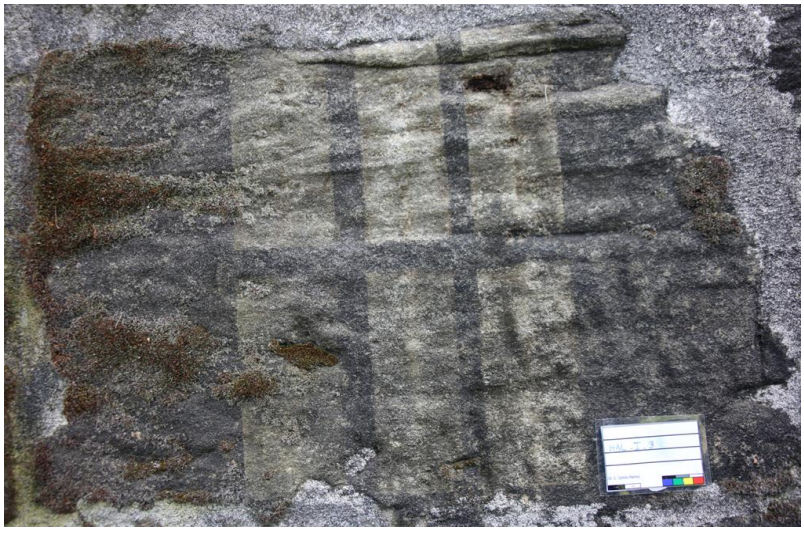


Abbildung 73: Musterflächen mit dem CleanLaser CL50.

- Leistung 40/50 Watt
- Pulsfrequenz: 100kHz
- Scanfrequenz: 90Hz



Abbildung 74: Detail der Musterfläche.

Auch hier muss die Laserreinigung als nicht adäquate Methode bewertet werden. Hier wären Kombinationen aus Feuchtreinigung (z.B. Heißdampf) und anschließender Laserreinigung oder Abrasive Reinigungsmethoden zu erproben.

6.5 Fazit

Für nahezu alle untersuchten Reinigungsaufgaben konnten geeignete und materialverträgliche Lösungen entwickelt werden. Ausgenommen hiervon sind biogen induzierte Krusten sowie Salz- bzw. weißlich, opake Gipskrusten, für die bislang keine adäquaten laserbasierten Reinigungsstrategien vorliegen.

Insbesondere der Einsatz von Zeilen- und Flächenlasersystemen (CleanLaser CL50, Infinito, Smart 300) zeigte überzeugende und reproduzierbare Reinigungsergebnisse. Durch die objektspezifische Parametrierung der Geräte ist ein selektiver, kontrollierter und substanzschonender Materialabtrag unter Erhalt des Alterswertes der Oberflächen möglich.

Die eingesetzten Lasersysteme arbeiten effizient und weisen auch im Vergleich zu konventionellen Reinigungsverfahren eine hohe Leistungsfähigkeit auf. Darüber hinaus erweist sich die Laserreinigung auch bei biologischem Bewuchs (z. B. Grünalgen) als praktikable Alternative, insbesondere in Fällen, in denen ein Feuchteeintrag durch Verfahren wie Heißdampf technisch nicht möglich oder konservatorisch nicht vertretbar ist. Hier konnte vor allem der Infinito- Reinigungslaser überzeugen.

Vergleichende Ergebnisse und Dokumentationen aus Referenzprojekten bestätigen die grundsätzliche Eignung der Methode. Es ist jedoch zwingend zu berücksichtigen, dass **sämtliche Parametereinstellungen objekt- und gerätespezifisch zu definieren und anzupassen sind**, sodass keine generalisierbaren Standardparameter existieren.



Abbildung 75: Die drei am besten bewerteten Lasergeräte für die gestellten Reinigungsaufgaben: CleanLaser CL50, Infinito, Smart300 (von li. Nach re.)

7 Matthias Zötzl, Henning Kersten: Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Begleitung des Forschungsprojekts

7.1 Einleitung

Das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. führte im Rahmen des von der DBU geförderten „Laserprojekts“ naturwissenschaftliche Untersuchungen durch. Der Bericht beinhaltet die Ergebnisse und gibt Empfehlungen.
Im Rahmen des Projekts wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung der Kalk- und Sandsteinvarietäten Musterflächen der Dome in Halberstadt, Magdeburg und Halle
- Kennwertbestimmung an Kalk- und Sandsteinvarietäten
- REM-EDX-Untersuchungen an Natursteinoberflächen mit Auflagen/Krusten
- Untersuchung der Auflagen mittels Mikro-RFA
- Kontrolle der Reinigung mittels Mikro-RFA
- XRD-Untersuchungen an ausgewählten Oberflächen
- REM-EDX-Untersuchungen an Natursteinoberflächen mit Auflagen/Krusten nach der Laserreinigung
- Untersuchungen der ungereinigten und lasergereinigten Musteroberflächen mit dem Digitalmikroskop Dino-Lite
- Farbwertbestimmung mittels ColorReader (datacolor) ungereinigten und lasergereinigten Musteroberflächen
- ATP-Bestimmung mittels kikkoman-Lumitester C-110 an Vergrünungsmusterflächen
- Untersuchungen der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten (Voruntersuchungen und Untersuchungen nach der Reinigung)

Folgende ermittelte Untersuchungsergebnisse von insgesamt 228 Einzelflächen sind Bestandteil der im Rahmen des Laserprojekts angelegten Datenbank:

- w-Wert Vorzustand
- w-Wert Nachzustand
- Farbwertmessung Vorzustand
- Farbwertmessung Nachzustand
- Mikrokamerafoto Vorzustand
- Mikrokamerafoto Nachzustand

Folgende Abkürzungen werden im Text verwendet: Hbs = Halberstadt, MD = Magdeburg, HAL = Halle.

7.2 Naturstein- und Kennwertbestimmung

Voraussetzung der Bewertung von Reinigungsmusterflächen ist die Kenntnis von Materialeigenschaften, Materialkennwerten des Natursteinuntergrundes, der zu reinigenden Oberflächen.

Bei den beauflagten Natursteinen auf deren Oberflächen Laserreinigungsmuster angelegt wurden, handelt es sich um verschiedene in Sachsen-Anhalt typische und häufig an Baudenkmalen verwendete Sandsteine. Um ein möglichst breites Spektrum an Untergründen mit verschiedenen Auflagerungen abzubilden, wurden Musterflächen an den Domen in Halberstadt, Magdeburg und Halle ausgewählt. Auch der Muschelkalk, ein wichtiges Baumaterial des Halberstädter Doms wurde einbezogen. Der Fokus zur Bewertung liegt auf dem Kennwert der kapillaren Wasseraufnahme.

Wasseraufnahmen, bestimmt an Muschelkalkbohrkernen des Halberstädter Doms zeigen w-Werte zwischen 0,6 kg/(m2 ▪ √h) und 1,3 kg/(m2 ▪ √h) (ZÖTZL, 2023).

Der w-Wert eines untersuchten Involutussandsteins des Halberstädter Doms liegen bei 22,7 kg/(m2 ▪ √h).

Im Bereich des Halleschen Doms wird von der Verwendung von Wörmlitzer Sandstein, einem Buntsandstein (Grenze Unterer Buntsandstein/Mittlerer Buntsandstein) ausgegangen. Die Wasseraufnahmen variieren je nach Dichte und Ausbildung der Zemente. Die w-Werte wurden im Rahmen von Untersuchungen an der Neuen Residenz in Halle bestimmt (ZÖTZL, 2018). Sie liegen zwischen 0,9 kg/(m2 ▪ √h), 2,0 kg/(m2 ▪ √h) und 3,3 kg/(m2 ▪ √h) und ein Wert lag bei 6,5 kg/(m2 ▪ √h).

Die w-Werte von Buntsandsteinen des Magdeburger Doms wurden an Bohrkernen, die im Bereich der Ostfassade untersucht wurden, bestimmt (ZÖTZL, 2019). Die rötlichen und hellbeigen Varianten liegen bei w-Werten von 3,5 kg/(m2 ▪ √h) und 3,8 kg/(m2 ▪ √h). Der grünlich-beiger Sandstein, mit Kohlebestandteilen, der im Bereich des Bischofgangs verbaut ist, zeigt einen w-Wert von 4,4 kg/(m2 ▪ √h).



Abbildung 76: Buntsandsteine des Magdeburger Doms. Bohrkerne der Ostfassade (aus ZÖTZL, 2019)

7.3 Untersuchungen von Auflagen und Krusten aus dem Halberstädter Dom

Die EDX-Analyse am REM ist sehr gut geeignet, strukturelle Untersuchungen mit der chemischen Analyse zu kombinieren. Für Flächenanalysen ist das EDX-Mapping eine hervorragende Methode. Mit dem Ziel der Untersuchung von Auflagen und Krusten wurden exemplarisch Sandstein und Kalksteinproben entnommen, Anschliffe präpariert und mittels REM und EDX-Mapping untersucht. Mit der Präparation und Analyse ausgewählter Proben wurde Herr Dr. Köberle an der TU Dresden beauftragt. Die Ergebnisse von Herrn Köberle werden im folgenden Abschnitt zitiert und interpretiert.

Die Probenahme erfolgte nach gemeinsamer Festlegung der zu beprobenden Oberflächen mit einer 20 mm Bohrkrone. Die Abb. 77 und Abb. 78 sowie und Abb. 81 und Abb. 84 zeigen die beprobten Kalkstein- und Sandsteinbereiche, die Abb. 79 und Abb. 80 und Abb. 85 und Abb. 86 die Bohrkernproben.



Abbildung 77: *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)*



Abbildung 78 *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)*



Abbildung 79: *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)*

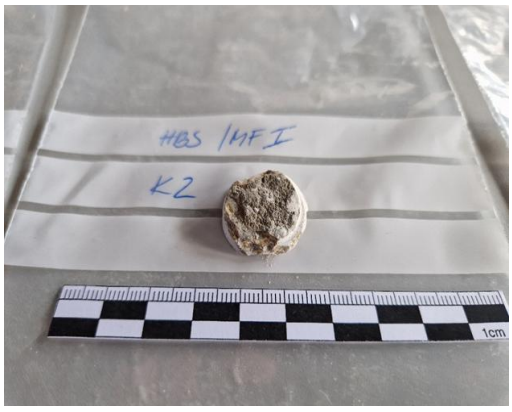


Abbildung 80: *Musterfläche MF I: Kreuzgang, Kalkstein, Probe MF_I_K1 (links, hellere Kruste), Probe MF_I_K2 (rechts, dunklere Kruste)*



Abbildung 81: *Kreuzgang, Strebepfeiler mit Reinigungsmusterflächen*



Abbildung 82: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, Probe MF_II_K1 (oben, wenig Kruste), MF_II_K3 (dicke Kruste)*



Abbildung 83: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, Probe MF_II_K1 (oben, wenig Kruste)*



Abbildung 84: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, MF_II_K3 (3. von oben, dicke Kruste)*



Abbildung 85: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, Probe MF_II_K1 (oben, wenig Kruste)*

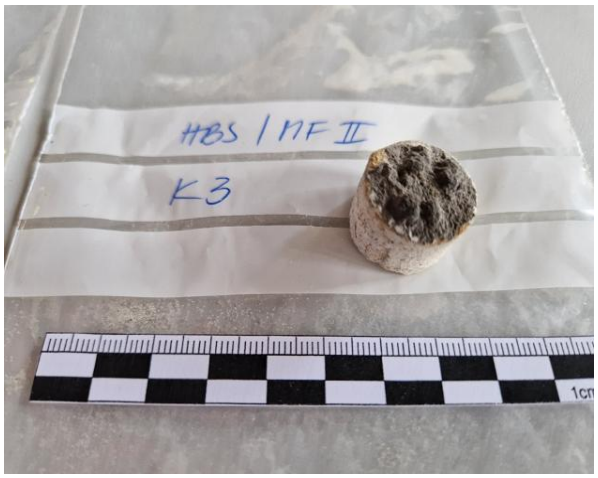


Abbildung 86: *Musterfläche MF II: Kreuzgang, Strebepfeiler, Sandstein, MF_II_K3 (3. von oben, dicke Kruste)*

Probenpräparation und Methodisches

Nach KÖBERLE (2024) wurden die Bohrkerne mit Epoxidharz unter Vakuum getränkt und ent-lang der geplanten Präparationsebene geschnitten. Die Schnittflächen wurden anschließend geschliffen und poliert und mit einem Rasterelektronenmikroskop REM QUANTA 250 FEG (Thermo Fisher Scientific/Germany) im Rückstreumodus BSE untersucht. Chemische Elemen-tanalysen in Form eines Mappings wurden mit dem an das REM angeschlossenen EDX-Analysesystem QUANTAX 400 (Bruker/Germany) durchgeführt. Die Tab. 1 gibt eine Probenbeschreibung, die Abb. 87 bis Abb. 90 zeigen die Oberseiten mit eingezeichneter Präparationsebene und die frischen Bruchflächen der Rückseiten im Gestein. Bei beiden Kalksteinproben handelt es sich um Muschelkalk.

Tabelle 1 Probenbeschreibung:

Bezeichnung	Länge / Durchmesser [mm]	Beschreibung
HBS 1 MF I K1	10 / ca. 20	Kalkstein, Muschelkalk, mit hellerer Kruste
HBS 2 MF I K2	7 / ca. 20	Kalkstein, Muschelkalk, mit dunklerer Kruste

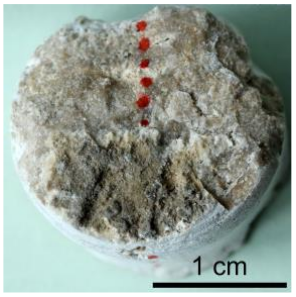


Abbildung 87: *Bohrkern MF I K1 Vorderseite (Foto: KÖBERLE, 2024)*



Abbildung 88: *Bohrkern MF I K1 Rückseite (Foto: KÖBERLE, 2024)*

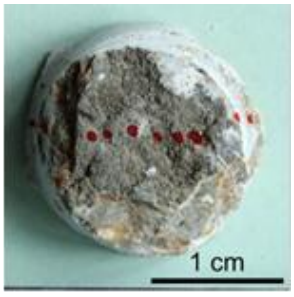


Abbildung 89: *Bohrkern MF I K1 Rückseite (Foto: KÖBERLE, 2024)*

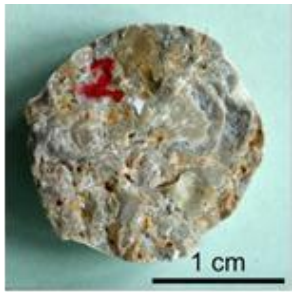


Abbildung 90: *Bohrkern MF I K2 Rückseite (Foto: KÖBERLE, 2024)*

REM-EDX-Anschliffuntersuchungen oberflächennaher Bereiche der Probe MF_I_K1 (mit der helleren Kruste) zeigen Konzentrationen von Schwefel auf der Kalksteinoberfläche sowie in den Poren der Kalksteinoberfläche als Hinweis auf Gips bzw. eine Vergipsung. Die Abb. 91 und Abb. 92 zeigt den untersuchten Bereich der Probe. In dem über die Fläche der Abb. 91 gemessenen REM-EDX-Spektrum, werden neben den Elementen Calcium und Schwefel zusätzlich noch Silizium, Aluminium und Magnesium gemessen, die Bestandteile der aufliegenden Gipskruste sind. Der Kohlenstoffnachweis zeigt das Einbettmittel Epoxidharz. Die Interpretation der Analysen zeigt sehr kleine Partikel aus Quarz, Feldspat und Ton in der aufliegenden Gipskruste. Die Vergipsung hingegen wird bis in eine Tiefe von ca. 3 mm in der Kalksteinoberfläche bzw. im oberflächennahen Bereich nachgewiesen (Abb. 95), die zu einer Verdichtung und Zerstörung der Oberfläche führt. Die Abb. 94 zeigt entstandene Gefügeschäden im Oberflächenbereich.

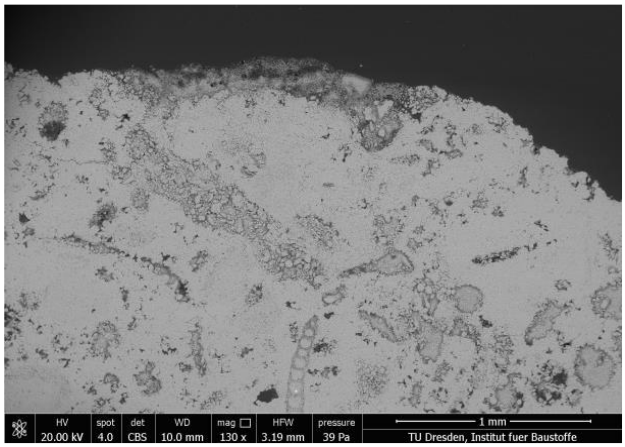


Abbildung 91: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024)

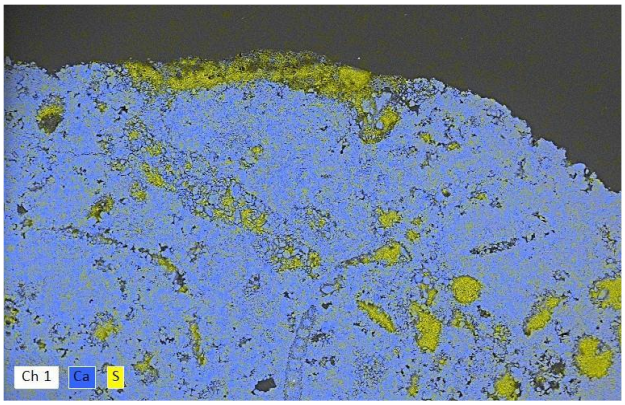


Abbildung 92: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S (Foto: KÖBERLE, 2024)

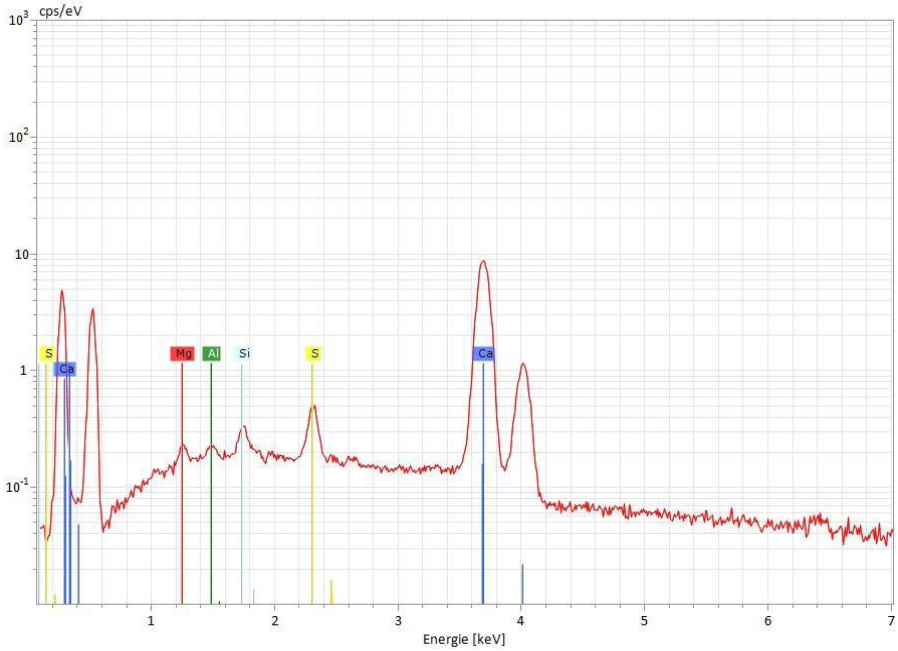


Abbildung 93: REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 91

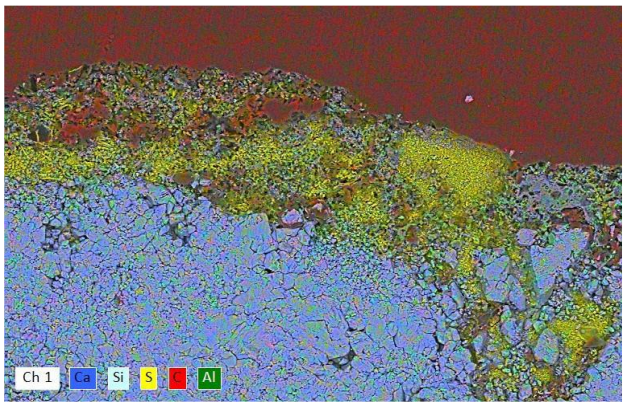


Abbildung 94: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1, Detail der Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024)

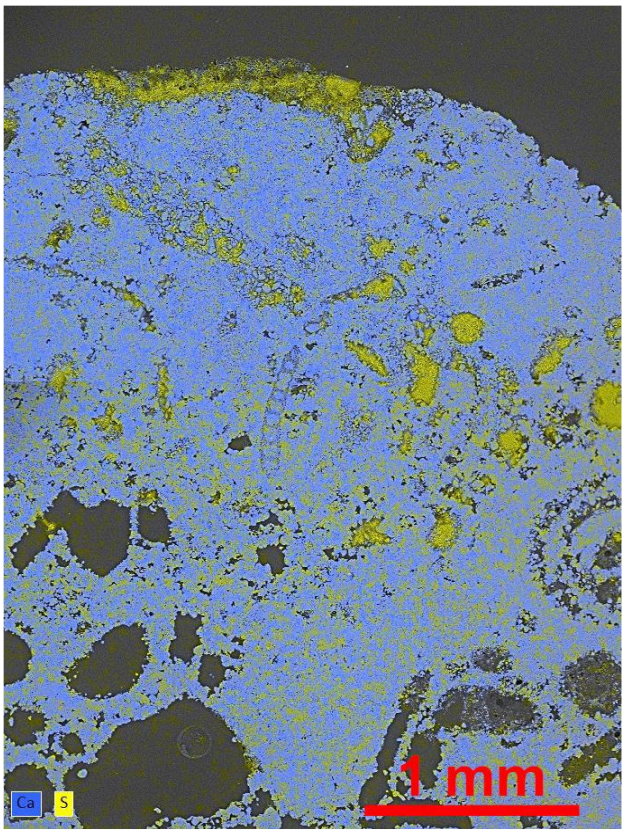


Abbildung 95: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K1 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S, aus mehreren Mapping-Bildern zusammengesetzte Abb. (Foto: KÖBERLE, 2024)

Die Kalksteinprobe MF I K2 mit der dunkleren Kruste zeigt zumindest oberflächennah ein deutlich dichteres Gefüge (als bei Probe MF I K1 nachgewiesen) mit Mürbzonen und oberflächenparallelen Rissflächen bis in eine Tiefe von ca. 1 mm bis 1,5 mm. Die Gipskruste sitzt im Wesentlichen auf der Kalksteinoberfläche und enthält ebenfalls die Staubkomponenten Quarz, Feldspat und Ton und Ruß sowie zusätzlich eine Eisenkomponente. Die Abb. 96 zeigt eine BSE-Aufnahme des oberflächennahen Bereichs der Probe. Das REM-EDX-Mapping mit dem Calcium- und Schwefelnachweis veranschaulicht den Bereich der Gipskruste in Abb. 97. Ein Detail- EDX-Mapping der Gipskruste zeigt Abb. 99 mit den Elementnachweisen von Calcium, Schwefel zusätzlich von Silizium, Magnesium, Eisen und Aluminium. Der Kohlenstoffnachweis zeigt das Einbettmittel Epoxidharz. Um die Verteilung von Gips in die Tiefe beurteilen zu können, wurde das Mapping bis in eine Tiefe von mehreren mm durchgeführt (Abb. 100). Geringe Schwefelgehalte werden bis in eine Tiefe von maximal 1 mm nachgewiesen.

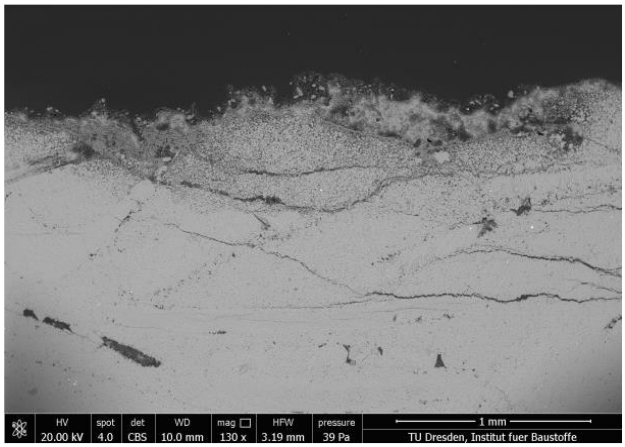


Abbildung 96: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

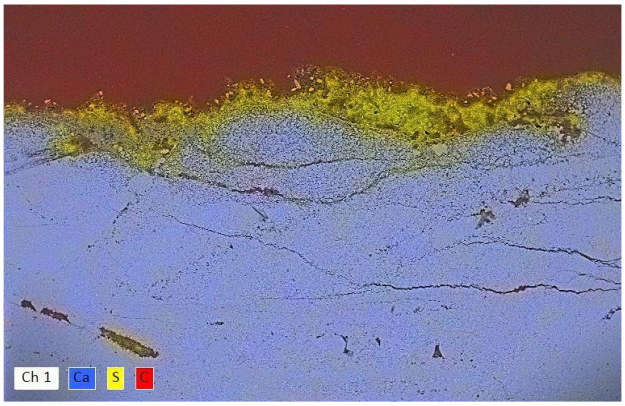


Abbildung 97: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S (Foto: KÖBERLE, 2025)

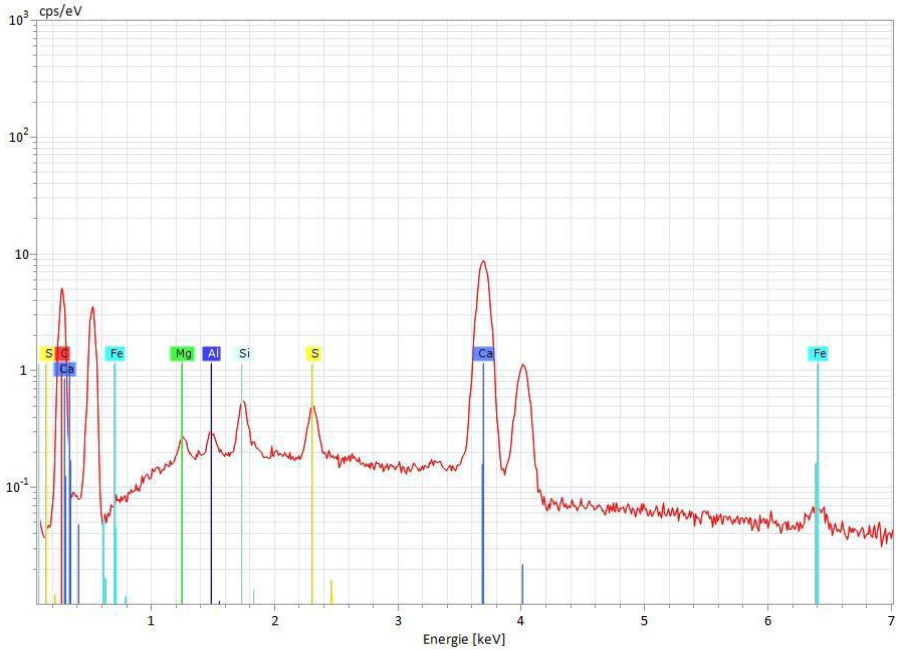


Abbildung 98: *REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 96*

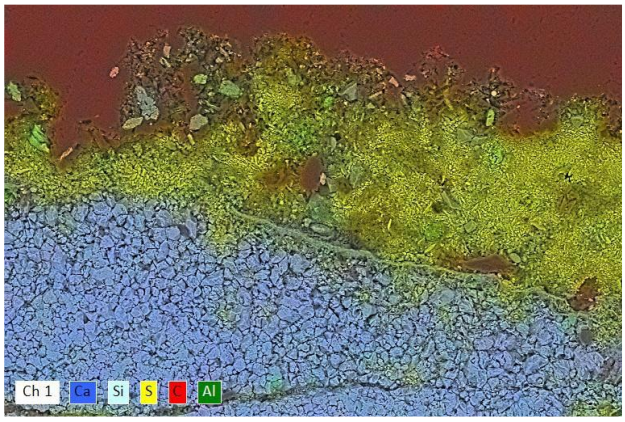


Abbildung 99: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca, Si, S, C und Al (Foto: KÖBERLE, 2024)



Abbildung 100: Bohrkernoberfläche der Probe MF I K2 (REM-BSE), EDX-Mapping von Ca und S, aus mehreren Mapping-Bildern zusammengesetzte Abb. (Foto: KÖBERLE, 2024)

7.4 Untersuchungen von Sandstein-Auflagen und -krusten aus dem Halberstädter Dom

Makroskopisch handelt es sich bei dem am Strebepfeiler, in Form von behauenen Quadern, verbauten Sandstein um einen Kreidesandstein, speziell um einen Involutussandstein. Baumaterial- und Provenienzuntersuchungen beschreibt ZÖTZL (2024). Das Material zeigt einen hohen Porenraum und hohe Wasseraufnahmen.

Auch bei den Sandsteinen wurde jeweils ein kleiner Bohrkern mit heller Kruste und einer mit einer dunklen Kruste entnommen und untersucht. Die Tab. 2 gibt eine Probenbeschreibung. Die Abb. 101 bis Abb. 104 zeigen Oberflächen und frische Bruchflächen der Bohrkerne.

Tabelle 2: Probenbeschreibung

Bezeichnung	Länge / Durchmesser [mm]	Beschreibung
HBS 3 MF II K1	11 / ca. 20	Sandstein, feinkörnig (Involutussandstein, Oberkreide) mit hellerer dünner Kruste
HBS 4 MF II K3	17 / ca. 20	Sandstein, feinkörnig (Involutussandstein, Oberkreide) mit dunklerer dicker Kruste

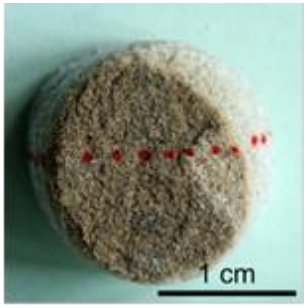


Abbildung 101: *Bohrkern MF II K1 Vorderseite (Foto KÖBERLE, 2024)*



Abbildung 102: *Bohrkern MF II K1 Rückseite (Foto KÖBERLE, 2024)*



Abbildung 103: *Bohrkern MF II K3 Vorderseite (Foto KÖBERLE, 2024)*



Abbildung 104: *Bohrkern MF II K3 Rückseite (Foto KÖBERLE, 2024)*

Die Abb. 105 zeigt den oberflächennahen Bereich der Sandsteinprobe mit dünner Kruste MF II K1 im Rückstreuelektronenbild. Sichtbar ist ein locker gepacktes Gefüge von Quarzkomponenten mit einem hohen Porenraum. Das dazugehörige EDX-Mapping in Abb. 106 zeigt die Elemente Silizium und Schwefel, Aluminium, Calcium und Kohlenstoff. Gips (Schwefel) ist lediglich lokal in Poren direkt unterhalb der Oberfläche nachweisbar.
Das über die gesamte Abbildungsfläche gemessene EDX-Spektrum (Abb. 106) zeigt neben Silizium und Schwefel auch noch die Elemente Calcium, Magnesium, Eisen und Chlor.
Schwefel wird lediglich im sehr oberflächennahen Bereich analysiert. Eine dünne Kruste mit Verdichtung des oberflächennahen Porenraums kann nachgewiesen werden. In den oberen Poren des Sandsteins, bis in Tiefen von ca. 0,5 mm bis 1 mm wird eine Verdichtung der Poren durch kleine silizium- und aluminiumhaltige Partikel festgestellt, bei denen es sich vermutlich um eingelagerte Verunreinigungen von Quarz, Feldspat und eventuell Tone handelt. Ein über mehrere Millimeter in die Tiefe durchgeführtes Element-Mapping zeigt nur sehr vereinzelt kann Schwefel in dem Profil.

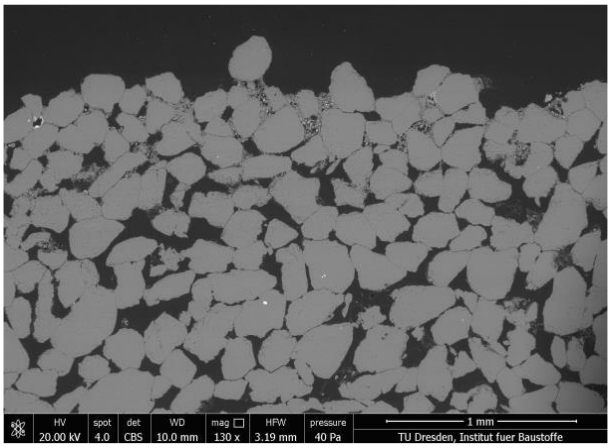


Abbildung 105: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K2 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024)

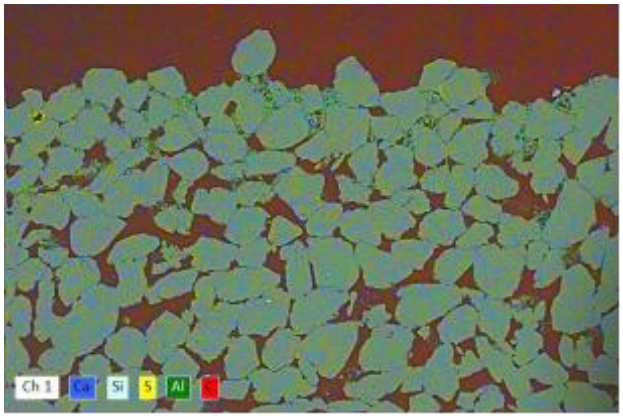


Abbildung 106: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K1 mit oberflächennahen Einlagerungen von Ca-, Si-, Al-, und C- haltigen Partikeln (EDX-Mapping) (Foto: KÖBERLE, 2024)

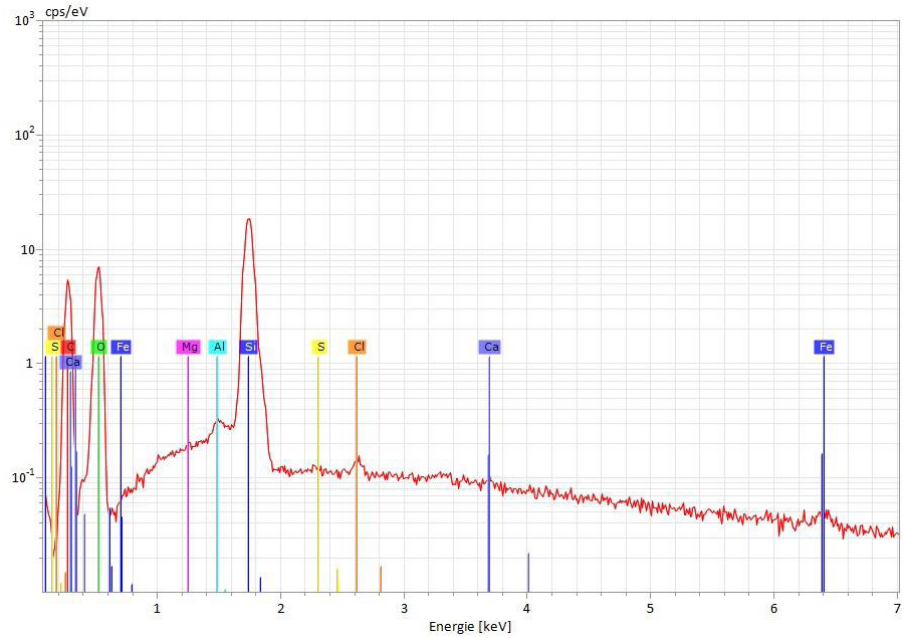


Abbildung 107: REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 105.

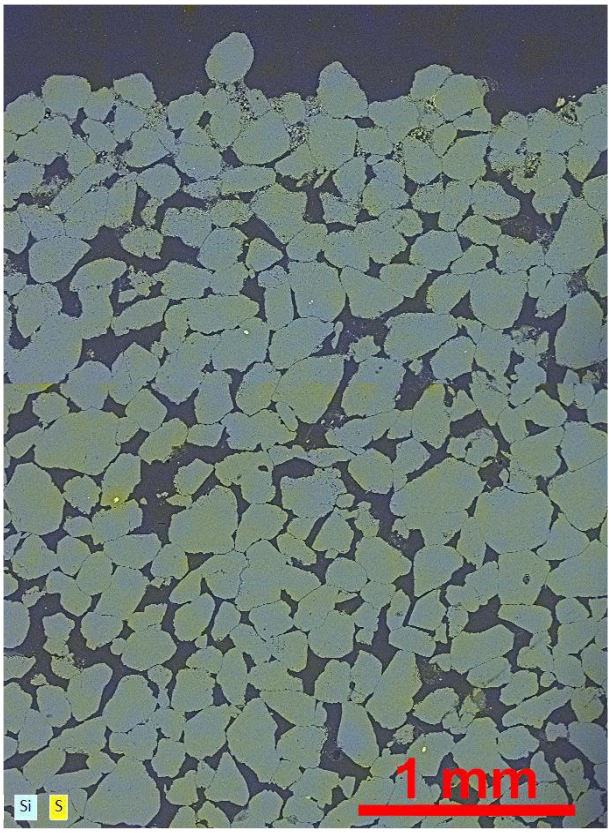


Abbildung 108: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K1 mit oberflächennahen Einlagerungen von Si und S, zusammengesetztes REM-EDX Mapping (Foto: KÖBERLE, 2024)

Die REM-Untersuchungen der mit einer schwarzen Kruste versehenen Sandsteinprobe MF II K3 zeigt in Abb. 109 eine Aufwölbung der Kruste (die bereits makroskopisch zu sehen ist) verbunden mit einer starken Schädigung des Sandsteins. Es handelt sich um eine Einlagerungskruste. Im Rückstreuelektronenbild der Oberfläche ist eine bis zu 1,5 mm nach oben abgesetzte Scholle zu sehen. Unterschiedliche Materialeigenschaften zwischen Untergrund und Kruste können bei Wärmedehnung und hydrischer Dehnung zu dieser Schädigung führen. Im Element-Mapping (Abb. 110) ist eine Ausfüllung und Vergrößerung des ursprünglichen Porenraums mit Schwefel, in den Poren der Scholle und auch in den oberflächennahen Poren des Sandsteins sichtbar.

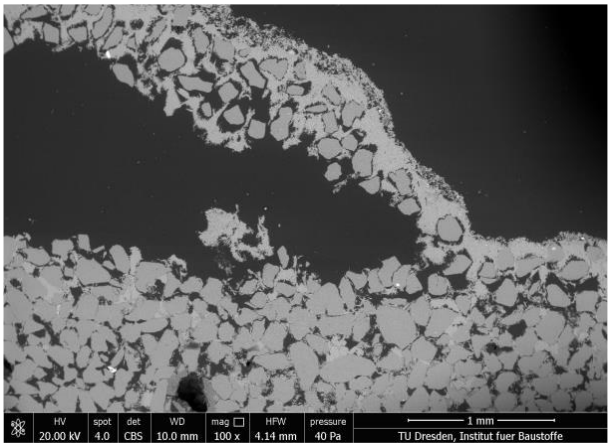


Abbildung 109: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K3 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024)

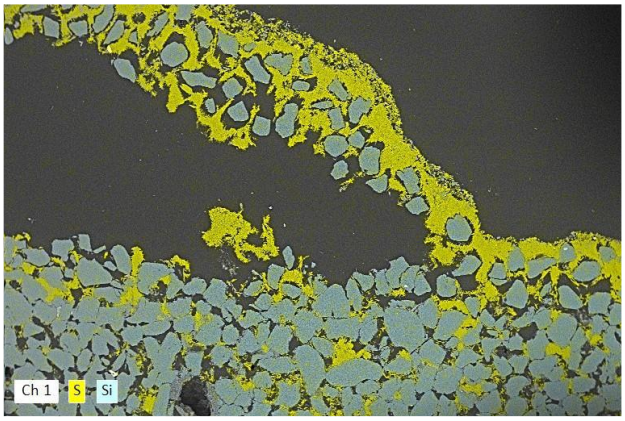


Abbildung 110: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K3 (REM-BSE), EDX-Mapping von Si und S (Foto: KÖBERLE, 2024)

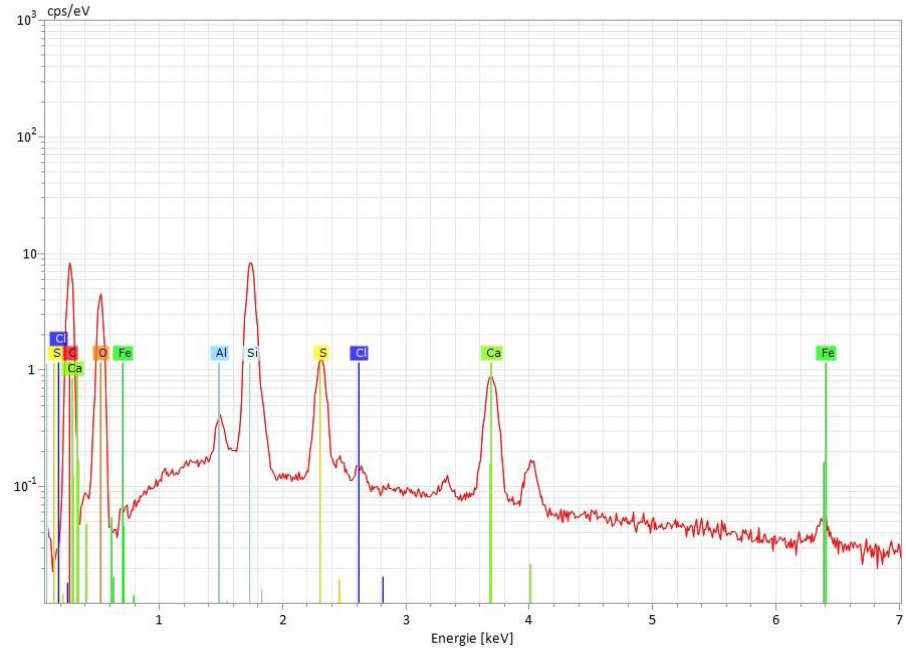


Abbildung 111: REM-EDX Spektrum, gemessen über die Fläche in Abb. 109.

Neben Schwefel und Silizium werden auch noch weitere Elemente wie Calcium, Aluminium, Eisen und Chlor über den untersuchten Bereich gemessen. Der deutliche Calciumpeak korreliert mit Schwefel und ist dem Gips zuzuordnen. Das Spektrum beschreibt noch kleinere Peaks von Aluminium, Eisen und Chlor. Es handelt sich vermutlich um Feldspäte und Tone im Sandstein oder um Staubeinlagerungen in und unter der Kruste. Der oberste Bereich der Kruste zeigt eine Einlagerung von vielen sehr kleinen Staubkomponenten in die Gipsmatrix.

Das Element-Mapping in Abb. 112 zeigt zusätzlich zu Silizium und Schwefel die Elemente Alu-minium, Calcium und Kohlenstoff berücksichtigt. Der Porenraum ist dementsprechend durch den Kohlenstoffgehalt des Epoxidharzes rot gefärbt. Wenig Aluminium liegt in den Zwickelauskleidungen des Quarzsandes vor, was auf Kaolinit hindeutet. Kaolinit wurde bei der XRD-Phasenanalyse von Involutussandsteinproben aus dem Skulpturenzyklus des Halberstädter Doms bereits beschrieben (ZÖTZL, 2017).

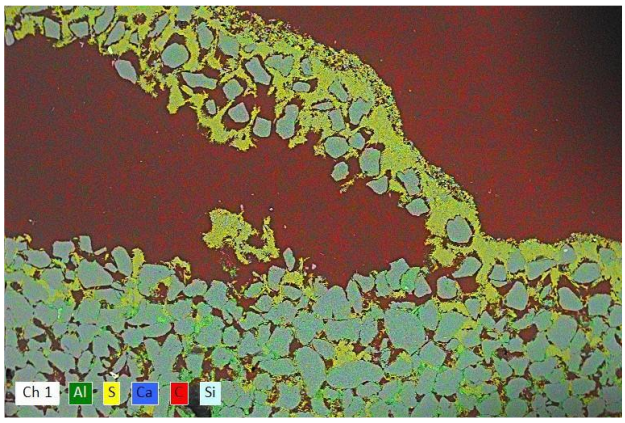


Abbildung 112: Probe MF II K3 mit oberflächennahen Einlagerungen von Ca-, Si-, Al-, und C- haltigen Partikeln (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2024)

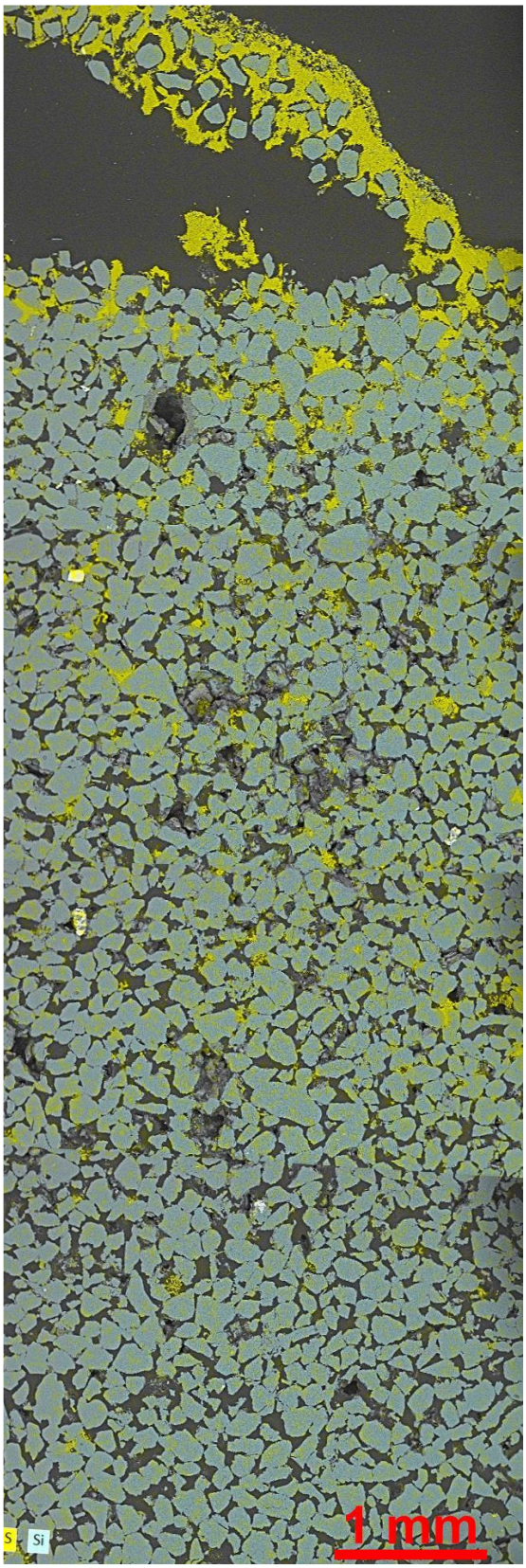


Abbildung 113: Bohrkernoberfläche der Probe MF II K3 (REM-BSE), zusammengesetztes EDX-Mapping von Si und S (Foto: KÖBERLE, 2024)

Fazit der Untersuchungen

In den Kalksteinproben MF I K1 (mit hellerer Kruste) und MF I K2 (mit dunklerer Kruste) konnten dünne Gipskrusten (Umwandlungskrusten) im Oberflächenbereich nachgewiesen werden. In MF I K1 sind die größeren Poren bis in eine Tiefe von 2-3 mm mit Gips gefüllt. In MF I K2 beschränkt sich die Gipsbildung direkt auf die Oberfläche, bis maximal in eine Tiefe von 1 mm. Allerdings erscheint der Kalkstein von MF I K2 auch dichter.
In der Kruste der Sandsteinprobe MF II K1 (mit wenig heller Auflage) konnte nur wenig Gips nachgewiesen werden, es liegt eine Auflagerungskruste vor, die in den Porenraum des Gesteins eindringt. In den oberflächennahen Poren konnten punktuell Gipsauskleidungen direkt unter der Oberfläche nachgewiesen werden.

In MF II K3 (mit starker dunkler Kruste) war eine deutliche Gipskruste auf der Oberfläche sichtbar. Es kam infolge der Vergipsung zur Bildung einer Scholle, die die obersten Kornlagen fixiert und sich in der Folge abgelöst hat. Die Gipsbildung konnte bis in eine Tiefe von 7-8 mm unterhalb der Oberfläche nachgewiesen werden. Durch die Gipsbildung wird der obere Bereich des Sandsteines stark verdichtet und geschädigt.

7.5 Untersuchung der Auflagen, Kontrolle der Reinigung mittels Mikro-RFA

Moderne Mikro-RFA-Handgeräte gehören heute in Laboreinrichtungen der Steinkonservierung häufig zur Standardausrüstung. Der Einsatz der schnellen und zerstörungsfreien Methode zur Analyse der chemischen Zusammensetzung der Oberfläche wurde als Möglichkeit zur Bestimmung des Reinigungserfolgs im Laserprojekt exemplarisch geprüft.

Mikro-RFA-Messungen erfolgten an Bohrkernen der Sandsteinreinigungsmusterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Reinigung der Oberfläche und im „frischen“ Stein. Die Messungen konnten dankenswerterweise am LDA Sachsen-Anhalt erfolgen. Genutzt wurde das Gerät Mikro-RFA HITACHI X-Met 8000 Expert Geo, mit dem Messprogramm Mining LE-FP, einer Messzeit von 15 s, in einem Messbereich von 9 mm x10 mm. Mikro-RFA-Messungen erfolgten jeweils an der ungereinigten Oberfläche, der gereinigten Oberfläche und an einer frischen Bruchfläche im Stein.

Die Tab. 3 zeigt die Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an ungereinigten Sandsteinoberflächen der Musterflächen Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen. Je nach Stärke der Auflage erfasst die Mikro-RFA auch teilweise die chemische Zusammensetzung der Gesteinsoberfläche, was zu beachten ist. Erst der Vergleich mit Messungen an frischen Bruchstellen in der Tiefe des Gesteins (Tab. 5), zum Beispiel an einem kleinen Bohrkern, ermöglicht es die Aussagekraft der Oberflächenmessung zu verbessern. Im vorliegenden Fall wurden die entsprechenden Bohrkernrückseiten mit der Mikro-RFA gemessen und zusätzlich Anschliffe, senkrecht zur Oberfläche präpariert und mit der EDX am REM untersucht um den Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Komponenten der Auflage aber auch des Sandsteins auf die chemische Zusammensetzung der Auflage zu kennen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an einer **ungereinigten** Sandsteinoberfläche eines Bohrkerns der Musterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Angabe in Elementprozent

Bezeichnung	Si	Al	K	Ca	Mg	Fe	S	P	Ba	Ti
Hbs-Dom-ungereinigt	40,596	1,773	0,331	0,645	0,224	0,636	0,089	0,155	0	0
MD-Dom- ungereinigt	36,621	3,397	2,040	1,024	0	0,787	0,962	1,087	0,069	0
HAL-Dom-ungereinigt	35,592	3,914	3,658	1,986	0	1,007	0,370	0,265	0,099	0,066

Der vorliegende Vergleich der chemischen Zusammensetzung der Krusten auf die drei untersuchten Sandsteine aus Halberstadt, Magdeburg und Halle zeigt Gemeinsamkeiten und auch deutliche Unterschiede, die sich mit der Zusammensetzung der Gesteinsuntergründe aber auch zusätzlicher Faktoren erklären lassen. Es werden hohe Gehalte an Silizium, deutliche Gehalte an Aluminium, Kalium und Calcium festgestellt die auf Staubbestandteile von Quarz, Feldspat und Tonmineralen hinweisen, dazu kommen Eisen, Magnesium, Schwefel und Phosphor sowie

etwas Barium und Titan. Die Laserreinigung aller Proben zeigt eine Vergrößerung des Si-Peaks, die für die Freilegung der Quarzkörner des Sandsteins gelesen werden kann. Die Laserreinigung der Hbs-Probe zeigt zudem eine geringfügige Abnahme der Elemente Al, K, Ca, S und Fe, die in der oberen Zone der Auflage abgereichert werden konnten. Die Messung im Stein (Tab. 5) der Hbs-Probe zeigt, die chemische Zusammensetzung des Natursteingefüges. Damit gehören scheinbar Si, Al, Ca, Fe, S und P in unterschiedlichen Elementprozenten zum natürlichen Sandsteingefüge mit den Komponenten Quarz und etwas Ton und geringe Mengen an Eisenmineralen sowie akzessorisch Apatit. S und Ca stehen allerdings für eine Gipsbelastung des Sandsteins und gehören nicht zum natürlichen Inventar. Anhand der vergleichenden Messungen kann eine Abreicherung der Elemente Al, K, Ca, S und Fe der Kruste durch die Laserreinigung nachvollzogen werden (Tab. 4). Auch die Messung der MD-Probe zeigt neben der geringfügigen Zunahme von Si eine nachvollziehbare Abreicherung der Elemente Probe Al, K, P, Ca, (S) und Fe in der Kruste durch die Laserreinigung. Damit gehören scheinbar Si, Al, K, Ca, P, Mg, Fe und S (sowie etwas Barium) in unterschiedlichen Elementprozenten zum natürlichen Sandsteingefüge mit den Komponenten Quarz, Feldspat und Apatit sowie geringe Mengen an Eisenmineralen (Tab. 5). S und Mg (Tab. 5) stehen allerding für eine Magnesiumsulfatbelastung des Sandsteins und gehören nicht zum natürlichen Inventar. Die HAL-Probe zeigt ebenfalls gut nachvollziehbar eine Abreicherung der Elemente Al, K, P, Ca, S, Fe, (Ba) und Ti und ebenfalls eine geringfügige Zunahme des Si-Peaks durch die Laserreinigung. Zum Natursteininventar gehören die Elemente Si, Al, K, Ca, Mg, Fe und Spuren von Ba mit den Komponenten Quarz, Feldspat, Dolomit und geringe Mengen an Eisenmineralen sowie akzessorisch Apatit. Die Abb. 114 bis Abb. 131 zeigen vergleichende graphische Darstellungen der beschriebenen Ergebnisse.
Ein Kohlenstoffnachweis für Ruß wurde bei den Messungen nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an einer **gereinigten** Sandsteinoberfläche eines Bohrkerns der Musterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Angabe in Elementprozent

Bezeichnung	Si	Al	K	Ca	Mg	Fe	S	P	Ba	Ti
Hbs-Dom-gereinigt	41,506	1,379	0,233	0,537	0	0,41	0	0,144	0	0
MD-Dom-gereinigt	39,190	2,166	1,553	0,670	0	0,315	0,904	0,492	0,042	0
Halle-Dom-gereinigt	37,634	3,866	3,34	0,23	0,857	0,195	0	0,05	0,061	0

Tabelle 5: Ergebnisse der Mikro-RFA-Messungen an der Unterseite eines Sandsteinbohrkerns (im Stein) der Musterflächen in Hbs (Dom, Strebepfeiler), MD (Dom, Tonsur) und HAL (Dom, Strebepfeiler) zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Auflagen (und der Gesteinsoberfläche), Angabe in Elementprozent

Bezeichnung	Si	Al	K	Ca	Mg	Fe	S	P	Ba	Ti
Hbs-Dom-im Stein	40,243	1,879	0	0,894	0	0,127	1,939	0,035	0	0
MD-Dom-im Stein	33,160	3,210	2,103	4,287	0,307	0,231	0,363	2,657	0,059	0
Halle-Dom-im Stein	37,634	3,866	3,34	0,23	0,857	0,195	0	0,05	0,061	0

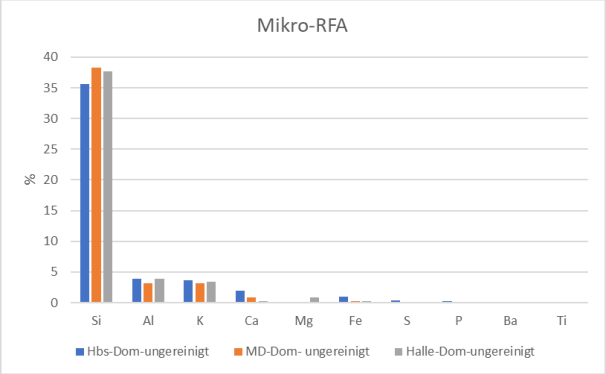


*Abbildung 114: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

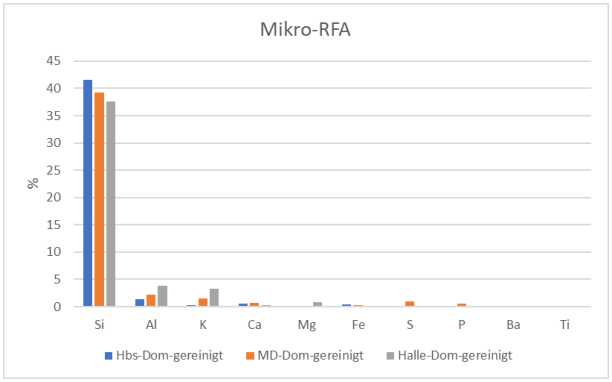


*Abbildung 115: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

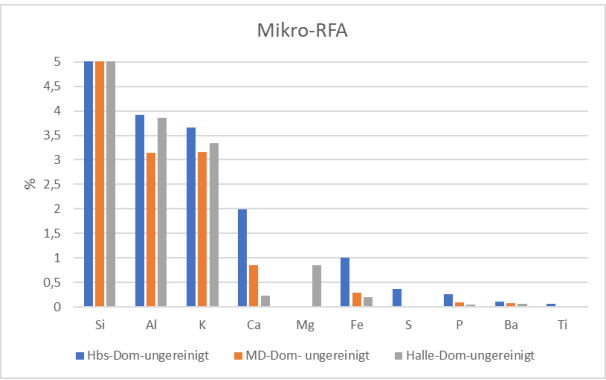


*Abbildung 116: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

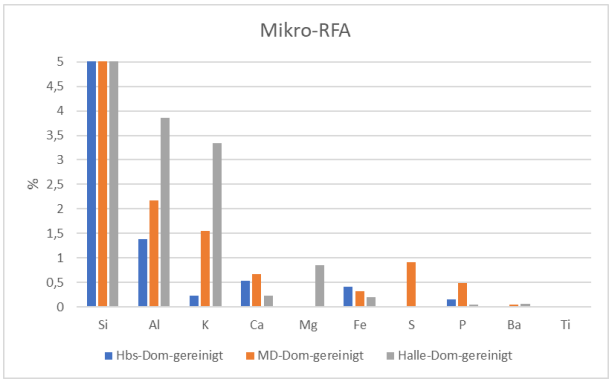


*Abbildung 117: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

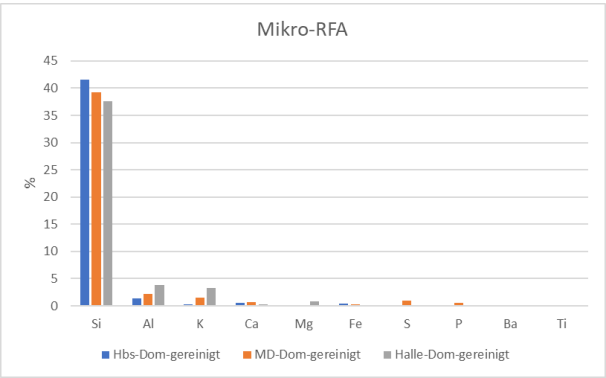


*Abbildung 118: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

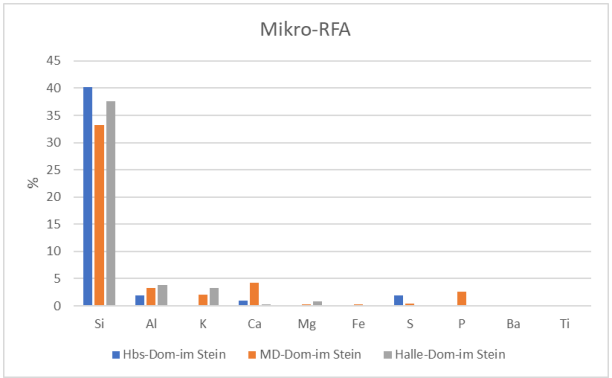


*Abbildung 119: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)*

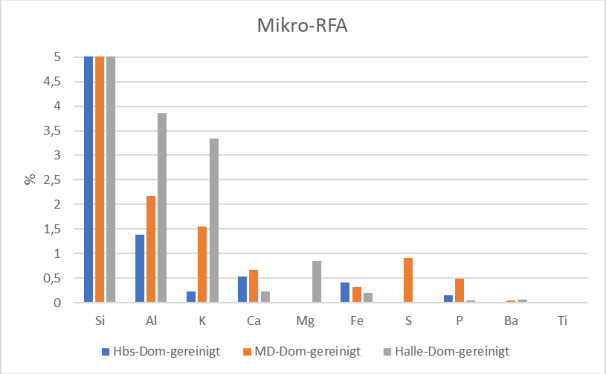


*Abbildung 120: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **gereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

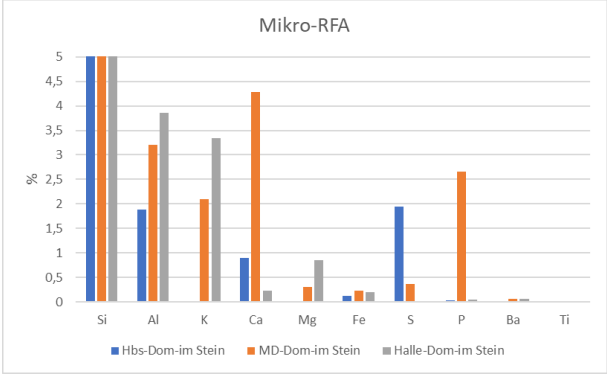


*Abbildung 121: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)*

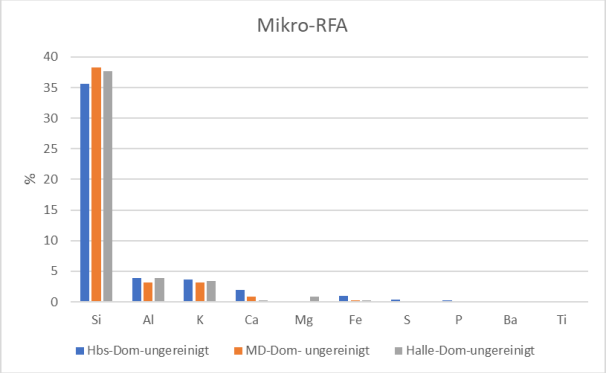


*Abbildung 122: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

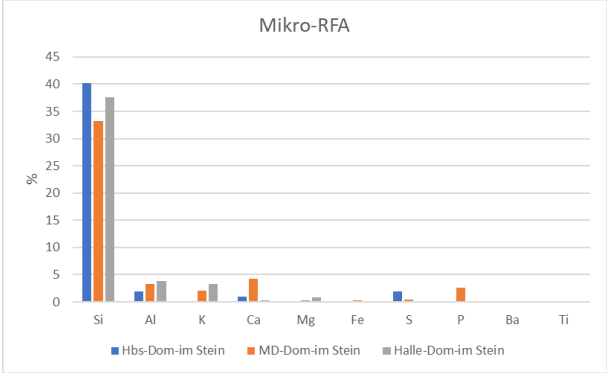


*Abbildung 123: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)*

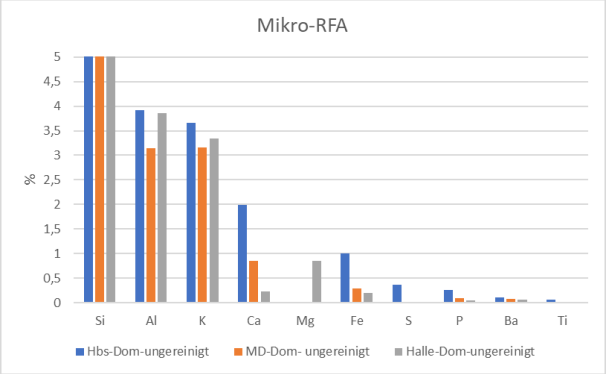


*Abbildung 124: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung im **ungereinigten** Bereich (Angabe in Elementprozent)*

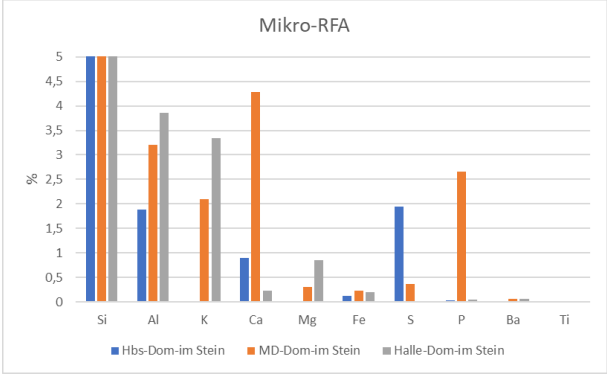


*Abbildung 125: Sandstein-Bohrkernproben aus den MF in Hbs, MD, HAL, Mikro-RFA-Messung **im Stein** (Angabe in Elementprozent)*

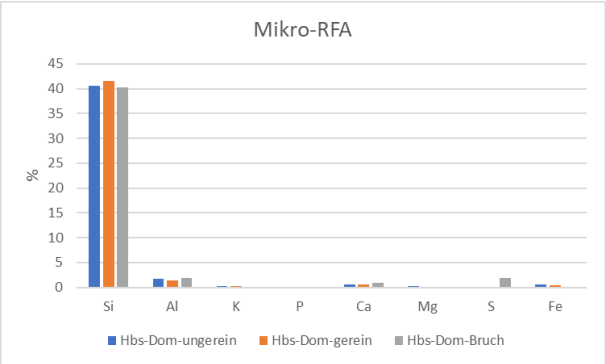


*Abbildung 126: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **Hbs**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)*

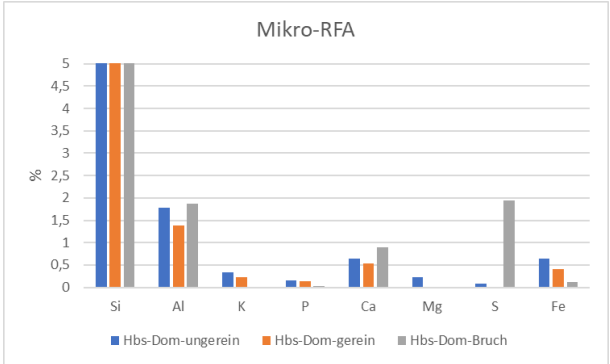


*Abbildung 127: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **Hbs**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)*

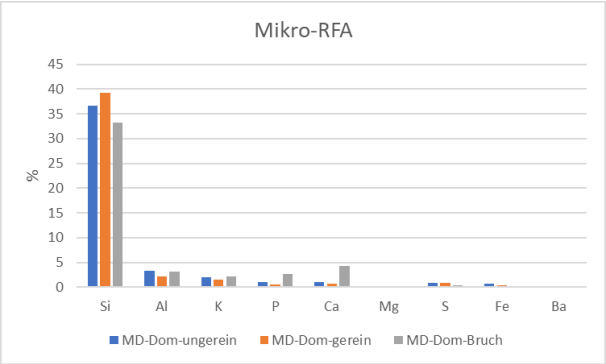


*Abbildung 128: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **MD**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)*

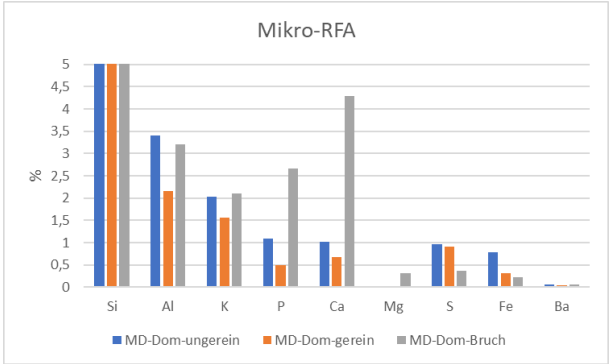


*Abbildung 129: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **MD**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)*

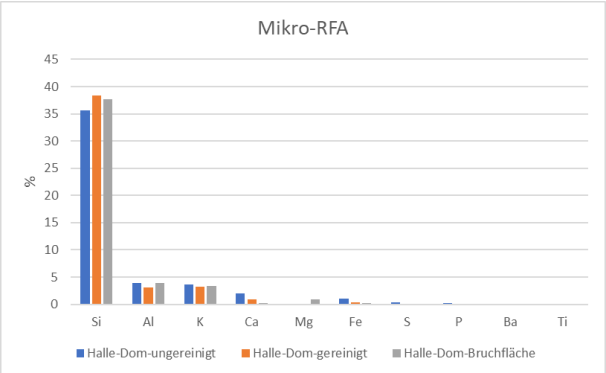


*Abbildung 130: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **HAL**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)*

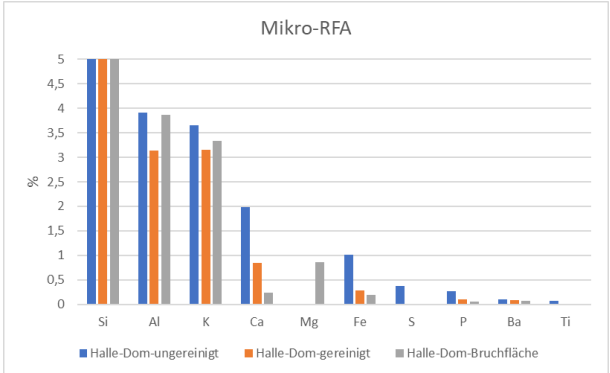


*Abbildung 131: Sandstein-Bohrkernproben aus der MF in **HAL**, Mikro-RFA-Messung im gereinigten, ungereinigten Bereich und im Stein (Bruch) (Angabe in Elementprozent)*

7.6 REM-EDX-Untersuchungen nach Laserreinigung an Sandsteinmustern

Bewertung der Laserreinigung von Krusten an Sandsteinmusterflächen am Dom in Halle, Dom in Halberstadt und dem Dom in Magdeburg, Untersuchungen an Krusten

In der Projektplanung war ursprünglich nur die exemplarische Untersuchung von Auflagen und Krusten an Musterflächen im Halberstädter Dom geplant. Im Projektverlauf zeigte sich jedoch die Notwendigkeit der Kenntnis der strukturell bedingten Eigenschaften und der chemischen Zusammensetzung der Musterflächen am Magdeburger Dom und am Dom in Halle.

Die vorliegenden Untersuchungen beschreiben die chemische und mineralische Zusammensetzung und Struktur von Krusten auf drei unterschiedlichen Sandsteinen an drei unterschiedlichen Standorten, an unterschiedlichen Gebäudebauteilen, die exemplarisch ausgewählt wurden. Ziel war es ebenfalls, die nach restauratorischer Aussage (nach ästhetischer Bewertung) für eine spätere Anwendung am Objekt favorisierte Reinigungsmusterfläche mit naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden zu bewerten. Dazu zählt auch die Untersuchung des Reinigungserfolgs, also der Auswirkungen der Laserreinigung auf das Gefüge der betroffenen Bereiche. Mittels REM-Methode, in Kombination mit einem EDX-Mapping, lassen sich mikroskopische Bereiche gut darstellen und bewerten sowie chemisch-strukturelle Aussagen treffen. Mit der Präparation und Analyse ausgewählter Proben wurde Herr Dr. Köberle an der TU Dresden beauftragt. Die Ergebnisse von Herrn Köberle werden im Folgenden zitiert und unter Einbeziehung weiterer Erkenntnisse interpretiert.

Nach Festlegung wurden zum Zwecke der Untersuchung keine Bohrkerne mit einem Durchmesser von 20 mm an den Musterflächen in Halberstadt, Magdeburg und Halle gezogen. Die Abb. 132 bis Abb. 134 zeigen die Probenahmepunkte. Die Tiefen variieren geringfügig.



Abbildung 132: Magdeburg, Dom, Tonsur, Strebepfeiler, Sandstein-Musterfläche, mit Reinigungsmustern



Abbildung 133: Halle, Dom, Strebpfeiler, Sandstein-Musterfläche, mit Reinigungsmustern

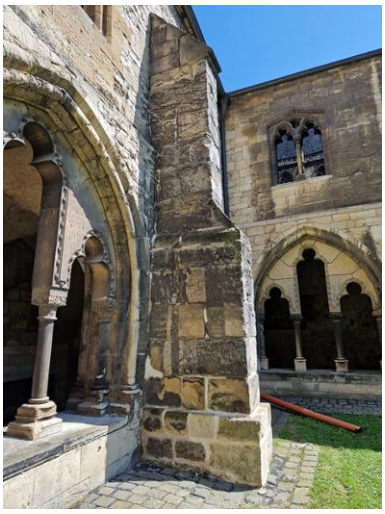


Abbildung 134: Halberstadt, Dom, Strebpfeiler, Sandstein-Musterfläche, mit Reinigungsmustern

Die Probenpräparation und das Vorgehen erfolgte wie oben beschrieben. Die Tab. 6 gibt eine Probenbeschreibung, die Abb. 135 und Abb. 136 zeigen die Seitenansichten und Oberseiten der Bohrkerne mit jeweils angezeichneter Präparationsebene und ungereinigten und gereinigten Bereichen.

Tabelle 6: Proben

Bezeichnung	Länge [mm]	Beschreibung
HBS	25	feinkörniger Sandstein, rötlich
MD	27	feinkörniger Sandstein, hellgrau
HAL	20	feinkörniger Sandstein, hellgrau



Abbildung 135: Bohrkernproben der Sandsteine HAL, Hbs, MD, Seitenansicht (Foto: KÖBERLE, 2025)

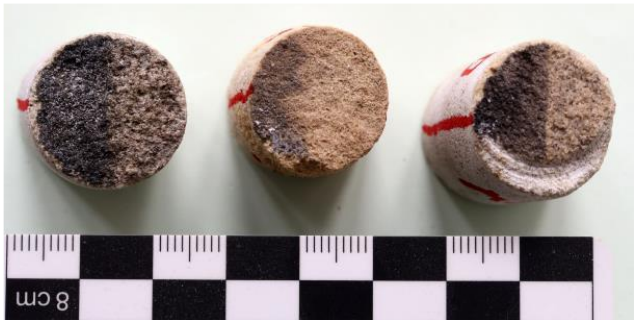


Abbildung 136: Bohrkernproben der Sandsteine HAL, Hbs, MD, Aufsicht mit ungereinigter und gereinigter Oberfläche (Foto: KÖBERLE, 2025)

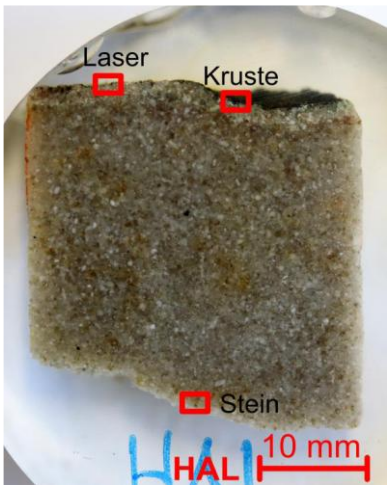


Abbildung 137: Bohrkernanschliff HAL mit Bezeichnung der untersuchten Bereiche (Foto: KÖBERLE, 2025)

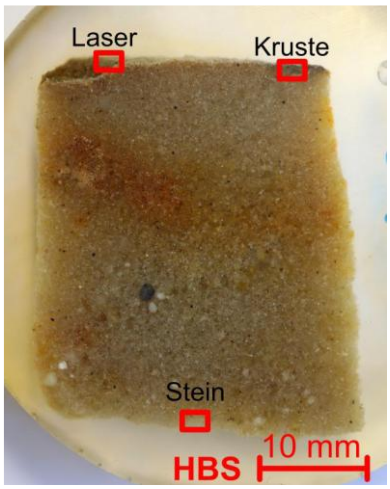


Abbildung 138: Bohrkernanschliff Hbs mit Bezeichnung der untersuchten Bereiche (Foto: KÖBERLE, 2025)

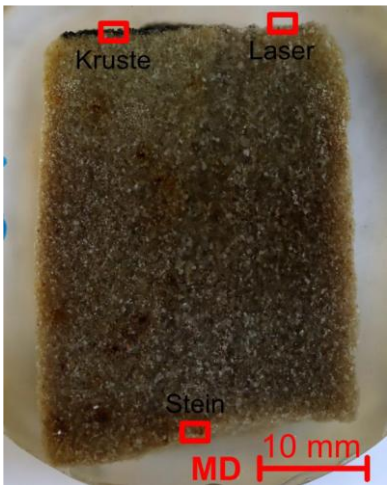


Abbildung 139: Bohrkernanschliff Hbs mit Bezeichnung der untersuchten Bereiche (Foto: KÖBERLE, 2025)

7.6.1 Sandsteinmusterfläche am Dom in Halberstadt

Eine Übersicht der untersuchten Bereiche im angeschliffenen Bohrkern findet sich in Abb. 137.

Der Involutussandstein zeigt, wie bereits beschrieben, einen sehr hohen Porenraum in einem locker gepackten Gefüge. Eine BSE-Aufnahme mit typischem Gefüge zeigt Abb. 139. Im unteren bruchfrischen Bereich des Steins

(Bohrkern) werden allein Silizium, als Marker für Quarz, und akzessorisch Zirkon nachgewiesen (Abb. 141). Aluminium, als Hinweis für Kaolinit, wurde bei dieser Analyse nicht gefunden. Auch Eisen und Schwefel konnten nicht in signifikanten Mengen festgestellt werden.

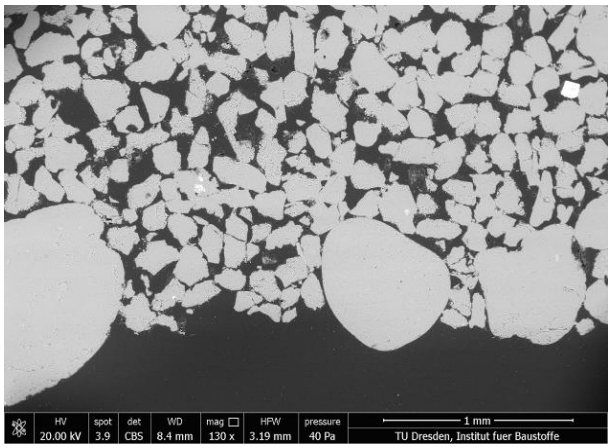


Abbildung 140: Hbs-Bohrkernunterseite (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

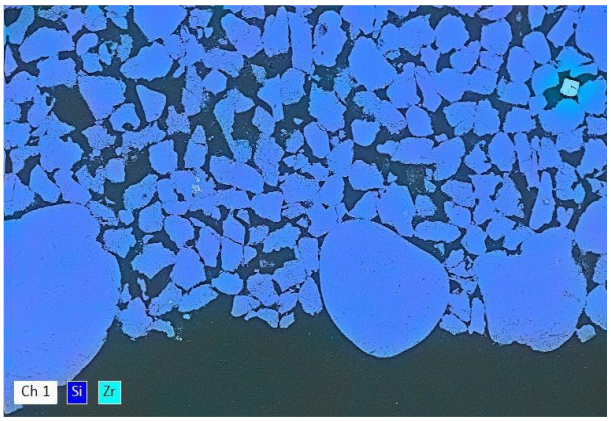


Abbildung 141: Hbs- Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Si und Zr (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

Es wurden ungereinigte (Abb. 142) und lasergereinigte Bereiche (Abb. 143) untersucht. In beiden Übersichtsaufnahmen sind in den oberen 200 – 300 µm Einlagerungen in den Porenräumen sichtbar, die die Oberfläche verdichten. Die lichtmikroskopisch deutlich sichtbare Auflage (Abb. 146) ist auch bei höherer Vergrößerung Abb. 144 und Abb. 145 kaum sichtbar. Nur sehr wenige Auflagekomponenten sitzen auf den Kornoberflächen. Auch die Zwickelfüllungen zwischen den Körnern sind im gereinigten Bereich kaum entfernt. Der Unterschied im w-Wert der Vor- und Nachmessung ist jedoch mit 5,4 kg/(m2 ▪ √h) und 12,3 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 3,2) mehr als deutlich. Die Wasseraufnahme des Bohrkerns über die Unterseite liegt bei einem w-Wert von 22,7 kg/(m2 ▪ √h). Damit zeigt die Verdichtung des Porenraums noch eine deutliche Wirkung.

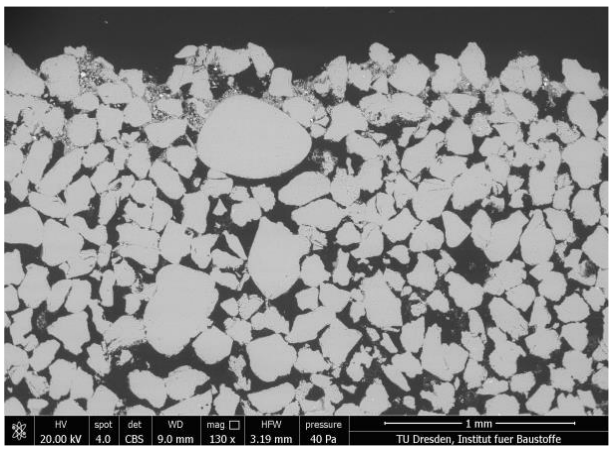


Abbildung 142: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Auflage (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

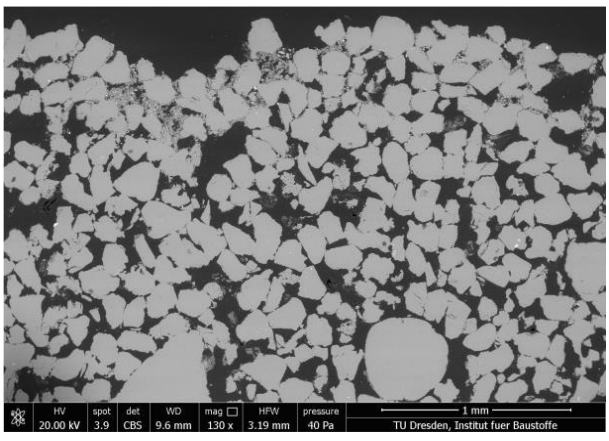


Abbildung 143: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Auflage nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

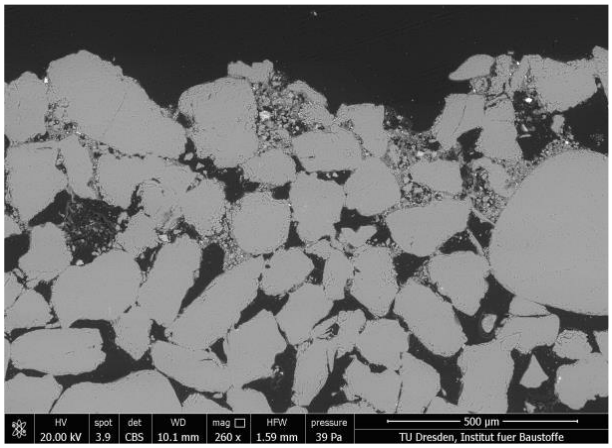


Abbildung 144: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 142 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

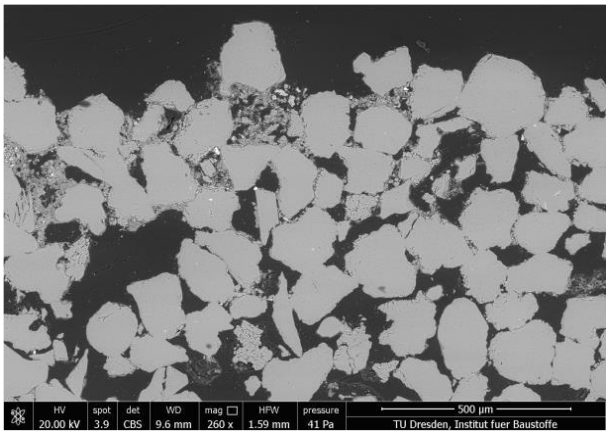


Abbildung 145: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung, Detail aus Abb 67 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

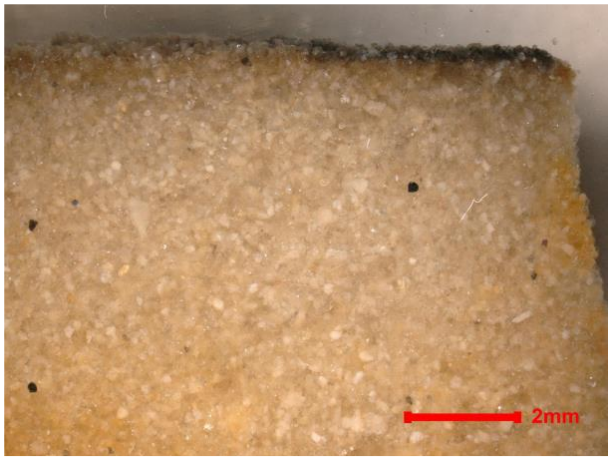


Abbildung 146: Bereich mit schwarzer Auflage (rechts) neben lasergereinigtem Bereich (links) (Videomikro-skop) (Foto: KÖBERLE, 2025)

Die Abb. 148 zeigt die chemische Zusammensetzung der sehr kleinen Partikel der Porenausfüllungen, die überwiegend aus Si und K und Fe bestehen. Es handelt sich danach vermutlich um Quarz, Feldspat und hauptsächlich Eisenminerale. Teil der Kruste ist demnach aus dem Gesteinshintergrund an die Oberfläche umgelagertes Eisen, welches neben Ruß (nicht nachgewiesen) zu einer Verschwärzung der Oberfläche beiträgt. Schwefel konnte, im Gegensatz zur o.g. Untersuchung nicht nachgewiesen werden.

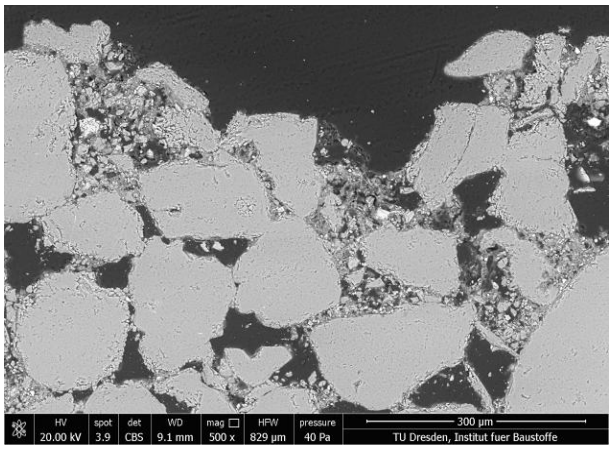


Abbildung 147: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68 (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

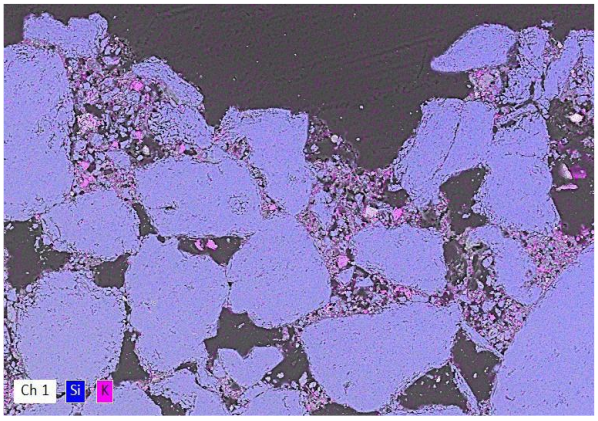


Abbildung 148: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68, REM-EDX-Mapping von Si und K (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

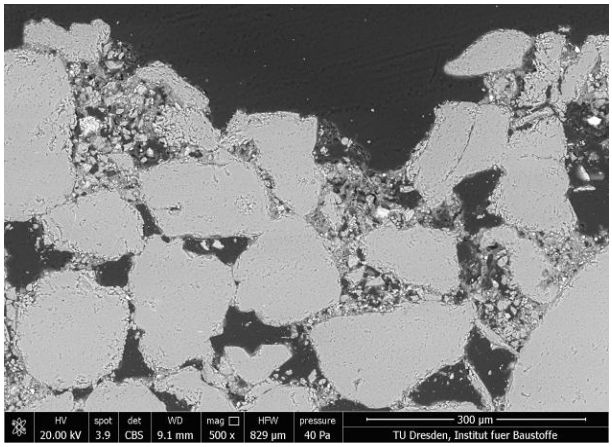


Abbildung 149: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68, REM-EDX-Mapping von Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

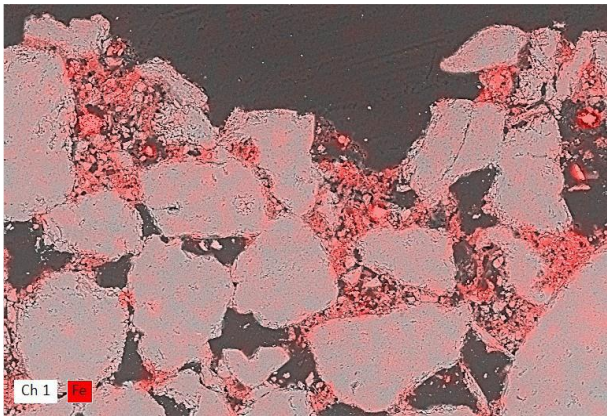


Abbildung 150: Hbs-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb. 68, REM-EDX-Mapping von Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

7.6.2 Sandsteinmusterfläche am Dom in Magdeburg

Eine Übersicht der untersuchten Bereiche im angeschliffenen Bohrkern findet sich in Abb. 139.

Der dem Bernburger Buntsandstein zugeordnete Sandstein zeigt ein relativ dicht gepacktes Gefüge aus Quarz- und Feldspatkomponenten (Kalifeldspat) mit einer Porenfüllung und vereinzelt Kornauflagen im oberen Bereich (Abb. 151). Nach der Laserreinigung des unmittelbar daneben liegenden Bereichs erscheint das Gefüge der oberen Kornlagen deutlich aufgelockert, Zwickelfüllungen fehlen (Abb. 152). Zudem scheinen hier eine Materialinhomogenität und ein geschädigtes Gefüge vorzuliegen. Der Unterschied im w-Wert der Messung ist im ungereinigten Bereich bei 0,3 kg/(m2 ▪ √h) und im gereinigten Bereich bei 26,7 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 2.11) extrem. Die Wasseraufnahme des Bohrkerns über die Unterseite liegt bei einem w-Wert von 5,7 kg/(m2 ▪ √h).

Der obere Bereich der ungereinigten Probe zeigt eine porenraumverdichtete Zone von 300 - 500 µm (Abb. 151). Auch unterhalb dieses stark verdichteten Bereichs sind die Poren teilweise mit kleinen Partikeln bis zur unteren Bruchfläche des Bohrkerns verfüllt. Bei dieser Porenraumfüllung handelt es sich um das Calciumphosphat Apatit (Abb. 153 bis Abb. 158), wie die Ergebnisse des EDX-Mappings zeigen. Die Kruste enthält sehr kleine Quarz- und Feldspartkomponenten, zum Teil in einer Matrix aus Ruß (Abb. 159). Der obere Bereich der Kruste ist eisendominiert (Abb. 160). Schwefel ist, im Gegensatz zur Mikro-RFA-Messung, nicht nachweisbar.

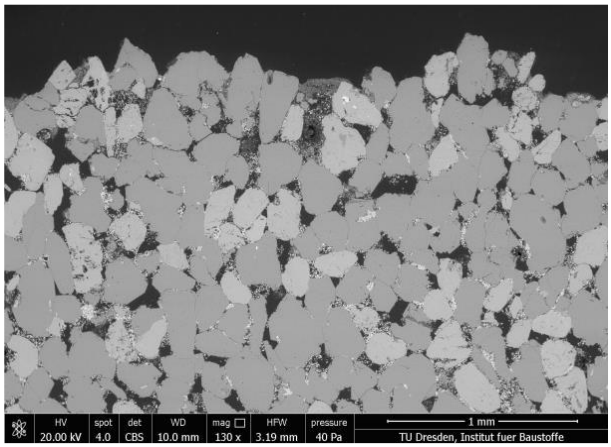


Abbildung 151: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

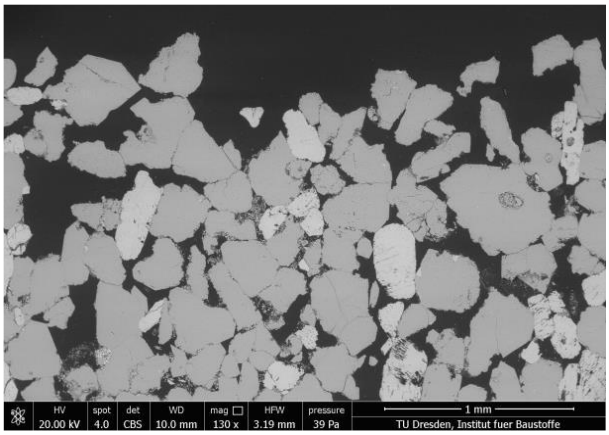


Abbildung 152: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

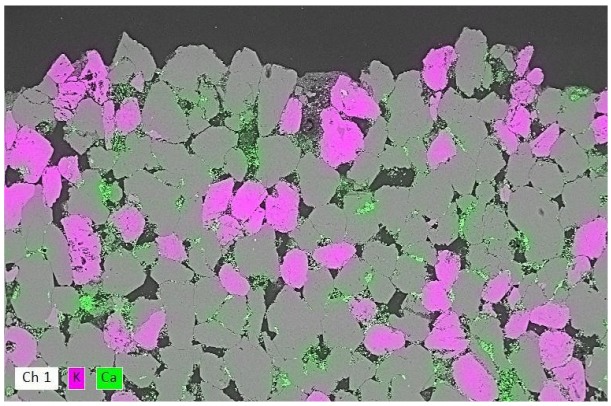


Abbildung 153: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

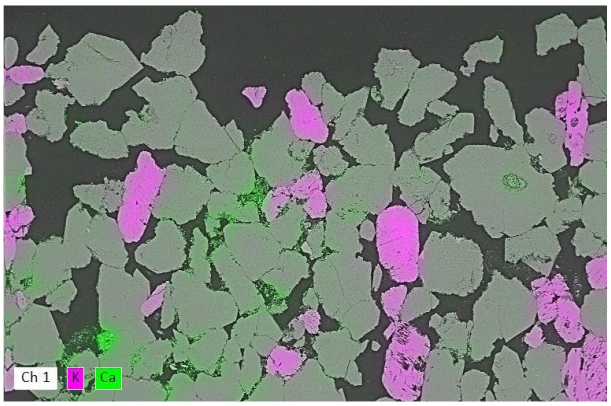


Abbildung 154: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung, REM-EDX-Mapping von Si, Ca und Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

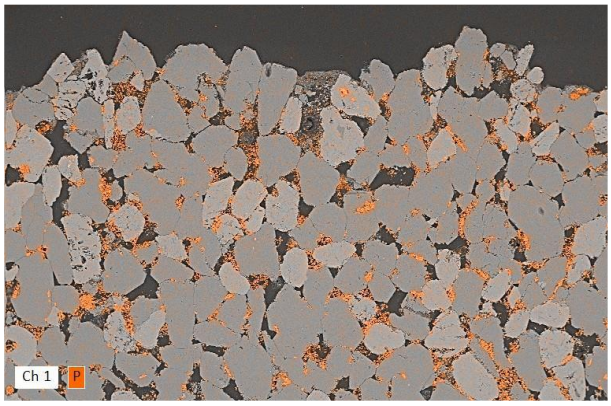


Abbildung 155: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, REM-EDX-Mapping von P (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

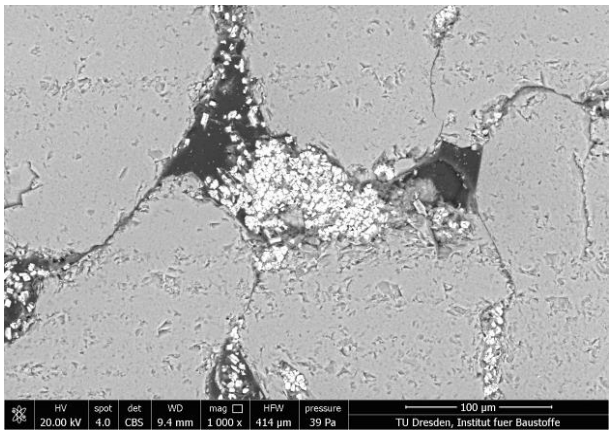


Abbildung 156: MD-Bohrkernunterseite (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

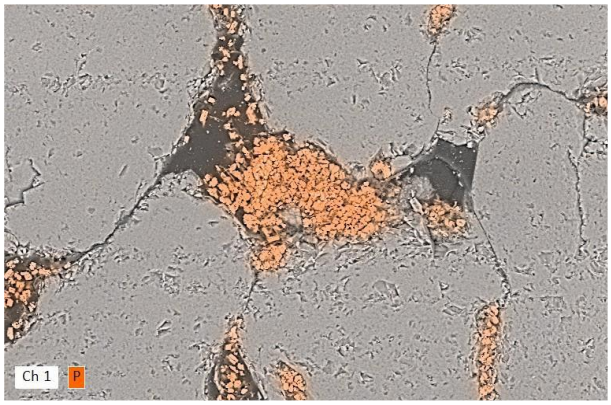


Abbildung 157: MD-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von P (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

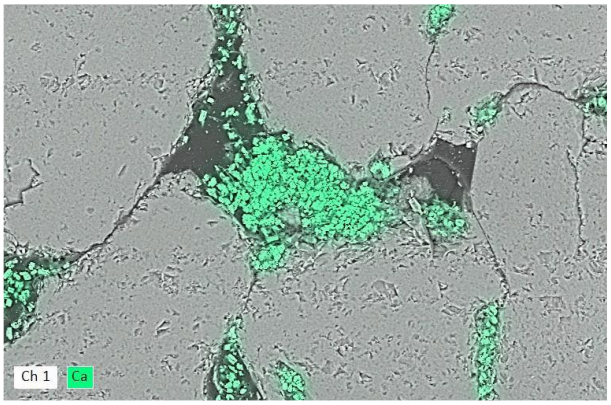


Abbildung 158: MD-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Ca (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

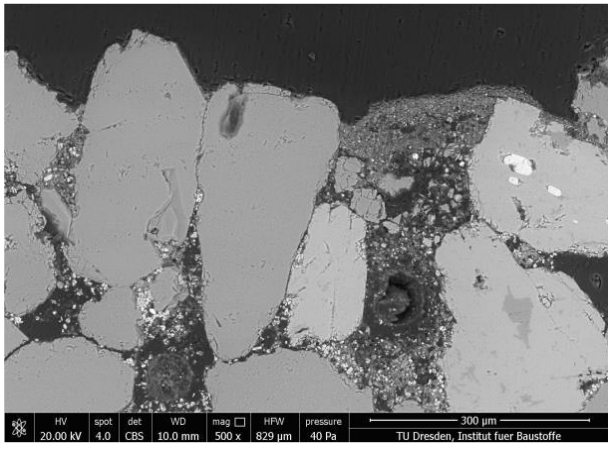


Abbildung 159: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail aus Abb (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

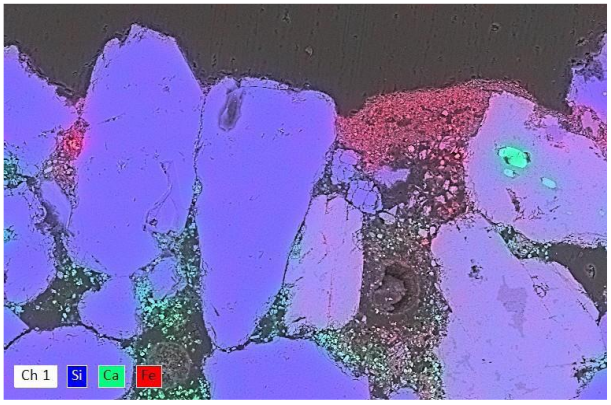


Abbildung 160: MD-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, REM-EDX-Mapping von Si, Ca und Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

7.6.3 Sandsteinmusterfläche am Dom in Halle

Eine Übersicht der untersuchten Bereiche im angeschliffenen Bohrkern findet sich in Abb. 139. Der ebenfalls dem Grenzbereich Mittlerer/Unterer Buntsandstein zuzuordnende Sandstein zeigt ein sehr dicht gepacktes Gefüge (Abb. 161) aus Quarz- und Feldspatkomponenten (Kalifeldspat) mit vereinzelt auftretenden dolomitischen Ooiden. Die Abb. 162 bis Abb. 164 zeigen die dazugehörigen Element-Mappings von Si, K und Mg. Schwefel wird nicht nachgewiesen (Abb. 163).

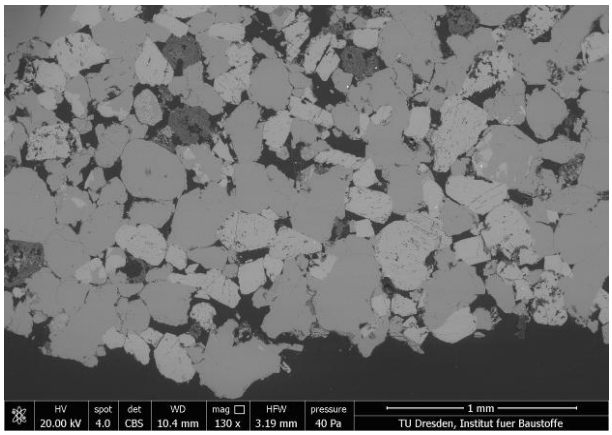


Abbildung 161: HAL-Bohrkernunterseite (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

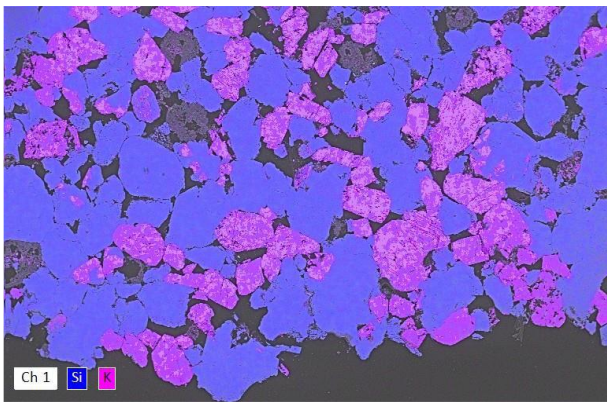


Abbildung 162: HAL-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Si und K (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

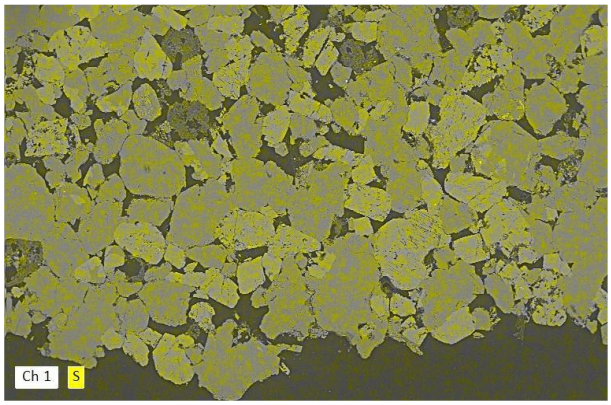


Abbildung 163: HAL-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von S (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

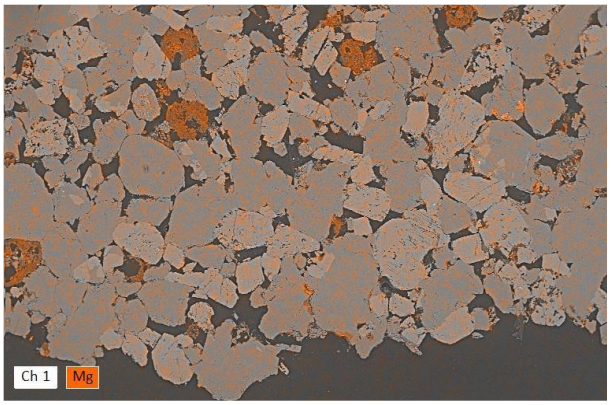


Abbildung 164: HAL-Bohrkernunterseite, REM-EDX-Mapping von Mg (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

Die Abb. 165 und Abb. 167 zeigen die Anschnitte der ungereinigten Oberfläche mit unterschiedlicher Korngröße und die Abb. 166 den der lasergereinigten Fläche im REM-BSE-Bild. In Abb. 167 ist erkennbar, dass die Kruste deutlich reduziert wurde, es jedoch immer noch Stellen gibt, die der Kruste zugeordnet werden können (rote Pfeile in Abb. 167). Vermutlich wurde mit der Kruste auch die von der Kruste eingenommene oberste Kornlage entfernt. Die Kruste ist ca. 200 - 300 µm in das Gefüge, unter die obere Kornlage eingedrungen.

Die Abb. 169 zeigt das BSE-Bild der Kruste, einer überwiegend aus Ruß bestehenden Matrix mit Komponenten von Quarz, Feldspat und eisenhaltigen Bestandteilen, wie anhand der Element-Mapping-Abbildungen Abb. 170. bis Abb. 172 mit den Elementen Silizium, und Kalium, Eisen nachvollzogen werden kann. Schwefel wird nach KÖBERLE (2025) nicht nachgewiesen, im Gegensatz zu den Mikro-RFA-Ergebnissen. Der w-Wert der Messungen liegt im ungereinigten und im gereinigten Bereich bei 0,2 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 1.3). Die Wasseraufnahme des Bohrkerns über die Unterseite liegt bei einem w-Wert von 2,8 kg/(m2 ▪ √h). Damit zeigt die Verdichtung des Porenraums noch ihre volle Wirkung.

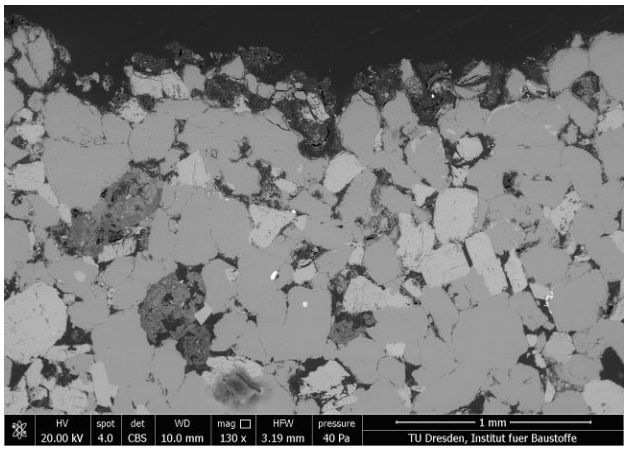


Abbildung 165: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

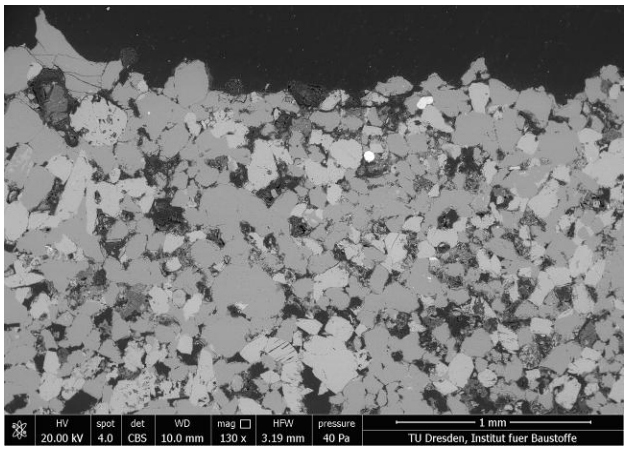


Abbildung 166: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

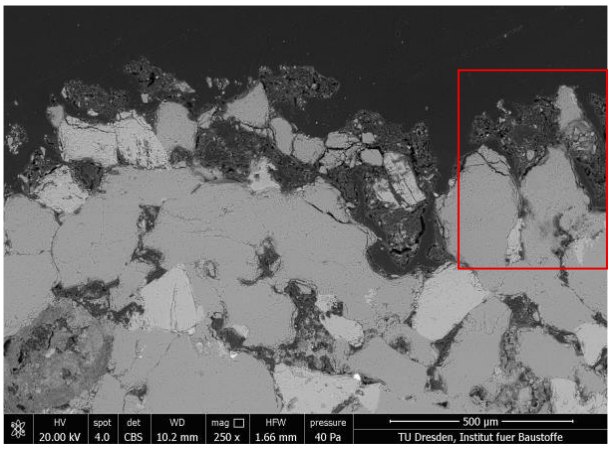


Abbildung 167: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

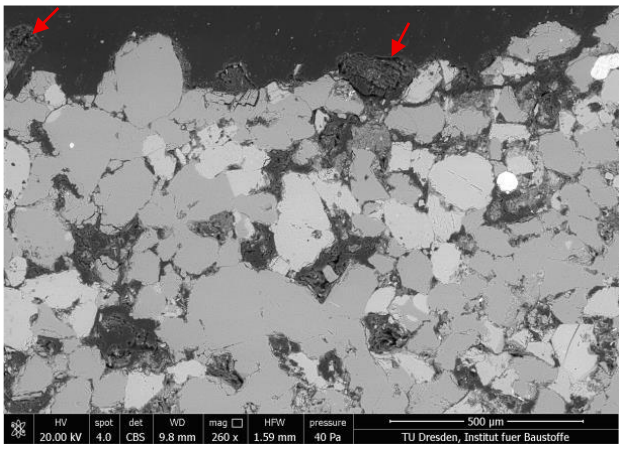


Abbildung 168: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste nach Laserreinigung (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

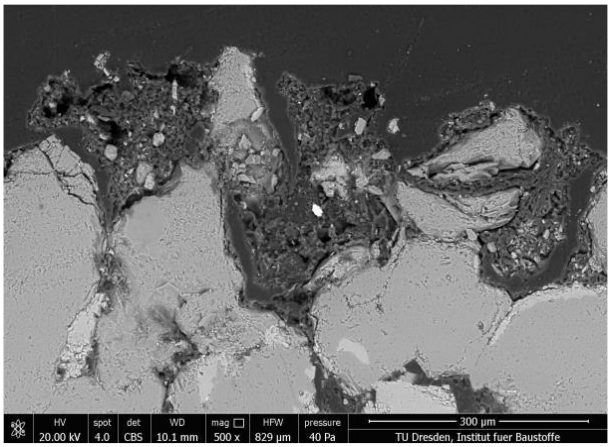


Abbildung 169: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste aus Abb. 165 (REM-BSE), zerstörte Komponenten Qz und Fsp, zerstörtes Quarzkorn, tiefschwarze Bereiche zeigen präparationsbedingte Ausbrüche im Bereich der Kruste (Foto: KÖBERLE, 2025)

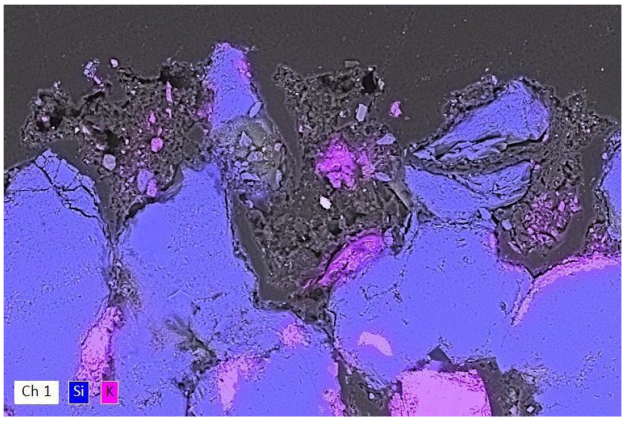


Abbildung 170: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste aus Abb. 165, REM-EDX-Mapping von Si und K (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

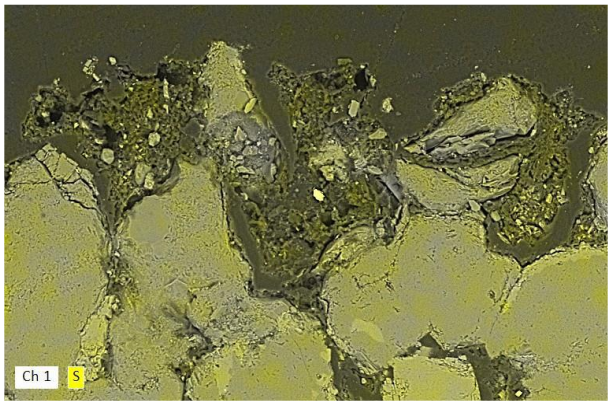


Abbildung 171: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste Abb. 165, REM-EDX-Mapping von S (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

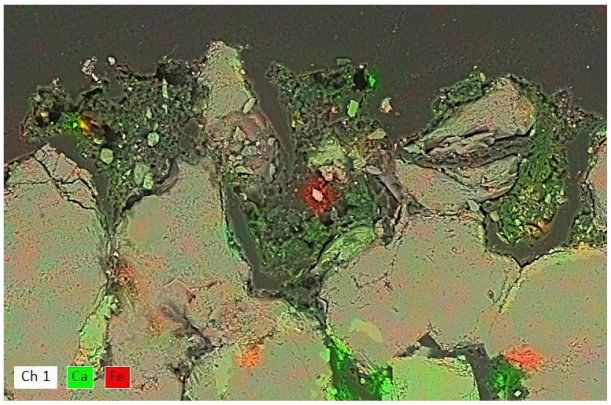


Abbildung 172: HAL-Bohrkernoberfläche, Bereich mit Kruste, Detail der Kruste aus Abb. 165, REM-EDX-Mapping von Ca und Fe (REM-BSE) (Foto: KÖBERLE, 2025)

7.6.4 Zusammenfassung

In allen drei Probenoberflächen konnten Krusten festgestellt werden, die den oberen Porenraum verdichten. Sie dringen als Auflagerung in den Porenraum ein und verdichten ihn. Krustenkomponenten in Staubgröße bestehen im Wesentlichen Quarz und Feldspat sowie Ruß und Eisen in unterschiedlichen Anteilen. In HBS und MD sind die Krusten eisendominiert, in HAL rußdominiert. In allen drei Krusten konnte kein signifikanter Gehalt an Schwefel festgestellt werden. Die Laserreinigung führte augenscheinlich bei allen drei Proben zu einem Materialabtrag.

Bei der Hbs-Probe ist der Unterschied im vor und nach der Laserreinigung gemessenen w-Wert jedoch mit 5,4 kg/(m2 ▪ √h) und 12,3 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 3,2) mehr als deutlich. Die Wasseraufnahme des Bohrkerns über die

Unterseite liegt bei einem w-Wert von 22,7 kg/(m2 ▪ √h). Damit zeigt die im BES-Bild sichtbare Verdichtung des Porenraums noch ihre Wirkung.

Der Unterschied der MD-Probe im w-Wert der Messung ist im ungereinigten Bereich bei 0,3 kg/(m2 ▪ √h) und im gereinigten Bereich bei 26,7 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 2.11) extrem. Die Wasseraufnahme des Bohrkerns über die Unterseite liegt bei einem w-Wert von 5,7 kg/(m2 ▪ √h). Hier handelt es sich um Materialinhomogenitäten, die Werte benachbarter Reinigungsmuster liegen bei w-Werten von 11,1 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 2.10) und 14,7 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 2.12). Bei der Probe MD fällt auf, dass im lasergereinigten Bereich das Gefüge des Sandsteins gelockert erscheint.

Ein Unterschied im w-Wert der Probe HAL ist im ungereinigten und im gereinigten Bereich nicht nachweisbar. Er liegt bei 0,2 kg/(m2 ▪ √h) (Fläche 1.3). Die Wasseraufnahme des Bohrkerns über die Unterseite liegt bei einem w-Wert von 2,8 kg/(m2 ▪ √h). Damit zeigt die Verdichtung des Porenraums durch eine dicke Kruste noch ihre volle Wirkung. Auf der Kornoberfläche der Probe HAL konnten auch im lasergereinigten Bereich noch Reste von Krustenmaterial festgestellt werden. Der oberflächennahe Porenraum im vergleichsweise bereits dichten Gesteinsgefüge ist stark verdichtet. Vermutlich wurde hier auch die obere Kornlage durch die Laserbehandlung entfernt.

7.7. Bewertung der Musterflächen

Bewertung der Musterflächen und der getesteten Laserreinigungsgeräte Anhand der Ergebnisse der Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme, der Farbmessungen und der Digitalmikroskopie

7.7.1 Einleitung

Die kapillare Wasseraufnahme eines Natursteins wird durch Auflagen und/oder Krustenbildung durch Materialumwandlung wie z.B. Vergipsung oberflächennah beeinträchtigt oder vollständig unterbunden. Inwieweit durch Laserreinigung solcher Oberflächen neben einer optischen Aufhellung durch die Entfernung von Schutzpartikeln auch die Wiederherstellung bzw. Vergrößerung dieser möglich ist, wurde mit Hilfe von Wassereindringtests untersucht. Als praxistaugliche und zerstörungsfreie Untersuchungsmethode erfolgte an den verschiedenen Musterflächen die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten.

Zunächst wurden Voruntersuchungen an unbehandelten Musterflächen vorgenommen. An verschiedenen Stellen erfolgte die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme um einen Überblick über das Wassereindringverhalten dieser Musterflächen zu gewinnen. Nach erfolgter Reinigung wurden an den einzelnen, mit Hilfe der Laserreinigung erstellten Musterflächen Nachuntersuchungen der kapillaren Wasseraufnahme durchgeführt.

Weiterhin erfolgten, zur Einschätzung der Farbveränderungen der Oberflächen durch die Laserreinigung, Farbmessungen mit Hilfe eines elektronischen Farbmessgerätes. Der ungereinigte Zustand (Referenzflächen) sowie der Zustand nach der Laserreinigung wurden erfasst und dokumentiert.

Zusätzlich erfolgten mikroskopische Begutachtungen ungereinigter Flächen (Referenzen) sowie die aller lasergereinigten Flächen mit Hilfe eines digitalen Auflichtmikroskops.

Alle ermittelten Messwerte finden Eingang in die aus dem Forschungsprojekt hervorgegangene, umfassende Datenbank.

7.7.2 Messverfahren

Kapillare Wasseraufnahme

Das Karstensche Messröhrchen besteht aus einem Glaszylinder mit aufsitzendem skaliertem Messröhrchen. Es wird mit Hilfe eines silikonhaltigen Kitts an der zu untersuchenden Oberfläche befestigt. Zur Messung wird es zügig mit destilliertem Wasser befüllt. In definierten Zeitabständen wird der Wasserstand in Messröhrchen abgelesen und erfasst. Anhand dieser Daten wird der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) ermittelt. Es handelt sich um ein einfaches, praxisnahes Prüfverfahren, dass mit dem Medium arbeitet dessen Eindringverhalten untersucht werden soll. Dies ist besonders in Bezug auf die Rheologie, insbesondere die Oberflächenspannung aber auch die Kapillarkräfte aufgrund der Diopolstruktur des Wassers von Bedeutung.

Farbmessungen

An allen lasergereinigten Flächen sowie an Referenzflächen erfolgten Farbmessungen. Zum Einsatz kam das Gerät *ColorReader* der Firma datacolor. Die Angabe der Farbwerte erfolgt im Lab-Farbraum. Aufgrund der Heterogenität der Oberflächen und der begrenzten Größe des Messbereiches erfolgten auf jeder Fläche 3 Farbmessungen, deren Mittelwert anschließend bestimmt und weiterverwendet wurde. Die Abb. 173 zeigt Beispiele für Farbmessungen mit dem ColorReader an Musterflächen, der einfach handhabbar, als Bedienoberfläche, über Bluetooth gekoppelt, ein Smartphone nutzt.

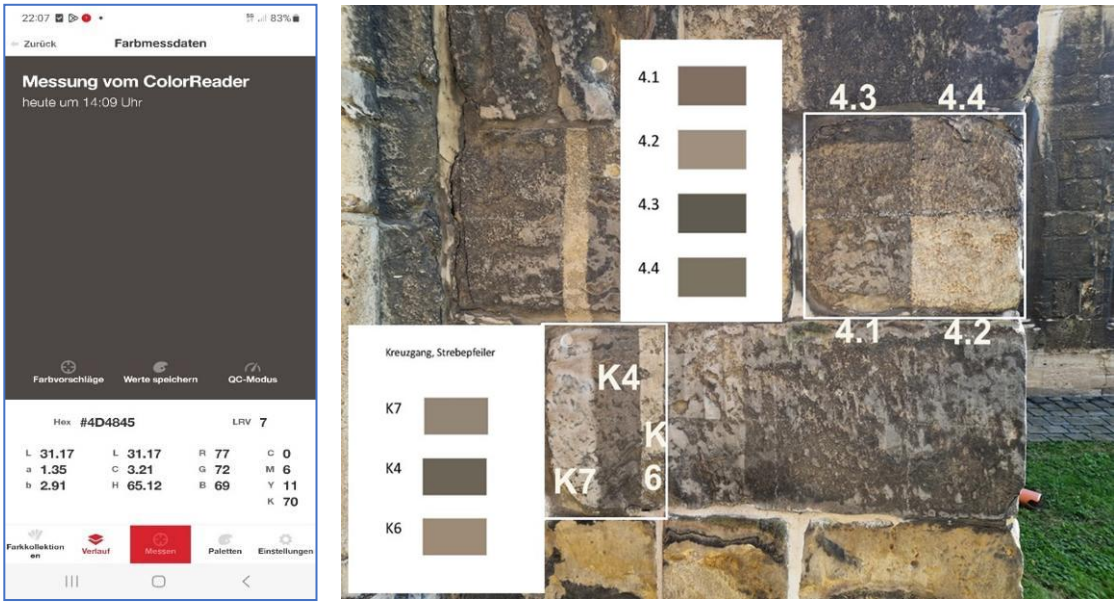


Abbildung 173: Beispiel für Farbmessungen mit dem ColorReader: Bedienoberfläche am Smartphone (links), Beispiel für Messungen an Musterflächen des Strebepfeilers am Halberstädter Dom (rechts)

Digitalmikroskopie

Alle mikroskopischen Aufnahmen erfolgten mit dem digitalen Auflichtmikroskop *Dino Lite AM4013MZT. Das Gerät arbeitet* mit einer bis zu 200-fachen Vergrößerung und einer Bildauflösung von 1,3 Megapixel (1280x1024 Pixel). Die Bildwiedergabe und -speicherung erfolgt über eine Verbindung zu einem mobilen PC. Zur Verbesserung der Bildqualität, besonders bei stark reflektierenden Oberflächen, steht zusätzlich ein eingebauter Polarisationsfilter zur Verfügung.

XRD-Phasenanalyse

XRD-Phasenanalysen erfolgten an Einzelproben mit einem Panalytical-Gerät an der TU Dresden. Die Auswertung erfolgte über die X-Pert-Software.

7.7.3 Dom Halberstadt

Musterfläche Kreuzgang

Das Material der Musterfläche I im südlichen Kreuzgang ist ein heller, relativ dichter Kalkstein mit unterschiedlich starken mittel- dunkelgrauen Auflagen (siehe Abb. 174). Die im Vorfeld der Reinigungsversuche durchgeführten Wassereindringtests ergaben ein sehr einheitliches Bild. Es wurden nur geringe Wasseraufnahmen mit w-Werten zwischen 0,15 kg/(m2 ▪ √h) und 0,21 kg/(m² ▪ √h) ermittelt. Die an den gereinigten Flächen ermittelten w-Werte befinden sich in einem ganz ähnlichen Bereich zwischen 0,04 kg/(m2 ▪ √h) und 0,59 kg/(m² ▪ √h), wobei festzustellen ist, dass die kapillare Wasseraufnahme der Flächen nicht mit dem Reinigungszustand korreliert. So weisen optisch gut gereinigte Flächen z.T. geringere w-Werte als wenig gereinigte oder ungereinigte Flächen auf (siehe Tab. 7 und Abb. 175). Innerhalb der ungereinigten Oberflächen tritt häufig eine Migration des zugeführten Wassers innerhalb der Auflage auf (Bildung eines Feuchtigkeitssaums währen der Messung).

Für das geringe Wasseraufnahmevermögen ist die dichte Struktur des Kalksteins verantwortlich. Die oberflächliche Abreinigung sichtbarer Auflagen bewirkt meist keine wesentliche Veränderung der kapillaren Wasseraufnahme der untersuchten Oberflächen.





Abbildung 174, Abbildung 175: Halberstadt, Dom, südlicher Kreuzgang, Zustand nach Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen (rechts) Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS

Tabelle 7: Halberstadt, Dom, Kreuzgang, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vorzu-stand [kg/(m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/(m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungs-gerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
I_3.2_1 (links)	0,8	0,3	CL50	60 %	T	58,52	2,36	12,29
I_3.2_2	0,8	0,2	CL50	80 %	T	62,25	1,56	15,88
I_3.2_3	0,8	0,5	CL50	100 %	T	65,68	2,24	15,74
I_3.2_4 (rechts)	0,8	0,2	CL50	100 %	T	65,43	2,28	15,67
I_3.2_5 Ref.	0,8					46,97	1,23	7,85
I_3.1_1 (links)	0,8	0,2	CL50	60 %	N	58,22	2,69	12,77
I_3.1_2	0,8	0,4	CL50	80 %	N	59,58	3,52	12,43
I_3.1_3	0,8	0,5	CL50	100 %	N	61,24	2,38	12,88
I_3.1_4 (rechts)	0,8	0,4	CL50	100 %	N	64,77	3,24	14,43

I_3.1_5 Ref.	0,8					48,02	1,24	11,03
I_4.0	0,7	0,3	CL50	100 %	T	62,51	2,55	15,85
I_4.0 Ref.	0,7					50,09	3,22	8,64
I_4.1	0,7	0,3	CL50	100 %	T	68,67	3,57	14,81
I_4.1 Ref.	0,7					50,57	2,72	10,57
I_2.1_1	0,2	0,3	Smart 300	100 %	T	60,53	3,89	13,32
I_2.1_2	0,2	1,0	Smart 300	75 %	T	63,74	1,33	14,50
I_2.1_3	0,2	0,7	Smart 300	50 %	T	60,01	2,36	12,17
I_2.1_4	0,2	0,3	Smart 300	100 %	N	65,93	2,56	13,59
I_2.1_5	0,2	0,3	Smart 300	75 %	N	63,52	1,19	12,03
I_2.1_6	0,2	0,5	Smart 300	50 %	N	63,39	1,79	12,80
I_2.1_6 Ref.	0,2					47,15	0,39	8,35
I_1.8_1	0,2	0,5	Soliton	max.	N	62,91	3,01	14,77
I_1.8_2 Ref.	0,4					54,16	3,86	8,71
I_1.8_3	0,2	0,1	Infinito L.	50 W	T	61,92	3,17	11,39
I_1.8_4	0,2	0,6	CL50	100 %	N	61,32	1,90	11,98
I_1.5.1_1 Ref.	0,1					50,84	1,33	10,58
I_1.5.1_2	0,2	0,3	Infinito L.	30 W	T	64,01	3,84	13,42
I_1.5.2	0,2	0,4	Infinito L.	30 W	N	61,40	2,75	11,76
I_1.5.3	0,2	0,5	Infinito L.	100 W	T	63,22	4,29	12,76
I_1.5.4	0,2	0,7	Infinito L.	100 W	N	63,43	4,98	9,85
I_1.5.5 Ref.	0,2					47,04	3,20	7,79
I_1.6.0 Ref.	0,2					48,13	2,46	9,09
I_1.6.1	0,2					67,06	4,91	15,92
I_1.6.2	0,2	0,3	Infinito L.	55 W	T	71,11	2,50	14,56
I_1.6.3	0,2	0,1	Infinito L.	55 W	T	64,55	4,30	15,15
I_1.6.4	0,2	0,4	Infinito L.	55 W	N	67,64	2,19	11,67
I_1.7.1	0,2	0,3	Infinito L.	72 W	T	64,67	3,39	12,97
I_1.7.2	0,2	0,5	Infinito L.	72W	N	64,27	3,05	10,90
I_1.7 Ref.						51,06	1,46	10,33
I_2.0_1	0,2	0,7	Soliton	max.	T	58,69	5,08	13,85
I_2.0_2	0,2	1,2	Soliton	max.	N	62,57	5,36	17,61
I_2.0 Ref.	0,3					53,89	3,13	12,45
I_2.2_1	0,2					48,64	2,84	10,89

Ref.								
I_2.2.2 (links)	0,2	0,2	Thunder C.	0,35 J	T	59,96	3,85	15,17
I_2.2.2 (rechts)	0,2	0,2	Thunder C.	0,35 J	N	63,25	0,13	17,62
I_2.2.3 (links)	0,2	1,2	Thunder C.	0,20 J	T	60,22	3,27	15,19
I_2.2.3 (rechts)	0,2	1,0	Thunder C.	0,20 J	N	67,17	3,75	18,33
I_2.3.1 (links)	0,2	0,7	Thunder C.	0,40 J	T	65,32	3,64	15,09
I_2.3.1 (rechts)	0,2	0,1	Thunder C.	0,40 J	N	69,35	4,37	17,27
I_2.3.1 Ref.	0,2					45,48	2,14	6,54
I_2.3.2 (links)	0,2	0,2	Thunder C.	0,45 J	T	67,69	4,42	17,29
I_2.3.2 (rechts)	0,2	0,3	Thunder C.	0,45 J	N	60,51	5,73	15,29
I_2.3.2 Ref.	0,2					43,39	3,19	5,48





Abbildung 176, Abbildung 177: Halberstadt, Dom, südlicher Kreuzgang, Voruntersuchung der ungereinigten Flächen (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts)

Tabelle 8: *Halberstadt, Dom, Kreuzgang, Bewertung der Laserreinigungsgeräte*

CL50	- kaum Unterschied zwischen Trocken- und Nassreinigung erkennbar - Reinigungsleistung korreliert mit Farbwert - keine Veränderung des w-Wertes - Veränderung der Scanbreite zwischen den Flächen 4.0 und 4.1
Smart 300	- Ergebnisse der Nassreinigung etwas heller als Trockenreinigung - guter Reinigungserfolg schon bei 50% Leistung, w-Wert nur leicht Erhöht
Infinito Laser	- kaum Unterschied zwischen Trocken- und Nassreinigung erkennbar - teilweise geringe Öffnung der Oberfläche - guter Reinigungserfolg schon bei 30 W Leistung - Lab-Wert korreliert nicht genau mit Leistung
Soliton	- Nassreinigung etwas besser als Trockenreinigung, Lab-Wert spiegelt dies ebenfalls wider - deutliche Erhöhung des w-Wertes - nur mit max. Leistung getestet
Thunder Compact	- geringer Unterschied zwischen Trocken- und Nassreinigung erkennbar - Lab-Wert korreliert weitestgehend - bei hoher Leistung z.T. leicht gelblich verfärbt - bei geringer Leistung z.T. mäßiger Reinigungserfolg

Alle getesteten Laserreinigungsgeräte sind gut für die Reinigungsaufgabe an der Musterfläche im Kreuzgang geeignet. Die häufig auftretende Streifentextur des CL50 war hier nicht erkennbar. Allerdings ist generell zu beachten, dass bei zu hoher Reinigungsleistung gelblich-bräuliche Verfärbungen auftreten können (siehe Abb. 178). Daher sollte die Leistung nur so hoch gewählt werden, wie für ein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis unbedingt nötig. Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 8 entnehmen.

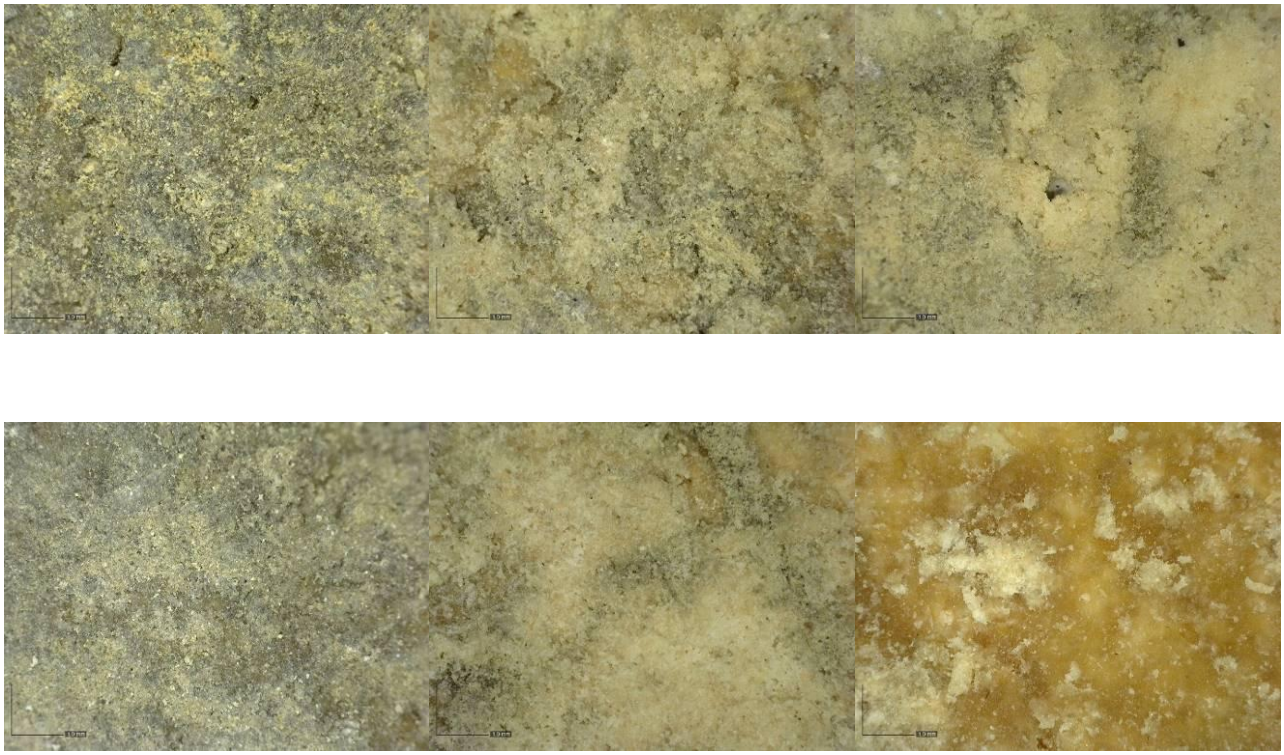


Abbildung 178: Halberstadt, Dom, südlicher Kreuzgang, digitalmikroskopische Aufnahmen: Reinigungsfläche 2.2.3 (oben links: ungereinigt, oben Mitte: Thunder Compact 0,2 J, trocken, oben rechts: Thunder Compact 0,2 J, nass; Reinigungsfläche 2.3.2 (unten links: ungereinigt, unten Mitte: Thunder Compact 0,45 J, trocken, unten rechts: Thunder Compact 0,45 J, nass; besonders bei Nassreinigung und hoher Reinigungsleistung treten Verfärbungen auf

Musterfläche Strebepfeiler

Das Material der Musterfläche II im Südlichen Kreuzgang ist ein heller, gelblich gefärbter Sandstein mit relativ variabler Körnung (siehe Abb. 179, 180). Er weist dicke, grau bis schwarze, stellenweise abschalende Krusten auf. Die im ungereinigten Zustand ermittelten Wasseraufnahmen variieren z.T. stark (siehe Abb. 181). Da durch die Schalenbildung der Krusten immer wieder Fehlstellen vorhanden sind, kann das Wasser während der Messung über diese Fehlstellen direkt in den kapillar stark saugenden Sandstein eindringen. Nur Bereiche mit dicken, völlig intakten Krusten generieren dann sehr niedrige w-Werte (siehe Tab. 9). Durch die Laserreinigung konnten vielfach sehr gute Reinigungsergebnisse erzielt werden (siehe Abb. 179). Zu beachte sind jedoch Farbveränderungen bei sehr hoher Reinigungsleistung (zu hohe Energiedichte).



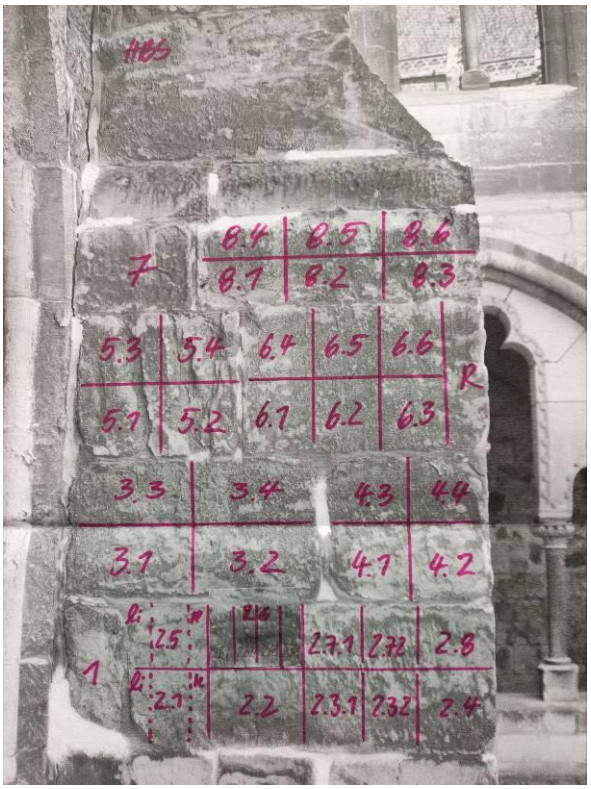


Abbildung 179, Abbildung 180: Halberstadt, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Ostflügel, Zustand nach Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen (rechts), Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS

Tabelle 9: Halberstadt, Dom, Strebepfeiler, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vorzu-stand [kg/ (m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/ (m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungs-gerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
II_2.6_1	0,3	13,3	CL50	60 %	T	44,61	2,20	7,45
II_2.6_2	0,3	2,0	CL50	80 %	T	40,28	2,55	8,60
II_2.6_3	0,3	13,2	CL50	100 %	T	47,26	2,84	7,96
II_2.6_4	0,3	0,7	CL50	100 %	N	42,55	3,42	8,74
II_2.2_1	0,3	20,2	CL50	100 %	T	41,95	2,71	9,10
Ref.	0,3					28,65	1,84	3,78
II_2.7_1	0,3	39,2	Smart 300	100%	T	49,02	-0,65	9,83
II_2.7_2	4,6	8,8	Smart 300	75%	T	49,90	-0,07	12,96
II_2.8	4,6	28,2				45,81	0,93	7,02
Ref.	4,6					30,32	2,45	4,81
II_2.3_1	0,3	14,6	Smart 300	100	N	35,02	2,89	6,62
II_2.3_2	4,6	10,6	Smart 300	75%	N	43,94	3,69	10,03

Ref	4,6					34,43	0,06	4,27
II_2.4_1	4,6	9,4	Smart 300	50%	N	42,56	1,26	7,29
II_6.1	2,2	2,9	Infinito L.	100 W	N	56,13	1,67	11,47
II_6.4	2,2	0,2	Infinito L.	100 W	T	54,22	4,46	8,69
II_2.5 (links)	5,3	9,2	Infinito L.	100 W	T	52,06	3,28	12,01
II_2.1 (links)	5,3	18,1	Infinito L.	100 W	N	55,23	5,34	8,76
II_2.5 (rechts)	5,3	20,0	Soliton	max.	T	52,46	5,26	12,54
II_2.1 (rechts)	5,3	31,4	Soliton	max.	N	50,53	2,31	12,03
II_2.1 Ref.	5,9					37,97	1,88	7,56
II_2.5 Ref.	3,0					41,43	1,83	6,64
II_3.1	5,4	11,4	Soliton	max.	N	57,62	6,69	13,20
Ref.	5,4					44,01	0,50	9,73
II_3.3	5,4	36,8	Soliton	max.	T	50,00	2,95	9,73
Ref.	5,4					34,53	-0,64	5,93
II_3.2	5,4	12,3	Thunder C.	0,35 J	N	56,36	4,33	12,40
Ref.	5,4					50,62	5,50	12,09
II_3.4	5,4	10,1	Thunder C.	0,35 J	T	41,24	-0,90	11,05
II_4.3	6,2	5,9	Thunder C.	0,20 J	T	35,95	4,70	5,16
II_4.1	6,2	7,9	Thunder C.	0,20 J	N	44,70	5,38	10,12
II_4.4	6,2	7,5	Thunder C.	0,45 J	T	45,08	7,06	9,92
II_4.2	6,2	8,5	Thunder C.	0,45 J	N	60,86	4,48	12,94





Abbildung 181, Abbildung 182: Halberstadt, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Ostflügel, Voruntersuchung der ungereinigten Flächen (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts):

Tabelle 10: Halberstadt, Dom, Strebepfeiler, Bewertung der Laserreinigungsgeräte

CL50	- guter Reinigungserfolg bei 100% Leistung - Nassreinigung bringt kaum Verbesserung - keine Verfärbungen zu beobachten - durch heterogene Oberflächen keine homogene Reinigung - w-Wert hängt vom Vorhandensein einer Kruste ab, weniger von der Reinigungsleistung - Lab-Wert korreliert nicht immer mit augenscheinlichem Eindruck
Smart 300	- hohe Intensitäten öffnen Oberfläche sehr stark - deutliche rötlich-gelbe Verfärbung bei 100% Leistung und Nassreinigung, bei 75% leichte Verfärbung, keine Verfärbung bei 50% aber geringe Reinigungsleistung, Trockenreinigung nur bei 100% gut - w-Werte korrelieren nicht mit Reinigungsleistung (teilweise Kruste)
Infinito Laser	- sehr guter Reinigungserfolg, hohe Öffnung der Oberfläche - rötliche Verfärbungen bei 100W Reinigungsleistung möglich - w-Wert korreliert nur teilweise mit Reinigungsleistung
Soliton	- guter Reinigungserfolg bei 100% Leistung, hohe Öffnung der Oberfläche - deutliche rötlich-gelbe Verfärbung bei 100% Leistung
Thunder Compact	- guter Reinigungserfolg bei 100% Leistung, moderate Öffnung der Oberfläche - Verfärbung bei 100% Leistung möglich - w-Wert korreliert weitestgehend mit Leistung

Alle getesteten Laserreinigungsgeräte sind gut für die Reinigungsaufgabe an der Musterfläche am Strebepfeiler geeignet. Die häufig auftretende Streifentextur des CL50 war hier nicht erkennbar. Allerdings ist generell zu beachten, dass bei zu hoher Reinigungsleistung gelblich-bräunliche Verfärbungen auftreten können (siehe Abb. 183). Dabei wird auch eine sehr starke Öffnung der Oberfläche erreicht. Hier sollte diskutiert werden, ob eine moderate Reinigung mit geringeren w-Werten nicht konservatorisch sinnvoller ist.
Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 10 entnehmen.



Abbildung 183: Halberstadt, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Ostflügel, digitalmikroskopische Aufnahmen: Reinigungsfläche 2.3_1, Smart 300, 100% (links), Reinigungsfläche 2.3_2, Smart 300, 75% (Mitte), Reinigungsfläche 2.4_1, Smart 300, 50% (rechts), deutlich ist die zunehmende Verfärbung bei steigender Leistung und Nassreinigung zu beobachten

Musterfläche Alter Kapitelsaal

Als Musterfläche III wurde ein farbig gefasster Kämpfer im Kapitelsaal am östlichen Kreuzgang ausgewählt (Abb. 186). Es handelt sich um einen Kalkstein mit einer rötlich-braunen Farbfassung. Auch hier ergab sich bei den im Vorfeld durchgeführten Wassereindringtests ein relativ homogenes Bild (Abb. 186 und Abb. 187). Alle im ungereinigten Zustand am Kämpfer ermittelten w-Werte liegen in einem Bereich zwischen 0,44 und 0,85 kg/(m^2 ▪ √h). Hierbei ist allerdings anzumerken, dass aufgrund der vorhandenen Farbfassung während des Wassereindringtests eine seitliche Ausbreitung der Flüssigkeit unter der Abdichtung hindurch erfolgte. Schon nach relativ kurzer Messzeit bildete sich um die meisten Messröhrchen ein Feuchtigkeitssaum. Daher ist die tatsächliche Wasseraufnahme etwas niedriger als die angegebenen Werte einzuschätzen. Die auf den gereinigten Oberflächen ermittelten Werte der kapillaren Wasseraufnahme liegen relativ einheitlich etwas über den Messwerten der Vorzustandsmessungen (siehe Tab. 11). Die Farbfassung wurde demzufolge durch die Laserreinigung nicht nur aufgehellt, sondern der Wasseraufnahmekoeffizient deren Oberfläche leicht erhöht. Das kapillare Wasseraufnahmevermögen des darunter befindlichen Kalksteins wurde durch die Reinigungsversuche nicht verändert. Allerdings erhöhte sich die Tendenz der oben beschriebenen seitlichen Ausbreitung der Flüssigkeit innerhalb der Farbschicht. Jedoch war hier eine Differenzierung der einzelnen Reinigungsflächen anhand der Wasseraufnahmevermögens nicht möglich.





Abbildung 184, Abbildung 185: Halberstadt, Dom, Kapitelsaal, Kämpfer, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen

Tabelle 11: Halberstadt, Dom, Alter Kapitelsaal, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vorzustand [kg/(m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/(m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungs-gerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
III_A1_1	0,4	1,2				36,67	5,18	2,33
III_A1_2	0,4	1,0				42,52	5,67	5,7
III_A2_1	0,4	0,2	CL50	60 %	T	66,72	5,16	9,33
III_A2_2	0,4	0,6	CL50	60 %	T	60,23	11,16	6,38
III_A3_1	0,4	0,5	CL50	80 %	T	65,49	4,3	13,51
III_A3_2	0,4	0,6	CL50	80 %	T	62,61	10,56	8,49
III_A4_1	0,4	0,2	CL50	100 %	T	67,65	7,13	9,71
III_A4_2	0,4	1,0	CL50	100 %	T	56,7	13,83	11,35
III_A5_1	0,4	1,4	CL50	60 %	N	60,3	7,52	6,65
III_A5_2	0,4	0,4	CL50	60 %	N	57,16	11,08	13,25
III_A6_1	0,4	0,5	CL50	80 %	N	63,54	6,64	6,2
III_A6_2	0,4	0,9	CL50	80 %	N	57,6	8,76	11,04
III_A7_1	0,4	1,1	CL50	100 %	N	58,24	3,75	10,65
III_A7_2	0,4	0,2	CL50	100 %	N	56,46	6,23	11,34




Abbildung 186, Abbildung 187: *Halberstadt, Dom, Kapitelsaal, Kämpfer, Voruntersuchung der ungereinigten Flächen (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts)*

Tabelle 12: *Halberstadt, Dom, Alter Kapitelsaal, Bewertung der Laserreinigungsgeräte*

CL50	- deutlicher Unterschied zwisch. unterer und oberer Reinigungsfläche (oben stärkere Auflage) - 60% Reinigungsleistung deutlich schlechter als 80 und 100% - Streifenmuster an dieser Musterfläche nicht erkennbar - kaum Unterschied zwischen Trocken- und Nassreinigung erkennbar

Im Rahmen der Reinigungsversuche kam hier lediglich der CL50 zum Einsatz. Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 12 entnehmen.

Musterfläche Nordportal

Die Musterfläche am Nordportals des Halberstädter Doms besteht aus einem Muschelkalk-Kalkstein mit einer sehr kompakten Umwandlungskruste (Abb. 188 und Abb. 189). Die Kruste führte zur nahezu vollständigen Unterbindung der kapillaren Eigenschaften des Materials, das ursprünglich w-Werte von ca. 1,3 kg/(m^2 ▪ √h) aufwies. Nach der Laserreinigung konnte an den am stärksten gereinigten Flächen dieser Zustand nahezu wiederhergestellt werden (siehe Tab. 13).





Abbildung 188, Abbildung 189: Halberstadt, Dom, Nordportal, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen

Tabelle 13: Halberstadt, Dom, Nordportal, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vor-zustand [kg/ (m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/ (m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungs-gerät	Leistung [%, Watt oder Joule]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farb-wert (L)	Farb-wert (a)	Farb-wert (L)
1.1_1	0,1		CL50	60 %	N	43,08	-2,45	8,75
1.1_2	0,1		CL50	80 %	N	48,64	4,60	8,60
1.1_3	0,1	0,1	CL50	100 %	N	52,06	3,60	11,75
1.2_1	0,1	0	Thunder C.	0,45 J	T	54,75	3,06	9,70
1.2_2	0,1	0,2	Thunder C.	0,45 J	N	58,60	9,67	7,32
1.3_1	0,1	0	CL50	60 %	T	41,97	1,43	6,35
1.3_2	0,1		CL50	80 %	T	48,35	-1,51	10,34
1.3_3	0,1		CL50	100 %	T	49,94	-2,27	14,26
1.4_1	0,1	0	Thunder C.	0,20 J	T	43,18	0,38	8,15
1.4_2	0,1	0	Thunder C.	0,20 J	N	44,51	0,77	8,65
2.1_1	0,1	0,4	Smart 300	100 %	T	46,19	1,97	12,12
2.1_2	0,1	0,3	Smart 300	75 %	T	42,05	0,05	8,40
2.1_3	0,1	0	Smart 300	50 %	T	44,92	1,71	7,41

2.1_4	0,1	0,1	Smart 300	100 %	N	35,65	0,34	6,20
2.1_5	0,1	0,1	Smart 300	75 %	N	41,26	1,21	5,97
2.1_6	0,1	0,1	Smart 300	50 %	N	44,76	1,13	8,25
2.2	0	0,3	Thunder C.	0,35 J	N	52,08	5,71	9,80
2.3	0,1	1,2	Soliton	max.	N	53,14	10,81	16,04
2.4	0	0	Thunder C.	0,35 J	T	51,46	3,16	8,07
3.1 Ref.	0,1	0,1				31,13	0,62	3,91
3.2 Ref.	0	0				38,17	1,04	5,75
3.3	0,1	0,7	Infinito L.	100 W		46,77	3,99	16,14
3.4	0	1	Infinito L.	100 W		61,67	1,47	22,66
3.5	0,1	0	Infinito L.	72 W		46,18	4,58	9,88
3.6	0	0,5	Infinito L.	72W		45,21	0,24	7,48
3.7	0,1	0	Infinito L.	55 W		42,98	1,96	6,45
3.8	0	0,2	Infinito L.	55 W		52,21	1,42	10,57

Tabelle 14: Halberstadt, Dom, Nordportal, Bewertung der Laserreinigungsgeräte

CL50	- kaum Unterschied zwischen Trocken- und Nassreinigung erkennbar - guter Reinigungserfolg nur bei 100% Leistung, Lab-Wert korreliert mit Leistung, w-Wert bleibt gering
Smart 300	- nur guter Reinigungserfolg bei Trockenreinigung mit 100% Leistung aber leicht gelbliche Verfärbung - Nassreinigungseffekt scheint hier keine Rolle zu spielen
Infinito Laser	- nur mit 100 W Leistung guter Reinigungserfolg, nass besser als trocken - Erhöhung des w-Wertes auf ca. 1
Soliton	- Nassreinigung bei max. Leistung erzeugt sehr starke Reinigungs-wirkung, insgesamt hellste Fläche - w-Wert steigt deutlich an, Lab-Wert korreliert gut - leicht gelbliche Verfärbung
Thunder Compact	- guter Reinigungserfolg nur bei 0,45 J und Nassreinigung - erheblicher Unterschied zwischen Trocken- und Nassreinigung - Trockenreinigung generell schlecht, da Kruste bleibt + kaum Aufhellung

Von den getesteten Laserreinigungsgeräten erscheinen der Infinito Laser und der Smart 300 Laser am besten für die Reinigungsaufgabe an der Musterfläche am Strebepfeiler geeignet. Allerding ist nur bei hohen Leistungen ein zufriedenstellender Reinigungserfolg zu verzeichnen. Es sind jedoch die beim Smart 300 auftretenden geringen Verfärbungen der Oberfläche zu beachten (siehe Abb. 190).

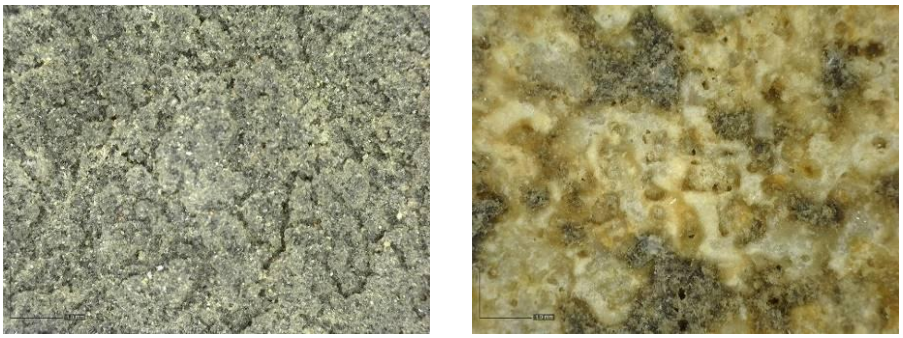


Abbildung 190: *Halberstadt, Dom, Nordportal, digitalmikroskopische Aufnahmen: ungereinigte Fläche (Fläche 3.1, links), gereinigte Fläche (Fläche 2.3, Soliton Laser, maximale Leistung), deutlich ist die stärkere gelblich-braune Verfärbung sichtbar*

7.7.4 Dom Magdeburg

Musterfläche Bischofsgang

Die Musterfläche I im Bischofsgang wurde mit einer Schlämme versehen, um Inhomogenitäten der verwendeten Natursteine auszugleichen. Die Schlämme ist mit einer verbackenen Schmutzauflage bedeckt (siehe Abb. 194). Die im Vorfeld der Reinigungsversuche durchgeführten Wassereindringtests ergaben auch hier ein sehr heterogenes Bild. Es wurden Wasseraufnahmen mit w-Werten zwischen 0 und 8,34 kg/(m² ▪ √h) ermittelt. Die ungereinigten Referenzflächen 2.1 und 2.2 weisen konträre w-Werte von 0,60 kg/(m² ▪ √h) und 8,34 kg/(m² ▪ √h) auf. An Musterfläche I trat bei allen Messungen die zuvor schon beschriebene Tendenz der seitlichen Ausbreitung der Flüssigkeit innerhalb der Schlämme auf (siehe Abb. 195). Außerdem hängt der gemessene w-Wert davon ab, ob eine kapillare Ankopplung an den stark saugenden Sandsteinhintergrund erfolgt oder nicht. Aufgrund der starken Heterogenität der Messwerte war eine Bewertung der einzelnen Reinigungsflächen anhand des Wasseraufnahmevermögens nicht möglich (siehe Tab. 15).

Die nachfolgende Abbildung zeigt das entsprechende Röntgenpulverdiffraktogramm der Analyse. Der Hauptphasenbestand der Probe aus dem Bischofsgang ist Gips. Daneben werden etwas Calcit (Kalk), Quarz, Feldspat und Hellglimmer analysiert, die aus dem Hintergrund, dem Zuschlag oder einem aufsitzenden Staub stammen können. Es handelt sich demnach um eine Gipsschlämme, möglicherweise aber auch um eine vergipste Kalkschlämme. Genauere Auskunft könnte eine Querschliffuntersuchung geben.

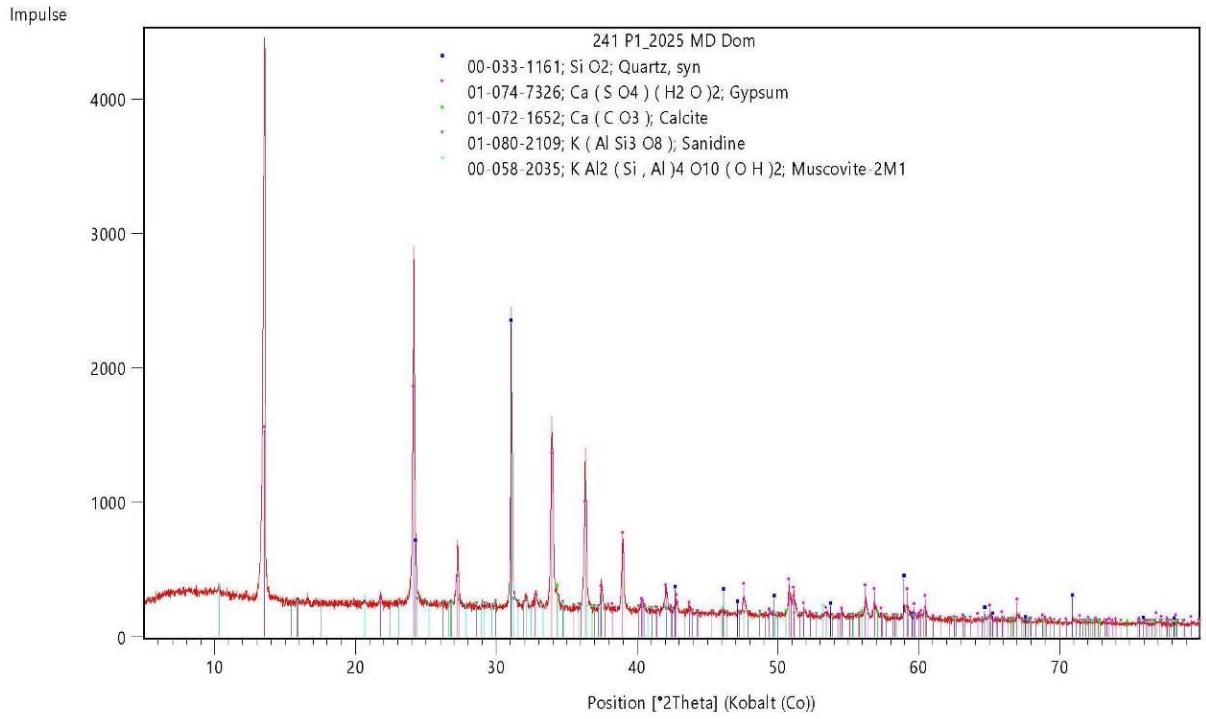


Abbildung 191: Röntgenpulverdiffraktogramm der Probe P1/2025 aus dem Bischofsgang



Abbildung 192, Abbildung 193: Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Südseite, Musterfläche I, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen: Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS

Tabelle 15: *Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Kennwerte der Reinigungsflächen*

Muster-fläche	w-Wert Vorzu-stand [kg/ (m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/ (m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungsgerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
I_1.1	0,4	0,2	Infinito L.	50%	T	73,10	1,95	14,25
I_1.2	0,4	0	Infinito L.	75%	T	74,62	3,11	15,47
I_1.3	0,4	0,7	Infinito L.	100%	T	70,35	3,00	14,41
I_1.4	0,6	1,3	Infinito L.	50%	N	70,42	2,78	17,35
I_1.5	0,6	0,6	Infinito L.	75%	N	69,98	4,64	15,67
I_1.6	0,6	0,4	Infinito L.	100%	N	70,50	4,30	16,78
Referenz	0,6					53,34	2,54	9,27
I_2.1 Ref.	0,2	0,6				55,93	2,37	11,45
I_2.2 Ref.	0,2	8,3				57,61	2,57	8,78
I_2.3	0,2	2,9	Infinito L.	50%	T	65,14	3,41	13,76
I_2.4	0,2	4,4	Infinito L.	75%	T	70,48	3,34	12,93
I_2.5	0,2	0,8	Infinito L.	100%	T	71,99	2,76	14,88
Referenz	0,2					53,60	1,51	9,11
I_3.1	0,4	2,5	CL50	60%	T	68,26	5,37	16,43
I_3.2	0,4	3,6	CL50	80%	T	74,20	3,48	15,75
I_3.3	0,4	3,9	CL50	100%	T	74,53	3,00	14,48
I_3.4	0,5	-	CL50	60%	N	72,21	1,23	14,82
I_3.5	0,5	-	CL50	80%	N	68,89	2,78	16,64
I_3.6	0,5	2,1	CL50	100%	N	73,98	4,23	15,27
Referenz	0,5					53,87	2,77	12,26




Abbildung 194, Abbildung 195: Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Südseite, Musterfläche I, ungereinigter Zustand (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts)

Tabelle 16: *Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Bewertung der Laserreinigungsgeräte*

CL50	- kein Unterschied zwischen Nass- und Trockenreinigung - auch bei geringer Reinigungsleistung schon gute Ergebnisse - kein Unterschied zwischen mittlerer und höchster Leistung - Lab-Werte korrelieren weitestgehend - störendes Streifenbild
Infinito Laser	- kein Unterschied zwischen Nass- und Trockenreinigung - auch bei geringer Reinigungsleistung schon gute Ergebnisse - kein Unterschied zwischen mittlerer und höchster Leistung - Lab-Werte korrelieren weitestgehend

Von den getesteten Laserreinigungsgeräten erscheint der Infinito Laser im niedrigen bist mittleren Leistungsbereich am besten für die Reinigungsaufgabe an der Musterfläche im Bischofsgang geeignet. Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 16 entnehmen.

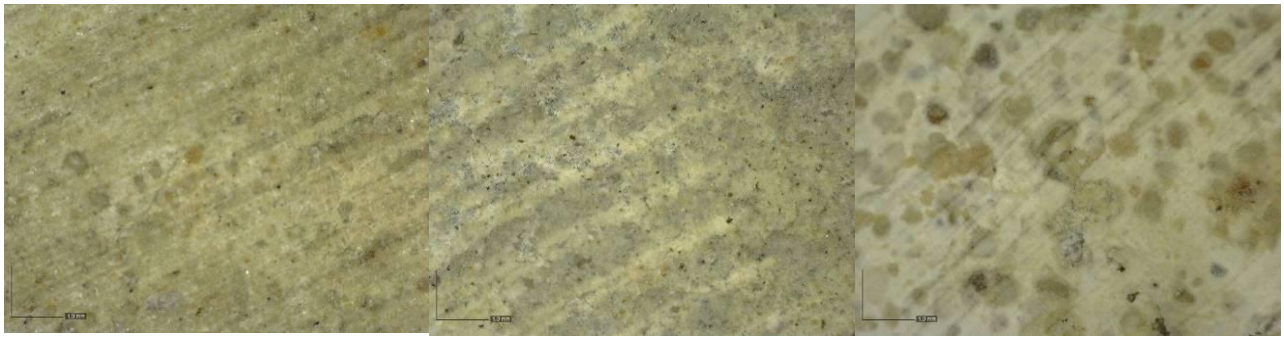


Abbildung 196, Abbildung 197: Magdeburg, Dom, Bischofsgang, Südseite, digitalmikroskopische Aufnahmen: mit dem CL50 gereinigte Flächen, 60% Leistung (links), 80% Leistung (Mitte), 100% Leistung (rechts): die auffällige Streifentextur trat bei allen getesteten Leistungsstufen auf:

Musterfläche II, Tonsur, Strebepfeiler

An einem Strebepfeiler der Tonsur im Kreuzgarten des Magdeburger Doms befindet sich die Musterfläche II. Es handelt sich um einen hellen, beigefarbenen, relativ homogenen Sandstein der durch eine relativ gleichmäßige Kruste grau bis schwarz verfärbt ist (siehe Abb. 200). Diese Kruste bewirkt eine sehr starke Hemmung der kapillaren Wasseraufnahme. Die Abreinigung dieser Auflage führte zu meist sehr guten Reinigungsergebnissen verbunden mit einer deutlichen Öffnung der Oberfläche (siehe Tab. 17). Zu beachten sind jedoch Farbveränderungen bei sehr hoher Reinigungsleistung (zu hohe Energiedichte) und die Streifentextur des CL50.

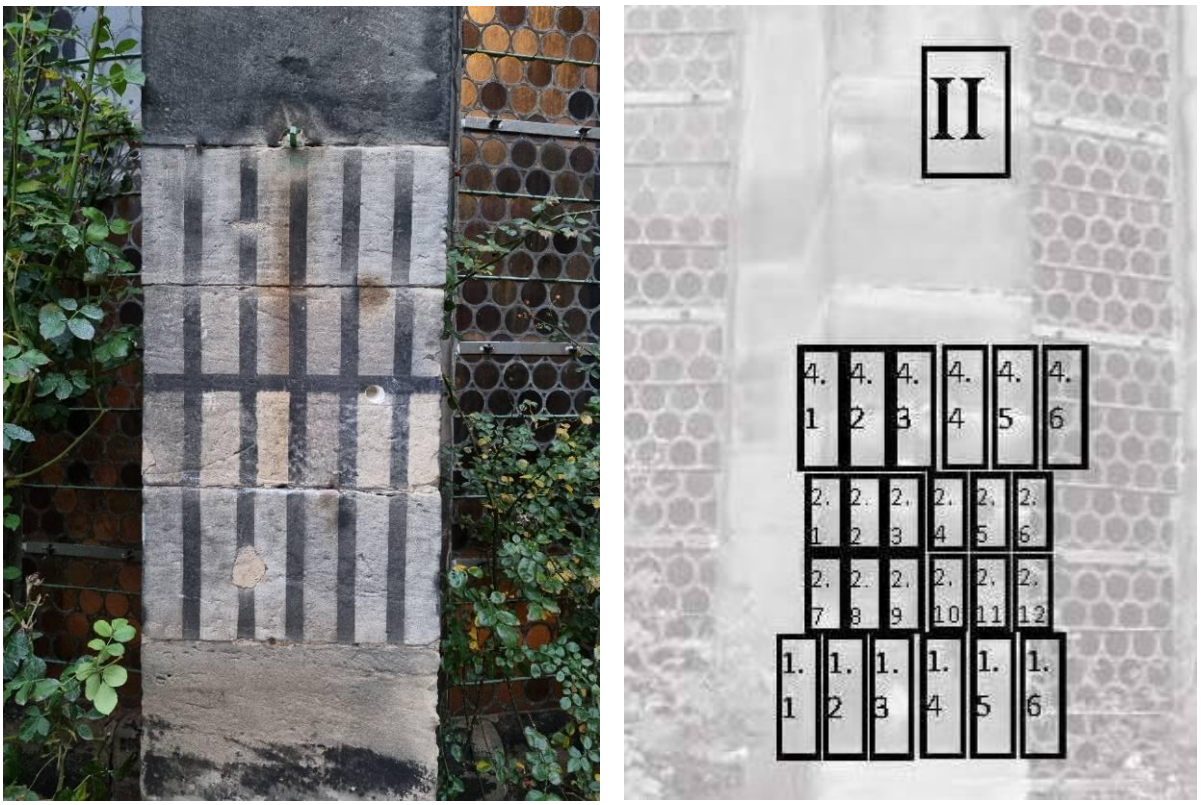


Abbildung 198, Abbildung 199: Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen: Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS

Tabelle 17: *Magdeburg, Dom, Strebepfeiler Tonsur, Kennwerte der Reinigungsflächen*

Muster-fläche	w-Wert Vorzu-stand [kg/(m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/(m2 ▪ √h)]	Laserreinigungs-gerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigunsart [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
II_1.1	1,0	3,4	Infinito L.	50%	T	50,12	3,00	8,60
II_1.2	1,0	4,4	Infinito L.	75%	T	50,50	1,10	9,47
II_1.3	1,0	8,2	Infinito L.	100%	T	54,35	1,72	8,43
II_1.4	1,0	7,6	Infinito L.	50%	N	50,86	2,63	9,26
II_1.5	1,0	7,2	Infinito L.	75%	N	56,08	2,24	9,21
II_1.6	1,0	8,4	Infinito L.	100%	N	54,62	1,88	7,83
Referenz	1,0					31,03	4,76	2,10
II_2.1	0,3	3,5	Smart 300	50%	T	47,77	2,48	5,81
II_2.2	0,3	4,0	Smart 300	75%	T	52,33	0,94	9,89
II_2.3	0,3	4,7	Smart 300	100%	T	48,44	3,14	9,26
II_2.4	0,3	4,7	Smart 300	50%	N	48,92	3,57	8,02
II_2.5	0,3	6,3	Smart 300	75%	N	51,41	2,02	10,64
II_2.6	0,3	10,3	Smart 300	100%	N	50,09	2,36	7,10
II_2.7	0,3	10,2	Thunder C.	0,20 J	T	46,97	3,28	8,60
II_2.8	0,3	9,9	Thunder C.	0,35 J	T	55,70	1,19	13,67
II_2.9	0,3	14,1	Thunder C.	0,45 J	T	53,43	3,57	14,71
II_2.10	0,3	11,1	Thunder C.	0,20 J	N	49,91	0,06	9,76
II_2.11	0,3	26,7	Thunder C.	0,35 J	N	59,07	1,19	11,87
II_2.12	0,3	14,7	Thunder C.	0,45 J	N	63,35	2,56	14,90
Referenz	0,3					31,94	1,30	2,97
II_4.1	1,5	7,2	CL50	60%	T	50,22	1,30	7,37
II_4.2	1,5	7,5	CL50	80%	T	53,42	2,68	7,49
II_4.3	1,5	4,1	CL50	100%	T	49,07	3,97	12,43
II_4.4	1,5	8,4	CL50	60%	N	49,52	2,51	7,65
II_4.5	1,5	3,8	CL50	80%	N	57,14	0,83	9,60
II_4.6	1,5	3,6	CL50	100%	N	57,28	-0,15	8,68
Referenz	1,5					29,30	2,05	5,45
II_3.1	0,4	2,0	Infinito L.	100%	T	49,48	-0,20	11,20
Referenz	0,4					23,18	-0,09	1,67




Abbildung 200, Abbildung 201 *Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, ungereinigter Zustand (links), Untersuchung der gereinigten Flächen (rechts)*

Tabelle 18: *Magdeburg, Dom, Strebepfeiler Tonsur, Bewertung der Laserreinigungsgeräte*

CL50	- kaum Unterschied zwischen Nass- und Trockenreinigung - moderate Öffnung der Oberfläche - Lab-Wert korreliert weitestgehend mit Leistung - häufig beschädigte Quarzkörner, störende Streifentextur
Smart 300	- Nassreinigung erfolgreicher als Trockenreinigung - moderate Öffnung der Oberfläche - w-Wert korreliert sehr gut, Lab-Werte eher nicht - gelbliche Verfärbung bei höherer Leistung (s. Abb. 125)
Infinito Laser	- gute Reinigungsleistung, moderate Öffnung der Oberfläche - optisch kaum Unterschied zwischen Nass- und Trockenreinigung - w-Werte belegen stärkere Öffnung der Oberfläche bei Nassreinigung - Lab-Werte korrelieren weitestgehend
Thunder Compact	- Nassreinigung erfolgreicher als Trockenreinigung - starke Öffnung der Oberfläche

Von den getesteten Laserreinigungsgeräten erscheinen der Infinito Laser und der Thunder Compact bei mittleren Leistungen am besten für die Reinigungsaufgabe an der Musterfläche am Strebepfeiler geeignet. Der gereinigte Sandstein zeigte jedoch bei allen Laserreinigungsgeräten bei hoher Reinigungsleistung und besonders bei Nassreinigung oberflächennah Anzeichen einer Entfestigung. Daher ist die Notwendigkeit einer nachfolgenden Festigung zu prüfen. Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 18 entnehmen.



Abbildung 202: *Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, digitalmikroskopische Aufnahmen: Reinigungsfläche 2.1, Smart 300, 50% (links), Reinigungsfläche 2.2, Smart 300, 75% (Mitte), Reinigungsfläche 2.3, Smart 300, 100% (rechts), deutlich ist die zunehmende Verfärbung bei steigender Leistung zu beobachten*

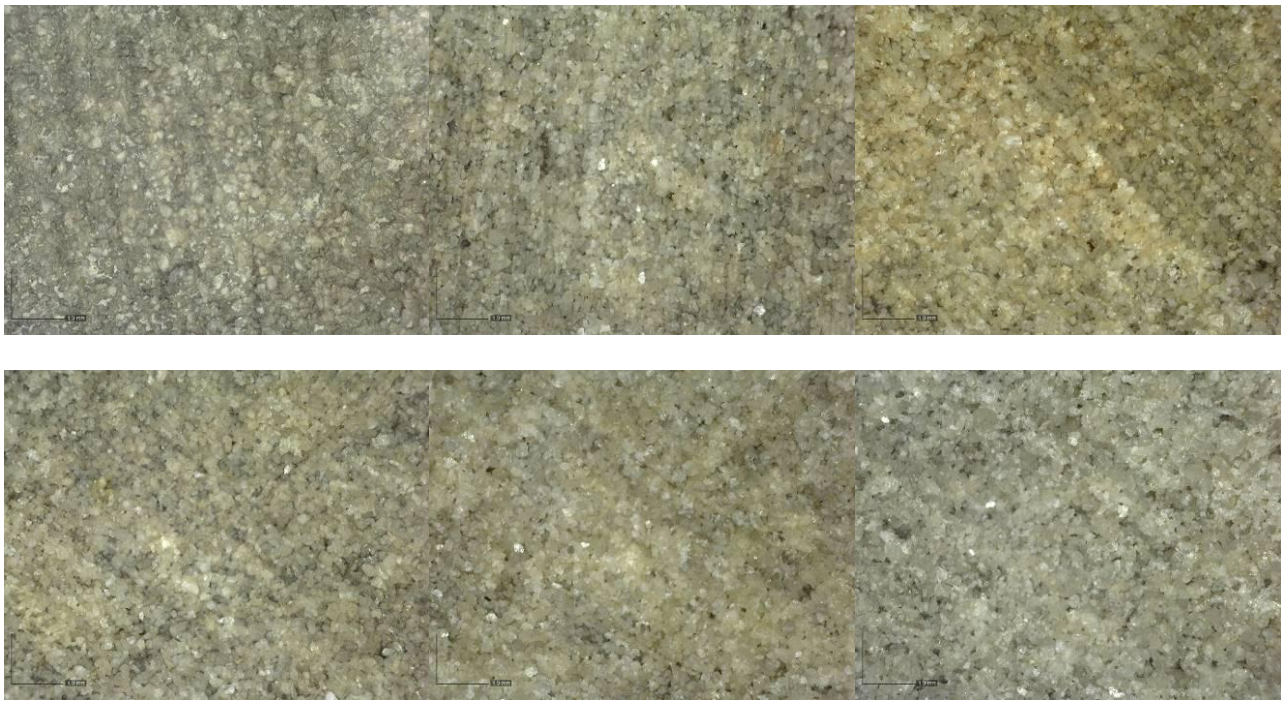


Abbildung 203: *Magdeburg, Dom, Kreuzgarten, Strebepfeiler Tonsur, Musterfläche II, digitalmikroskopische Aufnahmen: mit dem CL50 trocken gereinigte Flächen, 60% Leistung (oben links), 80% Leistung (oben Mitte), 100% Leistung (oben rechts), sowie nass gereinigte Flächen, 60% Leistung (unten links), 80% Leistung (unten Mitte), 100% Leistung (unten rechts): auch hier trat die auffällige Streifentextur bei allen getesteten Leistungsstufen auf*

Musterfläche Nordfassade

Die Musterfläche an der Nordfassade des Magdeburger Doms zeigte eine kompakte schwarze Kruste die zusätzlich eine starke Salzbelastung mit großflächig vorhandenen Salzausblühungen aufwies (s. Abb. 205). Dadurch ist der Reinigungserfolg generell als gering zu bewerten. Nur in den Bereichen in denen keine Kruste bzw. keine Salzausblühungen vorhanden waren erfolgte durch die Laserreinigung eine optisch ansprechende Reinigung sowie eine starke Öffnung der Oberfläche (siehe Flächen 1.15 bis 1.17). Bei den mit vermutlich Grünalgen bewachsenen

Reinigungsflächen 2.1 und 2.2 konnte durch die Reinigung mit dem CL50 eine leichte Erhöhung des w-Werte erreicht werden (siehe Tab. 19). Da die Voraussetzungen des Untergrundes besonders durch die Salzausblühungen stellenweise sehr ungünstig waren, hier keine differenzierte Bewertung der Eignung der einzelnen Laserreinigungsgeräte.

Die beprobten und mittels XRD untersuchten Ausbühsalze auf der Natursteinoberfläche der erweiterten Sockelzone der Nordfassade, im Bereich der Lasermusterfläche, zeigen allein Gips. Nebenphasenbestand ist Quarz, der aus dem Sandsteinhintergrund stammt. Die nachfolgende Abb. 204 zeigt das entsprechende Röntgenpulverdiffraktogramm der Einzelanalyse.

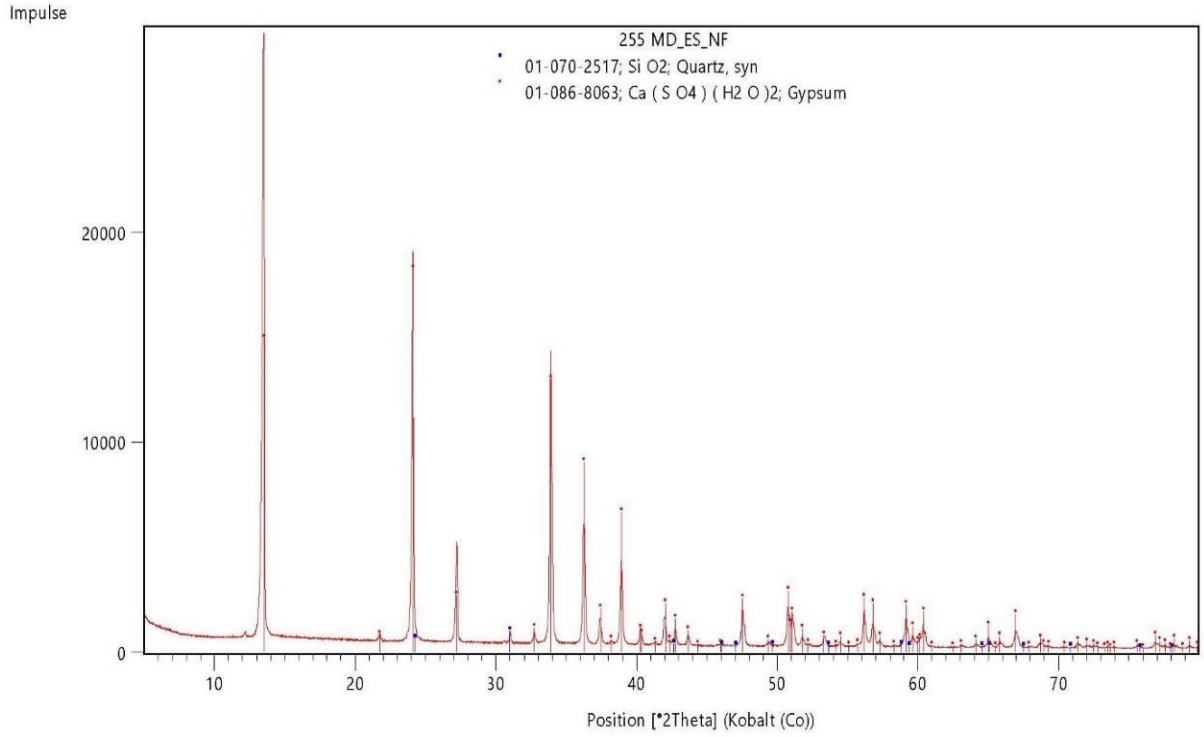


Abbildung 204: *Röntgenpulverdiffraktogramm der Probe MD_ES_NF (Musterfläche, Nordfassade)*



Abbildung 205, Abbildung 206 *Magdeburg, Dom, Nordfassade, Musterfläche III, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen: Abb. rechts: C. GRIMM-REMUS*

Tabelle 19: Magdeburg, Dom, Nordfassade, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vorzu-stand [kg/ (m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/ (m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungs-gerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
III_1.1 Ref.	4,0	4,0	Thunder C.	0,20 J	T	25,44	-0,15	5,63
III_1.2	0,5	0,8	Thunder C.	0,35 J	T	30,01	1,43	6,21
III_1.3	0,5	0,2	Thunder C.	0,45 J	T	43,50	0,19	16,21
III_1.4 Ref.	0,5	0,5	Thunder C.	0,20 J	N	29,53	1,39	5,03
III_1.5	0,5	0,4	Thunder C.	0,35 J	N	25,57	3,08	2,73
III_1.6	0,5	0,2	Thunder C.	0,45 J	N	26,70	1,16	4,52
III_1.7	0,5	0,3	Infinito L.	50%	T	31,22	1,65	6,29
III_1.8	0,5	0,2	Infinito L.	75%	T	34,84	3,68	4,95
III_1.9	0,5	0,1	Infinito L.	100%	T	30,45	1,49	3,50
III_1.10	0,5	0,1	Infinito L.	50%	N	25,74	-0,31	1,99
III_1.11	0,5	0,2	Infinito L.	75%	N	24,99	2,62	-0,16
III_1.12	0,5	0,4	Infinito L.	100%	N	27,65	-1,03	2,92
III_1.13	0,5	0,2	Smart 300	100%	T	26,12	1,56	3,78
III_1.14	0,5	0,2	Smart 300	100%	N	26,76	0,78	2,86
III_1.15	4,0	12,4	CL50	60%	T	26,31	1,30	3,94
III_1.16	4,0	19,4	CL50	80%	T	32,72	1,73	8,16
III_1.17	4,0	12,7	CL50	100%	T	27,32	0,53	5,74
III_1.18	0,5	0,5	CL50	60%	N	26,59	1,50	4,09
III_1.19	0,5	0,7	CL50	80%	N	34,54	1,87	7,06
III_1.20	0,5	0,3	CL50	100%	N	28,33	1,05	3,47
III_2.1	0,5	1,6	CL50	100%	T	29,28	1,61	13,38
III_2.2	0,5	1,1	CL50	100%	N	27,50	0,78	9,69

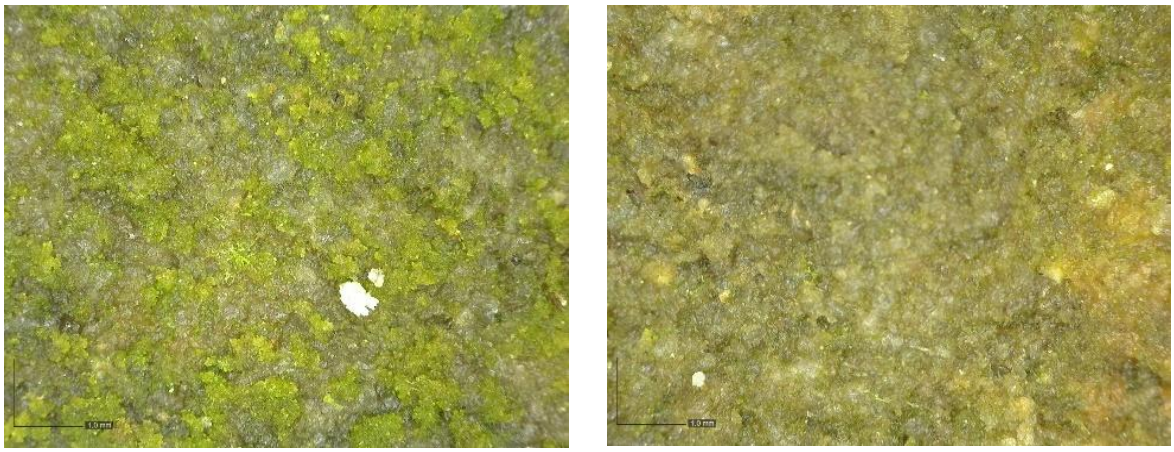


Abbildung 207: *Magdeburg, Dom, Nordfassade, Entfernung mikrobiologisch aktiver Besiedlung (links ungereinigter, rechts gereinigter Zustand nach ca. 6 Monaten)*

7.7.5 Dom Halle

Musterfläche Strebepfeiler

Die Musterfläche an einem Stebepfeiler auf der Nordseite des Doms in Halle zeigte eine kompakte schwarze Kruste die zusätzlich eine mikrobiologisch aktive Besiedlung aufwies (s. Abb. 208 und Abb. 209). Optisch ansprechende Reinigungsergebnisse konnten nur mit hohen Reinigungsleistungen erzielt werden. Eine Öffnung der Oberfläche erfolgte kaum (siehe Tab. 20). Zu beachten sind auch hier Farbveränderungen bei sehr hoher Reinigungsleistung (zu hohe Energiedichte).



Abbildung 208, Abbildung 209: Halle, Dom, Strebepfeiler Nordseite, Musterfläche III, Zustand nach der Laserreinigung (links), Lage der Reinigungsflächen

Tabelle 20: Halle, Dom, Strebepfeiler, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vorzu-stand [kg/(m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/(m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungsgerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
Referenz	0,2					22,83	0,36	3,83
I_1.1	0,2	0,3	Infinito L.	50%	T	36,61	0,75	6,38
I_1.2	0,2	0,3	Infinito L.	75%	T	39,22	1,50	8,01
I_1.3	0,2	0,2	Infinito L.	100%	T	48,42	6,70	5,63
I_1.4	0,2	0,2	Infinito L.	50%	N	33,04	2,42	6,63
I_1.5	0,2	0,3	Infinito L.	75%	N	39,00	0,97	8,48
I_1.6	0,2	0,2	Infinito L.	100%	N	48,98	-0,20	11,68
I_1.7	0,2	0,3	Smart 300	max.		34,27	1,58	7,50
I_1.8	0,2	0,4	Smart 300	max.		37,72	1,33	11,76
I_1.9	0,2	0,4	Smart 300	max.		36,08	3,38	11,35
I_1.10	0,2	0,7	Smart 300	max.		30,92	1,48	7,45
I_1.11	0,2	0,4	Smart 300	max.		34,82	2,96	13,72
I_1.12	0,2	0,5	Smart 300	max.		38,21	1,08	13,08
I_2.1	0,2	1,0	Thunder C.	0,20 J	T	24,90	2,48	5,14
I_2.2	0,2	1,4	Thunder C.	0,35 J	T	22,88	2,74	1,67
I_2.3	0,2	2,5	Thunder C.	0,45 J	T	25,82	2,21	5,21
I_2.4	0,2	0,7	Thunder C.	0,20 J	N	24,44	0,77	7,40
I_2.5	0,2	1,2	Thunder C.	0,35 J	N	22,34	1,46	4,14
I_2.6	0,2	0,8	Thunder C.	0,45 J	N	35,14	2,19	10,06
I_3.1	0,2	4,4	CL50	60%	T	30,78	-0,26	7,42
I_3.2	0,2	1,2	CL50	80%	T	34,15	3,60	6,92
I_3.3	0,2	3,6	CL50	100%	T	34,49	-2,09	11,72
I_3.4	0,2	2,6	CL50	60%	N	26,08	1,63	4,73
I_3.5	0,2	4,2	CL50	80%	N	28,24	3,55	4,57
I_3.6	0,2	7,1	CL50	100%	N	33,97	0,56	10,87

Tabelle 21: Halle, Dom, Strebepfeiler, Bewertung der Laserreinigungsgeräte

CL50	- auch bei höchster Leistung kein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis - erhöhte w-Werte aufgrund inhomogener Kruste bzw. Migrieren des Wassers innerhalb der Kruste (Bildung eines Feuchtigkeitssaums) - Streifentextur
Smart 300	- kein Unterschied zwischen Nass- und Trockenreinigung - gutes Reinigungsergebnis nur bei hoher Leistung - Lab-Wert korreliert mit Reinigungsleistung - keine Veränderung des w-Wertes nach der Reinigung - gelbliche Verfärbung der Oberfläche bei mittlerer und hoher Leistung
Infinito Laser	- kein Unterschied zwischen Nass- und Trockenreinigung - gutes Reinigungsergebnis nur bei hoher Leistung - Lab-Wert korreliert mit Reinigungsleistung - keine Veränderung des w-Wertes nach der Reinigung
Thunder Compact	- auch bei höchster Leistung kein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis - erhöhte w-Werte aufgrund inhomogener Kruste bzw. Migrieren des Wassers innerhalb der Kruste (Bildung eines Feuchtigkeitssaums)

Von den getesteten Laserreinigungsgeräten erscheinen der Infinito Laser und der Smart 300 Laser bei mittleren bis höheren Leistungseinstellungen am besten für die Reinigungsaufgabe an der Musterfläche am Strebepfeiler geeignet. Es sind jedoch die beim Smart 300 auftretenden Verfärbungen der Oberfläche zu beachten. Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 21 entnehmen.

Musterfläche Sandsteinplatte

Diese Musterfläche wurde zur Untersuchung des Laserreinigungsverfahrens zur Eignung für die Entfernung mikrobiologisch aktiver Besiedlungen angelegt. Im nächsten Kapitel wird darauf genauer eingegangen. Die Besonderheiten der Einzeleinstellungen lassen sich der Tab. 22 entnehmen.

Tabelle 22: Halle, Dom, Sandsteinplatte, Kennwerte der Reinigungsflächen

Muster-fläche	w-Wert Vorzustand [kg/ (m2 ▪ √h)]	w-Wert Nach-messung [kg/ (m2 ▪ √h)]	Laser-reinigungsgerät	Leistung [% bzw. Watt]	Reinigungs-art [nass/ trocken]	Farbwert Referenzflächen ≙ Vorzustand sowie Nachmessungen (L)(a)(b)		
II_1.1	2,6	3,8	CL50	100%	T	67,47	0,46	9,49
II_1.2	2,6	3,0	Thunder C.	0,45 J	T	52,78	-2,18	23,55
II_1.3 Ref.	2,6					44,09	-1,05	20,14
II_1.4	2,6	2,8	Infinito L.	100%	T	70,84	0,40	6,30
II_1.5	2,6	3,6	Smart 300	100%	T	54,01	2,77	13,83

7.7.6 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der Untersuchungen zur Laserreinigung kamen 5 verschiedene Laserreinigungsgeräte,
CleanLaser CL50,
Smart 300,
Infinito Laser 100W,
Soliton Laser,
Thunder Compact,
an insgesamt 9 Musterflächen zum Einsatz. Es wurden 228 Einzel-Reinigungsmusterflächen angelegt und durch das IDK untersucht.

Es zeigte sich deutlich, dass die sehr verschiedenen und z.T. heterogenen Oberflächen ganz unterschiedliche Anforderungen an die Lasertechnik bzw. die Reinigungsmethode stellen. So konnten relativ dünne Auflagen auf Sandstein oder Kalkstein schon mit geringerer Geräteleistung z.T. vollständig entfernt und die im Sandstein vorhandene Kapillarität auch über die Oberfläche wiederhergestellt werden (Musterflächen I und II in Halberstadt, Musterfläche II in Magdeburg). Auch bei einem relativ dichten Gestein, wie dem untersuchten Kalkstein am Nordportal des Halberstädter Doms konnten die vorhandenen Krusten entfernt werden und die ursprünglichen (wenn auch geringen) Kapillareigenschaften wiederhergestellt werden. Allerdings bedurfte dies dann auch relativ hoher Leistungen. Häufig war eine Laserreinigung mit Vornässen der Oberfläche effektiver als eine trockene Reinigung, in anderen Fällen trat dadurch kein Unterschied auf. In den meisten Fällen konnte jedoch eine deutliche Aufhellung der Oberflächen erreicht und dokumentiert werden.
Unbefriedigend waren lediglich die Reinigungsergebnisse an der mit Gipskrusten und Einzelkristallen bewachsenen Musterfläche an der Nordfassade des Magdeburger Doms. Aufgrund der relativ hellen Gipse war hier die Wechselwirkung des auftreffenden Laserstrahls mit der Oberfläche zu gering.

Auch die verschiedenen Arbeitsweisen der unterschiedlichen Laserreinigungsgeräte wirkten sich sehr deutlich auf das Reinigungsergebnis aus. Beim Zeilenlaser CL50 war immer wieder eine zeilenförmige Textur der Oberfläche nach der Reinigung zu beobachten, was häufig zu einem unruhigen Gesamtbild führte. Auch der Einfluss einer zu hohen Energiedichte führte besonders beim Smart 300 Laser zu Verfärbungen der Gesteinsoberfläche durch Phasenumwandlungsprozesse eisenhaltiger Minerale. Durch die punktförmige Laserstrahlgeometrie des Thunder Compact war auch hier nicht immer ein gleichmäßiges Reinigungsbild möglich. Als am besten für die vielseitigen Reinigungsaufgaben geeignet, wurde der Infinito Laser bewertet, der aufgrund seiner komplexen Ablenkungsgeometrie des Laserstrahls sowie des ausreichenden Leistungsvermögens ein klares und homogenes Reinigungsbild erzeugte.

7.8 Untersuchungen zur Laserreinigung mikrobiologisch aktiver Besiedlungen

7.8.1 Einleitung

Aufgrund einer mikrobiologischen Besiedlung von Natursteinoberflächen z.B. durch Algen oder Schimmelpilze sind neben ästhetischen Einbußen auch eine Reduzierung der kapillaren Aktivität der Oberflächen zu beobachten. Das Verfahren der Laserreinigung wurde auf seine Eignung für die Entfernung solcher Besiedlungen hin untersucht. Dazu wurden offensichtlich stark vergrünte Oberflächen mit Laser gereinigt und die mikrobiologische Aktivität mit Hilfe von ATP-Tests im ungereinigten und gereinigten Zustand bestimmt. Außerdem erfolgte der Vergleich der kapillaren Wasseraufnahme von ungereinigten und gereinigten Oberflächen.

7.8.2 Messverfahren

Die mikrobiologische Aktivität erfolgt mit Hilfe von ATP-Tests. Hierzu wird mit Hilfe von Teststäbchen etwas Material von der Oberfläche abgerieben. Anschließend wird die Probe in einem Teströhrchen in Kontakt mit einer speziellen Enzymlösung gebracht. Das Vorhandensein von ATP (Adenosintriphosphat), einem wichtigen Energieträger im Stoffwechsel, führt zu Biolumineszenz. Diese Biolumineszenz wird von einem speziellen Messgerät, einem Lumimeter erfasst, wobei die Stärke der Lumineszenz in RLU (relative light unit) angegeben wird. Dieser dimensionslose Wert gibt eine grobe Orientierung über die mikrobiologische Aktivität der Oberfläche und ist direkt proportional zur Besiedlung. Wobei für Natursteinoberflächen im Außenbereich Werte <100 RLU als nahezu unbesiedelt, Werte zwischen 100 und 400 RLU als gering besiedelt und erst Werte von >1000 RLU besiedelt bis stark besiedelt gelten können.

7.8.3 Dom Halberstadt

Musterfläche Aschegang

Am Halberstädter Dom, im sog. Aschegang erfolgte ein Reinigungsversuch an einem stark mit Grünalgen bewachsenen Gesims. Der obere Teil besteht aus Kalkstein, der untere aus Sandstein (siehe Abb. 133). Es konnte gezeigt werden, dass die Laserreinigung in der Lage ist, mikrobiologisch aktive Besiedlungen praktisch vollständig zu entfernen (siehe Tab. 23).



Abbildung 210: Halberstadt, Dom, „Aschegang“, Fläche mit biogener Besiedlung nach der Laserreinigung

Tabelle 23: Bewertung der Reinigungsflächen

Halberstadt, Dom, Musterfläche Aschegang			
Reinigungs-fläche	**mikr. Aktivität (RUL)**	**Lasergerät**	**Bewertung**
Kalkstein ungereinigt (oben)	4184	CL50	Ungereinigt, Kruste + Besiedlung, hohe mikrobiolog. Aktivität
Kalkstein gereinigt (oben)	156	CL50	Gereinigt mit höchster Leistung, guter Reinigungserfolg, Oberfläche aufgehellt, geringe mikrobiolog. Aktivität
Sandstein ungereinigt (unten)	3055	CL50	Ungereinigt, Kruste + Besiedlung, hohe mikrobiolog. Aktivität
Sandstein gereinigt (unten)	123	CL50	Gereinigt mit höchster Leistung, augenscheinlich mäßiger Reinigungserfolg, Oberfläche fleckig, aber geringe mikrobiolog. Aktivität

7.8.4 Dom Halle

Am Dom in Halle wurden an der Musterfläche am Strebepfeiler sowie an einer separaten Sandsteinplatte Untersuchungen zur Laserreinigung von mikrobiologisch aktiven Besiedlungen durchgeführt. An beiden Musterflächen konnte eine deutliche Reduzierung der mikrobiologischen Aktivität erzielt werden (siehe Tab. 24 und Abb. 212). Ein besonderer Vorteil der Musterfläche auf der Sandsteinplatte war, dass es sich um sehr homogenes, kaum verwittertes Material handelte, dass lediglich starken Grünalgenbewuchs zeigte (siehe Abb. 211). Somit konnte der alleinige Einfluss einer mikrobiologisch aktiven Besiedlung ermittelt werden.

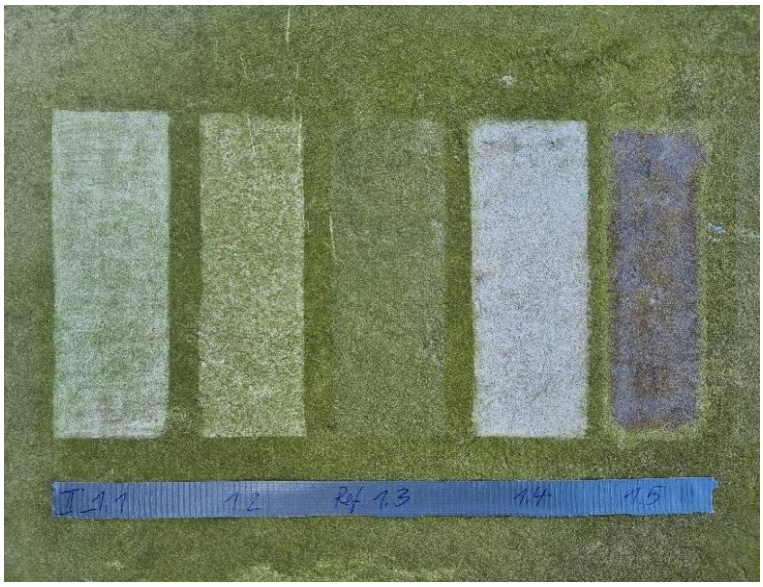


Abbildung 211: Halle, Dom, Sandsteinplatte: Vergleich der verschiedenen Reinigungsflächen

Tabelle 24: *Bewertung der Reinigungsflächen*

Halle, Dom, Musterfläche I Strebepfeiler				
Reinigungs-fläche	**w-Wert** [kg/(m2 ⋅ √h)]	**mikr. Aktivität (RUL)**	**Lasergerät**	**Bewertung**
Ref.	0,2	4307		Ungereinigt, Kruste + Besiedlung, hohe mikrobiolog. Aktivität
1.3	0,2	991	Infinito Laser	Gereinigt mit höchster Leistung, guter Reinigungserfolg, Oberfläche aufgehellt, verringerte mikrobiolog. Aktivität
1.9	0,4	151	Smart 300	Gereinigt mit höchster Leistung, guter Reinigungserfolg, Oberfläche rötlich verfärbt, geringe mikrobiolog. Aktivität
Halle, Dom, Musterfläche II Sandsteinplatte				
Reinigungs-fläche	**w-Wert**	**mikr. Aktivität (RUL)**	**Lasergerät**	**Bewertung**
1.1	3,8	1045	CL50	Gereinigt mit höchster Leistung, mäßiger Reinigungserfolg, Oberfläche streifig, zeigt Reste von Bewuchs, rel. hohe mikrobiolog. Aktivität
1.2	3,0	1417	Thunder Compact	Gereinigt mit höchster Leistung, geringer Reinigungserfolg, Oberfläche fleckig, zeigt noch deutlich Bewuchs, hohe mikrobiolog. Aktivität

1.3	2,6	2641	Referenz	
1.4	2,8	403	Infinito Laser	Gereinigt mit höchster Leistung, sehr guter Reinigungserfolg, Oberfläche aufgehellt, geringe mikrobiolog. Aktivität
1.5	3,6	45	Smart 300	Gereinigt mit höchster Leistung, guter Reinigungserfolg, Oberfläche rötlich verfärbt, äußerst geringe mikrobiolog. Aktivität

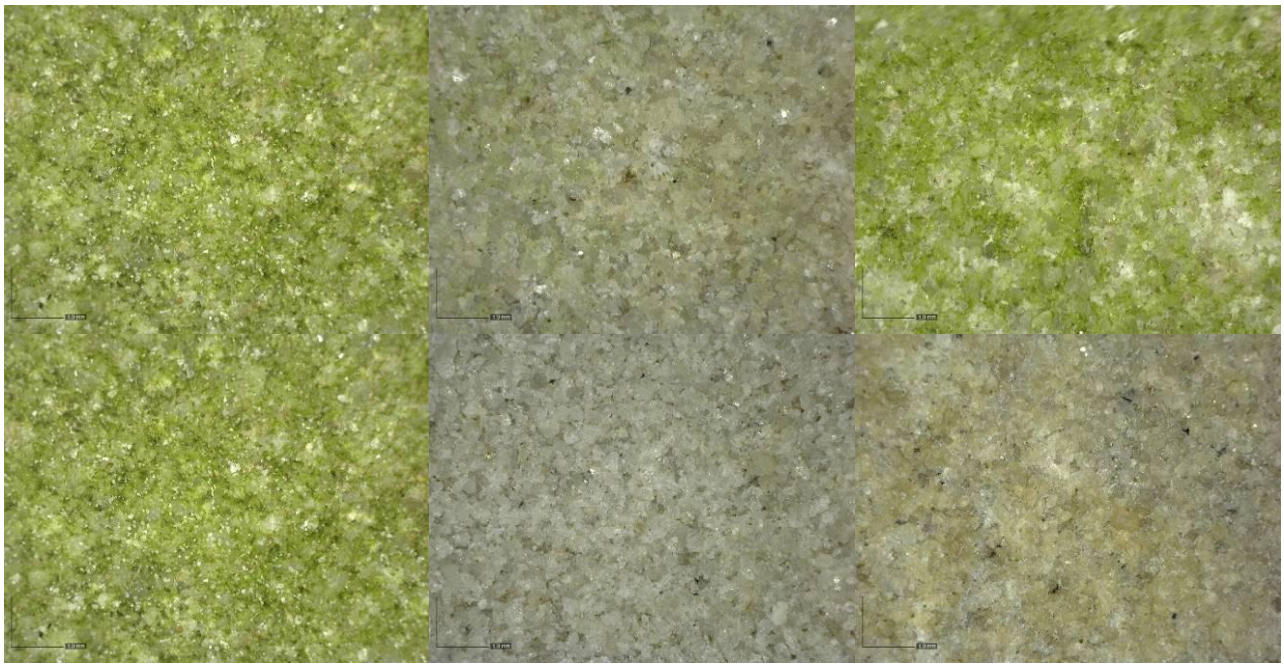


Abbildung 212: Halle, Dom, Sandsteinplatte: Vergleich der verschiedenen Reinigungsflächen, mikroskopische Aufnahmen: ungereinigt (links oben und unten), CL50, 100% (oben Mitte), Thunder Compact, 100% (oben rechts), Infinito Laser, 100% (unten Mitte), Smart 300 Laser 100% (unten rechts)

7.8.4 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verfahren der Laserreinigung gut geeignet ist um mikrobiologisch aktive Besiedlungen zu entfernen bzw. stark zu reduzieren. Generell muss mit hoher Leistung gearbeitet werden um die Besiedlung möglichst komplett zu entfernen. Allerdings sind die verschiedenen Geräte dafür unterschiedlich gut geeignet. So lässt sich mit Punkt- oder Zeilenlasern eine Besiedlung kaum vollständig entfernen (siehe Reinigungsflächen 1.1 und 1.2). Aufgrund der Lasergeometrie verbleiben immer wieder Reste der Besiedlung auf der Oberfläche, von denen dann auch eine Neubesiedlung ausgeht. Bei der hohen Leistung des Smart 300 erfolgte praktisch eine vollständige Entfernung der Besiedlung, aber auch eine deutliche Verfärbung der Sandsteinoberfläche durch Phasenumwandlungen eisenhaltiger Minerale. Für diese Reinigungsaufgabe am besten geeignet war der Infinito Laser. Die Ablenkungsgeometrie des Laserstrahls lässt hier eine relativ gleichmäßige Entfernung der Besiedlung zu.

Literatur

EHLING, A., SIEDEL, H. (2011) Bausandsteine in Deutschland, Band 2, 324 S.

HOFESTEDT, B., KALISCH, U., Pfefferkorn, S. (2002) In: Kalksteinkonservierung am Westportal des Halberstädter Doms St. Stephanus und St. Sixtus. Domstiftung Sachsen-Anhalt. S.11-36

KÖBERLE, T. (2025) REM-EDX-Untersuchung (REM-EDX-Mapping) an drei Bohrkernen nach einer Laserreinigung, REM-EDX-Untersuchungsbericht, TU Dresden, Institut für Baustoffe, AZ 5.5.1-67/2025, 10 S.

KÖBERLE, T. (2024) REM-EDX-Untersuchung (REM-Mapping) an Bohrkernen auf mögliche Gipskrusten, REM-EDX-Untersuchungsbericht, TU Dresden, Institut für Baustoffe, AZ 5.5.1-14/2024, 11 S.

MEINHARDT, J. (2025) Reinigungsmethoden in der Baudenkmalpflege – Spannungsfeld zwischen konservatorischer Notwendigkeit und ästhetischen Ansprüchen. in: Reinigungsmethoden für denkmalgeschützte Oberflächen.- Teil 2. IFS-Bericht 67/2025

SIEDEL, H., WIEDEMANN, G. (2002) Laserstrahlreinigen von Naturstein. Fraunhofer IRB Verlag, 180 S.

ZÖTZL, M. (2024) Der Dom zu Halberstadt, Romanzementbefunde und Baumaterialprovenienz. Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt 1/2024, S. 81-89 II

ZÖTZL, M. (2023) Halberstadt, Dom, Naturstein- und Materialuntersuchungen, IDK-Bericht HAL 72/2023, 8 S.

ZÖTZL, M. (2019) Magdeburg, Dom, Ostfassade, Ergebnisse der Wasseraufnahmeuntersuchungen an Naturstein. IDK-Bericht HAL 40/2019, unveröffentlicht, 1 S.

ZÖTZL, M. (2018) Halle, Neue Residenz, Ostflügel, Naturwissenschaftliche Voruntersuchungen. IDK-Bericht HAL 75/2018, 15 S.

ZÖTZL, M. (2017) Halberstadt, Dom, Skulpturenprojekt, Ergebnisse der XRD-Analysen an Krusten und Natursteinproben. IDK-Kurzbericht vom 25.08.2017

8 Jeannine Meinhardt: Einsatz des Luft-Permeameters zur Bewertung der Laserreinigung

Eine wesentliche Frage im Zusammenhang mit der Laserreinigung besteht bezüglich der anzustrebenden Reinigungsintensität, eine Frage, die bei jeder Reinigungsmaßnahme grundsätzlich gestellt werden muss. Weiterhin muss geklärt werden, welche Untersuchungsmethoden sich eignen, den Vor- und Nachzustand einer Reinigungsmaßnahme realistisch abzubilden, um objektiv entscheiden zu können, welche Reinigungsintensität, auch unter Beachtung des Alterswertes des jeweiligen Objekts, die geeignete ist. In diesem Bereich liegt ein wesentlicher Beitrag einer naturwissenschaftlichen Begleitung eines Reinigungsprozesses. Um den Grad einer konservatorisch notwendigen Reinigungsmaßnahme zu bestimmen, kann die freie Porosität sehr gut als Maßstab herangezogen werden, ist die Öffnung der oberflächennahen Porosität zur Ermöglichung der Trocknung des Gesteins im Sinne konservatorischer Erwägungen oder für die Aufnahme von Konservierungsmitteln ein wesentlicher Anlass für eine Reinigungsmaßnahme. Der so zu begründeten Reinigungsintensität sollten ästhetischen Ansprüche nachgeordnet sein. An dieser Stelle setzt die Bachelorarbeit von Susann Hofmann *Validierung und Praxistauglichkeit des Luft-Permeameters zur Bestimmung der oberflächennahen Luftdurchlässigkeit* an, ein hochsensibles Messverfahren, mit dem die Veränderungen im oberflächennahen Porenraum zerstörungsfrei bestimmt und bewertet werden können. Der oberflächennahe Porenraum bildet die zentrale Eintritts- und Austrittszone für Stofftransporte zwischen dem Gestein und der Atmosphäre. Porenöffnungen, Porenhälse und deren geometrische Ausbildung bestimmen in diesem Bereich maßgeblich, in welchem Umfang Gase, Wasserdampf oder Flüssigkeiten in den Porenraum eindringen oder diesen verlassen können. Veränderungen der Oberfläche wirken sich daher unmittelbar auf die transportrelevanten Eigenschaften eines Gesteins aus.

Zur Validierung und Einordnung der Ergebnisse des Luft-Permeameters erfolgte im Rahmen der Bachelorthesis ein Vergleich mit etablierten Messmethoden, wie der Wasseraufnahme und der Wasserdampfdiffusion, um die Aussagekraft des Verfahrens einzuordnen und dementsprechend zu validieren. Das in dieser Arbeit untersuchte Luft-Permeameter knüpft an die von Eberhard Wendler 2011 publizierte[15] zerstörungsfreie Methodik an. Ziel der Bachelorthesis war es, die Eignung des Luft-Permeameters zur Untersuchung des oberflächennahen Porenraums von Naturstein systematisch zu analysieren. Dabei wurde das Messverfahren sowohl unter Laborbedingungen an definierten Probenkörpern als auch unter praxisnahen Bedingungen an historischen Bauwerken untersucht. Ein besonderer Fokus lag dabei auf der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Darüber hinaus wurde analysiert, inwieweit sich mit dem Luft-Permeameter Unterschiede zwischen verschiedenen Natursteinvarietäten erfassen lassen. Ebenso war die Sensitivität des Verfahrens auf oberflächennahe Verdichtungen und Öffnungen Gegenstand der Untersuchungen. Hier lag die Schnittstelle zum vorliegenden DBU-Projekt. Die Ergebnisse zeigten, dass das Luft-Permeameter reproduzierbare und differenzierende Messwerte liefert. Sowohl Unterschiede zwischen verschiedenen Gesteinsvarietäten als auch feine Abstufungen im Oberflächenzustand konnten eindeutig erfasst

[15] Wendler, E. (2011): Luft-Permeameter. In: Einfache zerstörungsfreie Prüfverfahren, Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege/Archäologisches Landesmuseum (2011), S. 12.

werden. Im Vergleich zu Wasseraufnahme- und Wasserdampfdiffusionsmessungen erweist sich die Methode als besonders sensitiv.

Im Bachelorprojekt wurden flankierenden zum DBU-Vorhaben silikatisch gebundene Sandsteine am Dom in Magdeburg und Halle betrachtet sowie die Schaumkalke und auch Sandsteine des Halberstädter Doms, die teilweise einer Laserreinigung unterzogen wurden. Hier ging es im Wesentlichen um die Reduktion von dunklen Krusten. Mit Hinblick auf die Wirktiefe des Verfahrens der Laserreinigung muss auf die Arten von Krusten im Detail eingegangen werden. Es werden Auflagerungskrusten und Umwandlungskrusten unterschieden. Angelagerte Krusten sind typisch für ein nicht karbonatisch gebundenes Gestein, auf dem sich karbonatisch Stäube anlagern. Oder es gibt dünne Kalkschleier, z.B. aus Fugen, die in der Wechselwirkung mit schwefelsaurer Atmosphäre in Gips umgewandelt worden sind. Sie liegen nur auf der Gesteinsoberfläche auf und haben wenig intensiven Bezug zum Gestein und dessen oberflächennaher Porosität. Wenn daher oberflächennahe „Verschwärzung“ bzw. Kruste abgenommen werden, kann der darunterliegende Porenraum effektiv geöffnet werden. Anders die Umwandlungs- oder Reaktionskrusten, die sich auf einem karbonatisch gebundenen Material bzw. besser aus diesem bilden und dadurch eine enge Verzahnung von Kruste und Gestein besteht. Die oberflächennahe Abnahme der Kruste durch den Reinigungslaser kann nur bedingt den vergipsten Porenraum öffnen. Der Erfolg einer Laserreinigung auf Gesteinen, die typischerweise eine Umwandlungskruste bilden, kann nicht allein durch die Messung der kapillaren Saugfähigkeit, beispielsweise mit dem zerstörungsfreien Karstenschen Prüfröhrchen, bestimmt werden, da diese Poren sehr wahrscheinlich nicht in großem Umfang geöffnet werden. Hier kann das sensiblere, ebenfalls zerstörungsfreie Verfahren des Luft-Permeameters zur Bestimmung der oberflächennahen Luftdurchlässigkeit eingesetzt werden. So wie das Karstensche Prüfröhrchen die Objektmessung in Anlehnung an die Wasseraufnahme am Bohrkern nach DIN ist, kann die Permeationsmessung bzw. die Messung des Luftpermeationswiderstandes, so wie in Abb. 1 dargestellt, als Gleichnis für die Messung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes an einer Bohrkernscheibe angesehen werden. Ein Bohrkern oder eine Bohrkernscheibe bedeuten immer einen invasiven Eingriff am Objekt, der zum Schutz der originalen Oberflächen im besten Fall vermieden werden sollte. Daher sind Karstenmessungen zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme und eben auch die Messung des Luftpermeationswiderstandes geeignete Methoden.

Der Messaufbau, der in Abbildung 213 dargestellt ist, umfasst folgendes: An ein Karstensches Prüfröhrchen mit einer Fläche von 15,9 cm² wird am oberen Ende über eine gasdichte Schlauchverbindung ein wassergefülltes U-Rohr mit seitlichem Auslassstutzen befestigt. Die Innenfläche des U-Rohrs beträgt 1 cm². Über den Auslassstutzen wird mit Hilfe eines Peleusballs ein Überdruck von 6 cm Wassersäule erzeugt, was 600 Pa entspricht, oder 6 mbar. Mit einer Stoppuhr wird dann die Zeit ermittelt, in welcher die Druckdifferenz auf 4 cm Wassersäule (400 Pascal) abfällt. Die Druckänderung um 2 cm Wassersäule (in beiden Manometerschenkeln) entspricht einer Verschiebung der Luftsäule um 1 cm und somit einer durch die Fläche durchgetretenen Luftmenge von 1 cm³. Die transportierte Luftmenge ist proportional zur Fläche, Zeit und Druckdifferenz. Der reziproke Proportionalitätsfaktor stellt den

Permeationswiderstand dar. Ein hoher Permeationswiderstand weist auf einen geringen Luftdurchtritt hin, während ein niedriger Wert einen offenen, gut durchlässigen Porenraum anzeigt.
Der Permeationswiderstand ist kein absoluter Permeabilitätswert, sondern ein methodischer Vergleichswert, der die Durchlässigkeit des oberflächennahen Porenraums beschreibt.

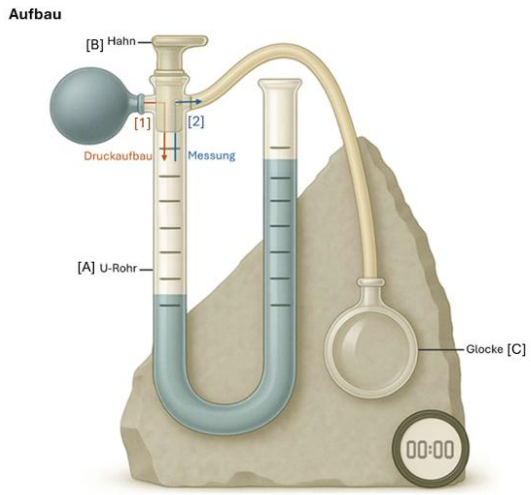


Abbildung 213: Messaufbau der Permeations-Widerstandsmessung (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann)

Die Luftpermeabilitätsmessungen werden durch die Berechnung des Permeationswiderstands R_L ausgewertet. Diese Kenngröße beschreibt, wie stark der Porenraum den Luftdurchtritt hemmt und dient damit als Maß für dessen Luftdurchlässigkeit. Der im Rahmen der Bachelorarbeit von Susann Hofmann verwendete Auswertungsansatz geht auf Dr. Eberhard Wendler zurück, der die Methode 2011 publizierte. Die Berechnungsformel lautet:

$$R_L = \frac{A}{V} \cdot \Delta p \cdot t$$

A [cm^2]: durchströmte Fläche (definiert durch den Glockendurchmesser)
V [cm^3]: verdrängtes Luftvolumen (Wassersäule)
Δp [Pa]: Druckgradient zwischen Start- und Enddruck
t [s]: mittlerer Dauer des Druckabfalls

Auf die oben beschriebene Weise wurden alle Musterflächen des Laserprojekts, die im Kreuzgarten des Magdeburger Doms, an dem Pfeiler der Tonsur (siehe Abb. 214) sowie an den Sandstein- (siehe Abb. 215) und Muschelkalkflächen des Halberstädter Doms (Kreuzgang und Nordquerhausportal) angelegt worden sind, untersucht.

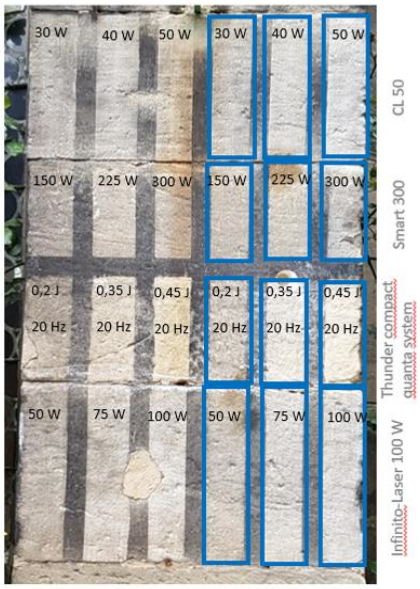


Abbildung 214: Musterflächen am Pfeiler der Tonsur im Kreuzgarten des Magdeburger Doms. Die blau umrahmten Sandsteinflächen wurden vor dem Lasern befeuchtet.



Abbildung 215: Musterflächen am Pfeiler im Kreuzgarten des Halberstädter Doms (Sandstein).

Die Ergebnisse spiegeln von der ungereinigten Fläche hin zu den Reinigungsflächen mit gesteigerter Reinigungsintensität sinkende Permeationswiderstände [MPa pro s pro m] wider (siehe Tab. 25 und Abb. 216, Magdeburger Dom).

Tabelle 25: Tonsur, Kreuzgarten, Magdeburger Dom. Übersicht der Permeationswiderstandswerte der krustenreduzierten Flächen mit der jeweiligen Lasereinstellung im Vergleich zum Wert der ungereinigten Kruste (Fläche 1) (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann)

		R_L [MPa s/m] Fläche 1	R_L [MPa s/m] Fläche 2	R_L [MPa s/m] Fläche 3	R_L [MPa s/m] Fläche 4
RL [MPa s/m] Kruste(Referenz)		**31**	**8**	**8**	**10**
Reduktion Einstellungen:	**stark/nass**	1,1	0,3		2,4
	mäßig/nass	1,1	0,3	4,8	3,2
	gering/nass	1,8	0,5	3,8	2,9
	stark/trocken	0,8	0,3	4,2	5,3
	mäßig/trocken	1,5	0,3	1,7	5,8
	gering/trocken	1,52	1,8	3,5	3,7

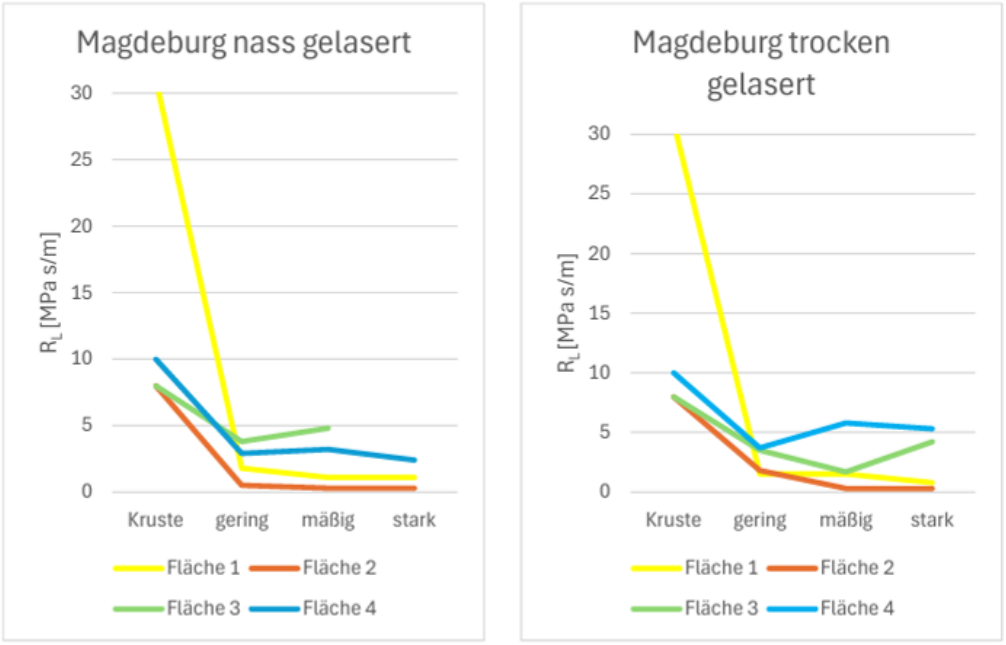


Abbildung 216: Musterflächen zur Laserreinigung von Auflagerungskrusten auf Sandstein am Magdeburger Dom (Tonsur, Kreuzgarten) mit geringer, mäßiger und starker Intensität, auf befeuchteter (links) und trockener Steinoberfläche (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann)

Der ungereinigte Stein hat extrem lange gebraucht, ehe die Luft aus dem Röhrchen in den Stein abgeflossen ist. Die Oberfläche war demnach sehr dicht, der Permeationswiderstand sehr hoch. Im Vergleich zu den Ergebnissen der verschiedenen Laserreinigungsintensitäten fällt ein sehr deutlicher Unterschied auf. Die Oberflächen sind hinsichtlich des Wasserdampftransportes permeabler, durchlässiger. Es lässt sich bei genauerer Betrachtung nicht deutlich der Vorteil zwischen feuchter und trockener Reinigung für alle Laser in gleicher Weise herauslesen. Für die Anwendung des CL 90 Lasers scheint sich das Vornässen, das vor allem für eine Vergleichmäßigung des Reinigungsergebnisses durchgeführt wird, günstiger auszuwirken. Bei den anderen angewendeten Reinigungslasern

wird dieser Vorteil nicht richtig deutlich. Aber die Wasserdampfdiffusion ist bei allen angewendetem Reinigungslasern verbessert.

Die Ergebnisse der laserreduzierten Bereiche am Magdeburger Dom veranschaulichen eine deutliche Abnahme der Permeationswiderstände im Vergleich zur Kruste (siehe gelbe Linie in Abb. 216). Dabei ist es unerheblich, ob eine geringe, mäßige oder starke Laserintensität verwendet sowie ob auf angefeuchteter oder trockener Gesteinsoberfläche gelasert wurde. Die auflagernde Kruste wird auch bereits mit einer geringeren Laserintensität soweit abgenommen, dass der Porenraum frei wird, der konservatorische Aspekt ist bereits an diesem Punkt erfüllt, es sei denn die thermische Empfindlichkeit der Oberfläche soll vor diesem Hintergrund durch eine weitere Aufhellung der Gesteinsoberfläche reduziert werden, was ebenfalls konservatorisch relevant sein kann. Ansonsten greift bei den hier vorliegenden Auflagerungskrusten eine höhere Reinigungsintensität bereits in den Bereich der optisch-ästhetisch zu begründenden Reinigungsintensität, die auch mit Hinblick auf den Alterswert des Objekts diskutiert werden muss.

Die Ergebnisse der lasergereinigten Flächen auf Halberstädter (HBS) Sandstein (siehe Abb. 217 links) und Halberstädter Muschelkalk (siehe Abb. 217 rechts) zeigen ebenfalls eine deutliche Abnahme der Permeationswiderstände im Vergleich zur ungereinigten Kruste (Fläche 1). Hier lässt sich jeweils sogar eine Abstufung der Permeationswiderstände zwischen geringer und starker Laserintensität erkennen, insbesondere deutlich bei der Umwandlungskruste auf Halberstädter Muschelkalk.

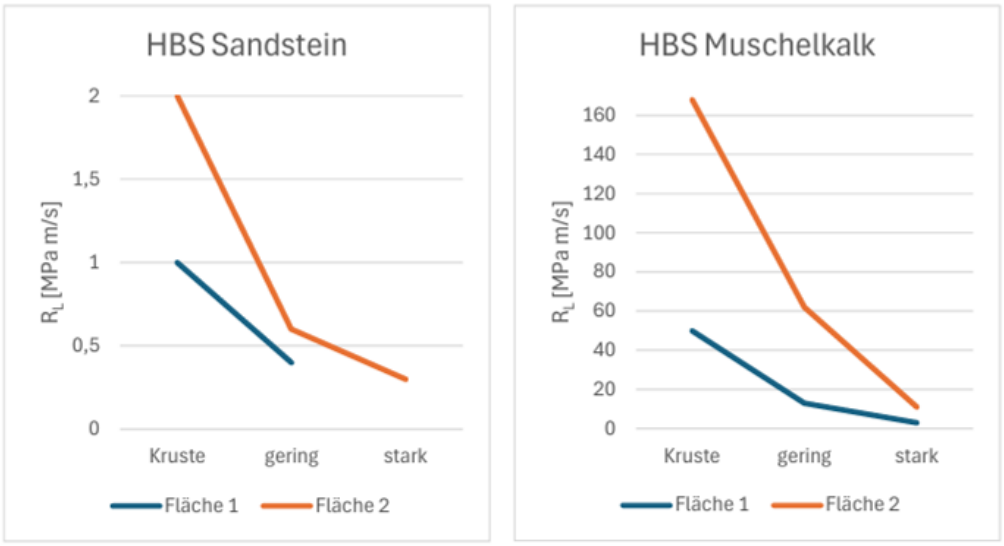


Abbildung 217: Musterflächen zur Laserreinigung von Auflagerungskrusten auf Sandstein am Halberstädter Dom (links) und von Umwandlungskrusten auf Halberstädter Muschelkalk (rechts) mit den Lasereinstellungen geringe und starke Intensität (Quelle: Bachelorthesis S. Hofmann)

Der Einsatz des Luft-Permeameters erlaubt sehr sensibel die Bestimmung des Grades der Öffnung des Porenraums, sensibler als es mit der zerstörungsfreien kapillaren Wasseraufnahme nach Karsten möglich ist. Somit ist mit dieser Methode möglich, die Grenze der konservatorisch erforderlichen Reinigungsintensität besser auszuloten. Auch der

Aufwand der Präparation des Messröhrchens und die Möglichkeit der endlos häufigen Wiederholbarkeit der Messung an derselben Stelle sprechen für die zukünftig verstärkte Anwendung des Luft-Permeameters.
Grundsätzlich funktioniert dieses Verfahren hervorragend für homogene Sandsteine. Etwas anders gestaltet es sich bei Kalkstein, wie eben dem Schaumkalk des Halberstädter Doms. Hier muss aufgrund der Heterogenität des Materials eine Vielzahl an Messungen durchgeführt werden, um repräsentative Mittelwerte zu erzeugen.

9 Julia Laposi: Laserreinigung von Alabaster: Machbarkeit und Risiken mit besonderem Hinblick auf den thermischen Einfluss

9.1 Einführung

Die Auswahl einer geeigneten Reinigungsmethode für Alabaster erfordert eine genaue Kenntnis der materialtypischen Eigenschaften und Empfindlichkeiten. Alabaster reagiert in besonderem Maße auf Wasser, mechanische Belastung und thermische Einwirkungen, was den Einsatz vieler historisch und gegenwärtig verwendeter Reinigungsverfahren problematisch macht. Zahlreiche Methoden – darunter wässrige Anwendungen, Kompressen unterschiedlicher Zusammensetzung, pastöse Systeme, lösemittelbasierte Verfahren, Feinstrahltechniken oder abrasive Hilfsmittel – können zu Substanzverlusten, Verletzungen der Originalsubstanz, Oberflächenmattierung, Veränderungen der Politur, Einlagerungen von Rückständen oder zu unerwünschten chemischen Reaktionen führen. Selbst Systeme, die nur gebundenes oder geringfügig vorhandenes Wasser enthalten, bergen nachweislich Risiken, da bereits eine kurze Feuchteexposition zu Löseschäden führen kann. Insgesamt machen diese Reaktionen des Materials deutlich, dass konventionelle Reinigungsverfahren bei Alabaster ein grundsätzlich hohes Risiko materialtechnischer Beeinträchtigungen mit sich bringen.

Vor diesem Hintergrund rückt die Laserreinigung zunehmend in den Fokus der Forschung und Praxis. Sie arbeitet berührungsfrei, wasserfrei und rückstandslos und ermöglicht eine präzise Steuerung der Energieeinwirkung. Damit lassen sich zentrale Problembereiche umgehen, die bei anderen Reinigungsverfahren unmittelbar mit dem Materialverhalten von Alabaster verknüpft sind. Gleichzeitig zeigen bisherige Anwendungen thermische Entwicklungen an der Materialoberfläche, die kritisch berücksichtigt werden müssen. Die Auswirkungen dieser Prozesse sind bislang jedoch unzureichend untersucht, und es lagen keine Erfahrungswerte über den Einfluss unterschiedlicher Alabastertypen, Schmutzcharakteristika sowie Laserparameter auf die Erwärmung des Materials vor.

Die vorliegende Arbeit setzt an dieser Forschungslücke an. Sie untersucht das thermische Verhalten von Alabasteroberflächen unter Laserbestrahlung, bewertet Risiken und Potenziale der Methode und prüft, unter welchen Bedingungen die Laserreinigung als schonende und kontrollierbare Alternative zu herkömmlichen Verfahren eingesetzt werden kann.

9.2 Materialcharakteristik und Voruntersuchungen

Alabaster besteht aus Gips, einem wasserhaltigen Calciumsulfat ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), oder seltener aus der wasserfreien Variante Anhydrit ($CaSO_4$). Er zählt zu den Evaporiten und ist ein feinkristallines bis kryptokristallines Gestein. Reine Alabastervarietäten sind meist weiß bis transluzent, es gibt jedoch auch Varianten mit natürlichen

Farbbeimengungen. Die Materialstruktur kann netzartige, gestreifte oder wolkige Muster aufweisen und von Adern durchzogen sein. Charakteristisch ist seine ausgeprägte Lichtdurchlässigkeit. Trotz seiner geringen Härte (Gips: 1½–2; Anhydrit: 3–3½ nach Mohs) besitzt Alabaster ein dichtes, marmorähnliches Gefüge und ist gut polierfähig. Aufgrund seiner Optik wird er häufig mit Marmor verwechselt, fühlt sich aufgrund seiner geringeren Wärmeleitfähigkeit jedoch wärmer an. Seine Weichheit, Reinheit und Transluzenz machten ihn seit der Antike bis in die Neuzeit zu einem begehrten Bildhauermaterial.

Um diese Materialeigenschaften und Empfindlichkeiten besser einschätzen zu können, wurden in dieser Arbeit Vorversuche durchgeführt, die verdeutlichen sollten, mit welchen Risiken bei der Reinigung zu rechnen ist. Die Ergebnisse zeigen klar, dass viele der historischen und auch heute noch verbreiteten Reinigungsverfahren nicht mehr guten Gewissens angewendet werden können und dass die Laserreinigung nach aktuellem Kenntnisstand eine geeignete Alternative darstellt. Die Voruntersuchungen bestätigten die Sensibilität des Materials eindeutig. Bereits geringe mechanische Einwirkungen führten zu sichtbaren Oberflächenverletzungen, wie Kratzer und Prellungen. Die Wasserlöslichkeit von Gips (≈ 0,2 g/100 ml) macht das Material zudem extrem anfällig für Feuchteeinwirkung. In Versuchen mit Leitungswasser, destilliertem, deionisiertem und gipsgesättigtem Wasser zeigte sich, dass schon nach zwei Sekunden Kontakt ein deutlicher Verlust der Politur eintrat und nach zwanzig Sekunden ein vollständiger Verlust der Politur zu beobachten war. Die einzige Ausnahme stellte gipsgesättigtes Wasser dar, das keine sichtbaren Schäden verursachte.

Auch die thermische Empfindlichkeit erwies sich als kritisch. Gips ist unterhalb von 40 °C stabil, beginnt aber ab etwa 40 °C zu Halbhydrat zu dehydrieren, bei höheren Temperaturen beschleunigt sich dieser Prozess deutlich und kann zur vollständigen Dehydratisierung führen. Versuche mit 1 mm starken Alabasterplatten, die auf 40 °C erwärmt und anschließend auf der Temperatur konstant gehalten wurden, zeigten bereits nach etwa sieben Minuten an einigen Bereichen einen leichten Verlust der Transluzenz. Der betroffene Bereich wirkte hellweiß und opak, ein klares Indiz für strukturelle Veränderungen. Diese Ergebnisse belegen, dass selbst moderate Erwärmung über einen bestimmten Zeitraum schädigend wirkt und dass Alabaster bei allen Reinigungsmethoden besonders sorgsam behandelt werden muss.

Laserreinigung: Potenzial und Grenzen

Auf Grundlage dieser Befunde erscheint die Laserreinigung als vielversprechende Alternative zu herkömmlichen Verfahren. Sie arbeitet vollständig berührungsfrei, wasserfrei und ohne rückstandsbildende Chemikalien und ermöglicht eine präzise kontrollierbare Energieeinwirkung. Diese Vorteile minimieren viele der typischen Risiken anderer Reinigungsmethoden. Gleichzeitig bestehen jedoch auch relevante Einschränkungen. Die Wärmeentwicklung während der Laserreinigung ist technisch unvermeidbar, ihre Auswirkungen auf Alabaster sind bislang kaum untersucht und potenziell kritisch. Zudem wird der sogenannte „Yellowing-Effekt“, ein gelblicher Film,

der nach der Behandlung auftreten kann, regelmäßig beschrieben, ohne dass seine Ursachen abschließend geklärt wären.

Angesichts der hohen Materialempfindlichkeit und der unzureichend erforschten thermischen Effekte stellt sich daher die Frage, inwieweit die Laserreinigung bei Alabaster tatsächlich sicher angewendet werden kann. Die vorliegende Arbeit untersucht deshalb sowohl die Laserreinigung allein als auch ihre Anwendung in Kombination mit Agar-Agar-Gel, das mit gipsgesättigtem Wasser angerührt wurde, und bewertet deren Vor- und Nachteile mit besonderem Hinblick auf die thermische Belastung des Materials.

9.3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau basierte auf der gezielten Variation definierter Versuchsbedingungen und der Kombination mehrerer Temperaturmesstechniken. Ausgangspunkt war die realitätsnahe Nachbildung natürlicher Verschmutzungssituationen auf Alabaster, wobei sowohl weiß-opaker als auch weiß-transparenter Alabaster aus Spanien verwendet wurden. Als künstliche Verschmutzungen kamen Lampenruß und Kohle als lose Verschmutzung, sowie eine durch Schmutzwasserberieselung erzeugte Schmutzkruste zum Einsatz. Zusätzlich stand auch ein Probestück aus dem Magdeburger Dom mit einer natürlichen Verschmutzung zur Verfügung. Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens wurden unterschiedliche Materialstärken hergestellt um sowohl die Oberflächentemperatur als auch den Temperaturverlauf in die Tiefe des Materials zu erfassen. Die Laserreinigung erfolgte jeweils mit und ohne Agar-Agar-Gel, um dessen Einfluss auf die Temperaturentwicklung zu bewerten.
Die Temperaturerfassung erfolgte mittels Platin-Temperatursensoren, Temperaturmesstreifen, einem thermochromen Pigment, IR-Thermographie sowie punktueller Messungen mit einem Infrarot-Thermometer.

9.4 Beginn der Untersuchungen

Die Auswahl der Laserparameter für die Untersuchung der thermischen Belastung bei der Laserreinigung erfolgte schrittweise und systematisch auf Basis von Vorversuchen, einem strukturierten Testaufbau und einem Bewertungssystem.
Zu Beginn wurden an einer weiß-transparenten Platte, die bereits zwei Wochen lang einer Dauerbefeuchtung mit Schmutzwasser ausgesetzt war, die Leistungsstufen 20 %, 40 %, 60 %, 80 % und 100 % bei einer Scanfrequenz von 100 Hz und einer Pulsfrequenz von 130 kHz getestet. Dabei zeigte sich, dass eine Leistung von 20 % zu einer zu langen Laserdauer führte und kein zufriedenstellendes Reinigungsergebnis erzielte. Höhere Leistungsstufen entfernten die Verschmutzungen hingegen deutlich und erforderten eine wesentlich kürzere Laserdauer. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden die weiteren Einstellungen festgelegt.
Auf dieser Grundlage wurden vier Leistungsstufen (40 %, 60 %, 80 %, 100 %) ausgewählt und systematisch mit unterschiedlichen Scan- und Pulsfrequenzen kombiniert. Für die erste Testreihe wurde mit einer mittleren

Scanfrequenz von 90 Hz und einer Pulsfrequenz von 100 kHz gearbeitet. Anschließend wurde zunächst die Scanfrequenz in 30-Hz-Schritten von 30 Hz bis 120 Hz variiert, danach die Pulsfrequenz auf 75 kHz, 100 kHz und 150 kHz. So ergab sich ein Raster von Parametereinstellungen, das an beiden Alabastersorten (weiß-opak und weiß-transparent) und mit zwei Verschmutzungsarten (Lampenruß und Kohle) untersucht wurde.

Die Bewertung der Testfelder erfolgte anhand eines definierten Bewertungssystems. Dafür wurden fünf Kategorien herangezogen: optisches Erscheinungsbild, Laserdauer (Zeit), Gleichmäßigkeit des Reinigungsergebnisses, Auftreten von Gefügeschäden sowie Verfärbungen bzw. Yellowing-Effekt. Jede Kategorie wurde in drei Stufen eingeteilt (1–3), wobei 1 für ein gutes und 3 für ein schlechtes Ergebnis stand. Gefügeschäden wurden dabei grundsätzlich negativ gewertet, unabhängig von sonst guten Ergebnissen. Aus den Einzelwerten der Kategorien wurde ein Mittelwert gebildet, um jede Parametereinstellung vergleichbar einordnen zu können. Die Mittelwerte wurden wiederum in drei Klassen. (1,0–1,8 = gut / 1,9–2,4 = mittelmäßig / 2,5–3,0 = schlecht) zusammengefasst.

Die Auswertung zeigte, dass eine Leistung von 40 % insgesamt zu geringe Reinigungseffizienz aufwies und daher für weitere Untersuchungen nicht geeignet war. Leistungsstufen von 100 % führten zwar zu schnellen Reinigungsergebnissen, jedoch vermehrt zu Gefügeschäden und hohen thermischen Belastungen. In der Feineinstellung wurden daher Leistungen im Bereich von 60–80 % weiter untersucht. Auf Basis der Bewertungstabelle stellte sich heraus das mit 60% Leistung, die besten Werte erzielt wurden. So wurden schließlich vier „gute“ und zwei „schlechte“ Parametereinstellungen ausgewählt, die in allen weiteren thermischen Untersuchungen verwendet wurden.
Die ausgewählten Kombinationen lauteten:
60 % – 60 Hz – 75 kHz
60 % – 75 Hz – 85 kHz
60 % – 80 Hz – 90 kHz
60 % – 90 Hz – 100 kHz
sowie als bewusst kritisch gewählte Einstellungen:
80 % – 120 Hz – 100 kHz
100 % – 75 Hz – 95 kHz
Damit standen vier Einstellungen mit guten Reinigungsergebnissen und moderater Einwirkung sowie zwei Einstellungen mit hoher Belastung und deutlichen Risiken zur Verfügung. Diese sechs Parametereinstellungen bildeten die Grundlage für alle folgenden Untersuchungen zur thermischen Entwicklung auf Alabasteroberflächen bei der Laserreinigung.

9.5 Untersuchungen zur Thermischen Belastung bei der Laserreinigung

Die Untersuchungsmethoden setzen sich aus den Versuchsbedingungen und den Temperaturmesstechniken zusammen.

Die Versuchsbedingungen bestehen aus folgenden Faktoren:

Den zwei verschiedene Alabastersorten: weiß-opaker und weiß-transparenter, sowie das zur Verfügung gestellte Probestück. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Verschmutzungen getestet, darunter künstlich, hergestellte Verschmutzungen sowie eine natürliche Verschmutzung von dem Probestück.

Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Variation der Materialstärke, um sowohl die Oberflächentemperatur als auch den Temperaturverlauf in den Tiefen des Materials zu untersuchen.

Zusätzlich wurde die Laserreinigung sowohl mit als auch ohne Agar-Agar-Gel (angemacht mit gipsgesättigtem Wasser) durchgeführt, um den Einfluss dieser Methode auf die Temperaturentwicklung zu beobachten.

Durch die gezielte Variation der Versuchsbedingungen sollte ein breites Spektrum an Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

Zur Überprüfung der Temperaturentwicklung wurden verschiedene Techniken eingesetzt.

Eine Methode war die Verwendung von Platin-Temperatursensoren, die mit Wärmeleitpaste aufgebracht wurden, um eine möglichst gute thermische Ankopplung an das Material zu gewährleisten. Die erfassten Temperaturwerte wurden anschließend in Echtzeit mit dem Messsystem von Gantner Instruments dokumentiert.

Eine weitere Untersuchungsmethode war die Anwendung von Temperaturmesstreifen. Diese zeigten durch einen irreversiblen Farbumschlag an, wenn bestimmte Temperaturbereiche erreicht wurden.

Zusätzlich wurde ein thermochromes Pigment eingesetzt, das in Gummi-Arabicum gebunden und als Paste aufgetragen wurde. Dieses Pigment zeigte einen reversiblen Farbwechsel von grün zu transparent, sobald eine Temperatur von ungefähr 30 °C erreicht wurde.

Zur Erfassung der Oberflächentemperatur wurde außerdem die IR-Thermographie genutzt, mit der Temperaturverteilungen sichtbar gemacht werden können.

Abschließend kam ein Infrarot-Thermometer zum Einsatz, um punktuelle Temperaturmessungen an der Oberfläche durchzuführen.

TP100-Temperatursensoren

Für die Untersuchung der thermischen Belastung während der Laserreinigung wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der eine verlässliche Temperaturerfassung in unterschiedlichen Materialstärken des Alabasters ermöglicht. Grundlage dafür war die Vorbereitung verschiedener Proben, bestehend aus weiß-opakem und weiß-transparentem Alabaster sowie einem natürlich verschmutzten Profilstück. Um die Temperaturentwicklung in definierten Tiefen zu erfassen, wurden in die Proben Kernbohrungen mit einem Durchmesser von fünf Millimetern eingebracht, deren Tiefe so gewählt wurde, dass Materialstärken von zwei, fünf, acht, zehn Millimetern und bei lose aufliegenden Verschmutzungen zusätzlich zwanzig Millimetern entstanden. Das Bohren erfolgte bei den größeren Platten nass und mit Wasserkühlung, um eine Erwärmung und damit verbundene Schädigungen zu vermeiden, während bei der

künstlich verschmutzten 1-cm-Platte und dem Profilstück eine trockene Bohrtechnik mit Druckluftkühlung eingesetzt wurde, um die Verschmutzungen nicht zu verändern. Die Erreichung einer Materialstärke von nur zwei Millimetern stellte eine besondere Herausforderung dar, konnte jedoch ohne Risse oder Brüche umgesetzt werden, sodass ein experimentell äußerst empfindlicher Bereich zugänglich wurde.

Um die Temperaturfühler optimal mit dem Material zu koppeln, wurde in jede Kernbohrung eine dünne Schicht Wärmeleitpaste eingebracht. Die PT100-Messfühler wurden anschließend präzise am Grund der Bohrung positioniert und mit Fixiermasse stabilisiert. Da eine direkte Temperaturmessung auf der laserbehandelten Oberfläche während des Ablationsprozesses nicht möglich war, mussten die Messdioden auf der Rückseite der gelaserten Fläche angebracht werden. Nur diese Anordnung gewährleistete, dass während des Laserns kontinuierlich Temperaturdaten erfasst werden konnten. Durch die exakt definierten Materialstärken war es möglich, die gemessenen Temperaturwerte den jeweiligen Tiefenbereichen eindeutig zuzuordnen und so eine möglichst genaue Annäherung an die tatsächlichen Oberflächentemperaturen vorzunehmen. Die Proben wurden auf Holzstützen gelagert, um Kabelbewegungen oder Kabelbruch auszuschließen und eine ungestörte Datenübertragung zu ermöglichen. Die Datenerfassung erfolgte über ein Messsystem von Gantner Instruments, das alle Temperaturverläufe in Echtzeit dokumentierte.

Jede Probenplatte wurde in Spalten unterteilt, wobei eine Spalte stets einen vollständigen Laserverlauf über mehrere Materialstärken repräsentierte. Somit wurde eine Laserparametereinstellung in einer zusammenhängenden Bahn über zwei, fünf, acht, zehn und zwanzig Millimeter geführt, wodurch die thermische Reaktion dieser Bereiche direkt miteinander vergleichbar war. Der Laser wurde in gleichmäßig langsamer Bewegung über eine etwa fünfzehn Zentimeter lange Strecke geführt, und die Messung setzte exakt in dem Moment ein, in dem der Laserprozess begann. Nach Abschluss des Schmutzabtrags lief die Temperaturmessung noch ein bis zwei Minuten weiter, um die Abkühlphase zu erfassen. Zwischen den Messreihen wurden die Proben jeweils auf eine möglichst identische Ausgangstemperatur zurückgeführt, die im Durchschnitt bei rund zweiundzwanzig Grad Celsius lag. Diese konstante Ausgangsbasis war entscheidend, um die Kelvinanstiege der einzelnen Messungen miteinander vergleichen zu können und um zu erklären, warum die dokumentierten Temperaturspitzen in vielen Versuchen über vierzig Grad Celsius erreichten, einem Bereich, in dem Gips beginnt, Kristallwasser abzugeben.

Die Verschmutzungssituationen bestanden aus lose aufliegenden Schichten wie Kohle und Lampenruß, künstlich rekristallisierten Schmutzkrusten sowie natürlicher Verschmutzung eines Profilstücks. Alle sechs zuvor ausgewählten Laserparametereinstellungen wurden auf jede dieser Verschmutzungen angewendet.
Anschließend wurden zwei Einstellungen ausgewählt: zum einen die thermisch günstigste Einstellung mit gutem Reinigungsergebnis und zum anderen eine thermisch intensive Einstellung, die sowohl schlechte Reinigungsergebnisse als auch Gefügeschäden zeigte. Beide Einstellungen wurden anschließend erneut in Kombination mit einem Agar-Agar-Gel-Auftrag untersucht. Die Temperaturverläufe wurden anschließend in Excel

aufbereitet und ausgewertet, die Liniendiagramme ermöglichten eine detaillierte Beobachtung der Temperaturänderungen in Abhängigkeit von Materialstärke, Verschmutzungsart und Laserparameter.

Temperaturmesserreifen und Thermochromes Pigment

Um die tatsächliche Oberflächentemperatur während der Laserreinigung noch genauer beurteilen zu können, wurde neben den PT100-Messfühlern ein ergänzender Versuchsaufbau entwickelt. Da die Temperaturerfassung mit den PT100-Sensoren nur bis zu einer Materialstärke von 2 mm möglich war und damit lediglich eine Annäherung an die Oberflächentemperatur erlaubte, wurden zusätzlich Alabasterplatten auf 1 mm Materialstärke reduziert. Durch diese geringe Stärke eröffnete sich die Möglichkeit, Temperaturmesstreifen sowie ein thermochromes Pigment auf der Rückseite aufzubringen, wodurch die thermische Beanspruchung unmittelbar sichtbar wurde. Die so erzielte visuelle Registrierung der maximalen Temperaturspitzen diente dazu, die Messergebnisse der PT100-Reihen zu vervollständigen und eine noch differenziertere Einschätzung der laserinduzierten Erwärmung zu ermöglichen.

Für diese Untersuchungen wurden Alabasterplatten auf eine Materialstärke von 1 mm geschliffen, um eine möglichst direkte thermische Rückmeldung nahe der Oberfläche zu ermöglichen. Auf der Rückseite der Platten wurden irreversible Temperaturmesstreifen im Messbereich von 37 bis 54 °C sowie ein reversiblen thermochromes Pigment aufgebracht. Beide Methoden ermöglichten eine optische Erfassung der Temperaturentwicklung während und unmittelbar nach dem Laservorgang. Die Versuchsreihen umfassten zunächst die Laserreinigung von zwei Verschmutzungsszenarien – Lampenruß und künstlich erzeugter Schmutzkruste – auf weiß-transparentem und weiß-opakem Alabaster. Anschließend wurde untersucht, wie sich die Laserreinigung in Kombination mit einer fünf Millimeter starken Agar-Agar-Schicht auf die thermische Belastung auswirkt.

Während die Pigmentschicht ab etwa 30 °C von Grün zu Transparent wechselte, zeigte sich im Verlauf der Untersuchungen, dass dieser Farbwechsel deutlich verzögert eintrat und daher keine ausreichend präzise Messgrundlage bot. Aus diesem Grund wurde die Auswertung hauptsächlich auf die Temperaturmesstreifen gestützt, da diese über einen eindeutigen, irreversiblen Umschlag verfügen und somit zuverlässig den Temperaturhöchstwert registrieren.

Die Ergebnisse der Messstreifen zeigten, dass bei allen Laserparametereinstellungen und bei beiden Verschmutzungsszenarien Temperaturen zwischen mindestens 49 und 54 °C erreicht wurden. Diese Werte liegen deutlich höher als die in 2 mm Materialstärke gemessenen Temperaturen und bestätigen, dass bei geringerer Materialstärke die maximalen thermischen Spitzen ansteigen. Auch bei der Laserreinigung in Kombination mit Agar-Agar-Gel zeigte sich in allen Fällen ein Temperaturumschlag bis 54 °C; eine Temperaturreduzierung konnte nicht festgestellt werden. Bei einigen Versuchsfeldern traten zudem ausgeprägte Reaktionen wie Blasenbildung auf der Geloberfläche auf, und nach dem Laservorgang waren sichtbare Laserspuren auf der Auflagefläche des Gels erkennbar.

Insgesamt bestätigten die Untersuchungen, dass die Laserreinigung an 1 mm starkem Alabaster unabhängig von der Verschmutzung und den verwendeten Parametern zu kritischen Temperaturbereichen führt, die deutlich über der für Alabaster relevanten 40-°C-Schwelle liegen. Die zusätzlichen Methoden ermöglichten damit eine eindeutige und visuell nachvollziehbare Dokumentation der maximal erreichten Temperaturen und ergänzten die Ergebnisse der PT100-Messreihen in einem entscheidenden Punkt.

Infrarot-Thermographie

Für die Untersuchung der thermischen Entwicklung während der Laserreinigung wurde die IR-Thermographie eingesetzt, um die Wärmeverteilung auf der Alabasteroberfläche sichtbar zu machen und die Messergebnisse der PT100-Temperaturmessfühler sowie der Temperaturmesstreifen zu ergänzen. Verwendet wurden je eine Platte aus weiß-transparentem und weiß-opakem Alabaster. In die Mitte jeder Platte wurde ein drei mal drei Zentimeter großes Quadratraster eingeritzt, das den exakt zu lasernden Bereich definierte. Die Versuche wurden ohne Verschmutzung durchgeführt, damit ausschließlich das materialabhängige thermische Verhalten bewertet werden konnte.

Im ersten Versuchsansatz wurde das markierte Feld mit allen sechs Laserparametereinstellungen gereinigt. Während des Laservorgangs zeichnete die Wärmebildkamera die Oberflächentemperatur und die Wärmeverteilung auf. Vor, direkt nach dem Lasern und erneut fünf Minuten später wurden thermographische Aufnahmen angefertigt, um die Erwärmung und das anschließende Abkühlverhalten zu dokumentieren. Ergänzend erfolgten Temperaturmessungen mit einem Infrarotthermometer direkt nach dem Lasern sowie einem rückseitig angebrachten Temperaturmessfühler bei 1mm Materialstärke, um die IR-Daten zu unterstützen.

Im zweiten Versuchsansatz wurde die Laserreinigung mit zwei ausgewählten Parametereinstellungen (der wie bei dem Versuch mit den Temperaturmessfühlern schon beschrieben thermisch güstigen und thermisch belastend) in Kombination mit einer Agar-Agar-Gelschicht durchgeführt. Auch hier wurden der Vorzustand, der Zustand nach dem Ge- Auftrag, nach am die Platte auf die Ausgangstemperatur erreicht hat, direkt nach dem Lasern sowie der Zustand fünf Minuten später thermographisch erfasst. Somit konnten die Auswirkungen der thermischen Belastung mit und ohne Gelauflage auf das thermische Verhalten beurteilent werden.

Die IR-Aufnahmen zeigten in allen Versuchen eine deutlich begrenzte, zentrale Erwärmung im gelaserten Feld. Der Hot-Spot blieb klar abgegrenzt und war auch nach fünf Minuten noch sichtbar, während die umliegenden Bereiche deutlich kühler blieben. Damit bestätigte die IR-Thermographie die materialtypisch geringe Wärmeleitfähigkeit des Alabasters und die starke Lokalisierung der eingetragenen Energie.

Die entscheidende Erkenntnis ergab sich im direkten Vergleich zwischen IR-Thermographie und PT100-Messfühlern: Bei weiß transparenten Alabasterart erreichte die Temperatur in 10 mm Materialstärke fast genau jene Werte, die gleichzeitig in der IR-Thermographie an der Oberfläche gemessen wurden. Beim weiß-opaken Alabaster zeigte sich

hingegen eine Abweichung zwischen beiden Messmethoden von bis zu mehreren Kelvin. Aus dieser Beobachtung ließ sich ableiten, dass die thermische Ausbreitung im Material nicht bei beiden Alabastertypen gleich verläuft und dass die Gefüge- und Kristallstruktur einen maßgeblichen Einfluss auf die Wärmeleitung besitzt.

Damit konnte im Rahmen der Untersuchung der folgende materialwissenschaftliche Merksatz bestätigt werden: Je größer die Kristalle, desto transparenter und desto höherr die Wärmeleitfähigkeit. Die IR-Thermographie machte diese Unterschiede deutlich sichtbar und lieferte damit einen wesentlichen Beitrag zur Beurteilung der materialabhängigen Risiken bei der Laserreinigung.

9.6 Fazit

Die Untersuchungen zeigten eindeutig, dass die Laserreinigung von Alabaster stets mit einer thermischen Belastung verbunden ist. Unabhängig von der eingesetzten Messmethode – PT100-Temperaturmessfühler, Temperaturmesstreifen, thermochromes Pigment oder IR-Thermographie – wurden Temperaturanstiege dokumentiert, die in mehreren Fällen den kritischen Bereich über 40 °C überschritten. Besonders deutlich traten diese Temperaturspitzen im oberflächennahen Bereich auf. Die PT100-Messungen belegten, dass bereits bei einer Materialstärke von 2 mm relevante Kelvinanstiege auftreten, während die Untersuchungen an 1 mm starken Platten mit Temperaturmesstreifen bestätigten, dass die tatsächlich erreichten Oberflächentemperaturen noch höher liegen können.

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die thermische Belastung ist die Art der Verschmutzung. Lose aufliegende Verschmutzungen wie Kohle und Lampenruß führten zu geringeren Temperaturanstiegen als fest haftende, rekristallisierte Schmutzkrusten. Letztere absorbierten die Laserenergie deutlich stärker und verursachten die höchsten gemessenen Temperaturen. Natürliche Verschmutzungen zeigten ein ähnliches Verhalten wie künstlich erzeugte Schmutzkrusten. Damit stellt insbesondere die Reinigung von fest gebundenen Verschmutzungen ein erhöhtes thermisches Risiko dar.

Auch die Wahl der Laserparameter erwies sich als entscheidend. Hohe Leistungseinstellungen führten zu schnellen Reinigungsergebnissen, gingen jedoch regelmäßig mit hohen Temperaturanstiegen und einem erhöhten Schadenspotenzial einher. Parameterkombinationen im mittleren Leistungsbereich zeigten vergleichsweise geringere thermische Belastungen bei gleichzeitig akzeptablen Reinigungsergebnissen. Dennoch wurde auch bei diesen Einstellungen der kritische Temperaturbereich nicht zuverlässig unterschritten. Die Untersuchungen zeigen damit, dass es keine vollständig „thermisch unkritische“ Lasereinstellung für Alabaster gibt.

Die Ergebnisse verdeutlichten zudem die sehr geringe Wärmeleitfähigkeit des Alabasters. Die Wärme bleibt während der Laserreinigung lokal begrenzt und bildet ausgeprägte Hot-Spots im Bereich der Laserspur. Die IR-Thermographie zeigte, dass diese Hot-Spots auch mehrere Minuten nach Beendigung des Laserprozesses sichtbar bleiben. Der Vergleich zwischen IR-Thermographie und PT100-Messungen machte deutlich, dass sich die Wärmeausbreitung materialabhängig unterscheidet. Daraus ergab sich der materialbezogene Zusammenhang, dass feinere Kristallstrukturen mit höherer Opazität eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Die Kombination der Laserreinigung mit Agar-Agar-Gel führte zu keiner verlässlichen Reduzierung der thermischen Belastung. Zwar konnten in einzelnen Fällen geringere Temperaturanstiege beobachtet werden, insgesamt zeigte sich jedoch kein reproduzierbarer Effekt. In mehreren Versuchen traten zusätzliche unerwünschte Phänomene wie Blasenbildung auf der Geloberfläche sowie sichtbare Laserspuren auf der Auflagefläche auf. Zudem waren die Reinigungsergebnisse unter der Gelschicht optisch unbefriedigend. Agar-Agar erwies sich daher in diesem Fall nicht als geeignete Methode zur sicheren Reduktion der thermischen Belastung bei der Laserreinigung von Alabaster.

Ein weiteres zentrales Ergebnis betrifft den sogenannten Yellowing-Effekt. Dieser trat ausschließlich bei verschmutzten Oberflächen auf und konnte bei unverschmutztem Alabaster nicht beobachtet werden. Daraus ergibt sich, dass es sich nicht um eine materialbedingte Veränderung des Alabasters handelt, sondern um Rückstände oder Umwandlungsprodukte der Verschmutzungen, die während der Laserreinigung nicht vollständig entfernt werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die Laserreinigung von Alabaster stets mit einer relevanten thermischen Belastung verbunden ist und dass diese Belastung von mehreren miteinander verknüpften Faktoren beeinflusst wird. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich konkrete Ansatzpunkte für weiterführende Untersuchungen, die eine differenziertere Bewertung und gegebenenfalls eine bessere Steuerbarkeit der thermischen Effekte ermöglichen könnten.

Ein zentraler Aspekt zukünftiger Untersuchungen betrifft die Ausgangstemperatur des Objekts. In der vorliegenden Arbeit lag diese bei etwa 22 °C, sodass alle gemessenen Temperaturanstiege auf dieser Ausgangsbasis beruhen. Weitere Forschungsarbeiten könnten untersuchen, wie sich eine gezielte Absenkung der Ausgangstemperatur auf die thermische Entwicklung während der Laserreinigung auswirkt. Dabei wäre zu klären, ob eine Vorkühlung lediglich zu einer Verschiebung der absoluten Temperaturhöchstwerte führt oder ob sie auch Einfluss auf den Kelvinanstieg, die Dauer der Hot-Spot-Bildung sowie das Abkühlverhalten des Materials nimmt. Gleichzeitig müssten mögliche Begleiterscheinungen wie Kondensationsbildung, veränderte Materialspannungen oder Auswirkungen auf bestehende Schädigungen berücksichtigt werden. Eine solche Differenzierung wäre insbesondere für die praktische Anwendung an empfindlichen Alabasterobjekten von Bedeutung.

Obwohl der Auftrag von Agar-Agar-Gel in den durchgeführten Untersuchungen keine verlässliche Reduzierung der thermischen Belastung zeigte und teilweise zusätzliche unerwünschte Effekte auftraten, schließt dies weiterführende Untersuchungen in diesem Bereich nicht grundsätzlich aus. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Ergebnisse von Parametereinstellungen, Materialeigenschaften und Prozessabläufen erscheint es sinnvoll, die Reproduzierbarkeit der beobachteten Effekte unter streng kontrollierten und identischen Versuchsbedingungen zu überprüfen. Ziel weiterer Untersuchungen sollte dabei weniger eine Optimierung der Methode als vielmehr die eindeutige Klärung sein, ob die fehlende temperaturreduzierende Wirkung von Agar-Agar-Gel ein grundsätzliches oder ein kontextabhängiges Ergebnis darstellt.

Da die vorliegende Arbeit auf Untersuchungen mit einem einzelnen Lasersystem basiert, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Lasertypen nur eingeschränkt möglich. Unterschiedliche Lasersysteme unterscheiden sich

unter anderem in Wellenlänge, Pulsenergie, Pulsdauer und Pulsfrequenz, was zu abweichenden thermischen Reaktionsmustern führen kann. Weiterführende Untersuchungen könnten daher prüfen, inwieweit vergleichbare thermische Wirkungen bei unterschiedlichen Lasersystemen durch angepasste Parameter erzielt werden können. Ziel solcher Arbeiten wäre es, systemübergreifende Bezugsgrößen für den Energieeintrag zu identifizieren, um Ergebnisse aus einem Lasersystem nachvollziehbar auf andere Systeme übertragen zu können.

10 Helena Sophie Weßling: Reinigung von Verrußungen auf Holz mittels Lasertechnik: Vergleichende Betrachtung von Parametern auf verschiedenen Beschichtungen und Holzarten

10.1 Einleitung und Problemstellung

Brände führen häufig zu großflächigen Verrußungen an Holzobjekten, die auch ohne direkte Hitzeeinwirkung substanzielle konservatorische Herausforderungen darstellen. Konventionelle wässrige oder mechanische Reinigungsverfahren sind bei Ruß aufgrund seiner chemischen und physikalischen Eigenschaften problematisch: Rußpartikel sind mikrokristalliner Kohlenstoff mit hoher Adsorptionsfähigkeit, geringer Partikelgröße und ausgeprägter Haftung an Oberflächen; zudem können enthaltene Schwefeloxide bei Feuchtezufuhr saure Reaktionen auslösen. Vor diesem Hintergrund rückt die berührungslose Laserreinigung als potenziell schonende Alternative in den Fokus der Holzrestaurierung.

Während die Lasertechnik in der Steinrestaurierung seit den 1970er-Jahren etabliert ist, bestehen für Holzoberflächen – insbesondere mit transparenten Beschichtungen – weiterhin Unsicherheiten hinsichtlich Selektivität, Wärmeentwicklung und möglicher Schädigungen der Beschichtung. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, die Eignung der Laserreinigung zur Entfernung von Verrußungen auf transparentbeschichtetem Holz systematisch zu untersuchen.

10.2 Forschungsstand und theoretische Grundlagen

Der Forschungsstand zur Laserreinigung in der Restaurierung zeigt ein heterogenes Bild. Fallstudien und experimentelle Arbeiten belegen einerseits erfolgreiche Anwendungen auf polychromen Holzoberflächen und unbeschichtetem Holz, weisen andererseits jedoch auf Risiken wie Glanzverluste, Weißtrübungen, Blasenbildung oder partielle Abträge hin. Für transparent beschichtete Oberflächen liegen vergleichsweise keine systematischen Untersuchungen vor.

Theoretisch beruht die Laserreinigung auf der selektiven Absorption der Laserstrahlung durch die zu entfernende Schicht. Trifft ein gepulster Laserstrahl auf eine verrußte Oberfläche, soll der Ruß die Energie absorbieren und in Wärme umwandeln, sodass es zu photothermischen Abtragsprozessen kommt. Idealerweise liegt die Abtragsschwelle des Rußes unter jener der darunterliegenden Beschichtung. In diesem Fall kann der selbstbegrenzende Effekt eintreten: Nach dem Entfernen des Rußes wird die Laserstrahlung von der Beschichtung reflektiert oder nur unzureichend absorbiert, wodurch weitere Schäden vermieden werden.

10.3 Zielsetzung und Fragestellungen

Ziel der Arbeit ist es, zu prüfen, ob verrußte Holzoberflächen mittels Lasertechnik gereinigt werden können, ohne die originale transparente Beschichtung zu beschädigen. Dabei wird ein realistisches Schadensszenario angenommen, bei dem Möbel oder Holzobjekte lediglich Rauch und Ruß, nicht jedoch direkter Brandhitze ausgesetzt waren.
Im Mittelpunkt stehen folgende Fragestellungen:
* Kann Ruß durch Laserstrahlung weitgehend oder vollständig entfernt werden?
* Lassen sich Laserparameter so einstellen, dass die darunterliegende Beschichtung erhalten bleibt?
* Welche Beschichtungen (Öl, Wachs, Schellack) eignen sich für eine Laserreinigung, und bei welchen ist davon abzuraten?
* Zeigen sich Unterschiede zwischen hellen und dunklen Holzarten?

10.4 Material und Methodik

Zur systematischen Untersuchung wurden Probetafeln aus Ahorn (hell) und Nussbaum (dunkel) hergestellt, die jeweils mit einer Öl-, Wachs- oder Schellackpolitur versehen wurden. Die Beschichtungen repräsentieren die Haupt Bindemittelgruppen von historischen Rezepten. Jede Kombination aus Holzart und Beschichtung wurde zweimal ausgeführt, um eine Parameterfindung und anschließende Übertragung auf größere Flächen zu ermöglichen.
Die Verrußung erfolgte durch Auftrag von Lampenruß ohne Bindemittel, um eine realitätsnahe, ungleichmäßige Ablagerung zu simulieren. Die Laserreinigung wurde mit einem diodengepumpten Nd:YAG-Laser (CL50G-BRP) durchgeführt. In mehreren Laserdurchführungen wurden Leistung, Scanfrequenz und Pulsfrequenz variiert, während die Scanbreite konstant gehalten wurde.
Zur Bewertung der Reinigungsergebnisse wurden sieben Kriterien herangezogen: Verbrennungen, Oberflächenrauheit, verbliebener Ruß, Glanzgrad, Abzeichnung der Strahlenbreite, Farbveränderung (gemessen mittels Spektralphotometer) sowie die Dauer des Laservorgangs. Die Ergebnisse wurden qualitativ und semi-quantitativ ausgewertet und zu Mittelwerten zusammengeführt, um vergleichende Aussagen zu ermöglichen.

10.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von Beschichtung und Holzart. Insgesamt konnte auf allen Proben – mit Ausnahme der Kombination Wachs auf Ahorn – ein Reinigungserfolg erzielt werden. Allerdings wurde bei keiner Variante ein vollkommen einwandfreies Ergebnis erreicht; häufig verblieben geringe Rußreste oder es traten Glanzverluste auf.

Ölpolitur:
Auf Ahorn ließen sich gute Reinigungsergebnisse erzielen, jedoch kam es bei hohen Energiedichten vereinzelt zu Verbrennungen des Holzes. Auf Nussbaum traten keine Verbrennungen auf, allerdings verblieben häufiger Rußrückstände. Insgesamt erwies sich Öl als vergleichsweise tolerant gegenüber der Laserbehandlung.

Schellackpolitur:
Schellack zeigte auf beiden Holzarten die besten Gesamtergebnisse. Der Ruß konnte weitgehend entfernt werden, und die Beschichtung blieb größtenteils erhalten. Dennoch traten stellenweise Glanzverluste und leichte Farbveränderungen auf, insbesondere bei der Übertragung der Parameter auf größere Flächen.

Wachspolitur:
Die Ergebnisse waren deutlich problematischer. Auf Nussbaum wurde die Wachsschicht großflächig beschädigt, ohne vollständig abgetragen zu werden. Auf Ahorn führte die Wärmeentwicklung dazu, dass sich der Ruß in das erweichte Wachs einbettete, wodurch eine Reinigung praktisch unmöglich wurde.

Ein zentrales Ergebnis aller Versuchsreihen ist die eingeschränkte Übertragbarkeit optimaler Parameter von kleinen Testflächen auf größere Flächen. Während auf kleinen Feldern häufig gute Ergebnisse erzielt wurden, traten bei der Flächenvergrößerung vermehrt Inhomogenitäten, Glanzverluste und Strichzeichnungen auf. Dies ist auf die Größe der Testflächen der Parameterbestimmung zurückzuführen, da diese zu klein waren, kam es erst bei der Übertragung auf die großen Flächen zu Überlappungen der Laserbahnen.

10.6 Diskussion

Die Untersuchungen bestätigen grundsätzlich das Potenzial der Laserreinigung für verrußte Holzoberflächen mit bestimmten transparenten Beschichtungen. Insbesondere Schellack- und Ölpolituren können unter sorgfältig gewählten Parametern gereinigt werden. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse die Grenzen der Methode.
Die unterschiedliche Eignung der Beschichtungen lässt sich materialbedingt erklären: Wachs reagiert aufgrund seines niedrigen Schmelzpunktes besonders empfindlich auf photothermische Prozesse, wodurch der Ruß nicht abgesprengt, sondern eingebettet wird. Schellack und Öl weisen höhere Abtragsschwellen und günstigere Absorptions-/Reflexionseigenschaften auf, was den selbstbegrenzenden Effekt begünstigt.
Der Einfluss der Holzfarbe zeigte sich weniger eindeutig als erwartet. Zwar reagierten helle Hölzer teilweise schneller auf den Energieeintrag, doch erwiesen sich Beschichtungstyp und Parameterwahl als entscheidender. Kritisch ist zudem die Übertragung auf größere Flächen, die im restauratorischen Alltag jedoch zwingend erforderlich ist. Hier zeigt sich, dass die Laserreinigung ein hohes Maß an Erfahrung, Kontrolle und gegebenenfalls Kombination mit anderen Reinigungsmethoden erfordert.

10.7 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Laserreinigung von Verrußungen auf Holz unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist. Für Schellack- und Ölbeschichtungen kann sie eine sinnvolle, berührungslose Ergänzung bestehender Reinigungsverfahren darstellen. Für eine Anwendung auf wachshaltigen Beschichtungen sind weitere Parameterversuche notwendig.

Die Arbeit zeigt zudem, dass erfolgreiche Parameterfindungen auf kleinen Testflächen nicht ohne Weiteres auf größere Objektflächen übertragbar sind. Für die Praxis bedeutet dies, dass umfangreiche Vorversuche unerlässlich bleiben. Zukünftige Forschung sollte sich verstärkt mit der Kombination von Laserreinigung und nachfolgenden konservatorischen Maßnahmen sowie mit alternativen Wellenlängen und Pulsdauern befassen.

11 Gregor Heinrich: Graffiti auf lackiertem Holz: Möglichkeiten der Entfernung durch Lasertechnik

Abstract

This research project analyzed the effectiveness of laser cleaning for removing graffiti from lacquered wooden surfaces. As part of this study, 711 samples were tested using five different Nd:YAG lasers (wavelength 1064 nm) on variously colored substrates made of alkyd resin and PU-acrylic resin lacquers, as well as six different graffiti paints from three different graffiti brands. The results showed that the cleaning efficiency strongly depends on the color combination and the chemical composition of the different layers. Overall, the study showed that laser cleaning of graffiti on painted surfaces is a technically feasible solution. However, in many cases, gloss loss and surface alterations remained after cleaning. It turned out that the most effective cleaning was achieved with a power of 40-50 watts, a pulse frequency of 130 kHz and a scanning frequency of 180 Hz. The results should provide a basis for identifying possible potentials and challenges for future applications of laser cleaning in the practical use of this technology.

11.1 Einführung

In der Baudenkmalpflege und auch im privaten Bereich kommt es häufiger zu Verschmutzungen durch *Tagging* [1] und Graffiti. Unter der Annahme, dass es sich hierbei nicht um ein zeitgenössisches Kunstwerk handelt, sondern um einen Akt des Vandalismus, der es nötig macht, betroffene Kunstwerke oder Objekte von diesem zu reinigen, wurde im Laufe dieser Masterarbeit die Abnahme von Graffiti auf lackierten Holzträgern mit Hilfe mehrerer Nd:YAG Laser untersucht. Diesbezüglich wurden passende Parameter sowie potenzielle Schwierigkeiten erforscht. Ebenso sollte der Erfolg der Schichtentrennung auf Basis der Möglichkeit einer überwiegend schadensfreien Abnahme der Graffitischicht von der Lackschicht beurteilt werden.



Abbildung 218: Graffiti auf einer Berliner Haustür

11.2 Methodik

Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden Probekörper hergestellt, da Schichtaufbau, Bindemittel und Produkte auf realen Objekten nicht exakt differenzierbar sind. Der Schichtenaufbau erfolgte nach DIN 18363 (Juni 1996) mit deckenden Beschichtungen mittlerer bis hoher Schichtdicke.

Als Untergrundlacke wurden PU-Acrylharz- und Alkydharzfarben mit definierten Glanzwerten verwendet. Zur Prüfung

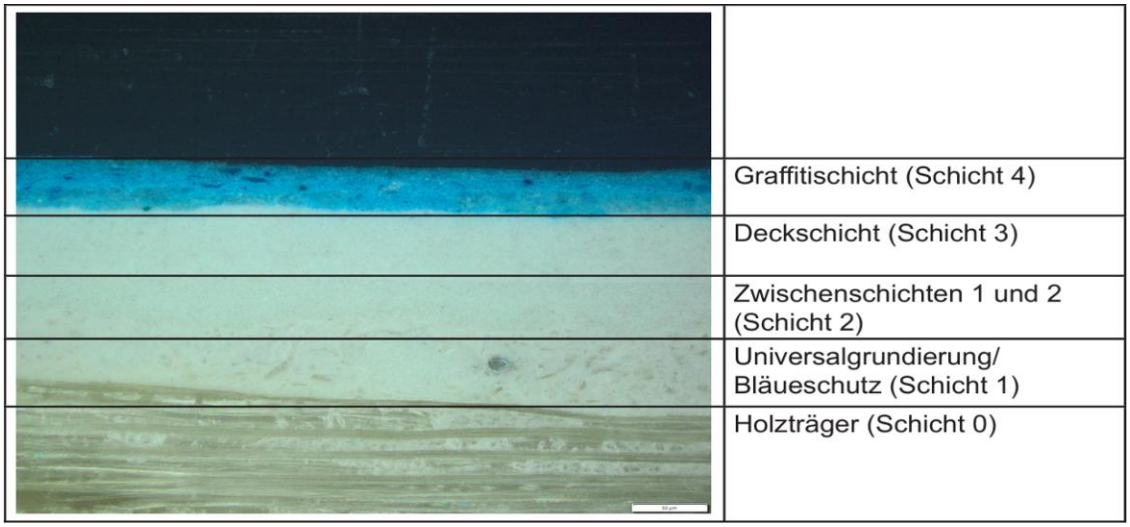


Abbildung 219: Schichtenaufbau nach DIN 18363, Graffiti (Cyan) auf lichtgrauem Alkydharzlack

heller und dunkler Untergründe wurden die Farben Lichtgrau und Moosgrün sowie in späteren Versuchen die Farben Enzianblau und Feuerrot eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Profilleiste aufgeleimt, um ebene und profilierte Flächen zu testen.

Als Graffitifarben wurden Produkte der Marken Molotow™, Montana Cans™ und mtn™ in Cyan, Magenta, Gelb, Schwarz, Weiß sowie Silber (Burner Chrome von Molotow™) verwendet.

Die Untersuchung wurde in 4 verschiedene Phasen eingeteilt. In Phase 1 erfolgte die Schichtenabnahme mit dem Nd:YAG-Laser „cleanLaser lightCASE CL50“ bei 1064 nm unter variablen Leistungs- und Frequenzparametern. (vgl. Abb.3) Die so gewonnenen Ergebnisse wurden optisch untersucht, einschließlich Oberflächenanalyse, Farbwert- und Glanzmessung, UV-Fluoreszenztests, Querschliffanalysen zur Schichtdickenmessung sowie Röntgenfluoreszenzanalyse. In Phase 2 wurden die optimalen Reinigungsparameter aus Phase 1 auf größeren Flächen überprüft und weiter verfeinert.

In Phase 3 und 4 erfolgte die Reproduzierbarkeitsprüfung mit vier weiteren Lasern (Flaser HULK 200-500, Quanta System Thunder Compact, EL.EN. Smart 300 und EL.EN Infinito). Hierfür wurden zusätzliche Proben in Lichtgrau, Moosgrün, Feuerrot und Enzianblau mit PU-Acrylharz- und Alkydharzlacken und aufliegendem Graffiti der Firma Molotow™ hergestellt. Abschließend wurde die Laserabnahme auf unbehandeltem Holz untersucht, um zusätzlich allgemeine Aussagen zur Graffitientfernung auf Holz zu ermöglichen.

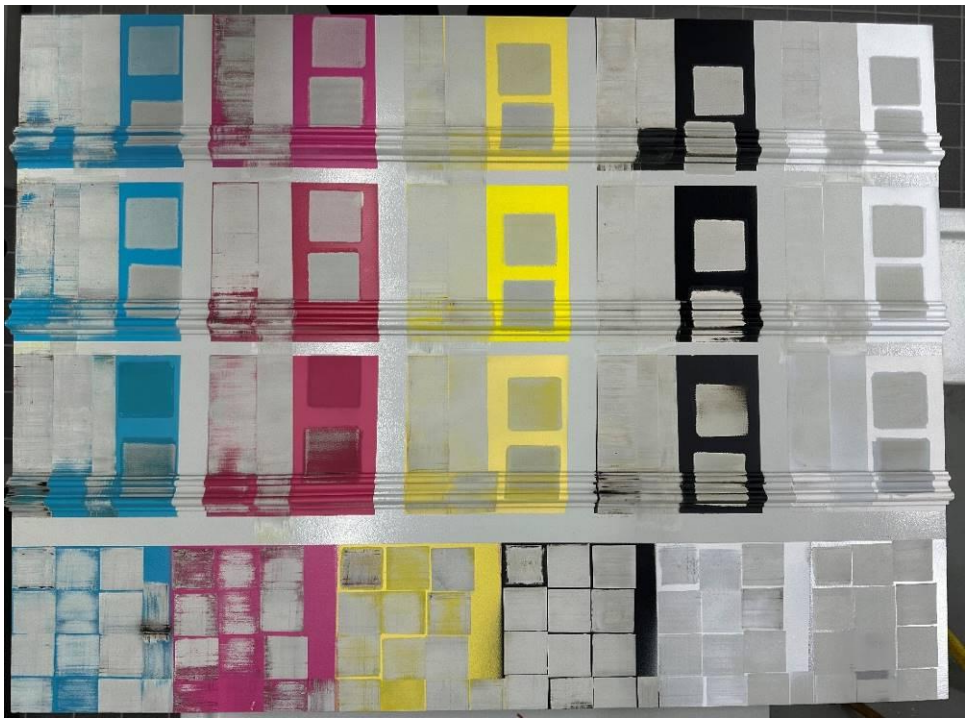


Abbildung 220*: Probeplatte der Phasen 1-3, PU-Acrylharzlack Lichtgrau*



Abbildung 221*: Probeplatte der Phase 4, Alkydharzlack links Feuerrot, rechts Enzianblau, mitte Holzsichtig*

11.3 Ergebnisse /Diskussion der Ergebnisse

Zur Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit kamen verschiedene analytische Methoden zum Einsatz.

Zunächst erfolgte eine optische Oberflächenanalyse mithilfe eines Zeiss Technoskops, bei der die Proben anhand von sechs optisch bewertbaren Kriterien klassifiziert wurden. Ergänzend dazu wurden die Farb- und Glanzwerte mit dem ColorLite sph850 der FHP sowie dem BYK-Gardener Color-Guide Gloss des Fraunhofer-Instituts in Braunschweig bestimmt. Zur genaueren Untersuchung der Materialstruktur wurde eine Schichtdickenmessung mittels Querschliffen durchgeführt. Dabei erfolgte auch eine UV-Fluoreszenzprüfung unter dem Mikroskop. Für die Pigment- und Materialanalyse kam die Röntgenfluoreszenzspektrometrie zum Einsatz. Abschließend wurde ein Wassertropfentest durchgeführt, um die Intaktheit der Oberfläche sowie das Absorptionsvermögen von Wasser vor und nach der Schichtenabnahme zu beurteilen.

Ausgehend von den besten Probenergebnissen mittels Farbwertanalyse der verschiedenen Graffitimarken lässt sich auf die besten angewandten Parameter schließen, die zu diesen Reinigungserfolgen geführt haben. Alle Proben erhielten aufgrund des Glanzwertverlustes nur eine Bewertung von 5, was dennoch einem exzellenten Ergebnis entspricht.

Graffitifarbe	Probe	Leistung	Pulsfrequenz	Scanfrequenz
Molotow™				
Cyan	P2 Probe 3	45 Watt	200 kHz	180 Hz
Magenta	P2 Probe 7	50 Watt	130 kHz	180 Hz
Gelb	P2 Probe 11	50 Watt	130 kHz	180 Hz
Schwarz	P4 Probe 10	0,65J	0.01 kHz	6ns
Weiß	P2 Probe 19	40 Watt	130 kHz	100 Hz
Burner Chrome	P4 Probe 18	50 Watt	200 kHz	180 Hz
Montana Cans™				
Cyan	P2 Probe 24	45 Watt	200 kHz	180 Hz
Magenta	P2 Probe 28	50 Watt	130 kHz	180 Hz
Gelb	P2 Probe 31	40 Watt	130 kHz	180 Hz
Schwarz	P2 Probe 36	15 Watt	130 kHz	180 Hz
Weiß	P2 Probe 40	50 Watt	200 kHz	180 Hz
Montana Colors™				
Cyan	P2 Probe 157	50 Watt	130 kHz	180 Hz
Magenta	P2 Probe 49	50 Watt	130 kHz	180 Hz
Gelb	P2 Probe 53	50 Watt	130 kHz	180 Hz
Schwarz	P2 Probe 58	15 Watt	200 kHz	100 Hz
Weiß	P2 Probe 62	50 Watt	200 kHz	180 Hz

Tabelle 26*: Die besten Proben der verschiedenen Graffitmarken und deren Farben*

Die Untersuchungen indizierten die besten Ergebnisse auf lichtgrauem Alkydharzlack. Insgesamt zeigten folgende Parameter die besten Ergebnisse:

Leistung: 40-50 Watt

Pulsfrequenz: 130/200 kHz

Scanfrequenz: 140-180 Hz

11.3.1 Auswirkungen der Schichtenabnahme auf die Oberfläche

Die Scanbreite betrug 5cm, wobei sich bei jeder Anpassung die Fluenz veränderte. So konnte je nach Lacktyp festgestellt werden, dass auf Alkydharz mit einer niedrigen Fluenz und auf PU-Acrylharz mit einer etwas höheren Fluenz die beste Schichtabnahme erreicht werden konnte.

Obwohl der Materialabtrag bei vielen Proben sehr gut verlief, hatte die Laserabnahme des Graffitis auch einige Auswirkungen auf die untersuchte Lackoberfläche. In der Betrachtung des Glanzwertes wurde sichtbar, dass bei 93% der Proben dieser komplett abgenommen wurde und der Glanzgrad auf eine sehr matte Oberfläche, teilweise mit einem Wert unter 5, reduziert wurde.

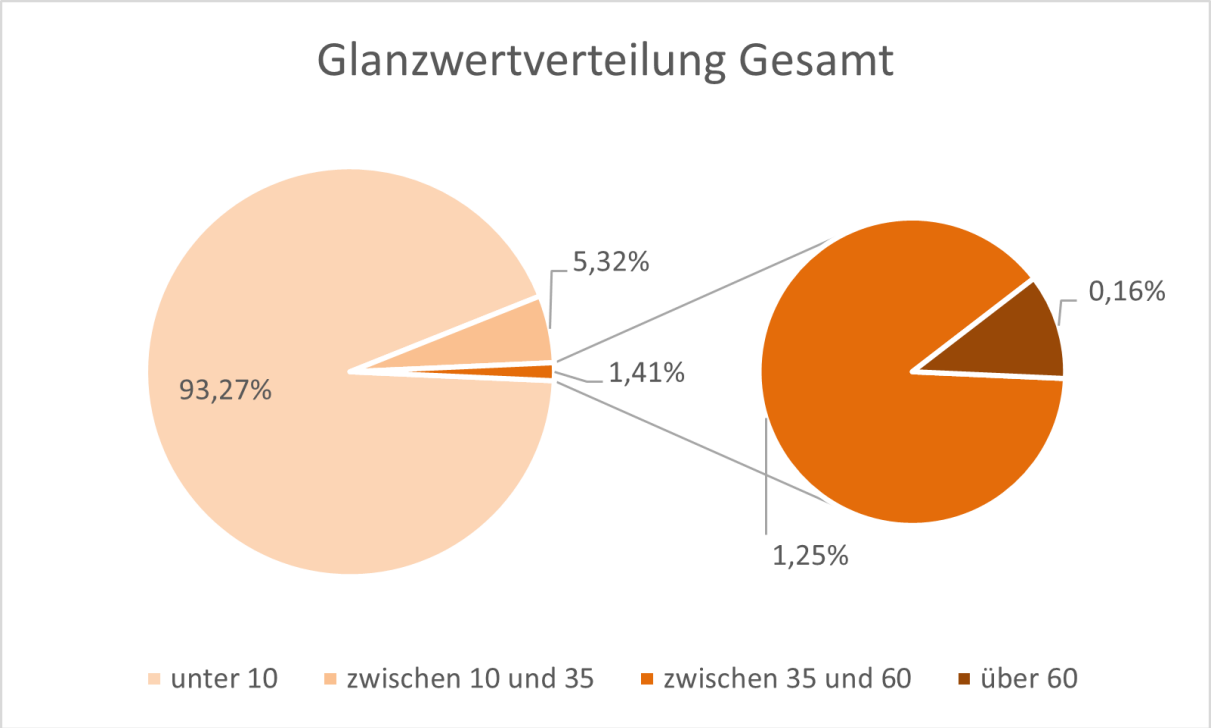


Abbildung 222: Glanzwertverteilung der Proben nach der Schichtenabnahme

Matt = unter 10
Halbmatt = zwischen 10 und 35
Halbglänzend = zwischen 35-60
Glänzend/Hochglänzend = über 60

Ebenso kam es bei 43% der Proben zu sichtbaren Laserspuren, welche dazu führten, dass bei 22% sogar Verbrennungen durch zu extremen Temperaturen entstanden. Dieser hohe Temperatureintrag führte bei 25% der Proben zu einer leichten bis starken Farbveränderung oder Vergilbung der Oberfläche. Zusätzlich wurden bei 58% der Proben auch nach der Reinigung noch Graffitireste festgestellt, welche bei 35% der Proben nur ungleichmäßig abgetragen werden konnten. Positiv hervorzuheben ist jedoch, dass bis auf eine unzureichende Abnahme der Graffitireste bei allen anderen Kriterien der meiste Prozentsatz der Proben zu positiven Ergebnissen geführt hat.

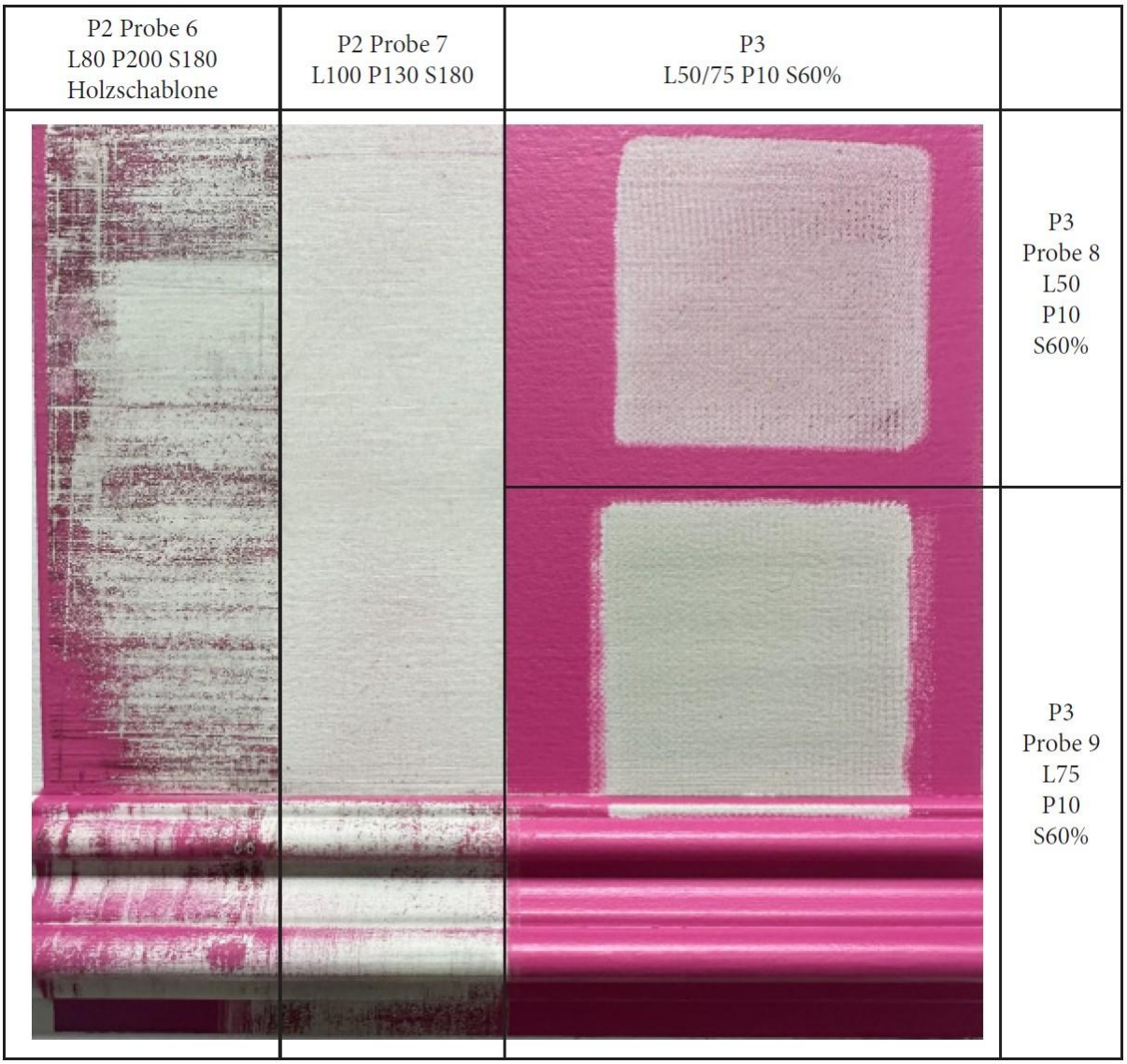


Abbildung 223*: Phase 2 und 3, Molotow Magenta auf PU-Acryllack*

Erhebliche Laserspuren, Graffitiüberreste und Verbrennungen auf der Oberfläche von P2 Probe 6. Im Vergleich dazu deutliche Verbesserung der Schichtenabnahme bei angepassten Parametern bei den Feldern P2 Probe 7 und P3 Probe 9.

11.3.2 Einfluss der Untergrundfarbe und der Graffitifarbe

Durch die erfolgreiche Abnahme auf lichtgrauen Untergründen lässt sich schlussfolgern, dass allgemein auf helleren Untergründen bessere Ergebnisse erzielt werden können, da die Reflektion des Untergrundes den Laserimpuls teilweise zurückwerfen kann und zusätzlich diesen nur geringfügig absorbiert. Dies führt allgemein zu einem besseren Abtrag der aufliegenden Schichten. Auf dunklen Untergründen, in diesem Fall mit den moosgrünen Lacken getestet, ist die Abnahme des Graffitis erschwerter. Letzteres lässt sich vor allem durch die hohe Energieaufnahme der Oberfläche und eine damit einhergehende Überhitzung, Verbrennungen sowie einen ungleichmäßigen Abtrag des Graffitis erklären. Die zusätzlich in Phase 4 untersuchten Untergrundfarben *Feuerrot* und *Enzianblau* zeigten, dass auf rotem Untergrund leicht bessere, jedoch ähnliche Ergebnisse wie auf dem moosgrünen Untergrund erzielt werden, während auf blauen Untergründen eine verhältnismäßig gute Trennung der Schichten vergleichbar zu denen auf lichtgrauem Untergrund zu erreichen war.

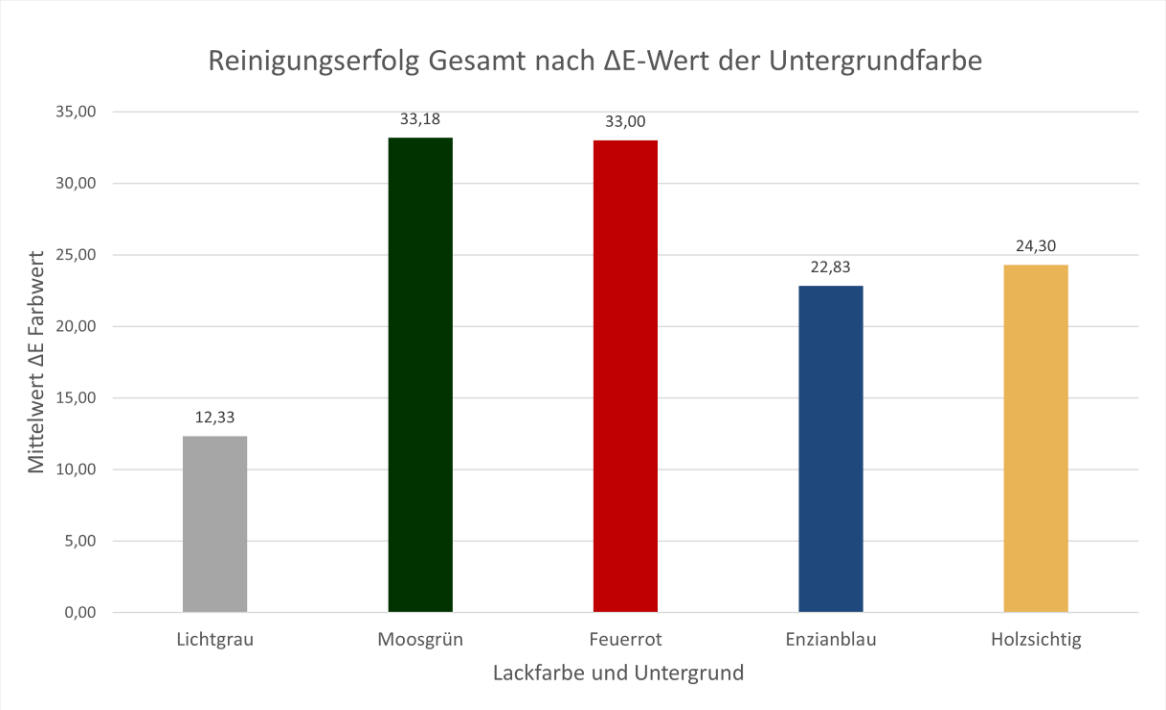


Abbildung 224*: Reinigungserfolg aller Proben nach dem ΔE-Wert auf den verschiedenen Untergründen*

Von den untersuchten Graffitifarben zeigten die Farben *Schwarz* und *Burner Chrome* sehr gute Ergebnisse nach der Laserablation auf allen Untergründen. Ursache ist die hohe Absorption der Laserenergie und das daraus resultierende Verdampfen der Oberflächenschicht und der darin befindlichen Pigmente. Die Farben *Cyan*, *Gelb* und *Weiß* zeigten neben einigen positiven Ausreißern vor allem auf hellen Untergründen gute Ergebnisse, auf dunklen hingegen schlechtere. *Magenta* stellte sich als am schwierigsten zu reinigen heraus, da hier die Wellenlänge des Lasers im Infrarotbereich von der Farbe reflektiert wird und nur unter sehr speziellen Parametern zu einem zufriedenstellenden Ergebnis der Schichtentrennung führt.

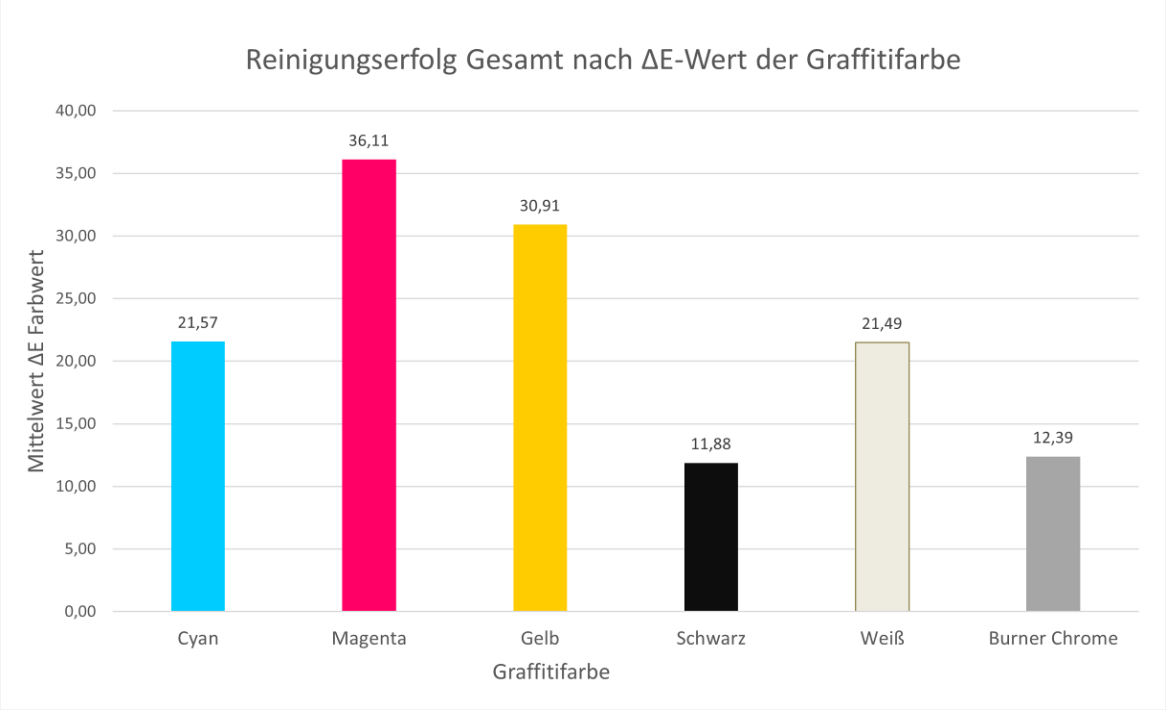


Abbildung 225*: Reinigungserfolg aller Proben nach dem ΔE -Wert der verschiedenen Graffitifarben*

11.3.3 Auswirkung des Lack- und Graffitibindemittels

Stellt man die untersuchten Bindemittel gegenüber, lassen sich einige Unterschiede und Gemeinsamkeiten erkennen. Die Bindemittel lassen sich in drei Basis-Bindemittel unterteilen: Alkydharze, modifizierte Acrylharze und Nitrocellulose. So lässt sich auch in den Untersuchungen erkennen, dass die Abnahme von *mtn*™-Farben, also Farben auf modifizierter Alkydharzbasis, auf Alkydharzlacken sich als am schwierigsten herausstellte. Das aufgebrachte Bindemittel des Graffitis verbindet sich sehr gut mit dem Untergrund, da es nahezu auf gleicher Grundlage basiert, und ist dementsprechend schlechter zu reinigen. Dagegen ist zwar die Haftung auf PU-Acryllack etwas schlechter, Alkydharz jedoch ist in seiner Struktur sehr robust und abriebresistent.[2] Auch das Bindemittel der Firma *Molotow*™*,* hier Nitro-Alkydalharz, müsste diese chemische Affinität haben. Allerdings zeigten die Proben, dass, vermutlich durch die Kombination mit dem Nitrocelluloselack als Zugabe für schnellere Trocknung[3], die Verbindung zum Untergrund nicht so effektiv eingegangen werden konnte, was zu einer guten Schichtenabnahme geführt hat. Ebenso werden Cellulosenitrate, wenn diese als Filmbildner eingesetzt werden, eher spröde und führen

dazu, dass entstehende Filme eine geringere Elastizität gegenüber äußerer Beanspruchung aufweisen.[4] In den Proben auf lichtgrauem Alkydharz konnte dies bestätigt werden, da sich hier durch den Laserimpuls die Graffitischicht direkt bei der Beanspruchung gelöst hat. Mit einem mittleren Reinigungserfolg zeigte sich das Bindemittel Nitro-Acrylharz der Firma *Montana Cans™* sowohl auf Alkydharz als auch auf PU-Acrylharz als resistenter und nur bedingt gut vom Untergrund abzunehmen.

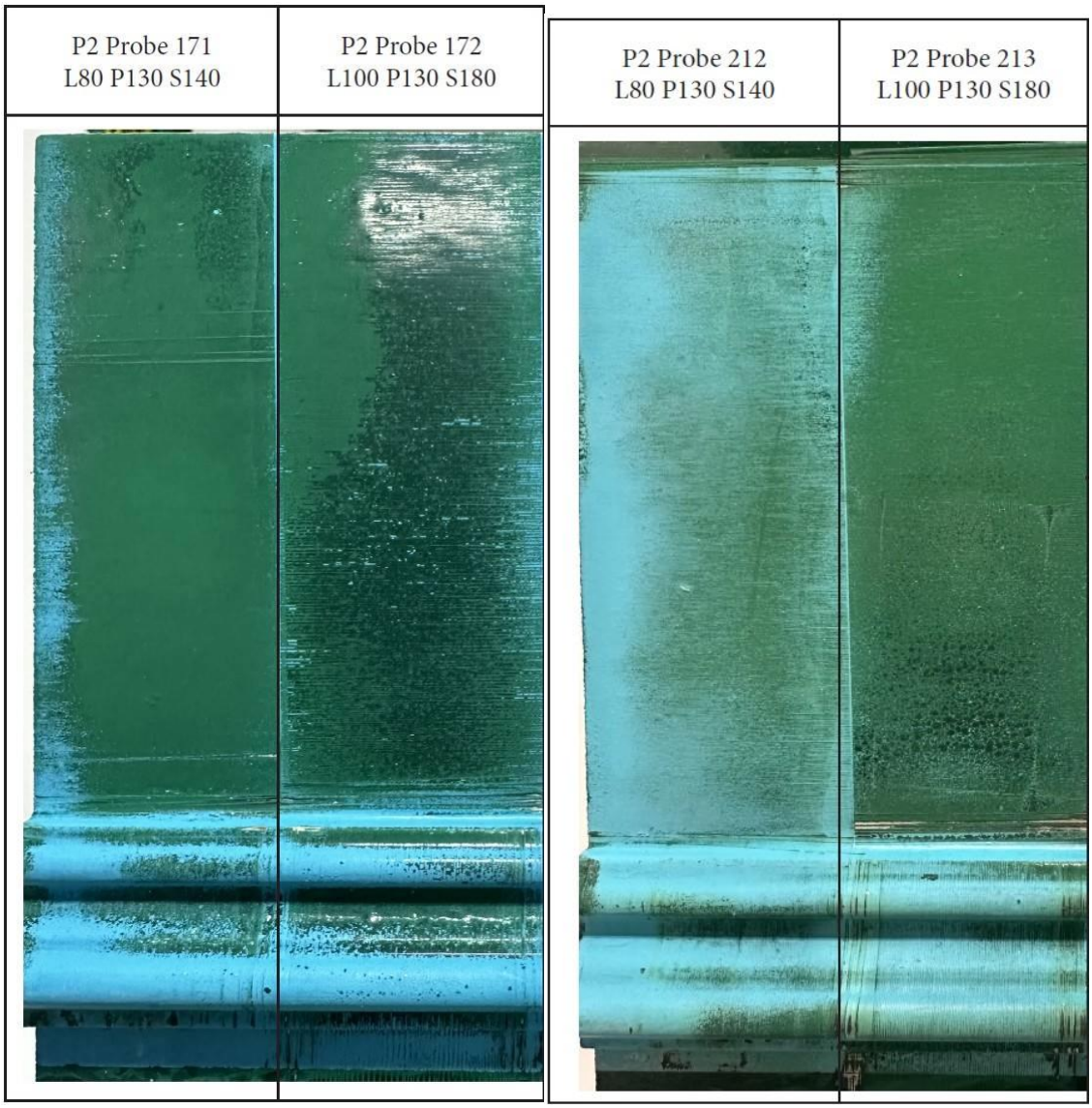


Abbildung 226*: Phase 2, Proben 171 und 172, Molotow™ Cyan auf Alkydharzlack*

Verbesserte Abnahme der Graffitischicht des nitrocellulosehaltigen Bindemittels auf Alkydharzlack.

Abbildung 227: Phase 2, Proben 212 und 213, mtn™ Cyan auf Alkydharzlack

Deutlich erschwerte Abnahme der Graffitischicht bei alkydhaltigen Bindemittel auf Alkydharzlack.

11.3.4 Vergleich optischer und technischer Methoden

Die teilweise ersichtliche Differenz zwischen den besten Proben der optischen Auswertung und der technischen Farbwertanalyse ist auf die Messweise des Farbwertgerätes zurückzuführen. Hier wurde zwar aus mehreren

Datenpunkten ein Durchschnitt ermittelt, der den Farbwert der Probe widerspiegelt, jedoch liegen bei einer erfolgreichen Schichtenabnahme noch weitere Kriterien zur Bewertung zugrunde und müssen differenziert werden. Bei der optischen Betrachtung wurden die Proben auf Grundlage von für die Konservierung und Restaurierung wichtigen Kriterien ausgewertet, was allerdings nur zu einem gewissen Maß geschehen kann. So lässt sich beispielsweise nicht zwischen feinen Farbunterschieden differenzieren oder im Falle des Glanzwertes dieser objektiv bewerten. Zur genauen Analyse müssen optische subjektive Bewertungen zusammen mit präzisen objektiven technischen Methoden kombiniert werden.

Der Einsatz des pXRF[5] zeigte zwar das Vorkommen von Titanoxid als Weißanteil in manchen Farben und bestätigte bei Burner Chrome die in der Querschliffanalyse gefundenen Metallpartikel als Aluminiumspäne, ist jedoch für die Gesamtauswertung nicht weiter vonnöten gewesen.

Anders verhält es sich bei der Querschliffanalyse. Im Rahmen der Masterarbeit stand leider nicht genügend Zeit zur Verfügung, um eine vollständige Analyse mittels Querschliffen durchzuführen. Daraus resultierend konnte nicht detailliert bestimmt werden, wie tief und präzise die angewandten Laser die einzelnen Schichten abnehmen oder zu welchen anderen möglichen Einflüssen der Laserabtrag innerhalb der Schichten und des Untergrundes führen könnte. Die im Paper von A. Dajnowski et al.[6] festgestellte Fluoreszenz des Harzbindemittels des Graffitis konnte unter ultraviolettem Licht nicht bestätigt werden. Dabei wurde dieser Aspekt jedoch nur an vier Graffitiproben der Firma *Molotow™* innerhalb eines Zeitraumes von 4 Monaten getestet. Es wäre also durchaus möglich, dass bei anderen Bindemitteln der Graffitis oder nach einem längeren Testzeitraum eine solche Fluoreszenz auftreten könnte.

11.4 Fazit

Die Untersuchung zur Laserabnahme von Graffiti auf lackierten Oberflächen zeigt, dass diese Methode grundsätzlich sehr effektiv sein kann. Im Vergleich zu traditionellen Reinigungsverfahren wie Trockeneisstrahlen, Sand- oder Hochdruckwasserstrahlen sowie dem Einsatz von Lösemitteln bietet die Laserablation entscheidende Vorteile. Dazu zählen die selektive und kontrollierte Entfernung der Graffitischicht, die Möglichkeit, die Reinigungseinstellungen präzise zu wiederholen, und ein geringer Umwelteinfluss. Besonders vorteilhaft ist die berührungslose Bearbeitung, wodurch der Untergrund nur minimal beschädigt wird.

Die Effektivität der Laserablation hängt maßgeblich von den gewählten Parametern ab. Vor jeder Anwendung sollten Probeflächen getestet werden, um Schäden durch falsche Einstellungen zu vermeiden. Die Farbe des Untergrunds sowie die Bindemittel von Lack und Graffitifarbe sind dabei von zentraler Bedeutung. Die besten Ergebnisse wurden auf lichtgrauem Alkydharzlack erzielt, insbesondere bei den Farben Schwarz und Burner Chrome. Hier ließ sich die Graffitischicht weitgehend entfernen, ohne die Oberfläche stark zu beschädigen. Auch die Farben Cyan, Gelb und Weiß zeigten gute Resultate, allerdings mit leichten Rückständen. Die Farbe Magenta erwies sich als besonders schwierig zu reinigen, da sie die Laserstrahlung stark reflektiert und nur wenig absorbiert. Auf hellen und blauen Untergründen war die Schichtentrennung am effektivsten, während dunkle (Moosgrün) und rote Untergründe problematischer waren. Eine hohe Absorption der Laserenergie führte dort zu thermischen Schäden wie eine Überhitzung der Oberfläche, Verbrennungen und Laserspuren.

Nach der Schichtenabnahme wurde bei fast allen Proben ein deutlicher Verlust des ursprünglichen Glanzgrades festgestellt – dieser sank teilweise um bis zu 96 %. Auf Alkydharzlack konnte der Glanzgrad in Einzelfällen, vor allem bei Weiß und Cyan, teilweise erhalten bleiben, jedoch nicht in ursprünglicher Intensität. Zu hohe Energieeinträge führten insbesondere auf dunklen Untergründen zu Verbrennungen, Laserspuren und Verfärbungen, die jedoch durch die richtige Wahl der Parameter vermieden werden konnten. Die effektivste Abnahme gelang bei einer Leistung von 40–50 Watt, einer Pulsfrequenz von 130 kHz und einer Scanfrequenz von 180 Hz.

Die Bewertung des Anwendungserfolgs erfolgte durch eine Kombination aus technischen Messungen (Farbwertbestimmung, Glanzgradmessung, Schichtdickenanalyse) und optischer Begutachtung. Die Farbwertanalyse des ΔE-Wertes war besonders aussagekräftig für die objektive Bewertung von Farbveränderungen und Erfolg der Schichtentrennung. Die optische Bewertung nach konservatorischen Kriterien war wichtig, um Oberflächenschäden oder strukturelle Veränderungen zu erkennen, die durch technische Messungen allein nicht erfasst werden.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Objekte ist jedoch komplex. Während die Laborbedingungen kontrollierte und reproduzierbare Resultate ermöglichten, konnten äußere Einflussfaktoren wie Witterung, Verschmutzungen, verschiedene Lackschichten und Langzeiteffekte im Rahmen der Arbeit nicht untersucht werden. Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass die Laserabnahme von Graffiti auf lackierten Oberflächen eine technisch realisierbare Lösung darstellt. Die ermittelten Parameter sind ein wichtiger Schritt, um das Potenzial der Laserablation für praktische Anwendungen zu nutzen. Dennoch sind weitere Entwicklungen notwendig, um die Methode flächendeckend und ohne Einschränkungen in der Praxis einsetzen zu können.

11.5 Ausblick

Insgesamt bietet die Laserreinigung großes Potenzial und benötigt weiterhin umfassende Forschung und Optimierung der ermittelten Parameter und Techniken, um zuverlässig im praktischen Einsatz auf historischen Objekten eingesetzt zu werden.

Neben der Erforschung weiterer Lack- und Graffitifarben können noch weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Methodik untersucht werden. Dazu gehört vorrangig Tests unter realistischen Bedingungen durchzuführen. Eine Untersuchung auf realen Objekten und die Wiederherstellung des Glanzgrades wären unabdingbar für künftige Forschungen. Ein potenzielles Resultat könnte dabei eine bessere Anpassung der Farbigkeit an den originalen Untergrund darstellen. Ebenso können mechanisch geführte Lasersysteme häufiger getestet werden, um ein gleichmäßigeres Reinigungsbild erzeugen und Fehler bei der manuellen Laserführung minimieren zu können. Besonders wichtig wäre auch die Untersuchung von Langzeittests zu strukturellen oder chemischen Veränderungen der Lackoberflächen wie beispielsweise unter UV-Bestrahlung oder Tests in einer Klimakammer.

Anmerkungen

[1] Einfarbige, grafisch gestaltete Signaturen-Graffiti, in der Regel nur aus dem Namen oder Pseudonym des Sprühers bestehend, Vgl. (van Treeck, 1998 S. 264)

[2] Vgl. (Prieto, et al., 2007 S. 76)

[3] Vgl. (Prieto, et al., 2007 S. 64)

[4] Vgl. (Prieto, et al., 2007 S. 64)

[5] Portables Röntgen-Fluoreszenz-Spektrometer

[6] Vgl. (Siano, et al., 2022 S. 99-103)

Danksagung

Mein herzlichster Dank gilt meinen zwei Prüferinnen Frau Prof. Dr. Angelika Rauch und Frau Dr. phil. Corinna Grimm-Remus, sowie der Stiftung DBU, der Bauhütte und Restaurierungswerkstätten Naumburg, der Firma SORTO-Bau sowie dem Fraunhofer-Institut Braunschweig und allen weiteren an der Arbeit beteiligten Personen.

Abbildungsnachweis

Abbildungen 1-10: Gregor Heinrich, Berlin/Potsdam

Literatur

Prieto, Jorge und Kiene, Jürgen. 2007. *Holzbeschichtung, Chemie und Praxis.* Hannover : Vincentz-Network, 2007.

Siano, Salvatore und Ciofini, Daniele. 2022. *Lasers in the Conservation of Artworks XIII; Photonic Diagnostics Laser Treatments.* Florence : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2022.

van Treeck, Bernhard. 1998. *Graffiti-Lexikon.* Berlin : Schwarzkopf & Schwarzkopf, 1998.

12 Lale von Baudissin, Nicolai Bach: Das Erstellen der Datenbank LADIS

Ein Bestandteil des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer Datenbank, in der die im Projekt gewonnenen Ergebnisse systematisch erfasst, strukturiert und einsehbar gemacht werden. Das Hauptziel dieser Datenbank besteht darin, einen öffentlich zugänglichen Anwendungskatalog der im Projekt angelegten Probeflächen bereitzustellen. Insbesondere soll sie Anwender*innen und Expert*innen aus der Restaurierung und Denkmalpflege die Möglichkeit eröffnen, sich materialspezifisch über die getesteten Geräte, die verwendeten Geräteeinstellungen sowie die erzielten Reinigungsergebnisse zu informieren.

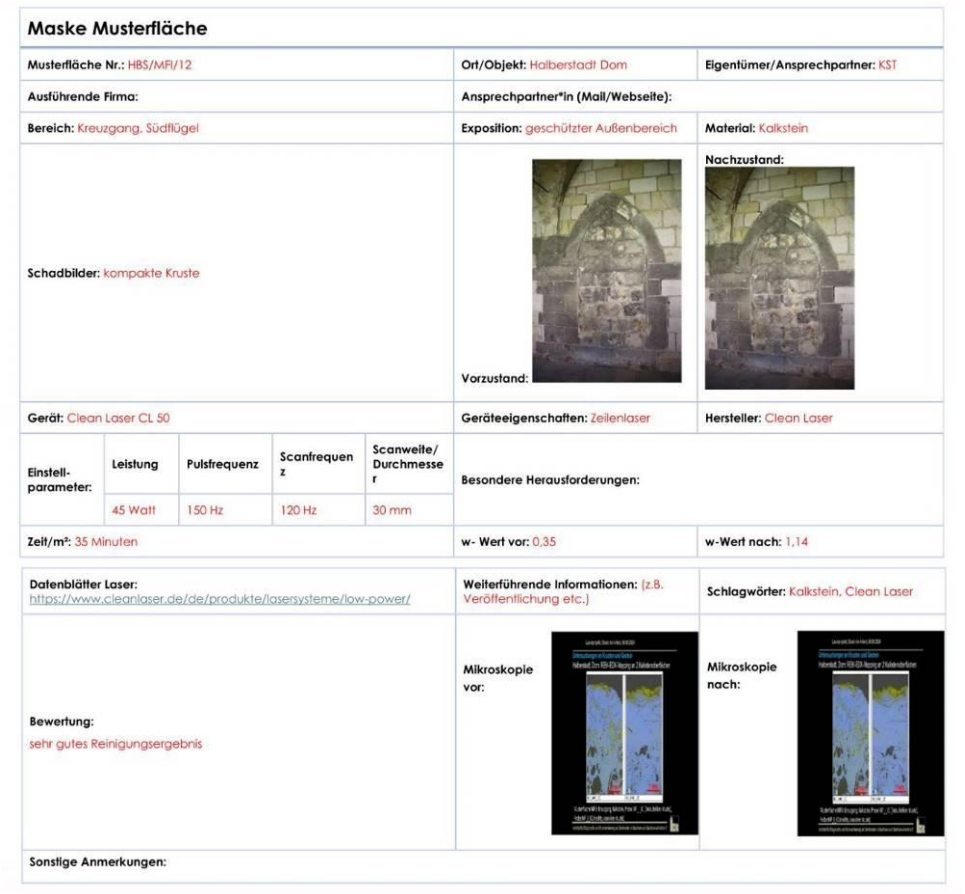
Zu Beginn des Projekts wurde zur Dokumentation der Probeflächen eine einfache Excel-Tabelle angelegt, in die alle damals als relevant erachteten Informationen wie unter anderem der Gerätename, die Einstellungsparameter und Angaben zur Probefläche eingetragen wurden. Aus dieser Tabelle wurde ein Datensatz exemplarisch herausgegriffen und die Grundlage für die spätere Struktur der Datenbank bilden sollte.

Tabelle 27*: Erster Entwurf Beispieldatensatz Laserdatenbank.*

Musterfläche I (Kreuzgang)														
Nr.	Gerät	Linse (in mm)	Leistung (Watt)	Scanbreite (in mm)	Pulsdauer (kHz)	Scanfrequenz (Hz)	Bereich/Größe (cm2)	Nass oder Trocken	Fluenz (in J/cm²)	Zeit (Min)	Anmerkung	w-Wert Vorzustand (in kg/m2 /h 0,5)	w-Wert (in kg/m2 /h 0,5) Nachzustand	Foto Vorzustand	Foto Nachzustand
HBS_I_3.2_1	CL50	150	40	50	97	78	200	T	0,277	<3Min.	sehr ungleichmäßig	1,3	2,4	3.2_1V	3.2_1N

Parallel dazu entstand ein erstes Konzept für eine mögliche Benutzeroberfläche, das sich an der bereits an der Fachhochschule Potsdam etablierten und erfolgreichen Datenbank „Polykon“[16] orientierte.

[16] Fachhochschule Potsdam, FB2 Studiengang „Konservierung und Restaurierung“, FB5 Studiengang „Information und Dokumentation“ 2025.



Maske Musterfläche

Musterfläche Nr.: HBS/MFl/12	**Ort/Objekt:** Halberstadt Dom	**Eigentümer/Ansprechpartner:** KST
Ausführende Firma:	**Ansprechpartner*in (Mail/Webseite):**	
Bereich: Kreuzgang, Südflügel	**Exposition:** geschützter Außenbereich	**Material:** Kalkstein
Schadbilder: kompakte Kruste	**Vorzustand:**	**Nachzustand:**
Gerät: Clean Laser CL 50	**Geräteeigenschaften:** Zeilenlaser	**Hersteller:** Clean Laser

Einstell-parameter:	Leistung	Pulsfrequenz	Scanfrequenz	Scanweite/ Durchmesser
	45 Watt	150 Hz	120 Hz	30 mm

Besondere Herausforderungen:

Zeit/m²: 35 Minuten	**w- Wert vor:** 0,35	**w-Wert nach:** 1,14
Datenblätter Laser: https://www.cleanlaser.de/de/produkte/lasersysteme/low-power/	**Weiterführende Informationen:** (z.B. Veröffentlichung etc.)	**Schlagwörter:** Kalkstein, Clean Laser
Bewertung: sehr gutes Reinigungsergebnis	**Mikroskopie vor:**	**Mikroskopie nach:**
Sonstige Anmerkungen:		

Abbildung 228*: Erster Entwurf beispielhafte Benutzeroberfläche Laserdatenbank.*

Über Prof. Ben Heuwing, Professor für Usability und User Experience an der Fachhochschule Potsdam, konnte ein erster Kontakt zum Fachbereich für Informationswissenschaften FB5 an der Hochschule hergestellt werden. Im Rahmen des Wahlkurses „WB 03 / WD 03 UX für digitale Informationsangebote“, entwickelten die Studierenden Maya Wussow und Yan Heinemann, in enger Abstimmung mit dem Projektteam, erste konkrete Entwürfe für den Aufbau und die Web-Oberfläche und führten mit ausgewählten Proband*innen erste Tests zu User Expereances einer möglichen Oberfläche durch. Konkrete Zielstellungen waren dabei den Prototyp durch Usability-Tests zu validieren, „schwerwiegende“ Usability-Probleme zu identifizieren und zentrale Fragestellungen des Aufbaus zu beantworten wie: „Wird die Facettensuche als solche identifiziert und genutzt oder scannen Nutzende visuell die Tags in der Ergebnisliste?“ oder „Werden alle Facetten vor Scannen der Ergebnisse genutzt oder verändern die dynamischen Suchergebnisse den Aufwand bei der Facettenwahl?“ Die von den Autor*innen erstellten Benutzeroberflächen wurden den fünf User*innen unter anderem für die gute Übersichtlichkeit, die klar erkennbaren Ergebnisse und die Bereitstellung von weiterführender Links gelobt, konstruktive Kritik gab es unter anderem zu der Kennzeichnung von Gerätenamen oder den Aufbau der Einstiegssuchseite.[17]

[17] Wussow, Heinemann 2025.

Die, bei dem User-Experience-Test gewonnen Erkenntnisse dienten wiederum als Grundlage für die spätere technische Umsetzung durch Lehrende und Studierende des Bachelorstudiengangs Informations- und Datenmanagement der Hochschule. Im Modul PD11 – Lab: Konzeptionierung & Entwicklung eines Informationssystems, haben sich im Sommersemester 2025, acht Studierende der Entwicklung der eigentlichen Datenbank angenommen.[18] Das Projekt wurde in die Phasen der Problem- und Informationsbedarfsanalyse sowie der Datenmodellierung (Phase 1), der 2 Datenmigration und –integration (Phase 2) sowie schließlich des softwaregestützten Aufbaus des Anwendungssystems unterteilt (Phase 3).[19]

Bereits in den ersten Treffen zeigte sich, wie unterschiedlich die Begrifflichkeiten und Denkweisen der beteiligten Fachdisziplinen sind. So mussten zunächst grundlegende Begriffe der restauratorischen Praxis – etwa „Fassung“, oder spezifische Schadensbezeichnungen erläutert werden, um sie korrekt in die Systemarchitektur einzubauen und in mögliche Querverbindungen einordnen zu können. Eine systematische Beschreibung der einzelnen Felder und Begriffe innerhalb eines Beispieldatensatzes erleichtertere die Kommunikation.

Gleichzeitig wurde auch auf restauratorischer Seite deutlich, dass bestimmte informatikbezogene Konzepte der Informationswissenschaftler*innen, wie etwa das „Encoding“ eines Datenfeldes, unmittelbare Auswirkungen auf die Gestaltung der Datenerfassung haben. So erforderte dies beispielsweise die präzise Festlegung, ob bestimmte Werte, wie etwa die W-Werte, als ganze Zahlen oder als Dezimalzahlen mit definierter Stellenanzahl gespeichert werden sollen. Auch hier half eine systematische Durcharbeitung der Daten von beiden Seiten und eine wiederholte Anpassung des Beispieldatensatzes dem beidseitigen Verständnis.

Neben inhaltlichen und terminologischen Fragen wurden auch technische und organisatorische Rahmenbedingungen diskutiert: die Wahl eines geeigneten Servers, datenschutzrechtliche Anforderungen, Fragen der Verantwortlichkeit für Inhalte sowie die Definition von Nutzerrechten und Pflegezuständigkeiten. Es besteht ein Anliegen, die Datenbank so zu konzipieren, dass ausgewählte Personen sie auch künftig erweitern und pflegen können. Aktuell liegt die Datenbank auf einem Server der FH Potsdam. Dort soll sie auch vorerst verbleiben. Ziel ist es, das Probeflächen auch zukünftig noch eingepflegt werden können.

Eine weitere zentrale Überlegung betraf die Zielgruppe der Datenbank. Obwohl davon auszugehen ist, dass primär Expert*innen aus dem Bereich der Restaurierung oder Denkmalpflege mit dem System arbeiten werden, stellte sich dennoch die Frage nach der angemessenen sprachlichen und funktionalen Ausrichtung sowie nach potenziellen Suchstrategien unterschiedlicher Nutzer*innen. Besonders relevant ist dabei die Frage, wie Restaurator*innen typischerweise suchen und mit welchen Fragestellungen sie an eine Datenbank herantreten. Es wird sich dabei häufig an Schadensbildern, Materialklassen, spezifischen Gerätenamen oder an Kontextinformationen wie Orten oder beteiligten Personen orientiert. Dies bedeutete für die Entwickler*innen, dass Suchfunktionen nicht nur auf formalen Metadaten, sondern auch auf Schlagworten, Querverweisen und semantischen Verknüpfungen beruhen müssen. Beispielhafte Suchanfragen können z. B. folgende sein: „*Ich erstelle eine Ausschreibung und muss Maßnahmen festlegen. Welche Gräte kommen in Frage und mit welchen Grundeinstellungen sollen Probeflächen*

[18] Für dieses Modul verantwortliche Dozierende waren Frau Dr. Elena Semenova, Herr Prof. Dr. Günther Neher und Prof. Dr. Rolf Däßler.
[19] Bach, Wussow, Graf, Kisa, Möckel, Neufeld, Schendel, Widmann 2025, S. 1f.

angelegt werden?“ oder *„Ich habe schwarze Krusten/Verschwärzungen auf einem Elbsandstein, wurde da ein bestimmtes Modell schonmal erfolgreich für genutzt? Gibt es bereits Erfahrungen mit einem Laser auf diesem Material?“* Die einzelnen Fragenstellungen wurden auf ihrer Beantwortbarkeit hin kontrolliert und darüber diskutiert, inwieweit weitere Angaben zu den Probeflächen gegeben werden müssen. Ein konkretes Beispiel ist hier:
“*Wir haben die und die Schäden, da gab es doch schonmal ein Projekt in XY, bei dem sie die gleichen Schäden hatten, was haben sie da genutzt?”*

- Tabellen “process” (Reinigungsvorgang), “device” (Gerät), “partial_surface” (Teilfläche), “condition” (Zustand) und “damage_pattern” (Schadbild) für Anfrage verknüpft
- Unklarheit bzgl. “Schäden. […]
- Entitätsmenge “damage_pattern” soll nach unserer Kenntnis im erneuerten Datenmodell in Tabellen mit Bezeichner-Attributen für “Verschmutzung” und “(physischer) Schaden” aufgeteilt werden
- Interpretation der Anfrage: Auflistung der Geräte, welche bei einem Reinigungsvorgang mit einem bestimmten (hier unbekannten) Verschmutzungs- / Schadensbild benutzt wurden[20]

Aus dieser Fragestellung ergab sich eine systematische Erfassung der aktuell im Projekt vorkommenden Schadbilder und Materialien, die jedoch offen für weitere Ergänzungen sind.

Tabelle 28*: Auflistung der Materialien von Träger und Fassung/Beschichtung innerhalb des Forschungsprojektes*

Material	**Fassung/Beschichtung**
Naturstein	
Kalkstein (Halberstädter Muschelkalk)	Keine
Alabaster	Keine
Sandstein	
Holz	
Sperrholzplatte (Birkenholz/Kiefernholz)	PU-Acrylharzlack (OBI PU Buntlack)
Sperrholzplatte (Birkenholz/Kiefernholz)	Alkydharzlack (swingcolor Kunstharz Buntlack)
Ahorn	Öl
Ahorn	Schellack
Ahorn	Wachs
Nussbaum	Öl
Nussbaum	Schellack
Nussbaum	Wachs
Metall	

[20] Neufeld, Schendel 2025, S. 5.

Eisen	Ölvergoldung

Tabelle 29*: Auflistung der Schadbilder innerhalb des Forschungsprojektes.*

Verschmutzung/zu entfernende Schicht
Naturstein
Kruste
Lampenruß
Kohleverschmutzung
Staubauflagerung
Biogener Bewuchs
Holz
Ruß
Graffiti (Montana Cans™ - Nitro-Acrylharzlack),
Graffiti (Montana Colors™ (MTN)™ - modifizierter Alkydharzlack)
Graffiti (Molotow™ Nitro-Alkydalharzlack)
Metall
Korrosionsprodukte

Neben der Auflistung mussten, stellten sich auch Fragen bezüglich einer Bewertung von Reinigungserfolgen:
„Welche Einstellungen bezüglich der Leistung und der Pulsdauer könnten sich für die Reinigung eine Farbfassung eignen?”

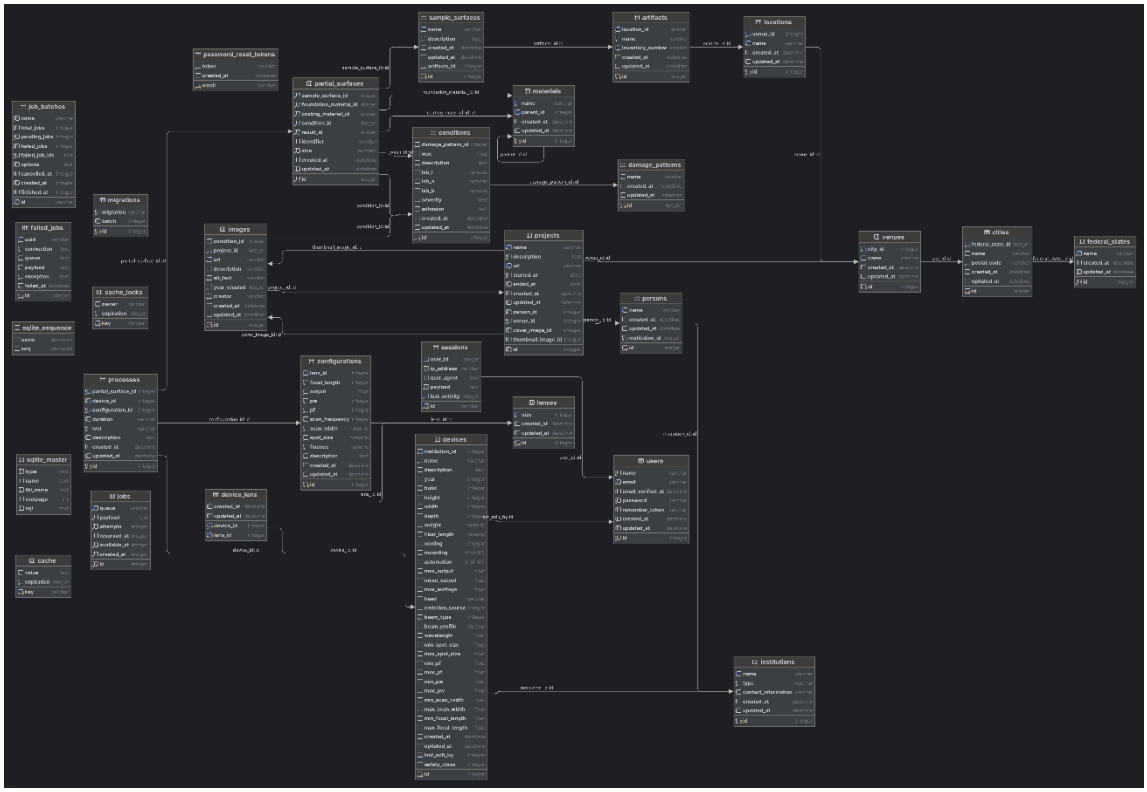
- Tabellen “process” (Reinigungsvorgang), “configuration” (Gerätekonfiguration), “partial_surface” (Teilfläche), “material” (Material) werden für Anfrage verknüpft
- Interpretation der Anfrage: Welche Geräte mit welchen Leistungs- und Pulsdauer-Einstellungen wurden in Reinigungsvorgängen auf eine Farbfassung benutzt?
- “Eignung” / “Erfolg” im aktuellen Datenmodell nur subjektiv aus Zustandsattributen (Vor- / Nachzustand) ableitbar (z.B. w-Wert)
- Verlinkung von Bildern der Entitätsmenge “image” (Bild) pro Zustand möglich [21]

Um diese Fragen beantworten zu können, musste ein Bewertungssystem bezüglich der einzelnen Probeflächen mit in die Datensätze einfließen. Somit werden Probeflächen hinsichtlich z.B. Reinigungserfolg, Bearbeitungsqualität und Prozessdauer mit einem einfachen Schulnotensystem von 1 bis 6 bewertet. Zusätzlich lassen Freitextfelder die Option zu weiteren Anmerkungen bezüglich des Reinigungserfolges. Bei den Abschlussarbeiten, die in dem Forschungsprojekt integriert waren, wurden jeweils eigene Kriterien zur Bewertung des Reinigungserfolges definiert,

[21] Neufeld, Schendel 2025, S. 3.

ebenso wie bei der Erstellung der Probeflächen in Halberstadt, Halle und Magdeburg.[22] Diese Bewertungen dienen ausschließlich der Dokumentation und dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn und sind nicht als Handlungsanweisungen zu verstehen. Insbesondere sollen daraus keine Empfehlungen für konkrete Reinigungsverfahren oder Geräteeinstellungen abgeleitet werden, um eine unsachgemäße Anwendung durch nicht qualifiziertes Personal und die Umgehung fachlicher Expertise zu vermeiden. Zudem können aus den dargestellten Ergebnissen keine Haftungsansprüche abgeleitet werden; sie stellen kontextspezifische Erfahrungswerte an den einzelnen Objekten dar, die ohne fachkundige Prüfung nicht auf andere Objekte übertragbar sind.

Für die Entwicklung des Informationssystems wurde zunächst ein konzeptionelles Entity-Relationship-Modell (ERM) erstellt, das die wichtigsten Datenobjekte, ihre Eigenschaften und ihre Beziehungen beschreibt. Dieses Modell bildete die Grundlage für das relationale SQL-Datenbankschema, in dem die Objekte als Tabellen, ihre Eigenschaften als Spalten und ihre Verknüpfungen über Fremdschlüssel umgesetzt wurden. Die Modellierung erfolgte schrittweise und orientierte sich an den definierten Anforderungen. Besonders wichtig waren dabei die sinnvolle Strukturierung der Messdaten und Geräteparameter sowie die Abwägung zwischen einfacher Dateneingabe und hoher Datenqualität. Für das Datenbankschema wurden geeignete Datentypen festgelegt, um eine effiziente und konsistente Speicherung zu gewährleisten, und das Modell wurde normalisiert, um Redundanzen zu vermeiden und die Datenintegrität sicherzustellen. So eignen sich etwa FLOAT oder DECIMAL für numerische Messwerte, während Textinformationen sinnvoller als VARCHAR oder TEXT gespeichert werden.[23]



[22] Vgl. Heinrich 2025; Láposi 2024; Weßling 2025.
[23] Bach, Wussow 2025.

Abbildung 229*: Zwischenstand des Datenmodells als EER (Enhanced Entity-Relationship-Modell, eine erweiterte Form des ERM) in MySQLWorkbench. Quelle: Bach, von Baudissin 2025.*

Für die Modellierung der Geräteparameter wurde zunächst das Entity–Attribute–Value-(EAV-) Modell geprüft, da es eine hohe Flexibilität bei variablen Attributen bietet. Die Analyse von Beispieldaten und Gerätehandbüchern zeigte jedoch, dass die Einstellungsparameter der Hersteller uneinheitlich benannt sind und sich je nach Gerätetyp deutlich unterscheiden. In Verbindung mit der erhöhten Abfragekomplexität und möglichen Performanceproblemen führte dies zur Entscheidung für ein vereinheitlichtes, normalisiertes Datenmodell, in dem alle Geräte innerhalb einer gemeinsamen Entitätsstruktur erfasst werden. Dabei wurden zentrale Regeln zur Datenintegrität festgelegt, etwa eindeutige Werte (UNIQUE), zulässige Sicherheitsmechanismen (CHECK) und Einschränkungen (CONSTRAINT), Beziehungskardinalitäten sowie Indizes zur Optimierung häufig genutzter Abfragen.

Auch die Frage, ob Orts- und Geodaten intern gespeichert oder über externe Dienste eingebunden werden sollten, wurde intensiv diskutiert. Trotz der Vorteile externer Datenquellen, wie Aktualität und Zusatzfunktionen von einzelnen Anbietern, wurde dieser Ansatz aufgrund des zusätzlichen Aufwands, möglicher Performanceeinbußen und der Abhängigkeit von externen Diensten verworfen.

In einer weiteren Projektphase wurden die Datentypen und Encodings detailliert ausgearbeitet. Leistungswerte wurden als FLOAT gespeichert, präzisere physikalische Messgrößen als DECIMAL, während ganzzahlige Parameter wie Pulsfrequenz und Pulsdauer als SMALLINT umgesetzt wurden. Kategorien wie Strahltypen erhielten eine numerische Kodierung zur Sicherstellung von Konsistenz und Erweiterbarkeit. Genaue und gültige Wertebereiche wurden außerdem definiert, sowie festgelegt, was Pflichtangaben sind (NOT NULL). Für Linsengrößen wurden eindeutige Werte durch UNIQUE-Constraints abgesichert, und für komplexe Gerätekonfigurationen wurden TEXT-Felder vorgesehen, um qualitative Beschreibungen angemessen abbilden zu können.[24]

[24] Bach, Wussow, Graf, Kisa, Möckel, Neufeld, Schendel, Widmann 2025.

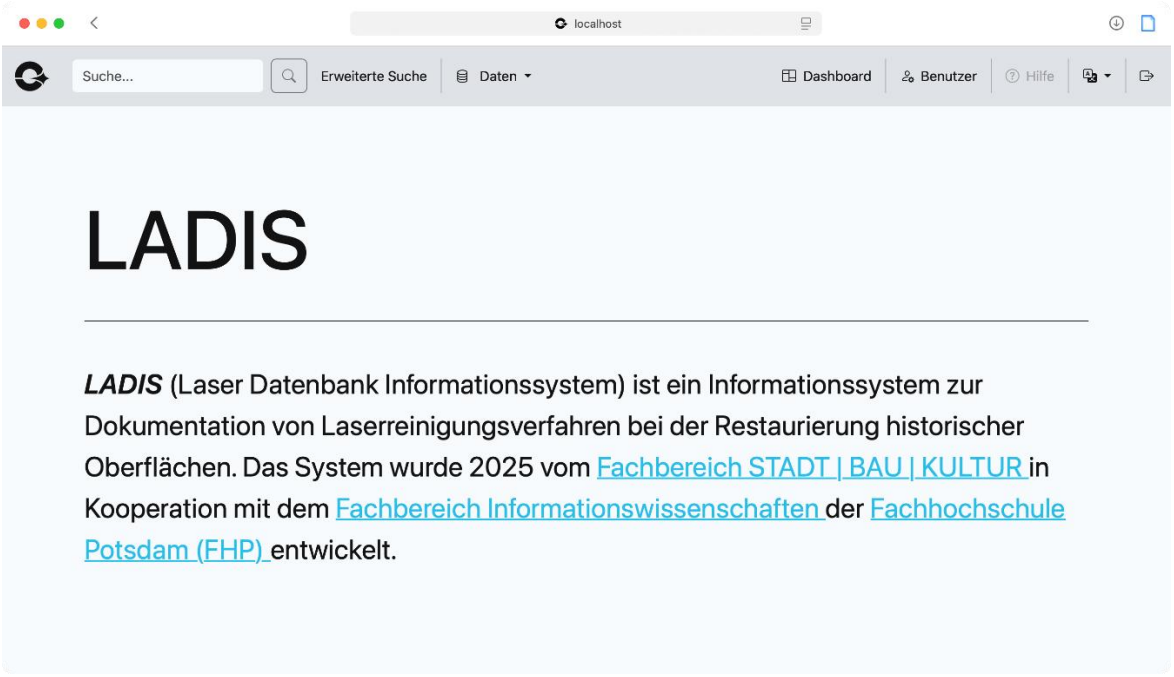


Abbildung 230*: Oberfläche Webauftritt Laserdatenbank. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.*

Als Ergebnis dieses interdisziplinären Entwicklungsprozesses entstand schließlich die Datenbank **LADIS – Laser Datenbank Informationssystem**, die eine strukturierte, nutzungsorientierte und erweiterbare Grundlage für die Dokumentation und Auswertung laserbasierter Reinigungsversuche bieten soll (Abbildung 230).[25]

„LADIS wird als Open-Source-Software entwickelt und unter der GPLv3-Lizenz veröffentlicht. Der Quellcode ist öffentlich zugänglich und auf GitHub versioniert, wodurch Transparenz, Nachnutzbarkeit und eine potenzielle Beteiligung externer Entwickler:innen gewährleistet sind. Die Offenheit des Projekts ist bewusst gewählt, um eine langfristige Weiterentwicklung im Kontext des Forschungsdatenmanagements zu ermöglichen.

Die Codebasis folgt etablierten Konventionen moderner Webanwendungen. Zentrale Bestandteile wie serverseitige Anwendungslogik, Benutzeroberfläche, Datenbankdefinitionen und automatisierte Tests sind logisch voneinander getrennt. Technisch basiert die Anwendung auf dem Webframework Laravel (PHP). Laravel unterstützt das Model-View-Controller-Muster (MVC) und stellt bewährte Mechanismen für die Anwendungsarchitektur, die Abbildung von CRUD-Operationen (Create, Read, Update, Delete) sowie für Datenbankmigrationen bereit. Dadurch lassen sich Änderungen am Datenmodell kontrolliert versionieren und konsistent umsetzen. Das Framework ist zudem datenbankagnostisch konzipiert und unterstützt verschiedene relationale Datenbanksysteme. Die Benutzeroberfläche wird mit Bootstrap umgesetzt, das eine einheitliche und responsive Darstellung auf unterschiedlichen Endgeräten erleichtert.

Ein zentraler Schwerpunkt der bisherigen Entwicklungsarbeit lag auf der vollständigen Implementierung des Datenmodells. Dieses berücksichtigt fachliche Abhängigkeiten, relationale Integritätsbedingungen sowie die detaillierte Spezifikation der Datentypen. Die saubere Modellierung des Datenbestands stellt einen wesentlichen

[25] Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.

Meilenstein dar, da sie die Voraussetzung für jede weitere funktionale, analytische oder nutzerorientierte Erweiterung der Anwendung bildet. (In diesem Sinne erfüllt das Datenmodell die im Projektantrag formulierte Anforderung einer "Datenbank" in substanzieller Weise.)

Begleitend zur Implementierung wurden grundlegende Software-Engineering-Praktiken etabliert. Dazu zählen eine projektbegleitende technische Dokumentation, klar definierte Entwicklungsworkflows sowie automatisierte Tests und Integrationsprozesse. Die Dokumentation umfasst neben einer zentralen Projektbeschreibung auch weiterführende Erläuterungen zu Datenmodell, Entwicklungsentscheidungen und Arbeitsabläufen. Ziel ist es, die Nachvollziehbarkeit der Entwicklung sicherzustellen und die Anschlussfähigkeit für zukünftige Bearbeitungen zu erhöhen.

Zur Unterstützung der Zusammenarbeit werden standardisierte Prozesse für die Einbringung von Codeänderungen und die Diskussion technischer Fragen genutzt. Diese orientieren sich an etablierten Open-Source-Praktiken und fördern eine strukturierte, transparente und qualitätsgesicherte Weiterentwicklung. Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsarbeit ist die Qualitätssicherung. Zentrale Komponenten der Anwendung werden durch automatisierte Tests überprüft, die in kontinuierliche Integrationsprozesse eingebunden sind. Diese Prozesse stellen sicher, dass Änderungen am Code reproduzierbar geprüft werden und technische Inkonsistenzen frühzeitig erkannt werden. Ergänzend werden automatisierte Abläufe für die Bereitstellung der Anwendung im VPN der FH Potsdam eingesetzt. Diese Kombination aus Tests und Integrationsmechanismen bildet eine wichtige Grundlage für Stabilität und langfristigen Betrieb.

Im momentanen Entwicklungsstadium (Version 0.3.0) bildet LADIS eine solide softwaretechnische Grundlage für weitere Entwicklungen. Der aktuelle Funktionsumfang der Anwendung ist bewusst als prototypisch einzuordnen. Auf Basis des implementierten Datenmodells stehen grundlegende Verwaltungs- und Suchfunktionen sowie eine einfache Benutzerverwaltung zur Verfügung. Weitergehende Funktionalitäten des Forschungsdatenmanagements, eine ausgearbeitete Benutzerführung (UI/UX) sowie erweiterte Analyse- und Exportmöglichkeiten sind bislang nicht umgesetzt und bleiben zukünftigen Entwicklungsschritten vorbehalten. Auf dieser Grundlage wird das Projekt derzeit in reduziertem Umfang aber kontinuierlich von zwei Beteiligten aus dem ursprünglichen studentischen Team weitergeführt.“[26]

Die Eingabe von neuen Daten erfolgt, wie zu Anfang festgelegt nur im angelemdeten Modus. Somit können nur ausgewählte Personen zusätzliche, geprüfte Daten hinzufügen (s. Abbildung 231).

[26] Bach 2025.

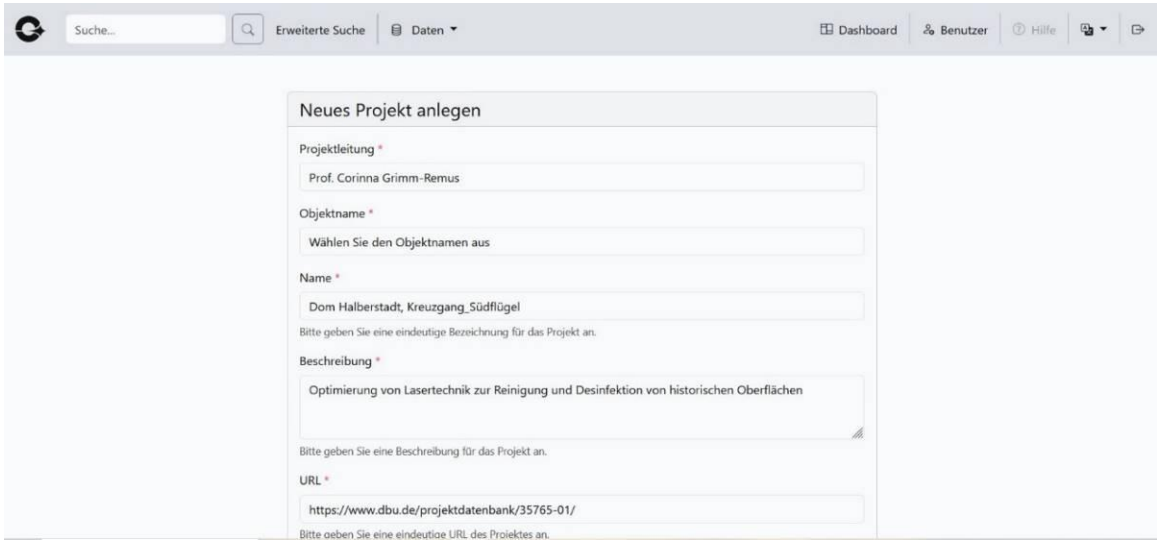


Abbildung 231*: Eingabemaske zur Projektanlegung. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.*

Die Eingabemaske für die Einzelnen Datensätze bietet dabei bereits eine Reihe von möglichen Eingabemöglichkeiten. Durch die Verknüpfung einzelner Felder (Übersicht s. Abbildung 229), werden neu angelegte Daten direkt übernommen und als Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung gestellt. Ein neu angelegter Ort, kann somit z. B. direkt mit einem Projekt verbunden werden, eine Person direkt mit einer Institution. Die Datenaufbereitung innerhalb des Forschungsprojektes ist bereits soweit angepasst worden, dass ein einfacher Transfer der Daten in die Datenbankstruktur gegeben ist.



Abbildung 234*: Suchmöglichkeiten der User*innen. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.*

Abbildung 234). Die spezifischen Suchparameter sind hierbei an die Abbildung 233 Suchgewohnheiten von Restaurator*innen und Expert*innen aus Fachverwandten Bereichen ausgelegt. So kann nach Bundesland, nach Projektname, nach der Projektleitung, nach Institutionen (Projektleitungen, Mitwirkende und Firmen), spezifischen Geräten und dem Trägermaterial gesucht werden.

Außerdem kann oben ober die Datensuche direkt auf einzelne Daten zugegriffen werden (s. *Abbildung 232*).

Nach der Suche gelangen die Unser*innen auf die jeweiligen Datensätze (s. Abbildung 235 und Abbildung 236).

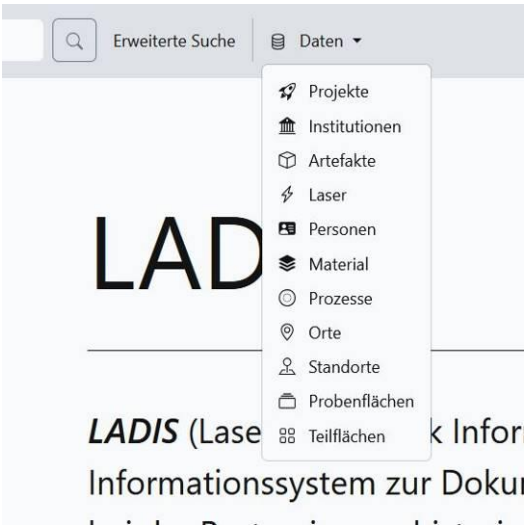


Abbildung 232: Direkte Dateiensuche. Quelle: Fachhochschule Potsdam, FB5 Informationswissenschaften 2025.

Die Suche von User*innen kann entweder über die Schlagwortsuche erfolgen oder aber über die Erweiterte Suche konkretisiert werden (s. Abbildung 233

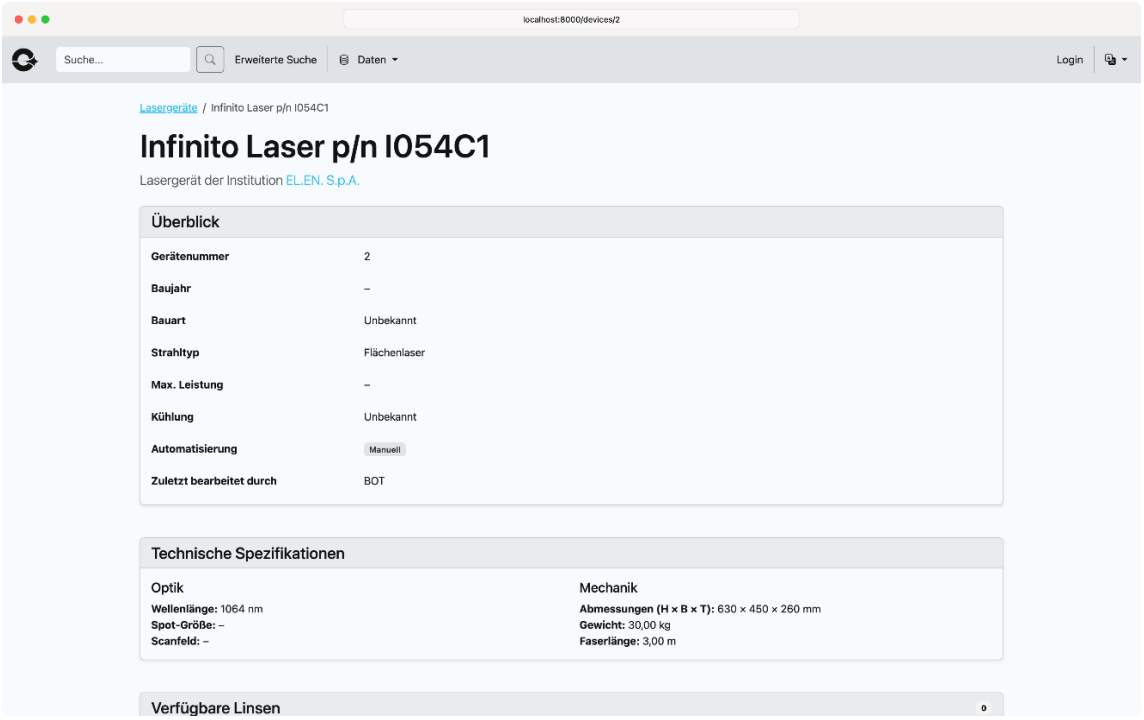


Abbildung 235*: Beispielhafte Anzeige für den Infinito Laser (Abbildung aufgenommen während des Arbeitsprozesses). Quelle: Nicolai Bach 2025*

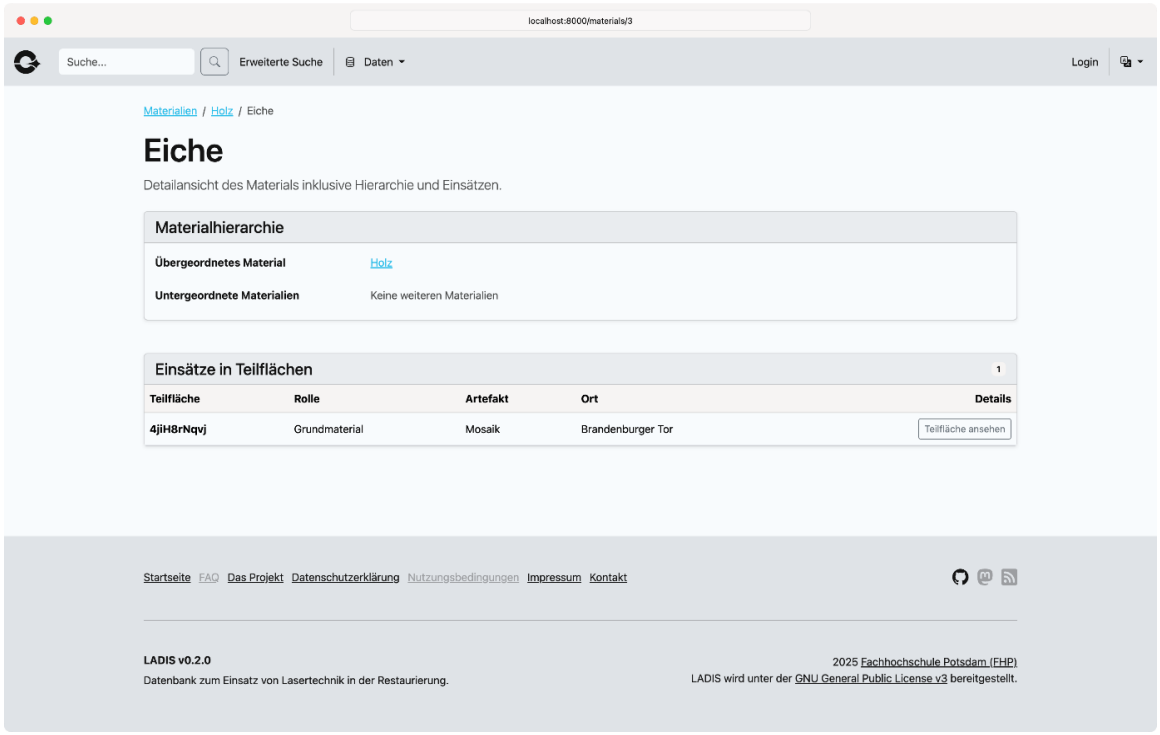


Abbildung 236*: Materialansicht Eiche. Quelle: Bach 2025.*

Im Zuge des Moduls PD11 – Lab: Konzeptionierung & Entwicklung eines Informationssystems im Sommersemester 2025 an der FHP konnte die Datenbank nicht abschließend konzipiert werden. Die zwei Studenten Nicolai Bach und Holger Ermann aus dem Fachbereich beschäftigten sich jedoch auf über den Kurs hinaus mit der Weiterentwicklung der Datenbank. Dank ihnen konnte das Grundgerüst so weit abgeschlossen werden, dass die Strukturen für die Daten weitestgehend geschaffen sind. Trotz deren Bemühungen, sind noch immer kleine Fehler in den Datenstrukturen, sodass die vorliegenden Daten nicht abschließend in die Datenbank eingepflegt werden können.

Quellen:

BACH, Nicolai, 2025. LADIS Softwareprojekt [E-Mail]. 14.12.2025, 21:05:00

BACH, Nicolai und Lale VON BAUDISSIN, 2025. Von der Erstellung einer Datenbank. Vortrag Abschlusskolloquium DBU-Forschungsprojekt „Optimierung von Lasertechnik zur Reinigung und Desinfektion von historischen Oberflächen“. Fachhochschule Potsdam. 20 November 2025

BACH, Nicolai und Maya WUSSOW, 2025. *Modell-Entwurf*. Unveröffentlichte Prüfungsleistung. Potsdam: Fachhochschule Potsdam. PD11_SoSe24_Dokumentation_Teil1

BACH, Nicolai, Maya WUSSOW, Michael GRAF, Helin KISA, Caronline MÖCKEL, Artur NEUFELD, Maria SCHENDEL und Paula Charlotte WIDMANN, 2025. *PD11 Lab: Konzeptionierung & Entwicklung eines Informationssystems - Portfolioprüfung*. Unveröffentlichte Prüfungsleistung. Potsdam: Fachhochschule Potsdam

FACHHOCHSCHULE POTSDAM, FB2 STUDIENGANG „KONSERVIERUNG UND RESTAURIERUNG“, und FB5 STUDIENGANG „INFORMATION UND DOKUMENTATION“, 2025. POLYKON. *POLYKON* [online]. 2025. [Zugriff am: 13 Dezember 2025]. Verfügbar unter: https://polykon.fh-potsdam.de/

FACHHOCHSCHULE POTSDAM und FB5 INFORMATIONSWISSENSCHAFTEN, 2025. LADIS. *LADIS* [online]. 2025. [Zugriff am: 13 Dezember 2025]. Verfügbar unter: http://10.105.20.103/

HEINRICH, Gregor, 2025. *Graffiti auf lackiertem Holz - Möglichkeiten der Entfernung durch Lasertechnik*. Masterarbeit. Potsdam: Fachhochschule Potsdam

LÁPOSI, Julia, 2024. *Laserreinigung von Alabaster: Machbarkeit und Risiken - Am Beispiel des Epitaphs für den Domdekan Caspar von Kannenberg im Dom zu Halberstadt*. Bachelorarbeit. Potsdam: Fachhochschule Potsdam

NEUFELD, Artur und Maria SCHENDEL, 2025. *Notizen zu bereitgestellten Beispiel-Suchanfragen,*. Unveröffentlichtes Arbeitsblatt. Potsdam: Fachhochschule Potsdam. Projektteil „Datenintegration“ | Arbeitspaket „SQL-Anfragen“

WESSLING, Helena-S., 2025. *Reinigung von Verrußungen auf Holz mittels Lasertechnik: Vergleichende Betrachtung von Parametern auf verschiedenen Beschichtungen und Holzarten*. Bachelorarbeit. Potsdam: Fachhochschule Potsdam

WUSSOW, Maya und Yan HEINEMANN, 2025. Prototyp-Testing Laserdatenbank. *WB 03 / WD 03 UX für digitale Informationsangebote*. Unveröffentlichte Prüfungsleistung. Fachhochschule Potsdam. 31 Januar 2025

13 Zusammenfassung

Im Rahmen der Untersuchungen wurden unterschiedliche Lasersysteme sowie variierende Prozessparameter an verschiedenen Natursteinen, insbesondere Sand- und Kalkstein, erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Laserreinigung grundsätzlich eine hohe Wirksamkeit hinsichtlich der Entfernung von Schmutzauflagerungen sowie mikrobiologischen Besiedlungen aufweist. Insbesondere bei moderaten Leistungsparametern konnten reproduzierbar gute Reinigungsergebnisse erzielt werden. Demgegenüber führte eine Erhöhung der Energiedichte vereinzelt zu unerwünschten Nebenwirkungen, wie ggf. Farbveränderungen oder auch einer zu hohen Öffnung des Porenraums des Materials, vor allem beim Sandstein. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf.
Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war der Vergleich zwischen Trocken- und Nassreinigung. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Nassreinigung in vielen Fällen eine höhere Reinigungsleistung erzielt, jedoch zugleich mit einer stärkeren Veränderung der oberflächennahen Materialstruktur einhergehen kann. Der Reinigungserfolg erwies sich stark abhängig von den jeweiligen Ausgangsbedingungen der Oberflächen. Insbesondere bei stark salzbelasteten, durch kompakte Krusten überprägten Bereichen waren die erzielten Ergebnisse teilweise eingeschränkt.
Ergänzend wurden physikalische Parameter wie die kapillare Wasseraufnahme und der Luftpermeationswiderstand untersucht, um Veränderungen der Materialeigenschaften infolge der Laserbehandlung zu quantifizieren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Reinigung häufig mit einer Zunahme der Porosität einhergeht, was konservatorische Chancen impliziert. Zudem erweist sich die Untersuchungsmethode des Luftpermeationswiderstands als weiteres Instrument der Bewertung des Reinigungserfolges.
Ergänzend erfolgten Untersuchung zur Laserabnahme von Graffiti auf lackierten Holzoberflächen sowie verrußten Holzoberflächen. Hier zeigt sich, dass diese Methode grundsätzlich sehr effektiv sein kann. Im Vergleich zu traditionellen Reinigungsverfahren wie z.B. dem Einsatz von Lösemitteln bietet die Laserablation entscheidende Vorteile. Dazu zählen die selektive und kontrollierte Entfernung, die Möglichkeit, die Reinigungseinstellungen präzise zu wiederholen, und ein geringer Umwelteinfluss. Besonders vorteilhaft ist die berührungslose Bearbeitung, wodurch der Untergrund nur minimal beschädigt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Laserreinigung ein hohes Potenzial für die Anwendung in der Denkmalpflege besitzt. Gleichzeitig erfordert ihr Einsatz eine differenzierte, material- und schadensabhängige Anwendung. Die Auswahl geeigneter Geräte sowie die präzise Abstimmung der Prozessparameter sind entscheidend für den Erhalt der Originalsubstanz und die Qualität des Reinigungsergebnisses. Das Projekt leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung praxisorientierter Leitlinien und fördert den Wissenstransfer innerhalb der restauratorischen Fachpraxis. Dies soll die vorgelegte Datenbank gewährleisten.

14 Öffentlichkeitsarbeit

Regelmäßig wurde in der regionalen und überregionalen Presse durch abgehaltene Pressetermine über das Projekt informiert.



Volksstimme
Donnerstag, 13. April 2023

Halberstädter Tageblatt | 15

Halber-stadt

Licht geht schwarzen Krusten an den Kragen

Halberstadts Dom ist erneut Ausgangspunkt für Grundlagenforschung in der Restaurierung

Meldungen

Beratungsmobil steht auf dem Fischmarkt

Halberstadt (VS) • Das Beratungsmobil „Blickpunkt Auge“ macht am heutigen Donnerstag von 10 bis 14 Uhr auf dem Fischmarkt in Halberstadt Station. Das kostenlose Beratungsangebot wendet sich an Menschen mit Sehbeeinträchtigungen und ihre Angehörigen, unabhängig von der Erkrankung und dem aktuellen Sehvermögen des Betroffenen. An Bord des Beratungsmobils befinden sich viele Informationsmaterialien, ein Bildschirmlesegerät, ein Vorlesegerät sowie weitere Hilfs- und Verkehrsschutzmittel. „Weiterhin bieten wir Orientierung und Hilfe durch den Austausch mit Gleichbetroffenen, Seminare und Kurse“, heißt es vom Blinden- und Sehbehindertenverband Sachsen-Anhalt.

Hilfe bei Angst und Panik

Halberstadt (VS) • Die Selbsthilfegruppe zum Thema Angst und Panik lädt zu ihrem nächsten Treffen für Dienstag, 18. April, um 16.30 Uhr ein. Es findet in den Räumen des Burchardiklosters, Am Kloster 1 in Halberstadt, statt. Der Inhalt der Gespräche bleibe vertraulich, heißt es von der Selbsthilfekontaktstelle.

Frühjahrsputz am Käthe-Kollwitz-Platz

Halberstadt (VS) • Die Freunde des Käthe-Kollwitz-Platzes laden erneut zum Frühjahrsputz vor dem Todestag von Käthe Kollwitz am 22. April ein. Der Einsatz findet am Freitag, 21. April, ab 16 Uhr statt. Werkzeug dafür wird durch das Ordnungsamt gestellt. Vorgesehen ist, vor allem an den Wegrändern Unkraut zu beseitigen und Totholz von den Rasenflächen zu entfernen. Dort soll auch der Schriftzug „HBS“ aus vielen kleinen blühenden Osterglocken zu lesen sein. Die Blumenzwiebeln wurden von einem Baumarkt gespendet.

In der Medizin und in der Industrie sind sie inzwischen oftzu finden – Lasergeräte. Wie das scharfgebündelte Licht dabei helfen kann, Kulturgutzu bewahren, wird aktuell in Halberstadt erforscht.

Von Sabine Scholz

Halberstadt • Corinna Grimm-Remus schaltet die eckige Laserpistole aus. Das Ergebnis auf dem Kalkstein überrascht sie. Es sieht ein bisschen aus wie ein Barcode. Die Steinrestauratorin legt das Handteil des Lasergerätes zur Seite. „Deshalb machen wir das Ganze ja“, sagt sie. Die Wand vor ihr ist mit dünnen Kreidestrichen in kleine Felder aufgeteilt. Alle sind grau bis schwarz, manche buckig, anderen ist sichtlich ein Teil der Oberfläche abhandengekommen.

Wenn die Gipskrusten, die sich durch chemische Prozesse aufgrund verschiedener Umwelteinflüsse auf dem Kalkstein bilden, „aufblühen“, bilden sie Blasen und schollen. Wenn die irgendwann abfallen, nehmen sie darunterliegendes Material mit.

Verfärbungen sind nicht nur ein ästhetisches Problem

„Die Krusten sind schwarz, sie nehmen von daher sehr viel mehr Wärme auf als der helle Kalkstein“, erklärt Grimm-Remus. Durch die Temperaturunterschiede und die verschiedene Wasserleitfähigkeit von Kruste und Stein entstehen Spannungen. Die Schichten arbeiten quasi gegeneinander, es entsteht eine „Mürbezone“, welches, pulverisiertes Gestein. Beim Sandstein stärker als bei Kalkstein, aber dieser Prozess führt dazu, dass mittelalterliche Bauwerke wie der Halberstädter Dom Gefahr laufen, ihre Bauzier zu verlieren. Die dunklen Oberflächen schaden dem Steinmaterial generell, weshalb auch glatte Flächen leiden.

Doch wie diese Ablagerungen und Krusten beseitigen?

Am Halberstädter Dom ist ein Projekt zur Grundlagenforschung gestartet, dass zum großflächigen Lasereinsatz an Kalk- und Sandsteinmauern denkmalgeschützter Gebäude Daten sammelt. Am Ende soll ein Einsatzleitfaden entstehen, den Denkmalschützer und Restauratoren bundesweit nutzen können. Fotos (4): Sabine Scholz

Bevor die Laser zum Einsatz kommen, wird unter anderem die Wasseraufnahmefähigkeit des Steins ermittelt. Henning Kerste hat gerade das Versuchsröhrchen gefüllt, Mattias Zötzel die Stoppuhr gestartet.

Eine Frage, die seit Jahrzehnten Restauratoren und Wissenschaftler umtreibt. „Vor Jahren haben wir am Westportal des Doms ja bereits untersucht, wie man die Krusten wieder mit dem Stein darunter verbinden kann, um die Bauzier zu retten“, erinnert Ralf Lindemann, Baudirektor der Kulturstiftung Sachsen-Anhalt.

Damals war noch nicht mit Lasertechnik gearbeitet worden - unter anderem, weil die Geräte viel zu groß und schwierig zu bedienen waren, sagt Corinna Grimm-Remus. „Doch inzwischen sind die Laser so handlich geworden, dass man sie auf ein Baugerüst mitnehmen kann.“

Bei dem Projekt zur Sicherung der mittelalterlichen Farbfassungen an den Pfeilerfiguren im Hohen Chor des Halberstädter Doms hatte die Fachfrau die Skulpturen zunächst mit Lasertechnik gereinigt. „Dabei enstand die Idee, ob man nicht auch großflächig mit dieser Technik arbeiten kann und wie das auch wirtschaftlich geht“, berichtet die Restaurtorin.

Viel Zeit und Aufwand erforderlich

Gemeinsam mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), der Kulturstiftung und dem Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt (IDK) entwickelte Grimm-Remus eine Konzeption für ein Forschungsprojekt, an dessen Ende ein offener Anwendungskatalog stehen soll. In dieser Datenbank soll erfasst werden, für welche Art von Oberflächenverschmutzungen welches Lasergerät mit welchen Einstellungsparametern am sinnvollsten eingesetzt werden kann.

Um das zu ermitteln, ist viel Zeit und Aufwand erforderlich. Nach der Auswahl exemplarischer Schmutzkrusten auf

Lasergeräte sind handlich geworden, damit erweitert sich ihr Einsatzfeld.

Die Restauratorin Dr. Corinna Grimm-Remus leitet das Forschungsprojekt, für das Versuchsflächen in den Domen in Halberstadt, Magdeburg und Halle ausgewählt worden sind.

unterschiedlichen Oberflächen und der Auswahl möglicher Lasergeräte - vier kommen im Test zum Einsatz - müssen die Flächen vor und nach jedem Anwendungsfall untersucht werden. „Wir ermitteln unter anderem den W-Wert vor und nach der Reinigung“, sagt Matthias Zötzl vom IDK, während sein Kollege Henning Kersten eines der so genannten Karsten'schen Versuchsröhrchen am Stein befestigt. W-Wert? Dieser Wert sagt etwas darüber aus, wie gut der Stein Wasser aufnimmt. Die Krusten verhindern zwar, dass Feuchtigkeit leicht in den Stein eindringt - aber auch, dass Nässe wieder rauskommt. Was dann im Stein zu Salzablagerungen und Aufblühungen führt.

Diese Werte müssen für jedes der kleinen Versuchsfelder ermittelt und dokumentiert werden - und auch nach jedem Lasereinsatz. „Wir wollen ja sehen, welche Einstellung am Gerät das optimale Ergebnis bringt, erklärt Corinna Grimm-Remus. Deshalb erfolgen neben nichtinvasiven Untersuchungen auch Probenentnahmen vom Stein. In dem Dünnschliff, einem nur 25 bis 30 Mikrometer starken Gesteinsschnitt, wird ermittelt, wie tief die Reinigungswirkung ist.

Abbildung 237: Beispiel eines Beitrages in der Lokalpresse.

Es erfolgten zudem Radio- und Fernsehbeiträge.



Vom 27.06.-28.06.2024 erfolgte die Durchführung „Anwendungsseminar Reinigungslaser“ an der FH- Potsdam mit folgendem Programm:

27.06.2024, 14.00-18.00Uhr

Prof. Dr. Jeannine Meinhardt: Begrüßung

Dr. Corinna Grimm-Remus, Dipl. Ing. Matthias Zötzl: Vorstellung des laufenden DBU- Projektes

Prof. Dr. Robert Sobott: Naturwissenschaftliche Grundlagen zur Laserreinigung in der Restaurierung

Ulrich Bauer-Bornemann: Laserreinigung im Bereich der Baudenkmalpflege – Entwicklungen der letzten 30 Jahre

Ulrich Bauer- Bornemann und Dipl. Ing. Jan Sommer (Clean Lasersysteme GmbH):
erste Vorstellung aktuell eingesetzter Geräte und deren Unterschiede



Abbildung 238: Während der theoretischen Einführung.

28.06.2024, 10.00-17.00Uhr

10:00-12:30 Uhr und 13:30-15:30 Uhr Gruppenarbeit an unterschiedlichen Reinigungslasern und zu verschiedenen Reinigungsaufgaben

ab 16:00 gemeinsame Diskussion zu den Geräten und den Reinigungsergebnissen



Abbildung 239: Während des Praxisteils.

- Vorstellung u.a. des Projektes in den „Mitteldeutschen Mitteilungen“, ein Mitgliedermagazin vom Verein der Deutschen Ingenieure durch die Autorin Kathrain Graubaum

TITELTHEMA //

Reinigung per Laserstrahl bewahrt das authentische Alter

Dr. Corinna Grimm-Remus restauriert am Halberstäder Dom – auch berührungslos

von Kathrain Graubaum

Mittelalterliche Baumeister und Steinmetze hinterließen mit dem Halberstädter Dom eine der schönsten gotischen Kathedralen Deutschlands. Doch die steinerne Pracht leidet unter den Umwelteinflüssen. Rettung kommt mit der modernen Lasertechnologie. Unter der Leitung von Restauratorin Dr. Corinna Grimm-Remus wird erstmals im Denkmalschutz ein Anwendungskatalog für die Reinigung per Laserstrahl erstellt.



Oben: Restauratorin Dr. Corinna Grimm-Remus arbeitet am Nordportal des Halberstädter Domes. Unten: Anhand der Schadensbilder auf den Gesteinsoberflächen wird ein Anwendungskatalog für die Bedienung der Lasertechnologie im Denkmalbereich entwickelt. Fotos (4) Kathrain Graubaum



Wer den Halberstädter Dom St. Stephanus und St. Stxtus besucht, muss durch ein Gerüst hindurch das Portal des nördlichen Querhauses betreten. Früher war es nur den Domherren vorbehalten. Dementsprechend imposant ist es verziert mit einem Lebensbaumkreuz und einem Tympanon. Auf der Schmuckfläche im Bogenfeld des Portals stellten Steinmetze aus dem 15. Jahrhundert den Martentod dar. Doch eingeschalt und verbaut kann sich diese Eingangspforte derzeit nicht in seiner Pracht und einstigen Bedeutung präsentieren.

Nicht zu sehen, aber zu hören sind mitunter jene, die sich auf dem Gerüst zwecks restauratorischer Arbeiten aufhalten: Prof. Dr. Corinna Grimm-Remus gehört zur Leitung des an der Hochschule Potsdam angesiedelten Projektes „Das mittelalterliche Nordquerhausportal des Halberstädter Domes – Vereintgung von Forschung und restauratorischer Praxis in der Hochschulausbtldung“. Die Restauratorin zeigt auf schwarze Gesteinsoberflächen. Sie führt diese Rußschäden vor allem auf die schwefelhaltige Luft in der Vergangenheit zurück, als mit Kohle geheizt wurde. „Vereinfacht beschrieben hat Schwefel die Oberfläche des Kalksteins zu Gips umgewandelt, der verhält sich unter den Witterungseinflüssen anders als der darunterliegende Kalkstein. Das führt zur Ablösung der zierenden Oberflächen“, erklärt sie und gibt dabei eine weitere Information preis: Der Halberstädter Dom, errichtet vom 13. bis 15. Jahrhundert, ist hauptsächlich mit Muschelkalk aus dem im nahegelegenen Höhenzug „Huy“ gebaut worden – später auch mit Sandstein aus den Spiegelsbergen.

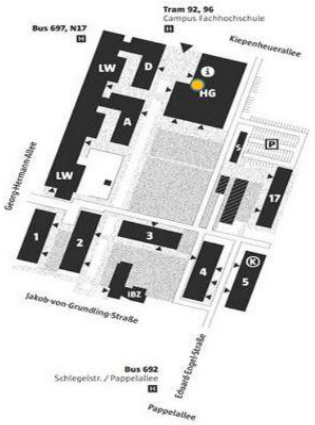
Die Frage, ob das Portal überhaupt schon einmal restauriert wurde, kann Corinna Grimm-Remus bejahen. Das Lesen von Spuren hauptsächlich auf mittelalterlichen Natursteinoberflächen hat die gebürtige Schönebeckerin gelernt – während ihrer Ausbildung zum Steinmetz und während

Zum Abschluss des Forschungsprojektes wurden alle Ergebnisse im Rahmen einer Abschlussveranstaltung, bzw. eines Fachkolloquiums, präsentiert:

VERANSTALTUNGSORT und ANMELDUNG

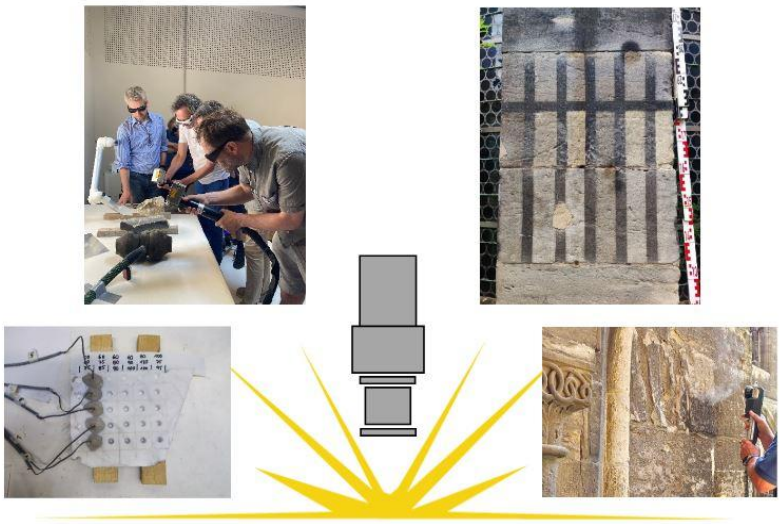
Fachhochschule Potsdam
Kiepenheuerallee 5 • Hauptgebäude
Hörsaal HG067

Anfahrt mit dem öffentlichen Nahverkehr von „Hauptbahnhof Potsdam“: Tram 92 und 96 in Richtung „Kirschallee“ bzw. „Campus Jungfernsee“ bis „Campus Fachhochschule“ – Dauer ca. 12 Minuten



Die **Teilnahme** am Abschlusskolloquium ist **kostenfrei**, dennoch ist aus räumlichen Gründen bis zum 30. September **unbedingt** eine **verbindliche Anmeldung** unter grimm@steinrestaurierung.net erforderlich.

Abschlusskolloquium DBU-Projekt
Optimierung von Lasertechnik zur Reinigung und Desinfektion von historischen Oberflächen
20.11.2025 FH Potsdam



gefördert durch DBU Deutsche Bundesstiftung Umwelt

KULTURSTIFTUNG SACHSEN-ANHALT

Bauer-Herrmann Steinrestaurierung

IDK Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V.

Dr. Corinna Grimm-Remus

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt LANDESMUSEUM FÜR VORGESCHICHTE

FH;P Fachhochschule Potsdam University of Applied Sciences



Abschlusskolloquium DBU-Projekt am 20.11.2025, FH Potsdam

Optimierung von Lasertechnik zur Reinigung und Desinfektion von historischen Oberflächen (AZ 35765/01)

Die Laserreinigung hat in den vergangenen Jahren einen immer höheren Stellenwert in der Restaurierung historischer Oberflächen eingenommen. Um diese Technologie einem noch größeren Kreis anwendender Restaurator*innen zugänglich zu machen, bedarf es eines systematischen Erfahrungstransfers, der im Rahmen des DBU-Projektes (Bewilligungsempfänger Kulturstiftung Sachsen-Anhalt) bereits 2024 mit den „Laser-Tagen“ an der FH Potsdam erfolgreich begonnen wurde. Im Projekt wurden aktuell in der Denkmalpflege für verschiedene Reinigungsaufgaben eingesetzte Lasergeräte anhand von Musterflächen vergleichend getestet. Welches Gerät ist für welchen Zweck geeignet und was sind erfolgversprechende Einstellparamater? Im Mittepunkt der Betrachtungen stand der Halberstädter Dom mit seinen stark verkrusteten Kalksteinoberflächen. Aber auch Sandsteine an den Domen in Magdeburg und Halle sowie Alabasteruntergründe wurden untersucht. Ein wesentlicher Pfeiler für die systematische Erfassung umfassender Ergebnisse bildeten verschiedene Qualifikationsarbeiten im Studiengang Konservierung und Restaurierung der FH Potsdam. So wurden materialübergreifend auch verruste oder mit Graffiti verschmutzte Holzoberflächen zum Gegenstand des Forschungsprojektes. Die für viele Anwender*innen interessanten Ergebnisse sind in vorbildlicher Weise in eine Datenbank im Sinne eines „Offenen Anwendungskataloges“ eingeflossen, die ebenfalls auf dem Abschlusskolloquium vorgestellt werden wird.

PROGRAMM

9:00 Prof. Dr. Jeannine Meinhardt
FH-Potsdam

Constanze Fuhrmann
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Ralf Lindemann
Kulturstiftung Sachsen-Anhalt

Karsten Böhm
Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt

Grußworte

9:30 Dr. Corinna Grimm-Remus
Magdeburg

Einführung und Ziele des Projektes

9:45 Ulrich Bauer-Bornemann
Bamberg

Reinigungslaser früher und heute

10:10 Dr. Corinna Grimm-Remus

Ergebnisse der Laserreinigung auf Naturstein aus restauratorischer Sicht

10:30-11:00 KAFFEEPAUSE

11:00 Henning Kersten & Matthias Zötzl
IDK Halle

Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Begleitung des Forschungsprojekts

11:45 Prof. Dr. Jeannine Meinhardt

Wissenschaftliche Projektbegleitung aus Sicht des Fachbeirates

12:15-13:15 MITTAGSPAUSE

13:15 Julia Laposí
FH Potsdam

Laserreinigung von Alabaster - Machbarkeit und Risiken

13:45 Helena Sophie Wessling
FH Potsdam

Reinigung von Verrußungen auf Holz mittels Lasertechnik - Vergleichende Betrachtung von Parametern auf verschiedenen Beschichtungen und Holzarten

14:15 Gregor Heinrich
FH Potsdam

Graffiti auf lackiertem Holz -Möglichkeiten der Entfernung durch Lasertechnik

14:45 Toni Lorenz
FH Potsdam

Unsichtbares sichtbar gemacht: Laserfreilegung der originalen Ölvergoldungen schmiedeeiserner Applikationen am Friedrich-Epitaph (1558)

15:05-15:30 KAFFEEPAUSE

15:30 FB Informationswissenschaften
FH Potsdam

Vorstellung der Datenbank zum Wissenstransfer der Ergebnisse

16:00 Dr. Corinna Grimm-Remus

Gemeinsame Abschlussdiskussion

Abbildung 240: Tagungsflyer.

15 Fotodokumentation Musterflächen Halberstadt, Magdeburg, Halle (Auflösung Onlineveröffentlichung)

Musterfläche	Ort	Gerät
Musterflächen Dom Halberstadt		
Musterfläche I (Kreuzgang)		
I_3.2_1 (links)	Dom Halberstadt	CL50
I_3.2_2	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.2_3	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.2_4 (rechts)	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.2_5	Dom Halberstadt	
I_3.1_1 (links)	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.1_2	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.1_3	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.1_4 (rechts)	Dom Halberstadt	**CL50**
I_3.1_5	Dom Halberstadt	
I_4.0	Dom Halberstadt	**CL50**
I_4.1	Dom Halberstadt	**CL50**
I_2.1_1	Dom Halberstadt	**Smart300**
I_2.1_2	Dom Halberstadt	**Smart300**
I_2.1_3	Dom Halberstadt	**Smart300**
I_2.1_4	Dom Halberstadt	**Smart300**
I_2.1_5	Dom Halberstadt	**Smart300**
I_2.1_6	Dom Halberstadt	**Smart300**
I_2.2_1	Dom Halberstadt	**CL50**

I_2.2_2	Dom Halberstadt	**CL50**
I_2.2_3	Dom Halberstadt	
I_1.8_1_1	Dom Halberstadt	**Soliton**
I_1.8_1_2	Dom Halberstadt	
I_1.8_1_3	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.8_1_4	Dom Halberstadt	**CL50**
I_1.5.1_1	Dom Halberstadt	
I_1.5.1_2	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.5.2	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.5.3	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.5.4	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.5.5	Dom Halberstadt	
I_1.6.1	Dom Halberstadt	
I_1.6.2	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.6.3	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.6.4	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**

I_1.7.1	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.7.2	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_2.0_1	Dom Halberstadt	**Soliton LT300**
I_2.0_2	Dom Halberstadt	**Soliton LT300**
I_2.2_1	Dom Halberstadt	
I_2.2.2 (links)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.2.2 (rechts)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.2.3 (links)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.2.3 (rechts)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.3.1 (links)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.3.1 (rechts)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.3.2 (links)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
I_2.3.2 (rechts)	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
Musterfläche II (Kreuzgarten, Strebepfeiiler)		

II_2.6_1	Dom Halberstadt	**CL50**
II_2.6_2	Dom Halberstadt	**CL50**
II_2.6_3	Dom Halberstadt	**CL50**
II_2.6_4	Dom Halberstadt	**CL50**
II_2.2_1	Dom Halberstadt	**CL50**
II_2.7_1	Dom Halberstadt	**Smart 300**
II_2.7_2	Dom Halberstadt	**Smart 300**
II_2.3_1	Dom Halberstadt	**Smart 300**
II_2.3_2	Dom Halberstadt	**Smart 300**
T	Dom Halberstadt	**Smart 300**
II_2.4_1	Dom Halberstadt	**Smart 300**
II_6.1_lik	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_6.4	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_2.5 (links)	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_2.1 (links)	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_2.5 (rechs)	Dom Halberstadt	**Solion**
II_2.1(rechs)	Dom Halberstadt	**Solion**
II_3.1	Dom Halberstadt	**Solion**
II_3.3	Dom Halberstadt	**Solion**
II_3.2	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
II_3.4	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
II_4.3	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
II_4.1	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**

II_4.4	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
II_4.2	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
Musterfläche III (Fassung)		
III_A1_1	Dom Halberstadt	
III_A1_2	Dom Halberstadt	
III_A2_1	Dom Halberstadt	
III_A2_2	Dom Halberstadt	
III_A3_1	Dom Halberstadt	
III_A3_2	Dom Halberstadt	
III_A4_1	Dom Halberstadt	
III_A4_2	Dom Halberstadt	
III_A5_1	Dom Halberstadt	
III_A5_2	Dom Halberstadt	
III_A6_1	Dom Halberstadt	
III_A6_2	Dom Halberstadt	
III_A7_1	Dom Halberstadt	
III_A7_2	Dom Halberstadt	
Musterfläche III (Fassung)		
III_B1_1	Dom Halberstadt	
III_B1_2	Dom Halberstadt	
III_B2_1	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B2_2	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B3_1	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B3_2	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B4_1	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B4_2	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B5_1	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B5_2	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B6_1	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B6_2	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B7_1	Dom Halberstadt	**CL50**
III_B7_2	Dom Halberstadt	**CL50**
Musterfläche IV (Nordportal unten)		

1.1_1	Dom Halberstadt	**CL50**
1.1_2	Dom Halberstadt	**CL50**
1.1_3	Dom Halberstadt	**CL50**
1.2_1	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
1.2_2	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
1.3_1	Dom Halberstadt	**CL50**
1.3_2	Dom Halberstadt	**CL50**
1.3_3	Dom Halberstadt	**CL50**
1.4_1	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
1.4_2	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
2.1_1	Dom Halberstadt	**Smart 300**
2.1_2	Dom Halberstadt	**Smart 300**
2.1_3	Dom Halberstadt	**Smart 300**
2.1_4	Dom Halberstadt	**Smart 300**
2.1_5	Dom Halberstadt	**Smart 300**
2.1_6	Dom Halberstadt	**Smart 300**
2.2	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
2.3	Dom Halberstadt	**Soliton**
2.4	Dom Halberstadt	**Thunder Compact, Quanta System**
3.1	Dom Halberstadt	
3.2	Dom Halberstadt	
3.3	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
3.4	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n**

		I054C1 (100W)
3.5	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
3.6	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
3.7	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
3.8	Dom Halberstadt	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
Musterflächen Dom Magdeburg		
I_1.1	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.2	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.3	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.4	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.5	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.6	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_2.1	Dom Magdeburg	
I_2.2	Dom Magdeburg	

I_2.3	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_2.4	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_2.5	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_3.1	Dom Magdeburg	**CL50**
I_3.2	Dom Magdeburg	**CL50**
I_3.3	Dom Magdeburg	**CL50**
I_3.4	Dom Magdeburg	**CL50**
I_3.5	Dom Magdeburg	**CL50**
I_3.6	Dom Magdeburg	**CL50**
II_1.1	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_1.2	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_1.3	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_1.4	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_1.5	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_1.6	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**

II_2.1	Dom Magdeburg	**Smart 300**
II_2.2	Dom Magdeburg	**Smart 300**
II_2.3	Dom Magdeburg	**Smart 300**
II_2.4	Dom Magdeburg	**Smart 300**
II_2.5	Dom Magdeburg	**Smart 300**
II_2.6	Dom Magdeburg	**Smart 300**
II_2.7	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
II_2.8	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
II_2.9	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
II_2.10	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
II_2.11	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
II_2.12	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
II_4.1	Dom Magdeburg	**CL50**
II_4.2	Dom Magdeburg	**CL50**
II_4.3	Dom Magdeburg	**CL50**
II_4.4	Dom Magdeburg	**CL50**
II_4.5	Dom Magdeburg	**CL50**
II_4.6	Dom Magdeburg	**CL50**
II_3.1	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
II_5.1	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.1	Dom Magdeburg	**Thunder Compact,**

		Quanta System
III_1.2	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
III_1.3	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
III_1.4	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
III_1.5	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
III_1.6	Dom Magdeburg	**Thunder Compact, Quanta System**
III_1.7	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.8	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.9	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.10	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.11	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.12	Dom Magdeburg	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
III_1.13	Dom Magdeburg	**Smart 300**

III_1.14	Dom Magdeburg	**Smart 300**
III_1.15	Dom Magdeburg	**CL50**
III_1.16	Dom Magdeburg	**CL50**
III_1.17	Dom Magdeburg	**CL50**
III_1.18	Dom Magdeburg	**CL50**
III_1.19	Dom Magdeburg	**CL50**
III_1.20	Dom Magdeburg	**CL50**
III_2.1	Dom Magdeburg	**CL50**
III_2.2	Dom Magdeburg	**CL50**
Musterfläche I, DOM Halle, Strebepfeiler		
	Dom Halle	Referenz
I_1.1	Dom Halle	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.2	Dom Halle	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.3	Dom Halle	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.4	Dom Halle	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.5	Dom Halle	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.6	Dom Halle	**Infinito Laser p/n I054C1 (100W)**
I_1.7	Dom Halle	**Smart 300**
I_1.8	Dom Halle	**Smart 300**
I_1.9	Dom Halle	**Smart 300**

I_1.10	Dom Halle	**Smart 300**
I_1.11	Dom Halle	**Smart 300**
I_1.12	Dom Halle	**Smart 300**
I_2.1	Dom Halle	**Thunder**
I_2.2	Dom Halle	**Thunder**
I_2.3	Dom Halle	**Thunder**
I_2.4	Dom Halle	**Thunder**
I_2.5	Dom Halle	**Thunder**
I_2.6	Dom Halle	**Thunder**
I_3.1	Dom Halle	**CL50**
I_3.2	Dom Halle	**CL50**
I_3.3	Dom Halle	**CL50**
I_3.4	Dom Halle	**CL50**
I_3.5	Dom Halle	**CL50**
I_3.6	Dom Halle	**CL50**
Musterfläche II, Biogener Bewuchs, Probe-Platte (Halle)		
II_1.1	CleanLaser CL50	
II_1.2	Thunder	
II_1.3	Referenz	
II_1.4	Infinito	
II_1.5	Smart 300	

Halberstadt, Musterfläche HBS_I



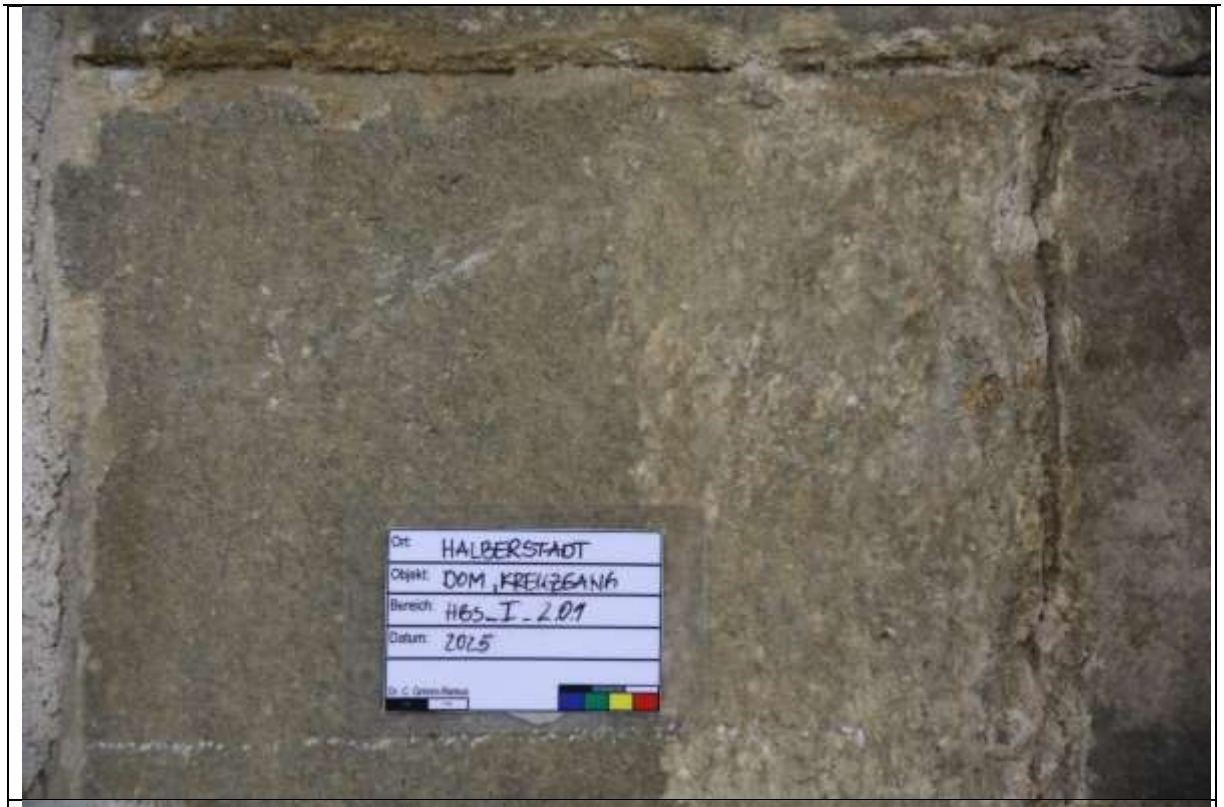

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_15.4
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_16.1
Datum: 2025

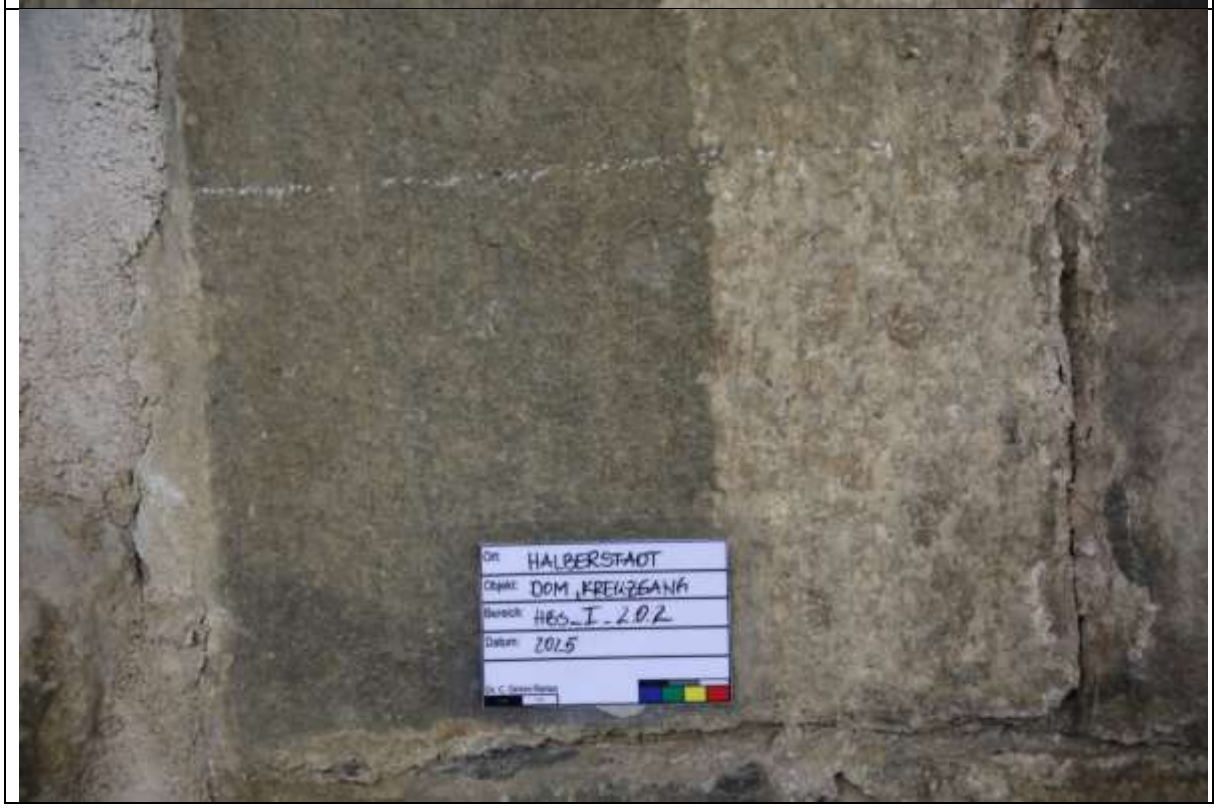

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG“
Bereich: HBS_I_1.6.2
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG“
Bereich: HBS_I_1.6.3
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG“
Bereich: HBS_I_1.6.4
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG“
Bereich: HBS_I_1.7.1
Datum: 2025


Ort HALBERSTADT
Objekt DOM KREUZGANG
Bereich HG_I_17.2
Datum 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_18.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_18.2
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_18.3
Datum: 2025


HALBERSTADT
DOM „FREIZEAN“
HBS_I_18.4
2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: HBS_I_2.01
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: HBS_I_2.02
Datum: 2025

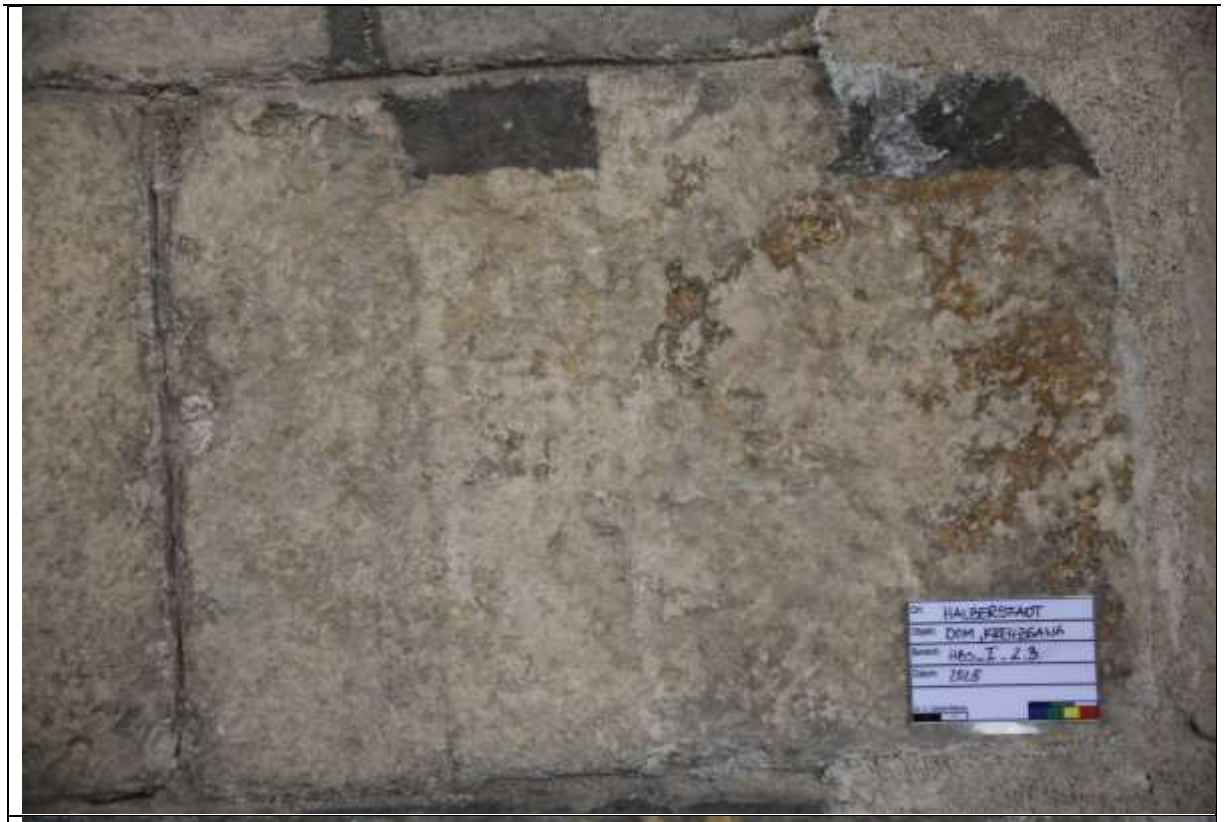

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_211
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_212
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_213
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_214
Datum: 2025


HALBERSTADT
DOM „KREUZGANG
HBS_I.215
2025
HALBERSTADT
DOM „KREUZGANG
HBS_I.216
2025


HALBERSTADT
DOM „KREUZGANG“
HBS_I_221
HALBERSTADT
DOM „KREUZGANG“
HBS_I_222
HALBERSTADT
DOM „KREUZGANG“
HBS_I_223
HALBERSTADT
DOM „KREUZGANG“
HBS_I_239




HALBERSTADT
DOM „FREUDENAUA“
HBS_I_2.3.2
2015


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_2.3
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG
Bereich: HBS_I_3.2
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: HBS_I_3.1
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: HBS_I.4.1
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: HBS_I.4.0
Datum: 2025

Halberstadt, Musterfläche HBS_II




Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGARTEN
Bereich: HBS_II_261
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGARTEN
Bereich: HBS_II_262
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGARTEN
Bereich: HBS_II_263
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGARTEN
Bereich: HBS_II_264
Datum: 2025


HALBERSTADT
DOM KREUZGANG
HBS. II.2.2
2015
HALBERSTADT
DOM KREUZGANG
HBS. II.2.1
2015
HALBERSTADT
DOM KREUZGANG
HBS. II.2.2
2015




Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: H65_I_4.2
Datum: 2025

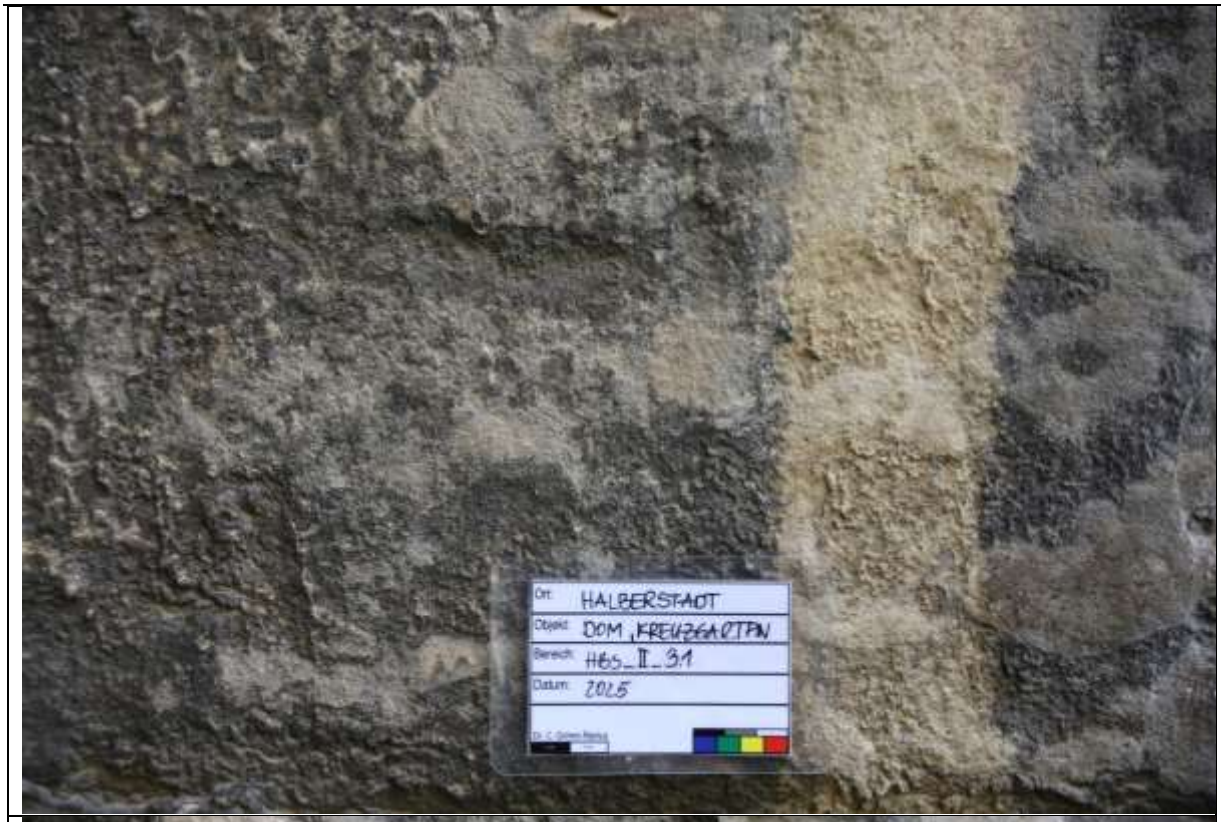

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KREUZGANG
Bereich: H65_I_4.1
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGARTEN
Bereich: HBS_II_4.4
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGARTEN
Bereich: HBS_II_4.3
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGAOTTN
Bereich: HBS_II_32
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGAOTTN
Bereich: HBS_II_34
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG“
Bereich: HBS_II_3.1
Datum: 2025

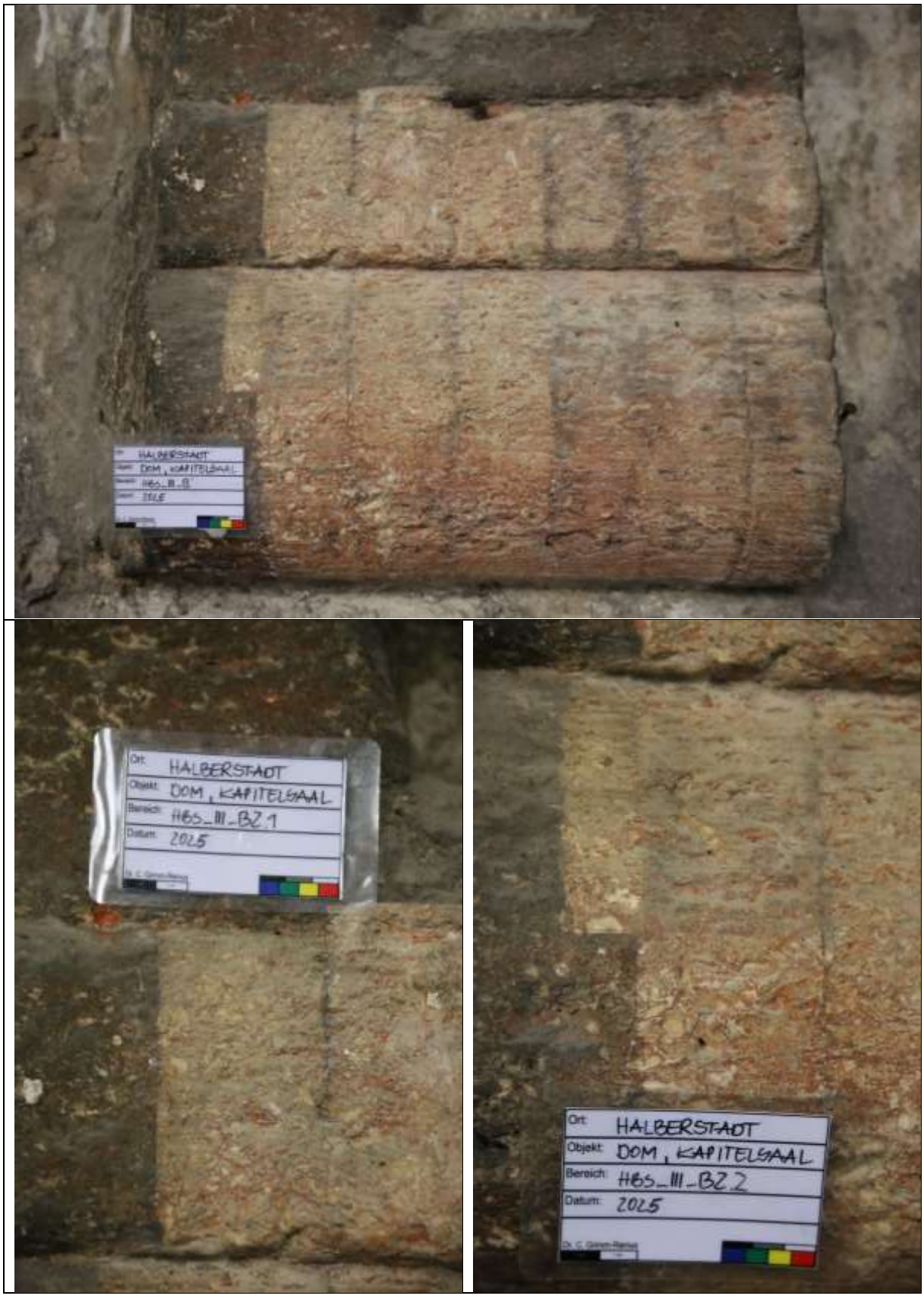

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM „KREUZGANG“
Bereich: HBS_II_3.2
Datum: 2025


HALBERSTADT
DOM KREUZGANG


HALBERSTADT
DOM KREUZGANG



Halberstadt, Musterfläche HBS_III




Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B3.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B3.2
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B4.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B4.2
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B5.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B5.2
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B6.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B6.2
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B7.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, KAPITELSAAL
Bereich: HBS_III_B7.2
Datum: 2025

Halberstadt, Musterfläche HBS_IV




Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: H65_IV_3.3
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: H65_IV_3.3
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.3
Datum: 2025

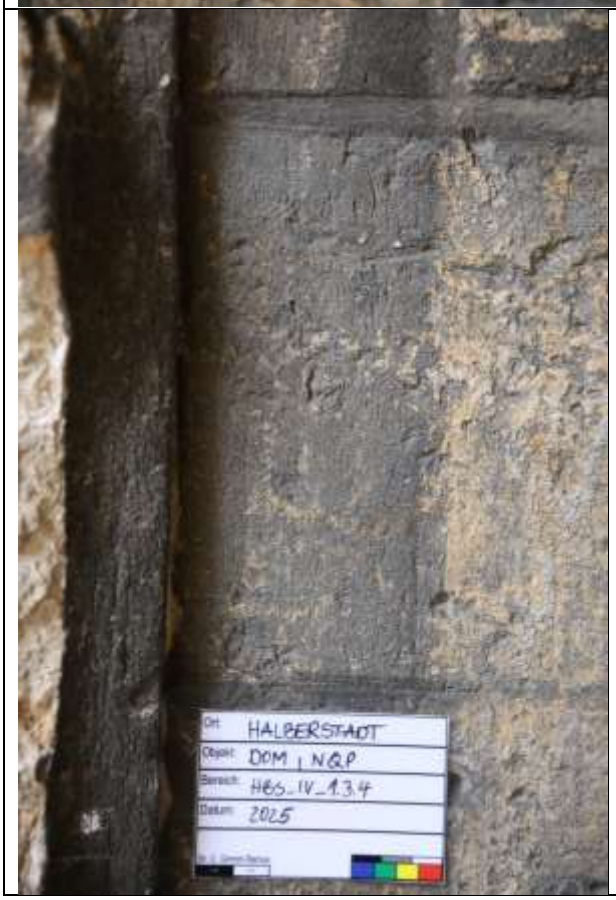

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.1.1
Datum: 2025
Dr. C. Gömm-Remus


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.1.2
Datum: 2025
Dr. C. Grimm-Remus
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.1.3
Datum: 2025
Dr. C. Grimm-Remus


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, NQP
Bereich: HBS_IV_2.1.4
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, NQP
Bereich: HBS_IV_2.1.5
Datum: 2025
Dr. C. Grimm-Remus


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.1.6
Datum: 2025
Dr. C. Grimm-Remus


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_1.3.4
Datum: 2025

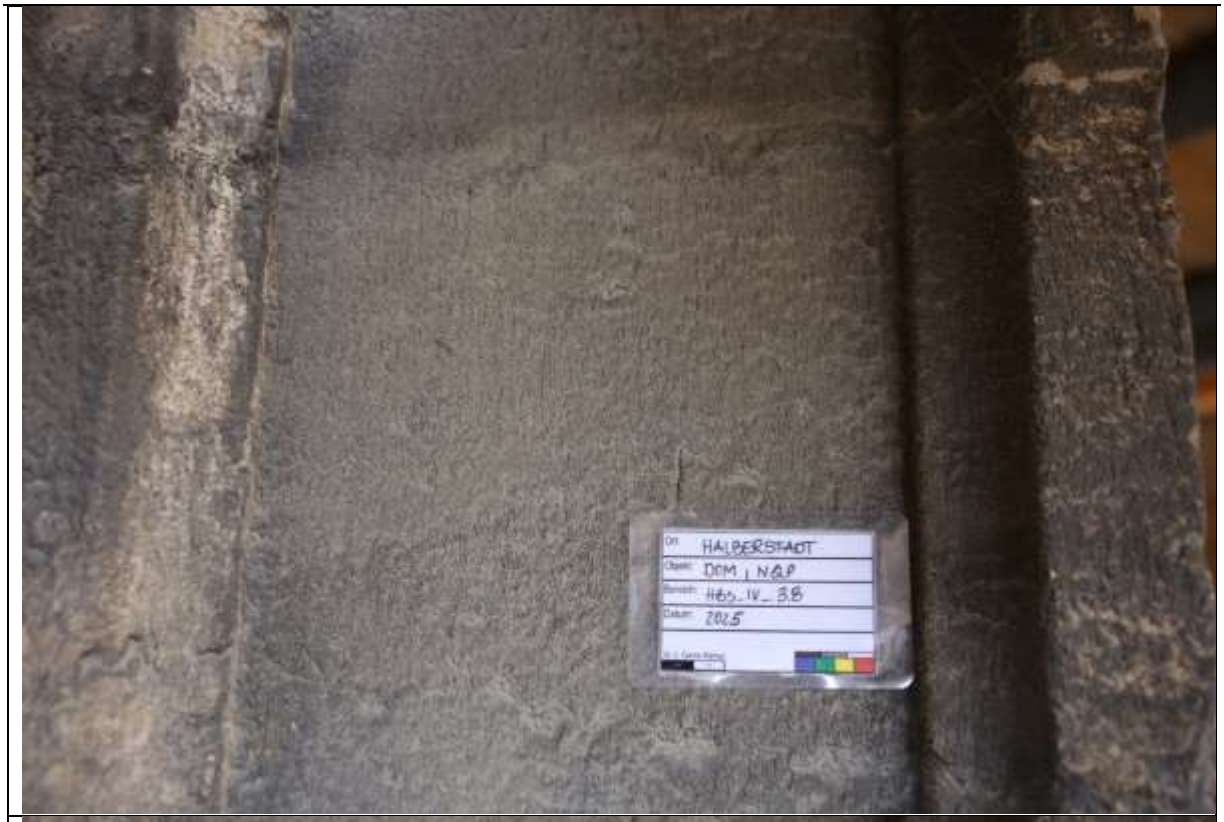

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_1.3.5
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM ; NQP
Bereich: HBS_IV_13.6
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM ; NQP
Bereich: HBS_IV_11.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM ; NQP
Bereich: HBS_IV_11.2
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM ; NQP
Bereich: HBS_IV_11.3
Datum: 2025




Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.1
Datum: 2025

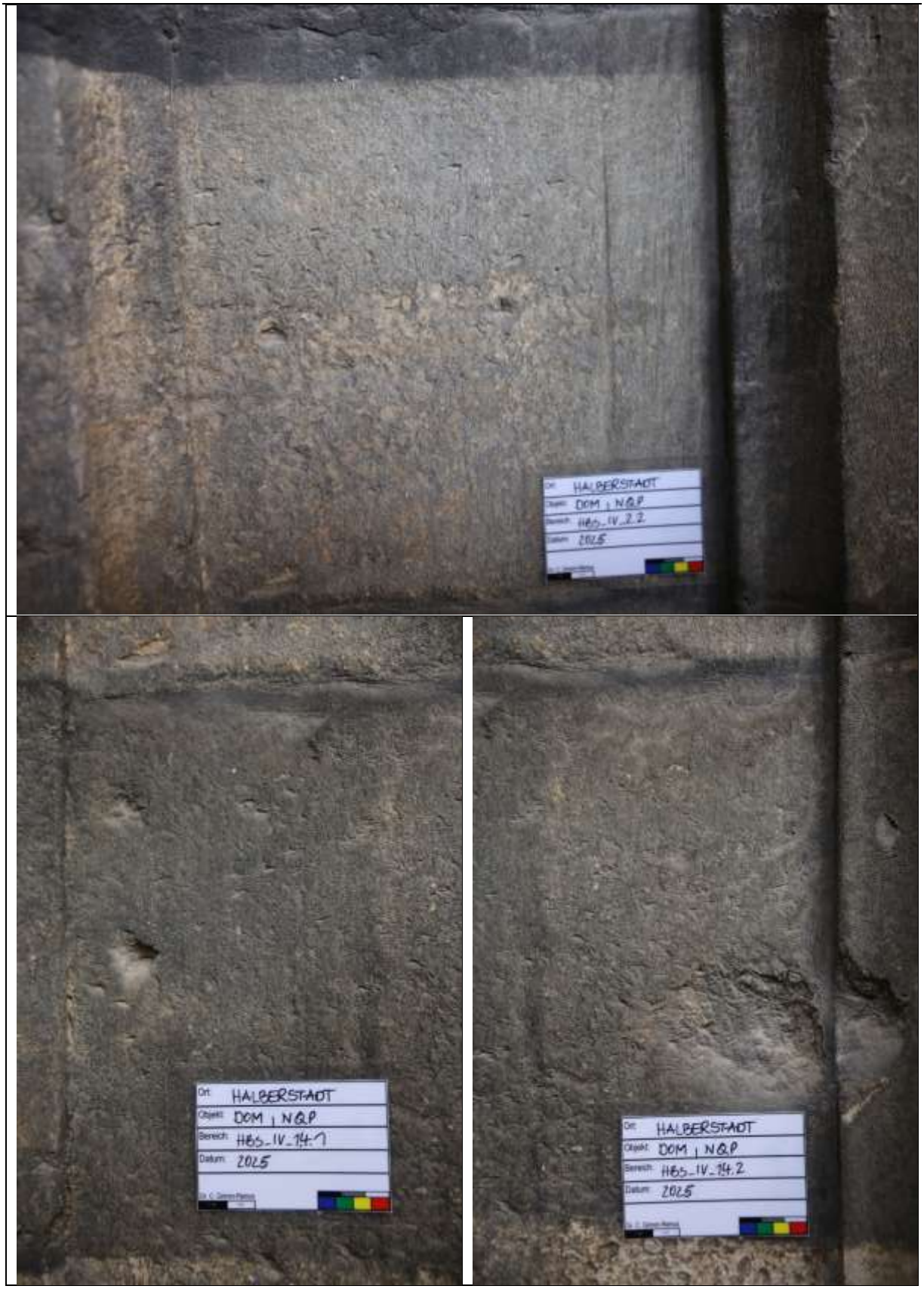

Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.3
Datum: 2025
Dr. C. Grimm-Remus


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, NQP
Bereich: HBS_IV_3.5
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM, NQP
Bereich: HBS_IV_3.6
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_3.4
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NQP
Bereich: HBS_IV_2.4
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: HBS_IV_2.2
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: HBS_IV_14.1
Datum: 2025
Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: HBS_IV_14.2
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM ; N&P
Bereich: H65_IV_122
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM ; N&P
Bereich: H65_IV_122
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: HBS_IV_12
Datum: 2025


Ort: HALBERSTADT
Objekt: DOM | NGP
Bereich: HBS_IV_5
Datum: 2025

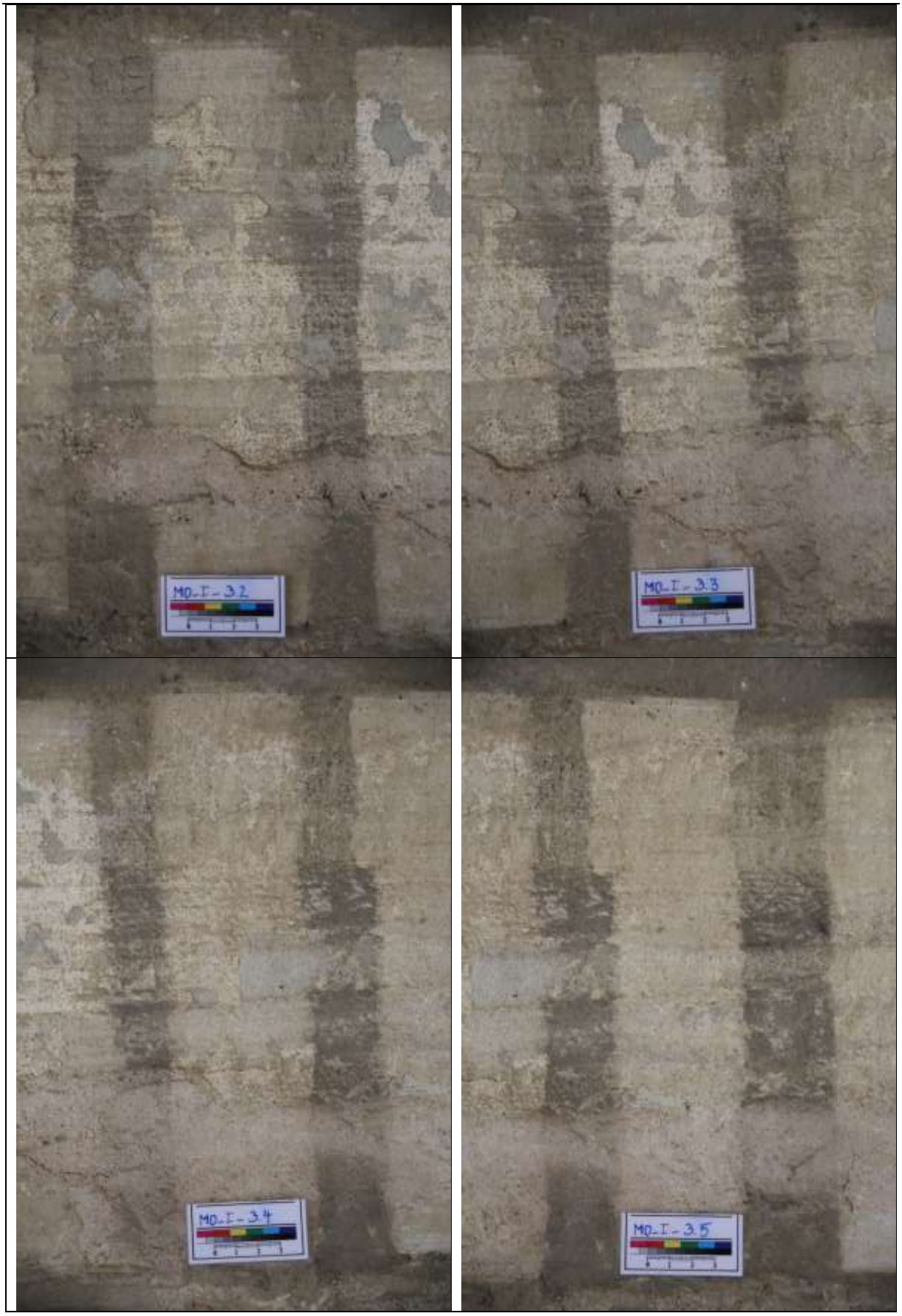


Magdeburg, Musterfläche MD_I




MD-I-1.5
MD-I-1.6
MD-I-2.1
MD-I-2.2


MD_I-2.3
MD_I-2.4
MD_I-2.5
MD_I-3.1


MO-I-3.2
MO-I-3.3
MO-I-3.4
MO-I-3.5


MD_I_3.6





Magdeburg, Musterfläche MD_II




MD_T_1.5
MD_T_1.6
MD_T_2.1
MD_T_2.2


MD_T_2.3
MD_T_2.4
MD_T_2.5
MD_T_2.6


MD_T_2.7
MD_T_2.8
MD_T_2.9
MD_T_2.10


MD_T_2.11
MD_T_2.12
MD_T_4.1
MD_T_4.2


MD_T_43
MD_T_44
MD_T_45
MD_T_46


MD_I_31










M0_II_5

Magdeburg, Musterfläche MD_III




MD-III_13
MD-III_14
MD-III_15
MD-III_16

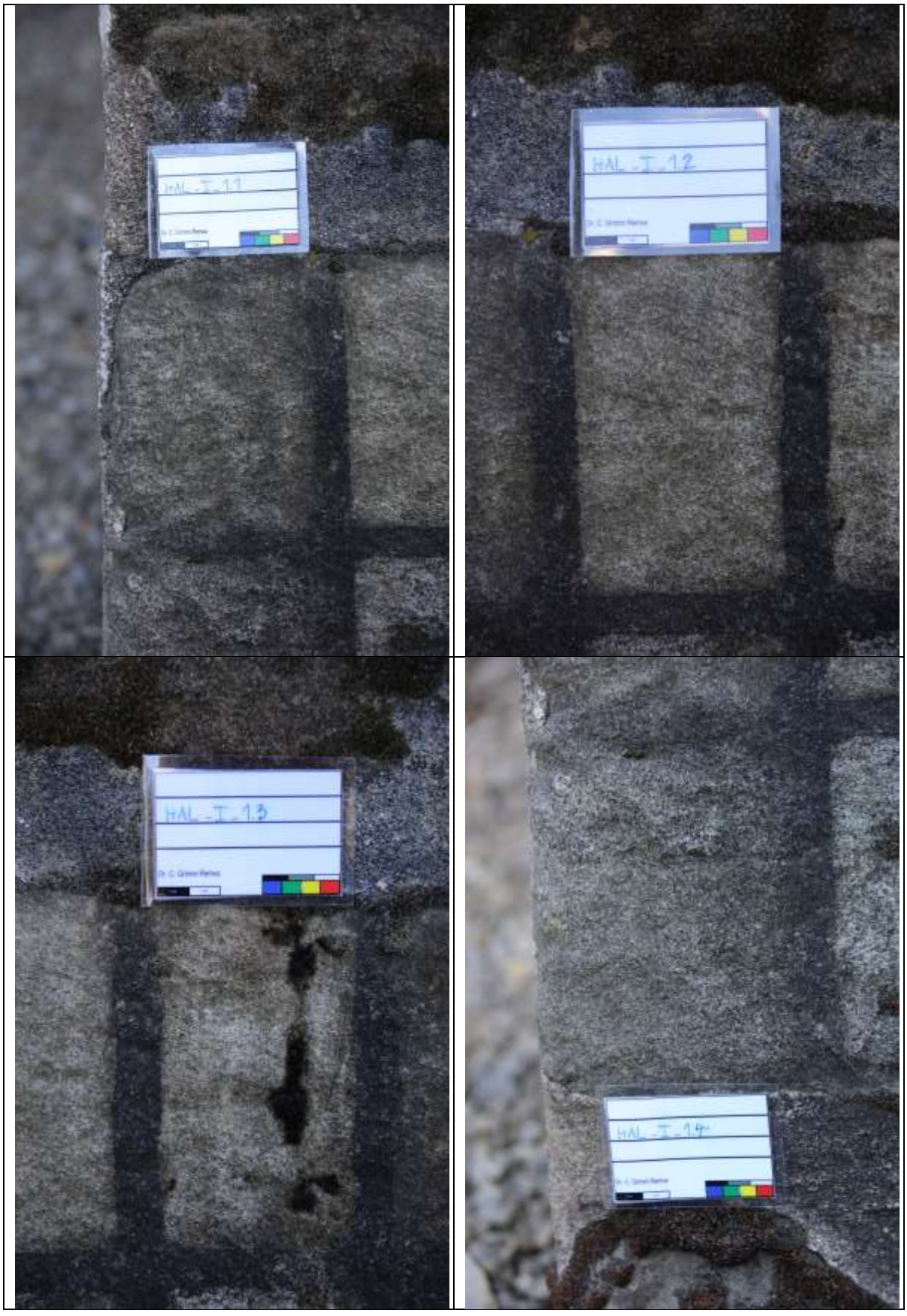

MD_III_17
MD_III_18
MD_III_19
MD_III_100




M0_III_115
M0_III_116
M0_III_117
M0_III_118


MD_III_1.1
MD_III_1.2
MD_III_2.1
MD_III_2.2

Halle, Musterfläche HAL_I






HAL-T-19
HAL-T-111
HAL-T-112


HAL_T.2.2

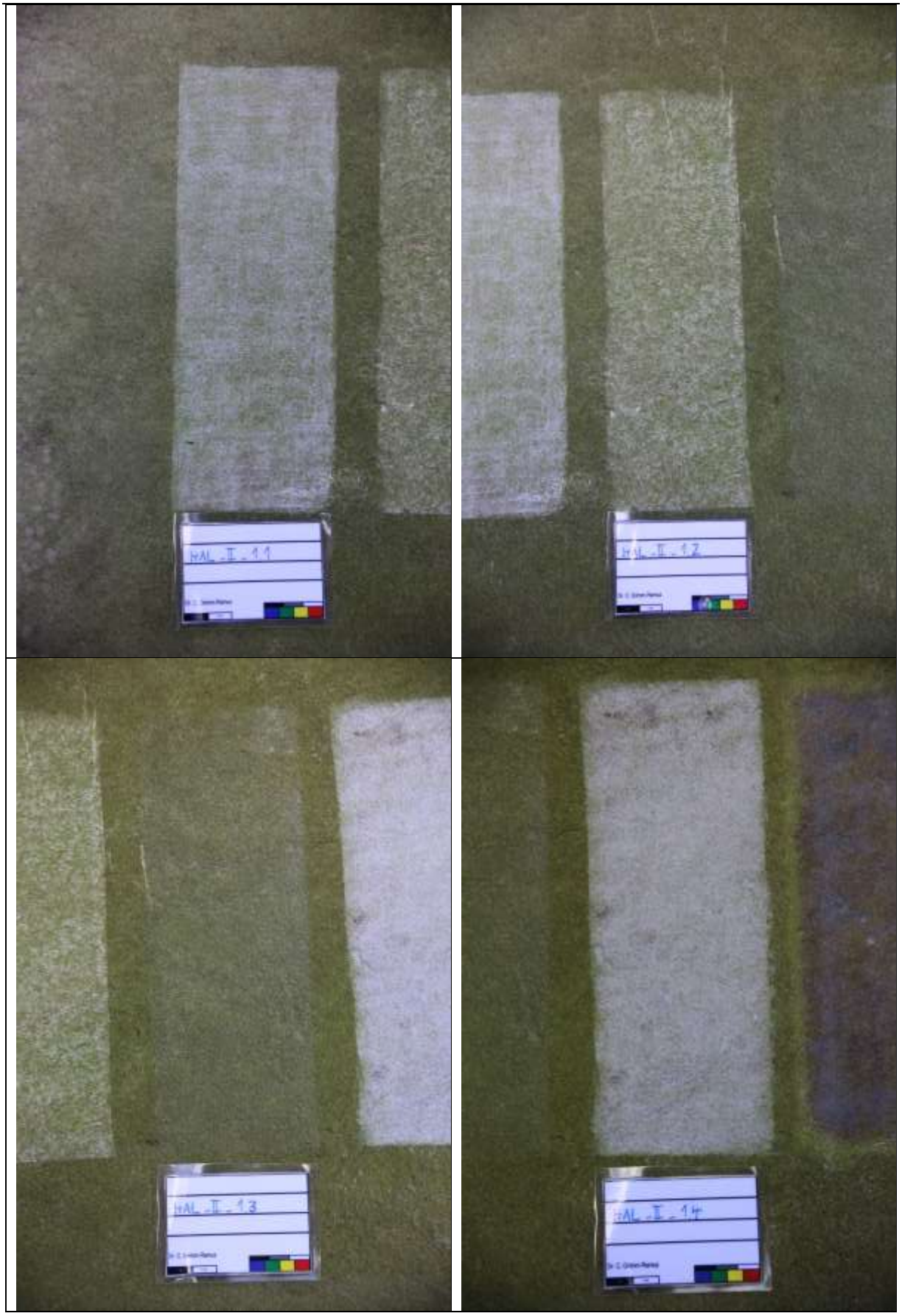

HAL_T_23
HAL_T_24
HAL_T_25
HAL_T_26


HAL_T_3.1
HAL_T_3.2
HAL_T_3.3
HAL_T_3.4


HAL - T. 3.5
HAL - T. 3.6






HAL_II_11
HAL_II_12
HAL_II_13
HAL_II_14


InL-T-15

Digitalmikroskopische Aufnahmen an Musterflächen

Digitalmikroskopische Aufnahmen an Gesteinsproben



Abb. 1 Hbs, Nordport, Kalkstein, Muschelkalk, frische Bruchfläche



Abb. 2 Hbs, Kreuzgang, Kalkstein, Muschelkalk, frische Bruchfläche



Abb. 3 Hbs, Nordport, Kalkstein, Muschelkalk, frische Bruchfläche



Abb. 4 HAL-Bohrkern, Sägefläche



Abb. 5 HAL-Bohrkern, Bruchfläche

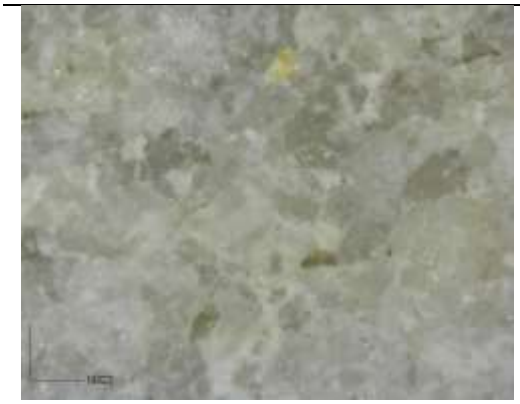


Abb. 6 HAL-Bohrkern, Sägefläche



Abb. 7 HAL-Bohrkern, Bruchfläche

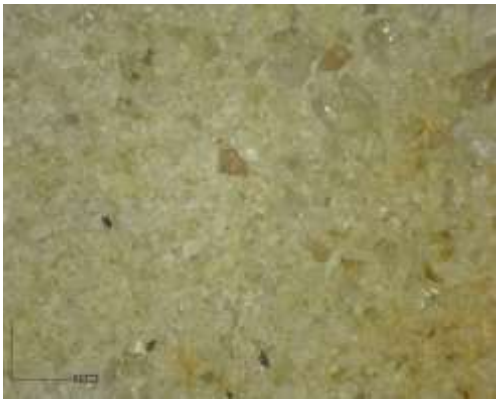


Abb. 8 Hbs-Bohrkern, Sägefläche



Abb. 9 Hbs-Bohrkern, Bruchfläche



Abb. 10 Hbs-Bohrkern, Sägefläche



Abb. 11 Hbs-Bohrkern, Bruchfläche



Abb. 12 MD-Bohrkern, Sägefläche



Abb. 13 MD-Bohrkern, Bruchfläche



Abb. 14 MD-Bohrkern, Sägefläche



Abb. 15 MD-Bohrkern, Bruchfläche

Digitalmikroskopische Aufnahmen an Musterflächen nach der Laserreinigung

Halberstadt, Musterfläche HBS_I



Abb. 16 Hbs Kg 3.2.1 li



Abb. 17 Hbs Kg 3.2.2



Abb. 18 Hbs Kg 3.2.3



Abb. 19 Hbs Kg 3.2.4



Abb. 20 Hbs Kg 3.2.5 Ref



Abb. 21 Hbs Kg 3.1.1 li



Abb. 22 Hbs Kg 3.1.2



Abb. 23 Hbs Kg 3.1.3



Abb. 24 Hbs Kg 3.1.4



Abb. 25 Hbs Kg 3.1.5 Ref



Abb. 26 Hbs Kg 4.0



Abb. 27 Hbs Kg 4.0 Ref

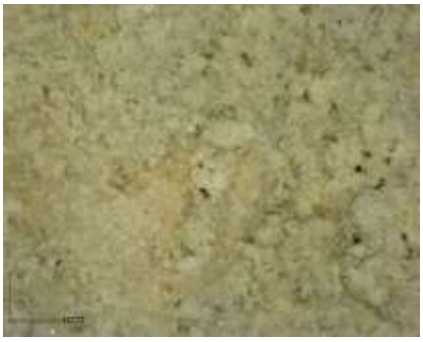


Abb. 28 Hbs Kg 4.1

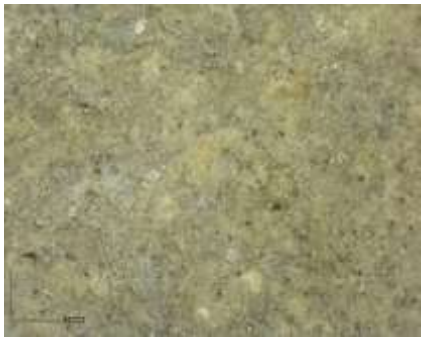


Abb. 29 Hbs Kg 4.1 Ref



Abb. 30 Hbs Kg 2.2.1 Ref



Abb. 31 Hbs Kg 2.2.2 li



Abb. 32 Hbs Kg 2.2.2 re



Abb. 33 Hbs Kg 2.2.1 Ref



Abb. 34 Hbs Kg 2.2.3 li



Abb. 35 Hbs Kg 2.2.3 re



Abb. 36 Hbs Kg 2.3.2 Ref



Abb. 37 Hbs Kg 2.3.1 li



Abb. 38 Hbs Kg 2.3.1 re



Abb. 39 Hbs Kg 2.3.2 Ref



Abb. 40 Hbs Kg 2.3.2 li



Abb. 41 Hbs Kg 2.3.2 re



Abb. 42 Hbs Kg 2.0_1



Abb. 43 Hbs Kg 2.0_1 Ref



Abb. 44 Hbs Kg 2.0_2



Abb. 45 Hbs Kg 2.0_2 Ref



Abb. 46 Hbs Kg 2.1_1



Abb. 47 Hbs Kg 2.1_2



Abb. 48 Hbs Kg 2.1_3



Abb. 49 Hbs Kg 2.1_4



Abb. 50 Hbs Kg 2.1_5



Abb. 51 Hbs Kg 2.1_6



Abb. 52 Hbs Kg 2.1_6 Ref



Abb. 53 Hbs Kg 1.8.1.1 Ref



Abb. 54 Hbs Kg 1.8.1.1



Abb. 55 Hbs Kg 1.8.1.2

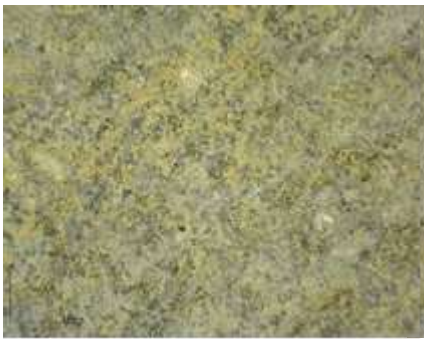


Abb. 56 Hbs Kg 1.8.1.1 Ref



Abb. 57 Hbs Kg 1.8.1.3



Abb. 58 Hbs Kg 1.8.1.4



Abb. 59 Hbs Kg 1.8.1.1 BKL



Abb. 60 Hbs Kg 1.6.1 Ref



Abb. 61 Hbs Kg 1.6.1



Abb. 62 Hbs Kg 1.6.2



Abb. 63 Hbs Kg 1.6.1 Ref



Abb. 64 Hbs Kg 1.6.3



Abb. 65 Hbs Kg 1.6.4



Abb. 66 Hbs Kg 1.7.2 Ref



Abb. 67 Hbs Kg 1.7.1



Abb. 68 Hbs Kg 1.7.2



Abb. 69 Hbs Kg 1.7.2 BKL



Abb. 70 Hbs Kg 1.5.1.1 Ref



Abb. 71 Hbs Kg 1.5.1.2



Abb. 72 Hbs Kg 1.5.2



Abb. 73 Hbs Kg 1.5.3



Abb. 74 Hbs Kg 1.5.4



Abb. 75 Hbs Kg 1.5.5

Halberstadt, Musterflächen HBS_II



Abb. 76 Hbs, 2.1 li



Abb. 77 Hbs, 2.1 Mitte Ref



Abb. 78 Hbs, 2.1 re

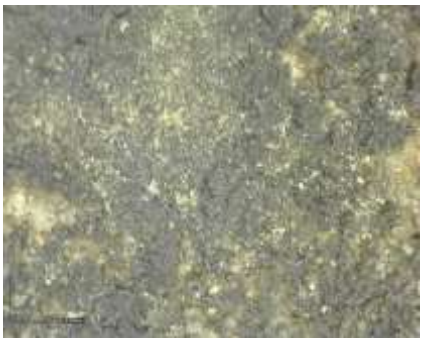


Abb. 79 Hbs, 2.2.1 Ref



Abb. 80 Hbs, 2.2



Abb. 81 Hbs, 2.3.2 Ref.



Abb. 82 Hbs, 2.3.1



Abb. 83 Hbs, 2.3.2



Abb. 84 Hbs, 2.4



Abb. 85 Hbs, 2.5 li

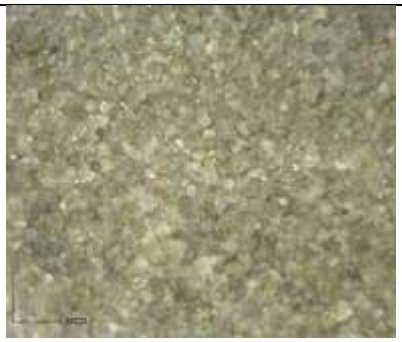


Abb. 86 Hbs, 2.5 Mitte Ref



Abb. 87 Hbs, 2.5 re



Abb. 88 Hbs, 2.5 Mitte Ref



Abb. 89 Hbs, 2.6.1



Abb. 90 Hbs, 2.6.2



Abb. 91 Hbs, 2.5 Mitte Ref



Abb. 92 Hbs, 2.6.3



Abb. 93 Hbs, 2.6.4



Abb. 94 Hbs, 2.7.1



Abb. 95 Hbs, 2.7.2



Abb. 96 Hbs, 2.8

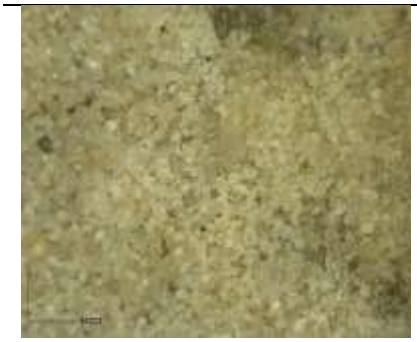


Abb. 97 Hbs, 3.1



Abb. 98 Hbs, 3.1 Ref.



Abb. 99 Hbs, 3.2



Abb. 100 Hbs, 3.3



Abb. 101 Hbs, 3.3 Ref.



Abb. 102 Hbs, 3.4



Abb. 103 Hbs, 4.1 Kruste



Abb. 104 Hbs, 4.1



Abb. 105 Hbs, 4.2



Abb. 106 Hbs, 4.3 Ref



Abb. 107 Hbs, 4.3



Abb. 108 Hbs, 4.4



Abb. 109 Hbs, 6 Ref



Abb. 110 Hbs, 6.1 li



Abb. 111 Hbs, 6.4

Halberstadt, Musterfläche HBS_III



Abb. 112 Hbs_St Pigment



Abb. 113 Hbs_St Ref



Abb. 114 Hbs_St Ref 2



Abb. 115 Hbs_St Ref 3



Abb. 116 Hbs_St_ unten Ref



Abb. 117 Hbs_St_1



Abb. 118 Hbs_St_2



Abb. 119 Hbs_St_3



Abb. 120 Hbs_St_4

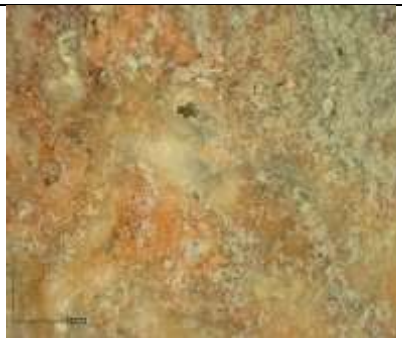


Abb. 121 Hbs_St_5



Abb. 122 Hbs_St_6



Abb. 123 Hbs_St_7



Abb. 124 Hbs_St_8



Abb. 125 Hbs_St_9



Abb. 126 Hbs_St_10



Abb. 127 Hbs_St_11



Abb. 128 Hbs_St_12

Halberstadt, Musterfläche HBS_IV



Abb. 129 Hbs, Np_1.1_1



Abb. 130 Hbs_Np_1.1_2



Abb. 131 Hbs_Np_1.1_3



Abb. 132 Hbs_Np_1.2_1



Abb. 133 Hbs_Np_1.2_2



Abb. 134 Hbs_Np_1.3_1



Abb. 135 Hbs_Np_1.3_2



Abb. 136 Hbs_Np_1.3_3



Abb. 137 Hbs_Np_1.4_1



Abb. 138 Hbs_Np_1.4_2

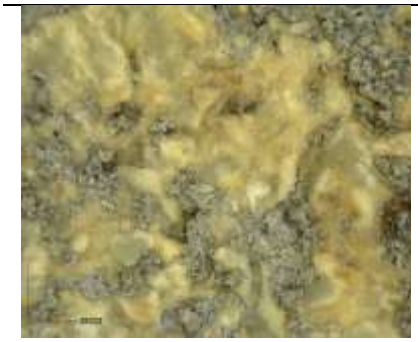


Abb. 139 Hbs_Np_2.1_1



Abb. 140 Hbs_Np_2.1_2



Abb. 141 Hbs_Np_2.1_3



Abb. 142 Hbs_Np_2.1_4

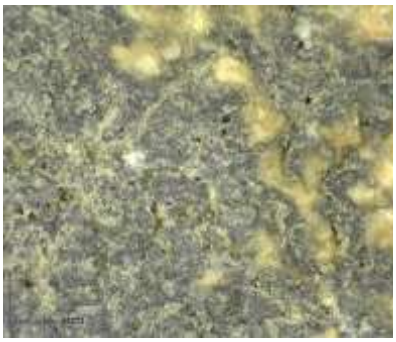


Abb. 143 Hbs_Np_2.1_5



Abb. 144 Hbs_Np_2.1_6



Abb. 145 Hbs_Np_2.2

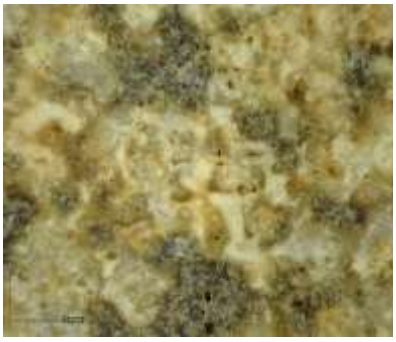


Abb. 146 Hbs_Np_2.3



Abb. 147 Hbs_Np_2.4



Abb. 148 Hbs_Np_3.1



Abb. 149 Hbs_Np_3.2



Abb. 150 Hbs_Np_3.3



Abb. 151 Hbs_Np_3.4



Abb. 152 Hbs_Np_3.5



Abb. 153 Hbs_Np_3.6



Abb. 154 Hbs_Np_3.7



Abb. 155 Hbs_Np_3.8

Magdeburg, Musterfläche MD_I



Abb. 156 MD, Bischof Vorzustand



Abb. 157 MD, Bischof Vorzustand

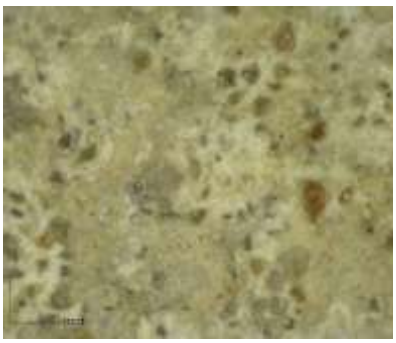


Abb. 158 MD, Bischof 1.1

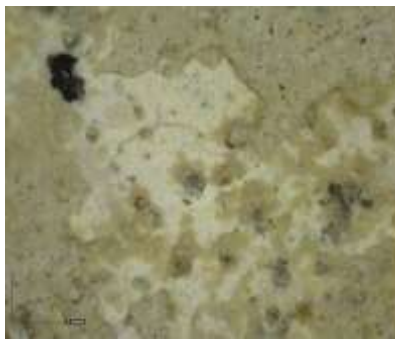


Abb. 159 MD, Bischof 1.2

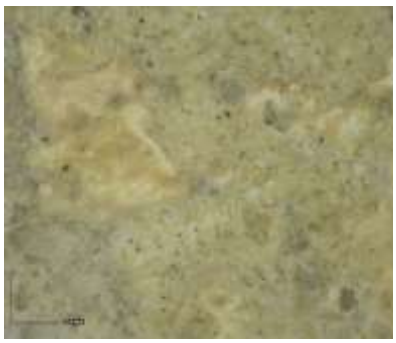


Abb. 160 MD, Bischof 1.3

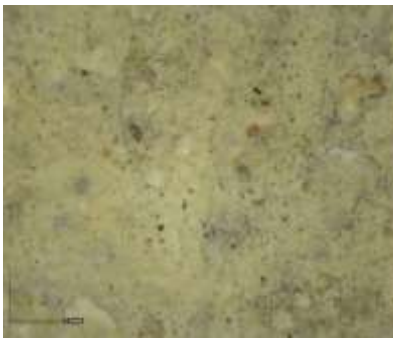


Abb. 161 MD, Bischof 1.4

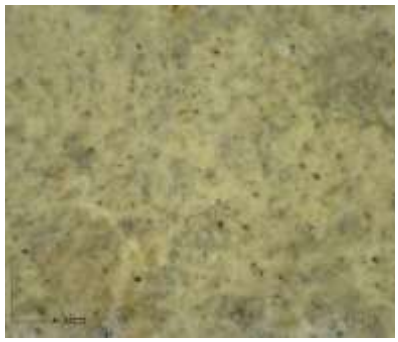


Abb. 162 MD, Bischof 1.5



Abb. 163 MD, Bischof 1.6



Abb. 164 MD, Bischof 2 Ref



Abb. 165 MD, Bischof 2 Ref

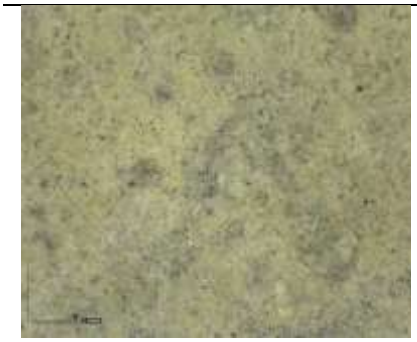


Abb. 166 MD, Bischof 2.1



Abb. 167 MD, Bischof 2.2



Abb. 168 MD, Bischof 2.3



Abb. 169 MD, Bischof 2.4



Abb. 170 MD, Bischof 2.5



Abb. 171 MD, Bischof 3 Ref

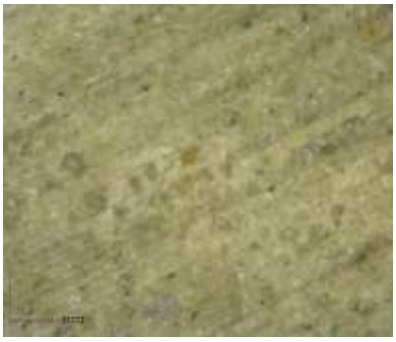


Abb. 172 MD, Bischof 3.1

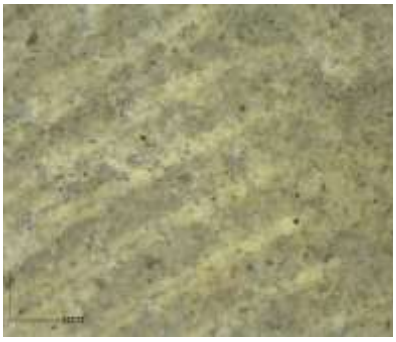


Abb. 173 MD, Bischof 3.2

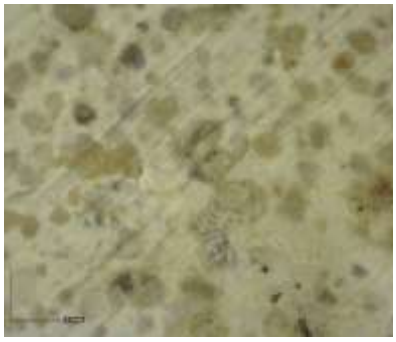


Abb. 174 MD, Bischof 3.3

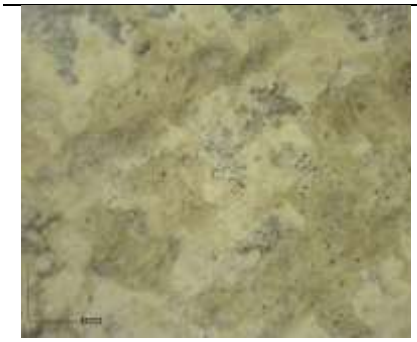


Abb. 175 MD, Bischof 3.4



Abb. 176 MD, Bischof 3.5

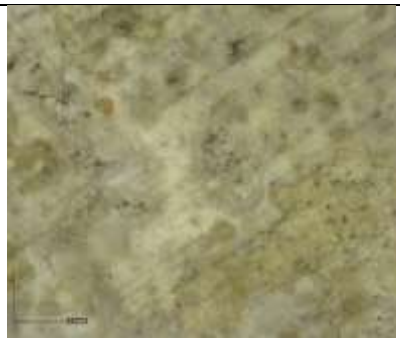


Abb. 177 MD, Bischof 3.6

Magdeburg, Musterfläche MD_II



Abb. 178 MD Tonsur Ref MF 1



Abb. 179 MD Tonsur Ref MF 1



Abb. 180 MD Tonsur Ref MF 1



Abb. 181 MD Tonsur Ref MF 1



Abb. 182 MD Tonsur Ref MF 1



Abb. 183 MD Tonsur MF 1_1



Abb. 184 MD Tonsur MF 1_2



Abb. 185 MD Tonsur MF 1_3



Abb. 186 MD Tonsur MF 1_4



Abb. 187 MD Tonsur MF 1_5



Abb. 188 MD Tonsur MF 1_5



Abb. 189 MD Tonsur Ref MF 2



Abb. 190 MD Tonsur Ref MF 2



Abb. 191 MD Tonsur Ref MF 2

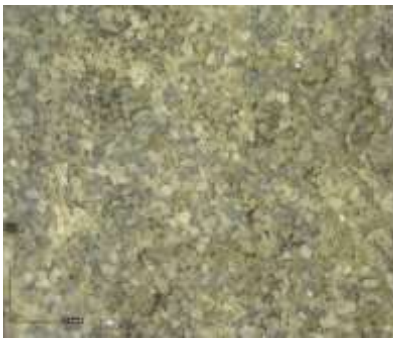


Abb. 192 MD Tonsur MF 2_7



Abb. 193 MD Tonsur MF 2_8



Abb. 194 MD Tonsur MF 2_9



Abb. 195 MD Tonsur MF 2_10



Abb. 196 MD Tonsur MF 2_11



Abb. 197 MD Tonsur MF 2_12



Abb. 198 MD Tonsur MF 2_1



Abb. 199 MD Tonsur MF 2_2

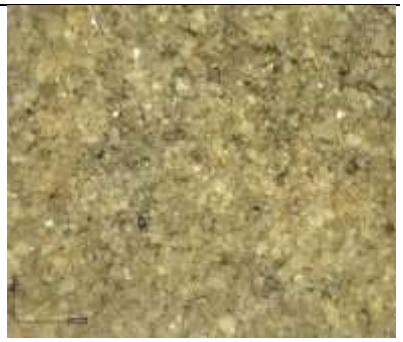


Abb. 200 MD Tonsur MF 2_3



Abb. 201 MD Tonsur MF 2_4

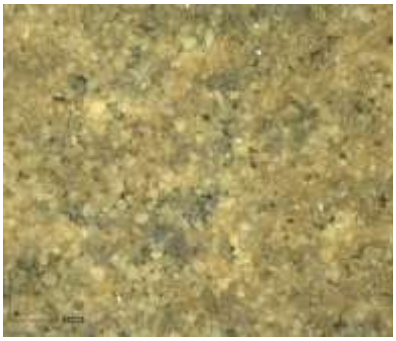


Abb. 202 MD Tonsur MF 2_5



Abb. 203 MD Tonsur MF 2_6



Abb. 204 MD Tonsur MF 4_1



Abb. 205 MD Tonsur MF 4_2



Abb. 206 MD Tonsur MF 4_3



Abb. 207 MD Tonsur MF 4_4



Abb. 208 MD Tonsur MF 4_5



Abb. 209 MD Tonsur MF 4_6

Magdeburg, Musterfläche MD_III



Abb. 210 MD, Nordf 1.1



Abb. 211 MD, Nordf 1.2

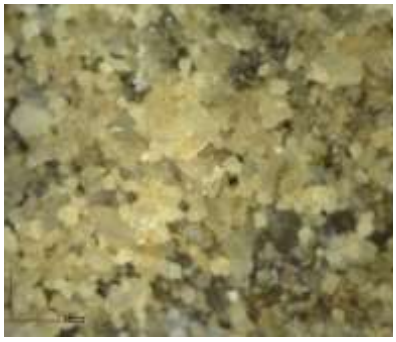


Abb. 212 MD, Nordf 1.3



Abb. 213 MD, Nordf 1.3, Gips



Abb. 214 MD, Nordf 1.4



Abb. 215 MD, Nordf 1.5



Abb. 216 MD, Nordf 1.6



Abb. 217 MD, Nordf 1.7



Abb. 218 MD, Nordf 1.8



Abb. 219 MD, Nordf 1.9



Abb. 220 MD, Nordf 1.7 Gips



Abb. 221 MD, Nordf 1.9 Gips



Abb. 222 MD, Nordf 1.10



Abb. 223 MD, Nordf 1.11



Abb. 224 MD, Nordf 1.12



Abb. 225 MD, Nordf 1.13



Abb. 226 MD, Nordf 1.14



Abb. 227 MD, Nordf 1.15



Abb. 228 MD, Nordf 1.16



Abb. 229 MD, Nordf 1.17



Abb. 230 MD, Nordf 1.18



Abb. 231 MD, Nordf 1.19



Abb. 232 MD, Nordf 1.20

Entfernung von Bewuchs



Abb. 233 MD, Nordf ungereinigt

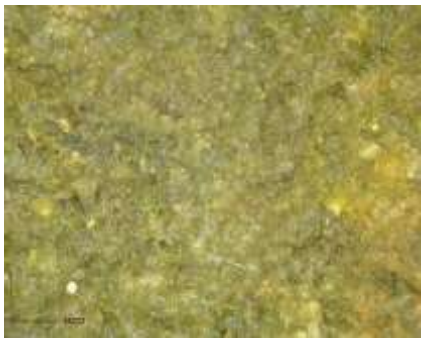


Abb. 234 MD, Nordf gereinigt

Halle, Musterfläche HAL_I



Abb. 235 HAL, 1.1



Abb. 236 HAL, 1.2



Abb. 237 HAL, 1.3

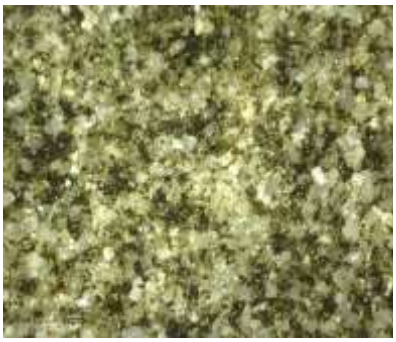


Abb. 238 HAL, 1.4



Abb. 239 HAL, 1.5



Abb. 240 HAL, 1.6

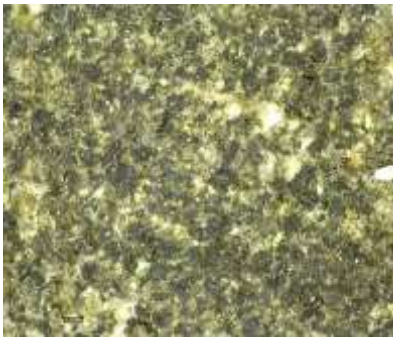


Abb. 241 HAL, 1.7



Abb. 242 HAL, 1.8



Abb. 243 HAL, 1.9

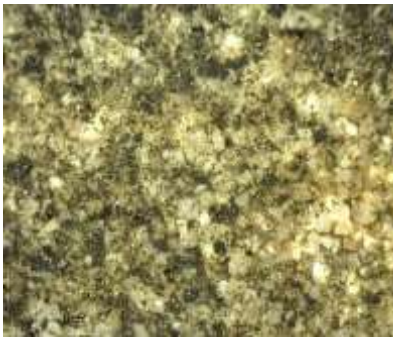


Abb. 244 HAL, 1.10

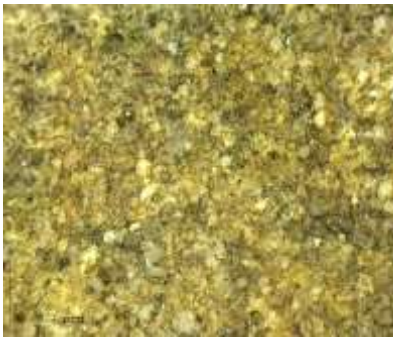


Abb. 245 HAL, 1.11



Abb. 246 HAL, 1.12

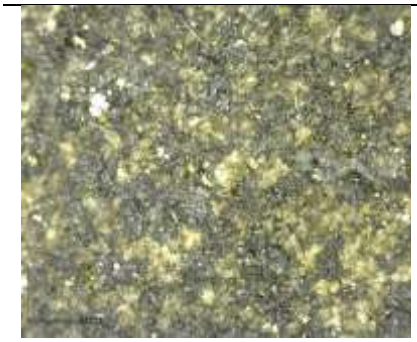


Abb. 247 HAL, 2.1

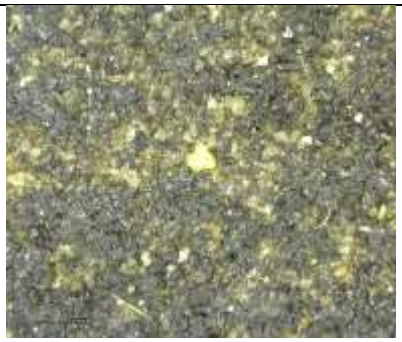


Abb. 248 HAL, 2.2

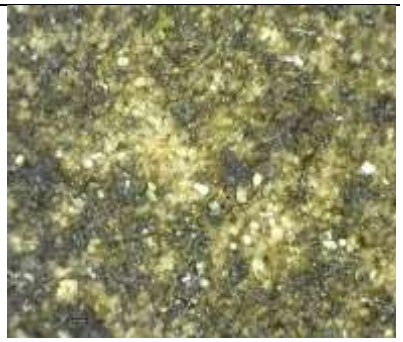


Abb. 249 HAL, 2.3

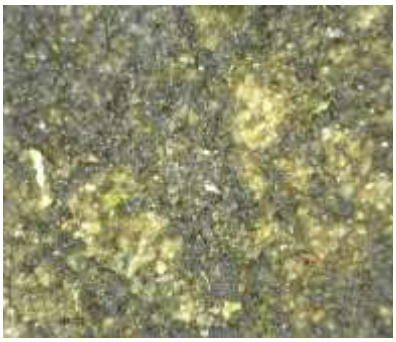


Abb. 250 HAL, 2.4



Abb. 251 HAL, 2.5

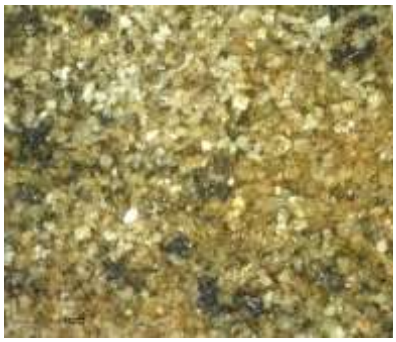


Abb. 252 HAL, 2.6

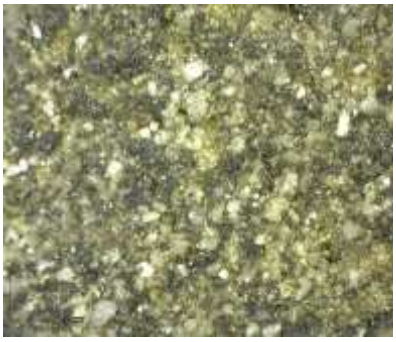


Abb. 253 HAL, 3.1

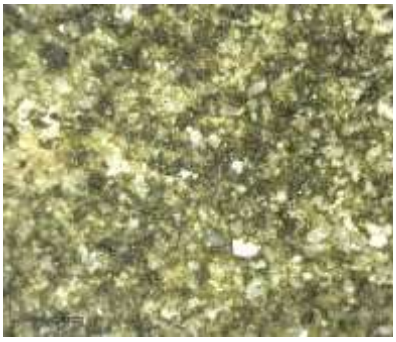


Abb. 254 HAL, 3.2



Abb. 255 HAL, 3.3



Abb. 256 HAL, 3.4

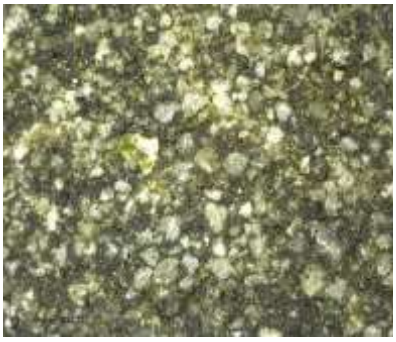


Abb. 257 HAL, 3.5

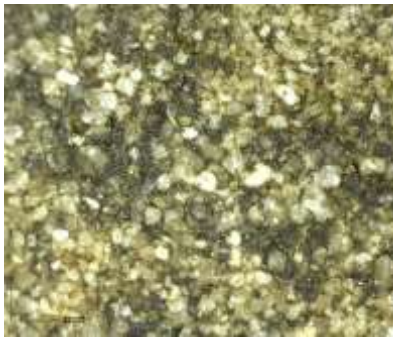


Abb. 258 HAL, 3.6

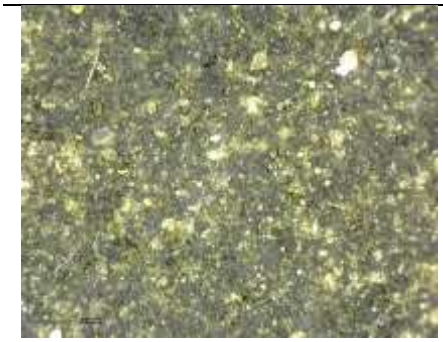


Abb. 259 HAL, Ref. A Rh 1

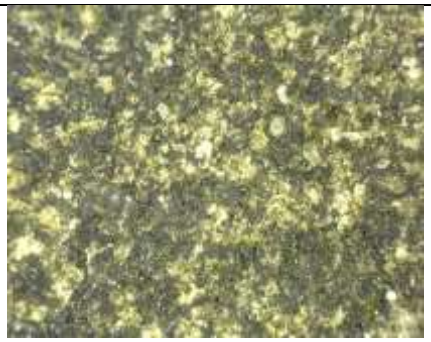


Abb. 260 HAL, Ref. B Rh 1

Halle Dom, Musterplatte mit Vergrünung



Abb. 261 HAL, Ref. 1.3



Abb. 262 HAL, 1.1: CL 50, 100%



Abb. 263 HAL, 1.2: Thunder, 100%



Abb. 264 HAL, Ref. 1.3



Abb. 265 HAL, 1.4, Infinito: 100%



Abb. 266 HAL, 1.5, Smart 300