

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

**Monitoring von Maßnahmen
zur behutsamen Betoninstandsetzung
von national bedeutsamen Baudenkmälern
der Nachkriegsmoderne**

gefördert von der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Bewilligungsempfänger:

Prof. Dr.-Ing. Christian Heese

Hochschule RheinMain

Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen

Fachgebiet Technologie der Massivbaustoffe und Massivbauerhaltung

Kurt-Schumacher-Ring 18

65197 Wiesbaden

Wiesbaden, Mai 2023

DBU-Aktenzeichen: 35625/01

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Christian Heese

Projektbearbeiter:

Dr.-Ing. Sarah Steiner

Dr. Michael Auras

Phillip Grillich, M.Sc.

Franziska Faist, M.Sc.

Dipl.-Ing. Jörn Kreye

Dipl.-Ing. (FH) Frowin Urban

Verfasser:

Dr.-Ing. Sarah Steiner

Dr. Michael Auras

Franziska Faist, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Christian Heese

Kooperationspartner:

Institut für Steinkonservierung e. V.

Große Langgasse 29

55116 Mainz

Projektlaufzeit:

September 2020 bis März 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Zusammenfassung

1	Motivation und Zielsetzung	12
2	Zerstörungsfreie Prüfmethoden zur Beurteilung der Bausubstanz	14
2.1	Infrarotthermographie	14
2.2	Radarverfahren	14
2.3	Ultraschalltomographie	15
2.4	Widerstandsmessung (Wenner-Sonde)	16
2.5	Impakt-Echo-Verfahren	17
3	Laboruntersuchungen	18
3.1	Aufbau der Prüfkörper	18
3.2	Ergebnisse und Diskussion	20
4	Evangelische Christuskirche (Bingen-Büdesheim)	24
4.1	Objektbeschreibung, zeitliche und methodische Einordnung der Instandsetzungen	24
4.2	Ergebnisse und Diskussion	27
4.2.1	Sichtprüfung	27
4.2.2	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen	27
4.3	Zustandsbewertung Bauwerk	32
5	Beckerturm (Becker-Brauerei in St. Ingbert)	33
5.1	Objektbeschreibung, zeitliche und methodische Einordnung der Instandsetzungen	33
5.2	Ergebnisse und Diskussion	34
5.2.1	Drohnenbasierte Erfassung der Instandsetzungsflächen	34
5.2.2	Sichtprüfung und Schadenskartierung	36
5.2.3	Zerstörungsfreie Charakterisierung von Schäden an den Instandsetzungsflächen	37
5.3	Zustandsbewertung Bauwerk	39
6	Neue Einsegnungshalle (Hauptfriedhof Saarbrücken)	40
6.1	Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen	40
6.2	Ergebnisse und Diskussion	41
6.2.1	Sichtprüfung und Schadenskartierung	41
6.2.2	Nachuntersuchung und Schadensdokumentation der Instandsetzung	43

6.3	Zustandsbewertung Bauwerk	49
7	Kirche Maria Königin des Friedens „Fatimakirche“ (Kassel)	50
7.1	Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen	50
7.2	Ergebnisse und Diskussion	52
7.2.1	Sichtprüfung und Schadenskartierung.....	52
7.2.2	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen	53
7.3	Zustandsbewertung Bauwerk	58
8	Weltkulturerbe Völklinger Hütte (Völklingen).....	59
8.1	Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen	59
8.2	Ergebnisse und Diskussion	62
8.2.1	Sichtprüfung und Schadenskartierung.....	62
8.2.2	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen	66
8.3	Zustandsbewertung Bauwerk	67
9	Kultur- und Kongresszentrum Liederhalle (Stuttgart).....	68
9.1	Objektbeschreibung, zeitliche und methodische Einordnung der Instandsetzung...68	
9.2	Ergebnisse und Diskussion	69
9.2.1	Sichtprüfung.....	69
9.2.2	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen	70
9.3	Zustandsbewertung Bauwerk	76
10	Stadthalle (Lahnstein).....	77
10.1	Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen	77
10.2	Ergebnisse und Diskussion	78
10.2.1	Sichtprüfung und Schadenskartierung.....	78
10.2.2	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen	78
10.3	Zustandsbewertung Bauwerk	81
11	Eignung und Einschränkungen der zerstörungsfreien Prüfmetho- den für ein Monitoring von Instandsetzungsmaßnahmen	82
12	Einschätzung zur Dauerhaftigkeit der untersuchten Instandsetzungsmaßnahmen.....	83
13	Öffentlichkeitsarbeit	85
14	Fazit.....	86
15	Literaturverzeichnis.....	87

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Skizze des Probekörpers Sto-1	19
Abb. 2: Skizze des Probekörpers P1-CEM I	20
Abb. 3: Oben: Bild des Probekörpers Sto-1 mit eingezeichneten Positionen der Fehlstellen. Unten: Wärmebilder bei aktiver Thermographie nach verschiedenen Zeitspannen der Aufheizung.	21
Abb. 4: A): 3D Skizze des Probenkörpers Sto-1. Zu sehen ist die Lage der in B) und C) dargestellten Ultraschallmessungen. Die rote Ebene kennzeichnet die Position des B-Bildes und die blaue Ebene die Position des D-Bildes	22
Abb. 5: A) 3D Skizze des Probenkörpers P1-CEM I mit der Position der in B) dargestellten Ultraschallmessung (B-Bild; rote Ebene in A)	23
Abb. 6: Links: Nordansicht der evangelischen Christuskirche (Bingen-Büdesheim). Rechts: Detailaufnahme einer Bronzetür des linken Portals.	24
Abb. 7: Links: Außenansicht des freistehenden Glockenturms. Rechts: Die Innenansicht zeigt die original erhaltene Sichtbettoberfläche mit Brettschalstruktur.	25
Abb. 8: Innenansicht der evangelischen Christuskirche (Bingen-Büdesheim) mit Blick auf den Altarraum	25
Abb. 9: Links: Abschnitt der aus einer Kombination aus Buntglasfenstern und Mauerwerk gefertigten Fassade im Zeltdachbereich. Rechts: Detailaufnahme zeigt die Ausführung einer ersten Sanierungsmaßnahme, bei der die Oberseite der freiliegenden Ziegelbereiche händisch abgedichtet werden musste, da Lochziegel anstatt planmäßig vorgesehener Vollziegel verwendet wurden.	26
Abb. 10: Links: waagerechte Rissbildung im Anschlussbereich der Säule auf Höhe des Übergangs Mauerwerk zu Betonfassade. Rechts: Waagrechte, zum Teil umlaufende Rissbildung an einer Säule der Ostfassade.	27
Abb. 11: Wärmebildaufnahme eines Stahlbetonelements der Ostfassade.....	28
Abb. 12: Ergebnisse aus den Radarmessungen projiziert auf die Untersuchungsfläche an der Ostfassade (Tiefe: 2 – 5 cm, kumuliert). ❶ bis ❷ kennzeichnen die einzelnen Stäbe der Vertikalbewehrung. Die rot markierten Bereiche sind Flächen, die bei der Sichtprüfung (inkl. Klopfest) Auffälligkeiten zeigten.	29
Abb. 13: Links: Auswertung der Ultraschalluntersuchungen an der Ostfassade. Rechts: Linienscans (B-Bilder) der Ultraschallmessungen.	29
Abb. 14: Messraster der Impakt-Echo Untersuchungen. Die orange und hellblau hinterlegten Felder kennzeichnen Messpunkte mit Abweichungen zur tatsächlichen Bauteildicke.	30
Abb. 15: Wärmebildaufnahme an der Südseite des Glockenturms.	30
Abb. 16: Oben: Bewehrungsdetektion mittels Radarverfahren an der Südseite des Glockenturms; Der rot markierten Bereiche wies bei den IR-Messungen und der Sichtprüfung (inkl. Klopfest) Auffälligkeiten auf. Unten: Ultraschall-Linienscans (B-Bild).....	31

Abb. 17: Turm der Becker-Brauerei in St. Ingbert.....	33
Abb. 18: Südfassade des Beckerturms.....	34
Abb. 19: 3D-Modell mit Ansicht der Nordfassade	35
Abb. 20: 3D-Modell mit Ansicht der Südfassade.....	35
Abb. 21: Links: Kartierung der Instandsetzungsflächen an der Westfassade und Rechts: Instandsetzungsflächen an der Südfassade (rechts)	36
Abb. 22: Schadenskartierung Nordfassade	36
Abb. 23: Schadenskartierung Westfassade	36
Abb. 24: Schadenskartierung Südfassade.....	37
Abb. 25: Auf den Sichtbeton projiziertes Radargramm an einem repräsentativen Bereich der Südfassade. Die roten Linien kennzeichnen Risse. Der instandgesetzte Bereich ist schwarz umrandet.....	38
Abb. 26: Messergebnisse des elektrischen Widerstands mit der Wenner-Sonde. Die roten Linien kennzeichnen Risse. Der instandgesetzte Bereich ist schwarz umrandet. ...	38
Abb. 27: Behutsame Instandsetzung (grau eingerahmt) an der Südfassade. (A): Ergebnisse aus der Ultraschalltomographiemessung. (B): Auswertung einer vertikal angelegten Messreihe mit der Wenner-Sonde.....	39
Abb. 28: Ostansicht der Neuen Einsegnungshalle am Hauptfriedhof Saarbrücken.....	40
Abb. 29: Bestands- und Zustandskartierung repräsentativer Teilflächen (Blau: Instandsetzung; Gelb: Hohlstelle; Rot: Schaden an Instandsetzung; Violett: Schaden am bauzeitlichen Sichtbeton).	42
Abb. 30: Einarbeiten von Kieselsteinen in die Reparaturflächen zur Nachstellung der teilweise durch Bindemittelgrate, teilweise durch freiliegende Kieselsteine vorgezeichneten Schalbrettstruktur.	43
Abb. 31: Links: Foto des Fassadenabschnitts. Rechts: Im noch nicht instandgesetzten Teil des Bauwerks zeigt das Wärmebild bei direkter Sonneneinstrahlung neben den visuell erkennbaren Abplatzungen eine Vielzahl von beginnenden Ablösungen.	44
Abb. 32: Links: behutsame Instandsetzung an der Südwestfassade auf Höhe des ersten Obergeschosses. Rechts: Der rote Rahmen markiert die Wärmebildaufnahme.	44
Abb. 33: (A): B-Bild einer Ultraschallmessung an einem Abschnitt der Südostfassade. Die Position des B-Bildes ist in dem unten dargestellten Foto der Sichtbetonwand rot markiert. (B): Bild des entnommenen Bohrkerns. (C): Die grün hinterlegten Flächen kennzeichnen jene Bereiche, in denen das Rückwandecho darstellbar ist und das Bauteil somit als intakt angesehen werden kann. Die behutsam instandgesetzten Abschnitte sind schwarz umrandet. Der gelbe Punkt markiert die Position der Bohrkernentnahme. (D): Bildaufnahme der beginnenden Abplatzung im bauzeitlichen Sichtbeton.	45
Abb. 34: Rückseite der in Abb. 33 gezeigten freistehenden Wand eines Laubengangs (links) und die B-Bilder aus den Ultraschallmessungen (rechts)	46
Abb. 35: Links: Abschnitt der Südost-Fassade des ersten Obergeschosses. Die behutsame Instandsetzung ist schwarz umrandet. Die grün markierten Bereiche kennzeichnen	

intakte Fassadenabschnitte (Rückwandecho nachweisbar). Rechts: Aufnahme des entnommenen Mikro-Bohrkerns (BK)	47
Abb. 36: Links: Einzelwerte der a^* - und b^* -Werte im XY-Diagramm; Rechts: Mittelwerte der L^* -Werte für die drei untersuchten Teilflächen, jeweils Bestandsbeton (Altbeton) und Reparaturbeton.	48
Abb. 37: Sehr gute farbliche Anpassung des Reparaturmörtels an den Bestandsbeton des oberen Betonierabschnitts, jedoch deutlicher Unterschied zum Bestandsbeton des unteren, etwas dunkleren Abschnitts (Zentralbau, Dach, Nordfassade).....	48
Abb. 38: Kirche Maria Königin des Friedens - Fatimakirche.....	50
Abb. 39: Wellenförmige Schüttlinien und dunkle Kiesnester im Ziegelsplittbeton.....	51
Abb. 40: Dunkle Verfärbung der Instandsetzung (Spritzbeton auf Kegel)	52
Abb. 41: Nordfassade: die Position der Profometermesslinien sind durch rote Pfeile gekennzeichnet; die behutsame Instandsetzung ist weiß umrahmt	53
Abb. 42: Oben: Nordfassade des Glockenturms mit Messlinien der zur Bewehrungsdetektion (rote Pfeile). Die behutsame Instandsetzung ist weiß umrahmt. Unten: Messbild der Untersuchungen mit dem Profometer (Messlinie 6).....	54
Abb. 43: A): Auswertung der Ultraschallmessungen an der Nordfassade des Glockenturms. Die Instandsetzungsfläche ist weiß umrahmt. Grün hinterlegte Abschnitte kennzeichnen Wandbereiche ohne Delamination. B): Im B-Bild ist kein eindeutiges Rückwandecho darstellbar; C): Rückwandecho ist trotz hohem Signalrauschen im oberflächennahen Bereich weitgehend nachweisbar.....	55
Abb. 44: Radargramm (Tiefe 0-6 cm; kumuliert) projiziert auf den untersuchten Bereich der Sichtbetonfassade des Glockenturms. Die Instandsetzung ist weiß umrahmt.	56
Abb. 45: Widerstandsmessung mittels Wenner-Sonde an der Nordfassade des Glockenturms. Die Instandsetzungsfläche ist weiß umrahmt.....	57
Abb. 46: Detektion von Schadstellen mittels Thermographie – Übersichtsaufnahme der Westfassade.	57
Abb. 47: Im IR-Bild sichtbare Kiesnester und Schüttlinien – Übersichtsaufnahme der Südfassade	58
Abb. 48: Foto des Rohstoffbunkers, Zustand 2022.....	60
Abb. 49: Südfassade des Kohlenturms.....	61
Abb. 50: Partiiell instandgesetzte Ostseite des Kohlenturms	61
Abb. 51: Deutlich ablesbare Instandsetzungsbereiche mit Nachstellung der originalen Schalbrettstruktur und dem insgesamt heterogenen Erscheinungsbild.....	62
Abb. 52: Zustandskartierung eines Teilbereichs des Rohstoffbunkers (Dunkelblaue Linie: Offenliegende Bewehrung; rote Linie: Riss; hellblau: Instandsetzung; hellgrün: Kiesnest; gelb: Hohllage).	63
Abb. 53: Links: Riss in einer konventionell instandgesetzten Fläche des Kohlenbunkers, Rechts: Detail mit Blattrost auf der Bewehrung.	64

Abb. 54: Das überwiegend orthogonal ausgebildete Rissmuster am Kohlenbunker scheint die Lage der Bewehrung nachzuzeichnen.	65
Abb. 55: An den noch nicht instandgesetzten Flächen des Kohlenbunkers ist die Schädigung der Betonoberfläche weit fortgeschritten.	65
Abb. 56: Links: Nordseite des Rohstoffbunkers. Der blaue Rahmen markiert die Position des über 2 m aufgenommenen Linienscans. Rechts: Detailaufnahmen (B-Bilder) der einzelnen Messstellen.	66
Abb. 57: Blick auf einen Ausschnitt der hufeisenförmig gekrümmten Außenwand des Beethovensaals mit charakteristischer Felderung und leicht aufgehellten Instandsetzungsstellen.	68
Abb. 58: Links: Kakeleerisse im Reparaturbeton, Rechts: kleine Abplatzung in Bestands- und Reparaturbeton	69
Abb. 59: Oben (Überblickfoto): Fehlstelle im Bestandsbeton über dem Dachanschluss. Unten (Detailfoto): Die Ablösung infolge Bewehrungskorrosion ist bereits weiter nach rechts fortgeschritten. Die am rechten Bildrand anschließende hellere Reparaturstelle ist jedoch intakt.	70
Abb. 60: In den Vertiefungen finden sich geringfügige Schäden am Bestandsbeton: (1) Betonabplatzung über Bewehrung, (2) Rostfahne am Durchstoßpunkt eines freien Endes eines Bewehrungskorbs. Das Risskrakelee in der Bindemittelhaut (3) scheint stabil zu sein, es hat nicht zu Abplatzungen geführt.	70
Abb. 61: Übersichtsplan der Fassade des Beethovensaals. An den eingezeichneten Messstellen wurden Messungen mit Ultraschall und Wenner-Sonde durchgeführt.	71
Abb. 62: Übersichtsplan der Fassade des Beethovensaals. An den eingezeichneten Messstellen wurden Radar-Messungen durchgeführt.	71
Abb. 63: Links: Foto der Messstelle 1. Rechts: Auswertung der Ultraschallmessungen projiziert auf die Sichtbetonfassade. Die Bereiche 1 – 3 kennzeichnen die Positionen der in Abb. 64 gezeigten B-Bilder.	72
Abb. 64: B-Bilder aus der in Abb. 63 gezeigten Auswertung der Ultraschallmessungen. 1: Bereich intakt (Rückwandecho darstellbar); 2: oberflächennahe interne Schäden bzw. Verbundlockerung; 3: Rückwandecho teilweise darstellbar.	72
Abb. 65: Ergebnisse der Widerstandsmessung (Wenner-Sonde) an Messstelle 1. Die Instandsetzungsflächen sind weiß umrahmt.	73
Abb. 66: Auswertung der Ultraschallmessung an Messstelle 2	74
Abb. 67: Ergebnisse der Messung d. elektr. Widerstandes (Wenner-Sonde) an Messstelle 2	74
Abb. 68: Links: IR-Bild der Messstelle 3. Rechts: Auswertung der Ultraschallmessungen projiziert auf die Sichtbetonfassade.	75
Abb. 69: A) Übersichtsbild der Messstelle „Nischen“. B) Wärmebildaufnahme eines Detailbereichs. Die instandgesetzte Fläche ist weiß umrahmt. C) Ergebnisse der Radarmessung	76
Abb. 70: Stadthalle in Lahnstein	77

Abb. 71: Teil des Untersuchungsbereichs auf dem Dach der Stadthalle.....	78
Abb. 72: IR-Bild der Betonplatten im Fassadenabschnitt der Südostseite. Beginnende Betonabplatzungen sind grün markiert. Die strichlierte Linie umfasst den in Abb. 73 und Abb. 75 gezeigten Untersuchungsbereich.	79
Abb. 73: A) Bild eines Sichtbetonelements an der Südost-Fassade. Die Auswertung der Ultraschallmessung ist auf das Bild projiziert. Grün hinterlegter Bereich: intakter Beton. B) B-Bild über die Länge des Linienscans.....	79
Abb. 74: Abplatzungen im bauzeitlichen Sichtbeton	80
Abb. 75: A): Auswertung des vertikalen Linienscans mit Ultraschall projiziert auf die Sichtbetonoberfläche. B) bis D): Einzelmessungen (B-Bilder) aus dem durchgeführten Linienscan	80

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Kennwerte der Basisplatte (Beton C 25/30, hergestellt im Oktober 2007, E-Modul- und Druckfestigkeitsprüfung erfolgten im Dezember 2020, Rautiefe und Haftzugfestigkeit wurden im März 2022 ermittelt).....	19
Tab. 2: Frischmörtel- und Festmörteleigenschaften des applizierten Instandsetzungsmörtels	19
Tab. 3: Flächenauswertung der Zustandskartierungen an der Neuen Einsegnungshalle.....	42
Tab. 4: Ergebnisse aus den Betondeckungsmessungen mit dem Profometer.....	54
Tab. 5: Zusammenfassende Zustandsbewertung der Instandsetzungsmaßnahmen	84

Zusammenfassung

Im Rahmen des vorgestellten Projektes wurden insgesamt 8 denkmalgeschützte und bereits instandgesetzte Bauwerke, zum Teil mehrmals zerstörungsfrei untersucht. Unter den ausgewählten Baudenkmalern befanden sich sowohl konventionell als auch behutsam instandgesetzte Gebäude. Dabei wurden Instandsetzungsmaßnahmen untersucht die vor längstens 73 Jahren durchgeführt wurden (Beckerturm, St. Ingbert). Das Untersuchungsobjekt mit der jüngsten Instandsetzung (durchgeführt vor 5 Jahren) ist die Stadthalle in Lahnstein. Die Bauwerksinspektion umfasste Messungen mit bildgebenden Prüfmethode wie Thermografie, Ultraschalltomographie und Radar. Ergänzend wurden Messungen des elektrischen Widerstandes mit der Wenner-Sonde sowie fallweise Farbmessungen und Untersuchungen mit dem Impakt-Echo durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die verwendeten Mess- und Untersuchungsmethoden zum Monitoring von denkmalgeschützten Sichtbetonbauwerken der Moderne wichtige Ergänzungen zur klassischen ingenieurtechnischen Sichtprüfung liefern. Die Untersuchungsergebnisse ergaben, dass behutsame Instandsetzungen lange Standzeiten erreichen können. Die im Zuge des Projekts durchgeführten Recherchen zu den Instandsetzungsmaßnahmen machen deutlich, dass hierfür eine geeignete und fachlich fundierte Planung der Ausführung unerlässlich ist. Eine im Vorfeld detaillierte fachkundige Zustandserfassung an allen Bauteilen und eine darauf basierende sorgfältige Auswahl der Instandsetzungsmaterialien sowie eine handwerklich sehr sorgfältige Durchführung der Maßnahmen mit engmaschiger, fachlicher Begleitung der Ausführung sind die wichtigsten Voraussetzungen für eine dauerhafte behutsame Instandsetzung. Regelmäßige Kontrollen in Form eines Bauwerksmonitorings können zudem wesentlich zum Erhalt der denkmalgeschützten Bausubstanz beitragen.

1 Motivation und Zielsetzung

In Deutschland stehen mit Stand 2017 rund 660 000 Bauwerke unter Denkmalschutz. Dies entspricht einem Anteil von 2,9 % am Gesamtgebäudebestand (22,1 Millionen) [1]. Dabei erlangen immer mehr Sichtbetonbauwerke den Status eines Denkmals. Insbesondere der Stahlbetonbau des frühen 20. Jahrhunderts brachte durch die rasante Entwicklung der technisch möglichen Ausführung beeindruckende Bauwerke hervorbrachte [2]. Im Vergleich zu heutigem, normgemäß eingesetztem Beton können die zur damaligen Zeit hergestellten Bauteile aus Stahlbeton jedoch deutlich geringere Dauerhaftigkeiten aufweisen. Neben betontechnologischen Unterschieden entsprachen insbesondere konstruktive Anforderungen, wie beispielsweise die Höhe der Betondeckung zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit, in vielen Fällen nicht den derzeit geltenden Anforderungen. Hierdurch entstanden vornehmlich Schäden wie Abplatzungen durch karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion. Bei der Instandsetzung – auch von Baudenkmalern – wurden und werden i.d.R. „konventionelle Instandsetzungsmaßnahmen“ gemäß der derzeit zu beachtenden Rili-SIB [3] und TR Instandhaltung von Betonbauwerken [4] zur Sicherung der Dauerhaftigkeit und Standsicherheit eingesetzt. Dabei wird die Betonoberfläche häufig großflächig nach Entrosten der Bewehrung und Aufbringen eines Korrosionsschutzes durch eine neue Betonoberfläche ersetzt. Ein optischer „Mindestangleich“ an die umgebenden Betonoberflächen erfolgt häufig nur über eine entsprechende Farbgebung der gesamten Fläche. Für die Denkmalpflege bedeutet dieses Vorgehen – insbesondere bei Sichtbetonbauten – herbe Verluste, da die originale Betonoberfläche mit ihren Werkspuren als Dokument der damaligen Bautechnik verloren geht oder nicht mehr sichtbar ist. Die Erhaltung und Instandsetzung dieser historisch bedeutsamen Betonbauwerke erfordern Maßnahmen, die umgesetzt werden, ohne dass die ursprüngliche Konstruktion und Ausdruckskraft dabei verloren geht. Neben einer Instandsetzung nach den geltenden Regelwerken kam in den letzten Jahrzehnten an Baudenkmalern daher auch vermehrt eine lokal begrenzte, so-genannte behutsame Instandsetzung zum Einsatz [5–8]. Bei der „behutsamen Betoninstandsetzung“ wird der Eingriff in die Bausubstanz minimiert. Es wird Wert auf kleinteilige Reparaturstellen gelegt und die großflächige Entfernung des originalen Betons über die geschädigten Bereiche hinaus vermieden. Zudem wird, im Gegensatz zur konventionellen Betoninstandsetzung, bei Sichtbetonbauwerken auf den Einsatz von kunstharzgebundenen Oberflächenbeschichtungen verzichtet, um einen größtmöglichen Erhalt der originalen Betonoberfläche mit ihrem architektonischen und optischen Erscheinungsbild zu bewirken (vgl [6; 8; 9]). Für diese „behutsame Betoninstandsetzung“ ist eine individuelle Abstimmung der gewählten Instandsetzungsmethode und des Instandsetzungsmaterials auf das Bauwerk erforderlich. Die Instandsetzungsmaterialien sollen in ihrer Zusammensetzung, Farbigkeit und Oberflächenstruktur möglichst der des Bauwerksbetons entsprechen. Trotz der beschriebenen Vorteile der Ansätze zur behutsamen Betoninstandsetzung stehen diese häufig in der Kritik im Vergleich zur konventionellen Instandsetzung eine geringere Dauerhaftigkeit aufzuweisen. Die geringere Dichtigkeit der Instandsetzungsmörtel und -betone könnte ein stärkeres Eindringen von Feuchtigkeit und Schadstoffen ermöglicht und damit das Risiko der erneuten Bewehrungskorrosion erhöhen. Außerdem kann die Behandlung von Teilflächen das Korrosionsrisiko der unbehandelt verbleibenden Flächen nicht beheben. Eine Übernahme der Gewährleistung seitens der ausführenden Firma wird daher, aufgrund der Abweichungen vom Regelwerk teilweise abgelehnt.

Es ist daher zwingend notwendig, bei der Planung derartiger Maßnahmen das weitere Korrosionsrisiko für den verbleibenden bauzeitlichen Bestandsbeton bauteilweise abzuschätzen [10] und gegebenenfalls durch begleitende Maßnahmen, z.B. durch Hydrophobierung, zu mindern. Für einen denkmalgerechten Erhalt von, sei es nun konventionell oder behutsam instand gesetzten Bauwerken, ist eine kontinuierliche Überprüfung der Bausubstanz erforderlich, um im besten Fall Schäden zu beheben, bevor bauhistorisch bedeutsame Merkmale verloren gehen. Die durchgeführten, systematischen Nachuntersuchungen und das Monitoring von Betoninstandsetzungsmaßnahmen an behutsam instandgesetzten Baudenkmalern sollen helfen, die Nachhaltigkeit von Instandsetzungsmethoden zu bewerten. Die Verbundqualität hat sich als einer der wesentlichen Faktoren für die Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahme herausgestellt (z.B. [10; 11]). Bei der Zustandsbewertung von Bauwerken kamen im vorgestellten Projekt neben der handnahen Untersuchung (visuelle Inspektion und Klopfprobe) die bildgebenden Methoden Radar [12; 13], Ultraschalltomographie [14–16] und Thermographie [17; 18] zum Einsatz. Die Kombination dieser Methoden hat sich als sinnvoll erwiesen, da sich die Ergebnisse zum Teil gegenseitig stützen oder ergänzen können (siehe z.B.: [19–21]). Ergänzend wurden Widerstandsmessung nach dem Wenner-Verfahren und Untersuchungen mit dem Impact-Echo durchgeführt. Durch Anwendung dieser Methoden konnten an repräsentativen Bauteilen Aussagen zur Dauerhaftigkeit insbesondere von behutsamen Instandsetzungen gewonnen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen beitragen, bei Bauherren, Denkmalbehörden, Fachplanern, Industrie und ausführenden Handwerksbetrieben langfristig die Akzeptanz für die behutsamen Instandsetzungsmethoden – die Eignung im speziellen Anwendungsfall vorausgesetzt – zu erhöhen.

2 Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Beurteilung der Bausubstanz

2.1 Infrarotthermographie

Die Thermografie ist ein bildgebendes Verfahren, das es ermöglicht, die Wärmestrahlung von Oberflächen aufzunehmen und darzustellen. Unterschiedliche Temperaturfelder auf der Oberfläche können auf Schäden (Delaminationen, Abplatzungen etc.) oder Mängel (Kiesnest) im Bauwerk hinweisen. Derlei Fehlstellen bedingen einen gehemmten Wärmeabtrag in das Bauteilinnere. Es entsteht ein Wärmestau, und das Material, welches durch solche Fehlstellen vom übrigen Bauteil (teilweise) getrennt wird, erwärmt bzw. erkaltet früher als der umgebende Beton. Voraussetzung hierfür ist ein Wärmetransport im Material. Dieser kann von außen nach innen erfolgen und wird meist aktiv (IR-Strahler) oder natürlich (Sonneneinstrahlung / Lufttemperatur) angeregt. Der maximale Temperaturunterschied einer Fehlstelle wird u. a. durch deren Tiefe (Betonüberdeckung) beeinflusst. In der Regel kann eine Fehlstelle nur dann geortet werden, wenn der Abstand zur Oberfläche nicht größer als der Durchmesser der Fehlstelle ist [22]. Bei Thermographie mit künstlicher Aktivierung lassen sich trockene als auch wassergefüllte Hohlräume in bis zu 12 cm Tiefe detektieren [23; 24].

Um Instandsetzungsmaßnahmen oder oberflächennahe Delaminationen detektieren zu können, muss eine möglichst gleichmäßige Erwärmung der Bauteiloberfläche erfolgen. Bei der Untersuchung von ausgedehnten Bauteilen oder Konstruktionen (ganze Fassaden, Brücken etc.) kommt daher die Sonneneinstrahlung häufig als bevorzugte Wärmequelle zum Einsatz. Bei der natürlichen Aktivierung gibt es allerdings einige wichtigste Einflussfaktoren, die eine Detektion von Schadstellen beeinflussen oder verhindern können. Hierzu gehört u.a. eine geeignete Exposition der Fassade (Schattenwurf), Wind, Feuchtebedingungen, Oberflächenemission und ein ausreichender Temperaturgradient [24]. Die Thermographie kann daher nicht überall und zu jeder Zeit erfolgreich zum Einsatz gebracht werden. Generell gilt, je höher der Temperaturgradient desto tiefer ist die Nachweistiefe von internen Defekten. Bei natürlicher Anregung wird von möglichen Nachweistiefen von bis zu 7,6 cm berichtet [24; 25]. Bei den durchgeführten Bauwerksuntersuchungen kam die Wärmebildkamera TiX580 der Firma Fluke zum Einsatz. Die Wärmebildaufnahmen der Probekörper wurden mit einer Testo 890 IR Kamera durchgeführt.

2.2 Radarverfahren

Bei dem Radarverfahren zur Bauwerksinspektion werden üblicherweise kurze elektromagnetische Impulse im Hochfrequenzbereich (50 MHz bis ca. 5 GHz) [13] in das zu untersuchende Bauteil eingeleitet. Die ausschlaggebende Größe bei der Erfassung der Bauteilgeometrie und Detektion von Inhomogenitäten (z.B. Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien, Fehlstellen, metallische Bewehrung in Beton, etc.) ist die materialspezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit. Diese ist abhängig von der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizität des untersuchten Materials. Die eingeleitete elektromagnetische Welle wird an Materialgrenzen, bedingt durch den Unterschied der jeweiligen Dielektrizitätskonstante, reflektiert. Je höher die Differenz der Dielektrizität zweier angrenzender Stoffe, desto stärker erscheinen die Reflexionen der Schichtgrenze. An metallischen Einbauteilen kommt es zur Totalreflexion des Signals [26]. Bei bekannten Dielektrizitätszahlen der entsprechenden Materialien lässt sich aus der Wellengeschwindigkeit und der Signallaufzeit der Reflektorabstand (Materialwechsel) zur Oberfläche des Prüfkörpers



ermitteln. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren bei der Messung zählen die Temperatur und der Feuchtegehalt des Materials, der Salzgehalt (nur gelöste Salze spielen eine Rolle), die Frequenz und die Porenstruktur [12]. Die Untersuchungen wurden mit dem Georadar GP8000 der Firma Proceq durchgeführt.

2.3 Ultraschalltomographie

Die Ultraschalltomographie dient der zerstörungsfreien Erfassung eines Bauteilinneren mithilfe der Ausbreitungsgeschwindigkeiten und Laufzeiten von Scherwellen bei gegebener Frequenz. Bei der Messung, wie sie im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführt wurden, ist nur ein einseitiger Zugang zum Bauteil erforderlich, da sich Sender und Empfänger an demselben Prüfkopf befinden. Zwischen der Aussendung und dem Empfangen eines Signals, erfährt dieses im Bauteil Absorption, Reflexion und Refraktion, abhängig von den Gegebenheiten des untersuchten Körpers. Dabei ist die materialabhängige akustische Impedanz ein Maß für den Widerstand, welcher der Scherwelle entgegengesetzt wird. An einer Grenzfläche zweier Materialien mit unterschiedlichen Dichten kommt es zu einem Impedanzsprung. Daraus entsteht ein Echo, welches von dem Prüfgerät erfasst wird [27]. Trifft die Schallwelle auf Luft kommt es zur Totalreflexion. Dadurch lassen sich eingeschlossene Hohlräume, oberflächenparallele Betonabplatzungen (z.B. durch korrodierte Bewehrung), Ablösungen an Schichtgrenzen durch fehlenden Verbund oder Lufteinschlüsse aufgrund von Verdichtungsmängeln oder Entmischungen (Kiesnester) verorten und deren Tiefe ermitteln. Wird bei einer Bauteiluntersuchung das Rückwandecho (Reflektion an der Bauteilrückseite) eindeutig nachgewiesen, kann davon ausgegangen werden, dass keine internen Schäden vorliegen. Da die Scherwelle mindestens eine Eindringtiefe von einer halben Wellenlänge benötigt, um sinnvolle Messdaten generieren zu können, kommt es zu einem so genannten „blinden Bereich“. Das genaue Ausmaß des blinden Bereichs ist zudem abhängig von der Prüfanordnung (Abstand zwischen Sender und Empfänger), der Frequenz, mit der das Signal angeregt wird, und der zu einem gewissen Teil materialabhängigen Scherwellengeschwindigkeit. Je größer die Frequenz, desto kleiner ist die Wellenlänge, was das Auflösungsvermögen erhöht. Bei höherer Frequenz nimmt jedoch die Dämpfung der Schallwellen zu, was stärkeres Signalrauschen verursacht.

Im Bauwesen wird häufig ein niedriger Frequenzbereich zwischen 10 kHz und 150 kHz verwendet [14]. Für die Bewehrungsdetektion mit Ultraschall sind gewisse Randbedingungen wie hochwertiger Beton und Bewehrungsstäben mit größerem Durchmesser vorteilhaft. Solche Gegebenheiten liegen meist eher bei Neubauten vor (Bewehrungsdurchmesser häufig $d \geq 8$ mm). In historischen Bauten liegt der Bewehrungsdurchmesser hingegen häufig bei 5 bis 8 mm [28]. Zudem ist der Zustand der Bauteiloberfläche entscheidend. Rauigkeit, Verwitterung/Aussinterungen, Rissbildung oder Verschmutzungen können wegen der Notwendigkeit der Trockenankoppelung auf die Oberfläche und der Totalreflexion an Luft, zu erheblichen Störsignalen führen. Interne Einflussfaktoren wie der Porenanteil im Beton oder das Größtkorn der Gesteinskörnung können einen maßgeblichen Einfluss auf die Eindringtiefe der Ultraschallimpulse in den Beton sowie die Detektierbarkeit der Bewehrung haben. Im Allgemeinen gelten 16 mm Größtkorn als unproblematisch, 32 mm und mehr bewirken eine deutliche Verschlechterung der Detektionsgrenzen, da mit zunehmendem Größtkorndurchmesser Streuanteile zunehmen und das Signal-Rausch-Verhältnis abnimmt [28].



Das im Zuge der Untersuchungen verwendete Prüfgerät A1020 Mira lite der Firma ASC erfasst Impuls-Echo-Ultraschalldaten mittels eines Sensorsystems, welches aus einer Matrix-Antenne von 32 Niederfrequenz-Breitband-Transversalwellen-Trockenkontaktwandlern (DPC) besteht. Eine punktuelle Einzelmessung wird als A-Bild (Laufzeitdiagramm) bezeichnet. Werden mehrere Einzelmessungen entlang einer Messlinie (in x-Richtung) aufgenommen wird ein so-genanntes B-Bild erzeugt. Die Auflösung / Segmentierung des B-Bildes entlang der x-Achse ist abhängig vom Abstand der Einzelmessungen zueinander. Werden mehrere B-Bilder (Linienscans entlang der x-Achse) erstellt, kann hieraus ein in y-Richtung verlaufendes D-Bild rekonstruiert werden. Zusätzlich lässt sich bei der Aufnahme von mehreren B-Bildern ein C-Bild generieren. Ein C-Bild ist eine Schnittebene parallel zur Oberfläche des Bauteils. Die Analyse der Ultraschalldaten erfolgte mithilfe der Software INTROVIEW-CONCRETE, die eine zwei- sowie dreidimensionale Visualisierung der Betonsubstanz ermöglicht.

2.4 Widerstandsmessung (Wenner-Sonde)

Die Widerstandsmessung nach dem Wenner-Verfahren [29] dient der Ermittlung des Elektrolytwiderstands der Porenlösung im Beton. Die Messung erfolgt über vier, entlang einer Linie und mit gleichem Abstand zueinander angeordneten, Elektroden. Über die äußeren Elektroden wird Strom eingespeist. Der daraus resultierende Potenzialabfall (Spannung) kann darauf hin über die beiden inneren Elektroden gemessen werden. Mit der zerstörungsfreien Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes kann eine Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit und der möglichen Korrosionsgeschwindigkeit für den Bewehrungsstahl erfolgen. Die Korrosion des Bewehrungsstahls besteht aus anodischem und kathodischem Teilprozess sowie den dazwischen ablaufenden elektrolytischen Transportvorgängen. Da der spezifische elektrische Widerstand den sich bei einem bestimmten Potential einstellenden Korrosionsstrom beeinflusst, hat er auch direkte Auswirkungen auf die Korrosionsgeschwindigkeit [30]. Im Allgemeinen ist ein niedriger spezifischer Widerstand mit einem hohen Korrosionsrisiko verbunden [31]. Zudem können anhand des spezifischen Elektrolytwiderstandes indirekt Rückschlüsse auf den Chloridmigrationskoeffizienten im Beton gezogen werden [32]. Der spezifische elektrische Widerstand im Beton ist abhängig von der Wassersättigung des Betons und dem Chemismus des Porenwassers. Der Messwert wird daher von vielen Parametern wie beispielsweise der Betonzusammensetzung, den Feuchtebedingungen, dem Karbonatisierungsgrad oder dem Salzgehalt beeinflusst [33]. Zusätzlich haben Temperaturschwankungen oder die unmittelbare Nähe zu Bewehrung oder Stahlfasern einen erheblichen Einfluss auf den elektrischen Widerstand und sollten daher bei der Messung berücksichtigt werden. Oberflächennahe Delamination oder Risse erzeugen Luftporen, wodurch der elektrische Widerstand erhöht wird. Dieser Umstand wird bei den nachfolgenden Untersuchungen genutzt, da hierdurch bei einer Kartierung mit der Wenner-Sonde lokal begrenzte, erhöhte Widerstände oberflächennahe Hohlstellen, Kiesnester oder partielle Ablösungen anzeigen können. Intakte Hydrophobierungen der Betonoberfläche hingegen verhindern einen ausreichenden Anschluss an das Porenwasser, was zu hohen Widerständen führt, die gegebenenfalls mit der Messtechnik nicht mehr erfasst werden können. Zur Ankopplung an den Beton werden, in Wasser getränkte, Schaumstoffkappen verwendet. Bei sehr trockenen Fassadenabschnitten ist zudem ein Vornässen des Betons erforderlich. Die gemessenen Werte können von zum Teil schwankenden lokalen Bedingungen wie Temperatur oder dem Anpressdruck während der Messung abhängen. Ein aussagekräftiger Vergleich der absoluten Messwerte



verschiedener Untersuchungsflächen an unterschiedlichen Baudenkmälern ist daher meist nicht möglich. Für die Auswertung der Ergebnisse erfolgte aus diesem Grund ein qualitativer Vergleich der gemessenen Widerstände innerhalb eines Messrasters. Das im Rahmen des Untersuchungsprogramms verwendete Prüfgerät ist das „Resipod“ der Firma Proceq (Elektrodenabstand = 50 mm).

2.5 Impakt-Echo-Verfahren

Impakt-Echo ist ein akustisches Verfahren, dessen Prinzip auf der Ausbreitung mechanisch angeregter Wellen basiert. Die Anregung erfolgt durch einen impulsartigen Aufschlag einer kleinen Stahlkugel (Impaktor) auf die Bauteiloberfläche. Dies kann händisch oder über eine im Messgerät integrierte Vorrichtung erfolgen. Die Wellen werden an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlicher akustischer Impedanz reflektiert. Ähnlich wie bei der Ultraschalltomographie erfolgt an der Grenzfläche zur Luft eine Totalreflexion. Bei bekannter Schallgeschwindigkeit kann aus der gemessenen Frequenz die Tiefenlage des Reflektors (z.B. Rückwand des Bauteils, Hohlage, etc.) bestimmt werden. Die maximale Frequenz der angeregten Wellen, und damit die minimal bestimmbare Schichtdicke, ist abhängig vom Durchmesser des Impaktors. Üblicherweise kommt es dadurch auch hier zu einem oberflächennahen Bereich mit einigen Zentimetern Tiefe, der nicht direkt erfasst werden kann („blinder Bereich“). Das Impakt-Echo-Verfahren kommt bei der Qualitätskontrolle von Bauwerken in erster Linie zur Bestimmung der Dicke eines Betonbauteils mit einseitigem Zugang zum Einsatz. Größere Hohllagen können im Allgemeinen indirekt geortet werden (siehe z.B.: [34; 35]).

3 Laboruntersuchungen

Auszüge des nachfolgenden Kapitels wurden bereits veröffentlicht in:

Steiner, S.; Grillich, P.; Öztürk, T.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring von Sichtbetonbauwerken der Nachkriegsmoderne mit bildgebenden, zerstörungsfreien Prüfverfahren“

In: 8. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken - Beurteilung, Instandsetzung und Denkmal-pflege von Bauwerken“, Esslingen 2023, Tagungsband (Raupach, M.; Schwamborn, B.; Wolff, L. (Hrsg.)), expert verlag GmbH, ISBN: 3816985564, S. 239-250.

Um die Interpretation der Ergebnisse aus den bildgebenden Prüfmethode an Sichtbetonbauwerken zu optimieren, wurden Probekörper mit unterschiedlichen Fehlstellen (Lufteinschlüsse, oberflächenparallele Delamination, Kiesnest) hergestellt und systematisch geprüft. Die durchgeführten Laboruntersuchungen und deren Ergebnisse werden nachfolgend beispielhaft für die Infrarotthermographie und die Ultraschalltomographie beschrieben. Die Erkenntnisse aus diesen Laboruntersuchungen konnten anschließend erfolgreich auf die Untersuchungen geschützter Bauwerke übertragen werden und fließen in die Ausführungen der Kapitel 4 bis 10 ein.

3.1 Aufbau der Prüfkörper

Um Delaminationen oder Kiesnester an der Schichtgrenze von Bestandsbeton zu Instandsetzungsmaterial zu simulieren, wurden zwei Probekörper mit unterschiedlichen Fehlstellen hergestellt. Als Basis dienten zwei im Oktober 2007 gefertigte Bodenplatten (200 x 150 x 27 cm³) aus einem Beton der Festigkeitsklasse C 25/30. Die Lagerung der Bodenplatten erfolgte seitdem überwiegend im Freien, wodurch sie der Witterung voll ausgesetzt waren (nicht überdacht). Das im Zuge der Probenherstellung applizierte Instandsetzungssystem besteht im Falle der Probe Sto-1 aus der zementgebundenen und kunststoffmodifizierten Haftbrücke StoCrete TH 200 sowie dem zementgebundenen und kunststoffmodifizierten Estrichmörtel StoCrete TG 108 der Firma StoCretec. Für den Probekörper P1-CEM I wurde ein mineralisch gebundener Instandsetzungsmörtel aus einem CEM I Normzement mit einem Wasser-zu-Zement Verhältnis von 0,5 verwendet. Die wesentlichen Kennwerte der Basisplatte sowie die der verwendeten Materialien des Instandsetzungssystems können den Tabellen Tab. 1 und Tab. 2 entnommen werden.

Die Bestandsbetonplatten enthalten beide eine Bewehrungsmatte mit einer Maschenweite von 15 x 15 cm² sowie je 2 horizontal verlaufende Bewehrungsstäbe im oberen bzw. unteren Viertel der Platte. Die Basisplatte der Probe Sto-1 hat eine Betonüberdeckung zur Bewehrungsmatte von etwa 5 cm. Die Oberflächen des Bestandsbetons wurden vor dem Aufbringen der Fehlstellen und der Instandsetzungsmaterialien lediglich gesäubert. Die Rautiefe belief sich im Mittel auf 0,4 mm. Die Basisplatte wurde in den 24 Stunden vor der Probenherstellung mehrfach gewässert. Auf die Probe Sto-1 wurde Material mit einer Schichtdicke von insgesamt 10 cm appliziert. Haftbrücke und Mörtel der Probe P1-CEM I beläuft sich auf eine Schichtdicke von 6 cm.

Tab. 1: Kennwerte der Basisplatte (Beton C 25/30, hergestellt im Oktober 2007, E-Modul- und Druckfestigkeitsprüfung erfolgten im Dezember 2020, Rautiefe und Haftzugfestigkeit wurden im März 2022 ermittelt).

Probe	Maße LxBxT [cm]	E-Modul [GPa]	Druckfestigkeit [MPa]	Rautiefe Ø [mm]	Haftzug [MPa]
Sto-1	200x150x27	34,2	60,9	0,4	-
P1-CEM I	200x150x27	32,7	53,2	1,1	1,3 ± 1

Tab. 2: Frischmörtel- und Festmörtel Eigenschaften des applizierten Instandsetzungsmörtels

Probe	Maße LxBxT [cm]	Ausbreitmaß [mm]	Luftporengehalt [%]	Frischmörtelrohichte [g/cm³]	Druckfestigkeit $f_{c, 28d}$ [MPa]
Sto-1	200x135x10	148 ± 3	4,2	2.24	60,6 ± 1,7
P1-CEM I	200x135x5	127 ± 4	4,6	2.18	63,5 ± 1,2

Die Fehlstellen des Probekörpers Sto-1 bestehen aus einer Luftpolsterfolie (LFP), einem Kiesnest (KN), sowie 4 Styrodurplatten (Styr) mit einer Dicke von je 2 cm und unterschiedlichen Längen. Die Styrodurplatten wurden stufig aufeinandergestapelt und verklebt. Durch die Treppenform des eingebrachten Materials ergibt sich hier eine stufenweise Abnahme des applizierten Materials. Damit soll der Effekt unterschiedlicher Tiefenlagen der Fehlstelle auf die verschiedenen Messmethoden untersucht werden. Abb. 1 zeigt eine Skizze des Probekörpers Sto-1 mit der Lage und den Maßen der eingebrachten Fehlstellen sowie ein Foto der Probe, vor dem Applizieren der Haftbrücke und des Mörtels.

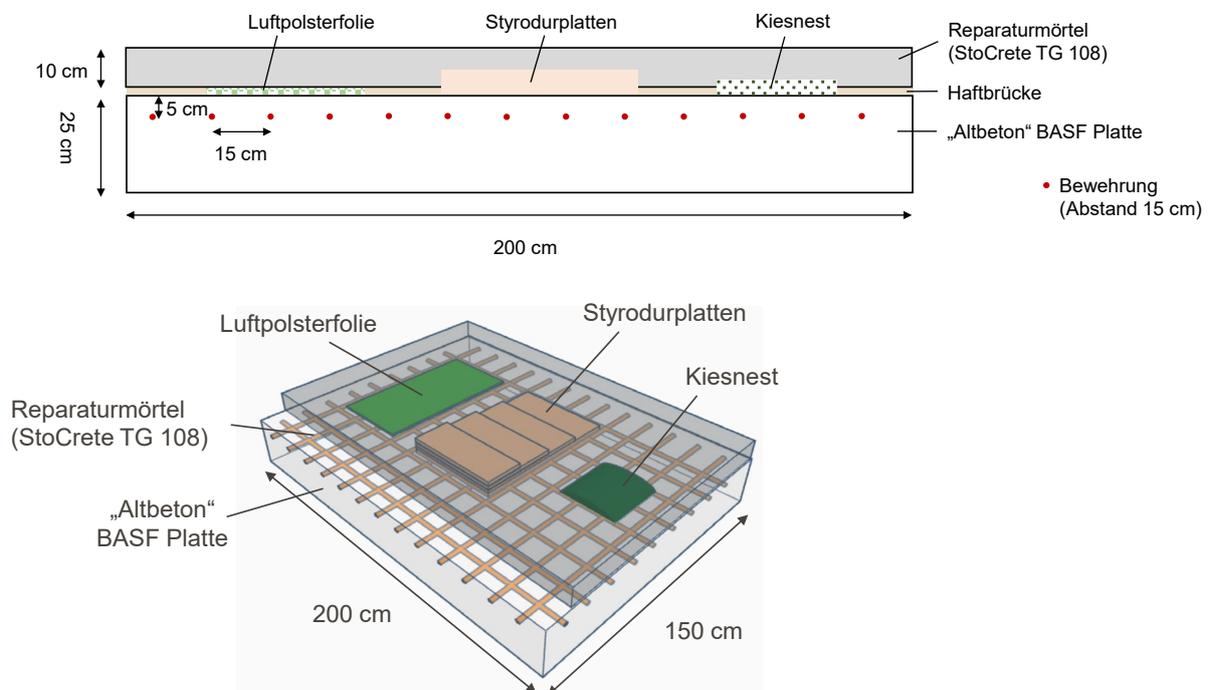


Abb. 1: Skizze des Probekörpers Sto-1.

Die Probenkonfiguration der Platte P1-CEM I ist in Abb. 2 dargestellt. Anstatt der Styrodurplatten wurde eine PE-Folie (2-lagig) eingebracht, um einen gelösten Verbund zwischen Bestandsbeton und Instandsetzungssystem zu simulieren.

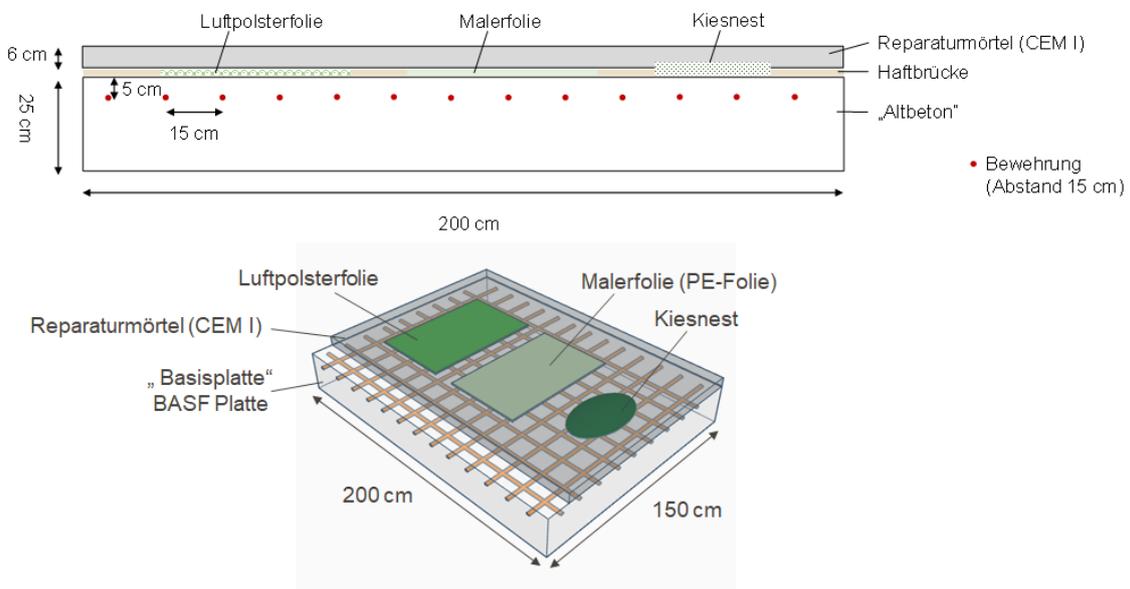


Abb. 2: Skizze des Probekörpers P1-CEM I

3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die in Abb. 3 dargestellten Wärmebilder sind Messungen am Probekörper Sto-1 nach 20, 40, 80 und 180 min der aktiven Erwärmung der Platte. Die erste Stufe der Styrodur-Fehlstelle ist nach 20 min zu sehen; Lage und Ausmaß der ersten Stufe sind nach 40 min sehr gut auszumachen. Die Schichtdicke des Instandsetzungsmörtels an dieser Stelle beträgt 2 cm. Die zweite Stufe mit einer Materialüberdeckung von 4 cm ist nach 80 min Aufwärmen vollständig am Wärmebild zu erkennen. Nach 80 min können außerdem erhöhte Temperaturen im Bereich der dritten Stufe (6 cm Überdeckung) gemessen werden. Nachfolgende Wärmebildaufnahmen zeigen allerdings bei fortschreitender Erwärmung eine eher diffuse Temperaturverteilung. Wie am Wärmebild nach 180 min zu sehen, können Luftpolsterfolie (LPF) und Kiesnest (KN) nicht klar dargestellt werden. Die Messergebnisse deuten darauf hin, dass Delaminationen oder Inhomogenitäten ab einer Tiefe von ca. 8 cm mit aktiver Thermographie nicht mehr eindeutig detektiert werden können.

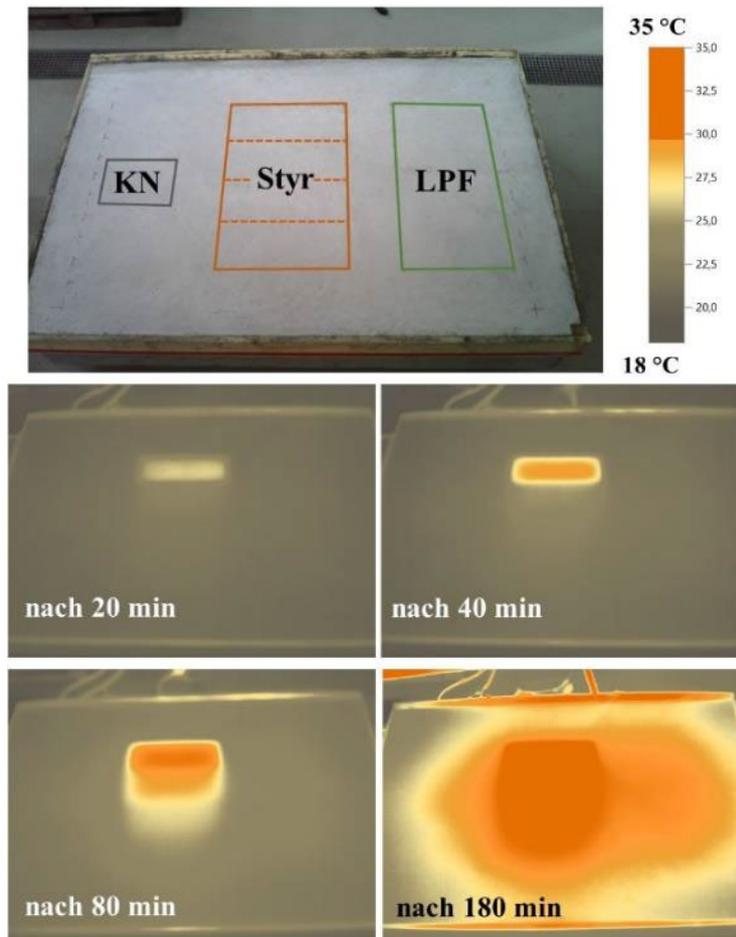


Abb. 3: Oben: Bild des Probekörpers Sto-1 mit eingezeichneten Positionen der Fehlstellen. Unten: Wärmebilder bei aktiver Thermographie nach verschiedenen Zeitspannen der Aufheizung.

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Ultraschallmessungen an der Probe Sto-1. Der horizontale Schnitt (B-Bild) stellt einen Linienscan außerhalb der Fehlstellen dar. Der Übergang von Instandsetzungsmaterial zu Bestandsbeton liegt bei der Probe Sto-1 in 10 cm Tiefe, und wird durch deutliche Reflexionen direkt abgebildet. Die Horizontalbewehrung und das Rückwandecho ist ebenfalls durchgängig vorhanden, was auf einen guten Verbund zwischen appliziertem Material und Basisplatte hindeutet. Abb. 4 C) zeigt einen vertikalen Schnitt (D-Bild) in Höhe der stufenweise eingebrachten Styrodurplatten. Zwischen Styrodur und Mörtel gibt es keinen direkten Materialverbund. An den damit einhergehenden Lufteinschlüssen erfolgt eine Totalreflektion der Scherwellen. Der Bereich hinter der Fehlstelle kann nicht mehr abgebildet werden, was zu einem fehlenden Rückwandecho führt. Befinden sich Delaminationen im blinden Bereich der Ultraschallmessung, kann ein plötzliches Fehlen des Rückwandechos als Interpretationshilfe herangezogen werden. Dargestellt ist ein solcher Fall in Abb. 4 C) im Bereich der obersten Styrodurplatte. An dieser Stelle liegt lediglich eine Mörtelüberdeckung von 2 cm vor. Die Delamination befindet sich im blinden Bereich und kann nicht direkt dargestellt werden. Da hier aber auch kein Rückwandecho vorliegt, muss es vorher zur Totalreflektion der Scherwellen gekommen sein.

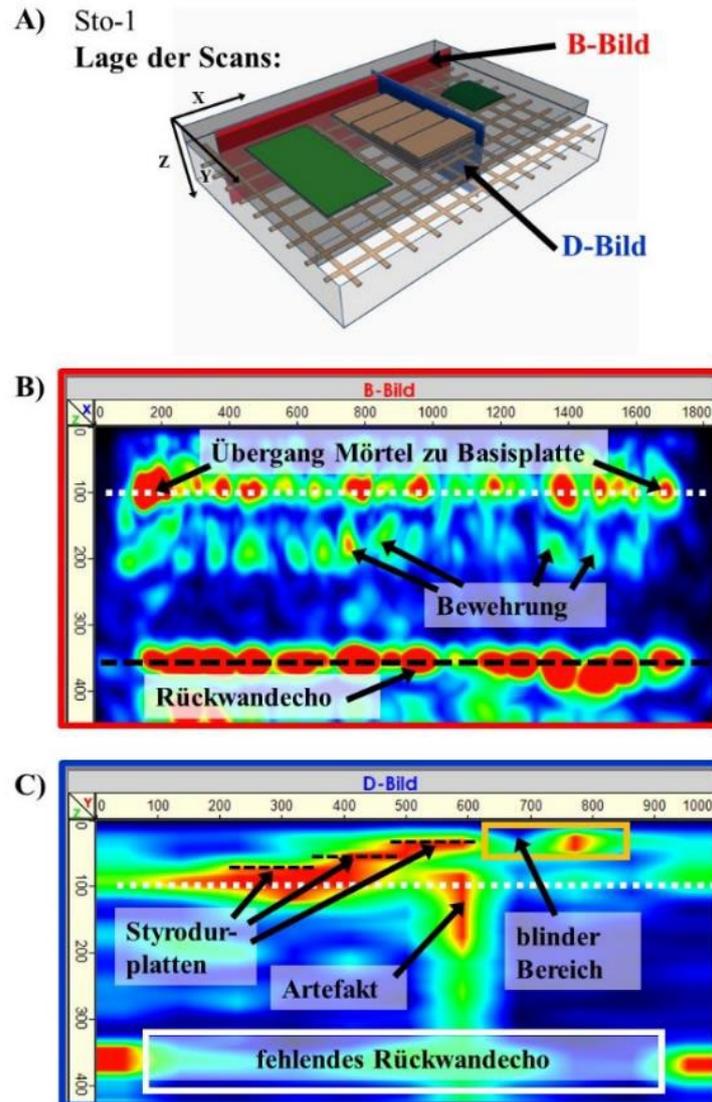


Abb. 4: A): 3D Skizze des Probenkörpers Sto-1. Zu sehen ist die Lage der in B) und C) dargestellten Ultraschallmessungen. Die rote Ebene kennzeichnet die Position des B-Bildes und die blaue Ebene die Position des D-Bildes

Abb. 5 zeigt die Untersuchungsergebnisse am Probekörper P1-CEM I. Das B-Bild (Abb. 5 B) verdeutlicht, dass es bei einer Totalreflexion an Delaminationen zu Mehrfachreflexionen mit gleichbleibenden, sich wiederholenden Tiefenabständen kommen kann. Diese Mehrfachreflexionen können als Artefakte die Interpretation der Ultraschallmessungen erschweren. Das Kiesnest hingegen scheint sich bei dem untersuchten Probekörper durch ein Fehlen jeglicher Reflexionen auszuzeichnen. (siehe Abb. 5 B)).

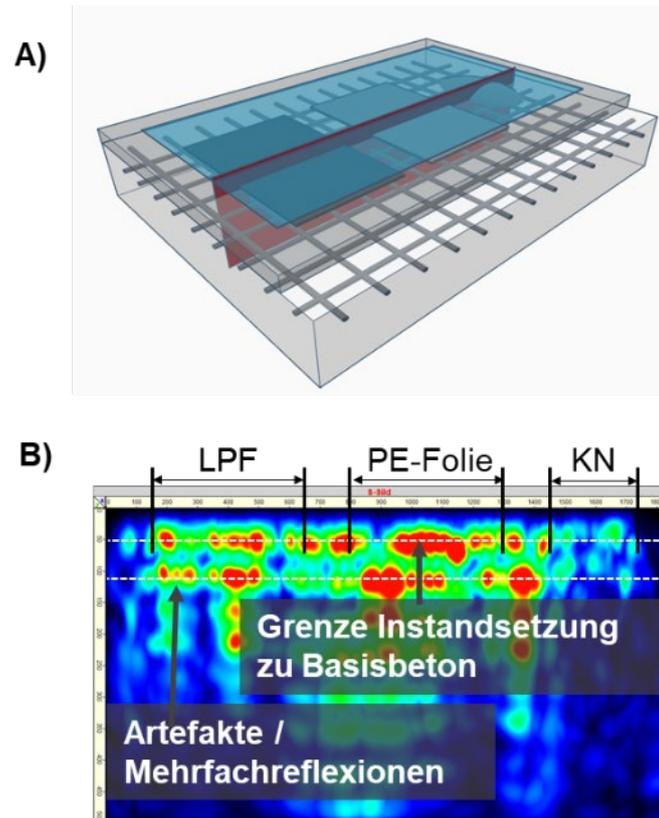


Abb. 5: A) 3D Skizze des Probenkörpers P1-CEM I mit der Position der in B) dargestellten Ultraschallmessung (B-Bild; rote Ebene in A).

4 Evangelische Christuskirche (Bingen-Büdesheim)

Auszüge des nachfolgenden Kapitels wurden bereits veröffentlicht in:

Steiner, S.; Grillich, P.; Öztürk, T.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring von Sichtbetonbauwerken der Nachkriegsmoderne mit bildgebenden, zerstörungsfreien Prüfverfahren“

In: 8. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken - Beurteilung, Instandsetzung und Denkmalpflege von Bauwerken“, Esslingen 2023, Tagungsband (Raupach, M.; Schwamborn, B.; Wolff, L. (Hrsg.)), expert verlag GmbH, ISBN: 3816985564, S. 239-250.

4.1 Objektbeschreibung, zeitliche und methodische Einordnung der Instandsetzungen

Die evangelische Christuskirche in Bingen-Büdesheim wurde in den Jahren 1962/63 nach den Plänen von Architekt Gerhard Hauss und seinem Büro Hauss und Richter (Heidelberg) errichtet. Der Komplex umfasst das Kirchengebäude mit Pfarrhaus, Campanile und angrenzendem Kindergarten. Die Kirche mit quadratischem Grundriss ist in Skelettbauweise aus Stahlbeton in Kombination mit Mauerwerk ausgeführt. Gekrönt wird das Gebäude von einem mit Kupferplatten gedecktem, um 45 Grad versetzt ausgeführten Kreuzdach (siehe Abb. 6 links). Die beiden, an der Nordseite gelegenen, Hauptportale zeigen reliefierte Bronzetüren (gestalten von Günther Lossow, Köln; siehe Abb. 6 rechts).



Abb. 6: Links: Nordansicht der evangelischen Christuskirche (Bingen-Büdesheim). Rechts: Detailaufnahme einer Bronzetür des linken Portals.



Abb. 7: Links: Außenansicht des freistehenden Glockenturms. Rechts: Die Innenansicht zeigt die original erhaltene Sichtbetonoberfläche mit Brettschalstruktur.

Der 25 Meter hohe Turm ist freistehend. Dessen Fassaden wurden ursprünglich als Sichtbeton mit Brettschalstruktur geplant (Abb. 7, links). Im Innenraum des Turms ist die historische, unveränderte Oberfläche erhalten (Abb. 7, rechts).

Abb. 8 zeigt eine Innenansicht der Kirche. Auch hier offenbart die Innenseite der Dachkehlen den mit weißem Anstrich versehenen Sichtbeton mit Brettschalstruktur. Die Wände zur Dachkonstruktion sind eine Kombination aus kunstvoll angeordneten Ziegelsteinelementen, unterbrochen von Buntglasfenstern (Künstler: Klaus Arnold), wodurch eine durchdachte Lichtführung mit Fokus auf den Altar entsteht. Nach Plänen des Architekten sollten die Fassaden des Kirchenbaus ebenfalls als Sichtbeton ausgeführt werden.

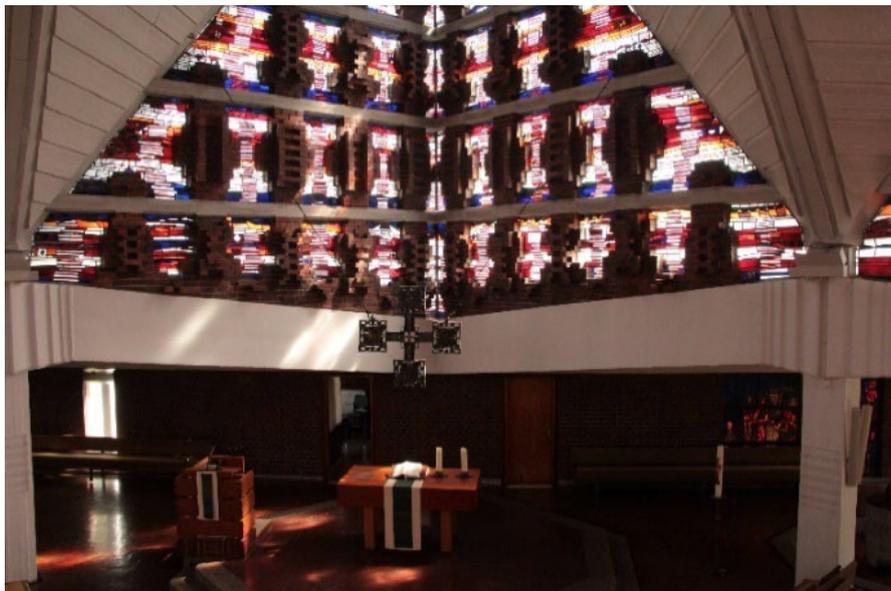


Abb. 8: Innenansicht der evangelischen Christuskirche (Bingen-Büdesheim) mit Blick auf den Altarraum

Aufgrund diverser Ausführungsfehler, wie beispielsweise einer unzureichenden Betondeckung oder nicht ordnungsgemäß angebrachter Rödeldrähte, was unmittelbar nach dem Einbau Korrosionsspuren an der Oberfläche zum Vorschein brachte, kam es bereits vor der Einweihung der Kirche 1964 zu ersten Sanierungsmaßnahmen. Beton und Mauerwerksoberflächen im Außen- und Innenbereich wurden beschichtet. Zusätzlich wurde der Beton im Bereich des Sockelgeschosses verputzt. Bei der Fertigung der kunstvollen Mauerwerk-Buntglasfenster-Kombination unmittelbar unter den Zeltdacharealen kamen anstatt der geplanten Vollziegel Lochziegel zum Einsatz, was eine Durchnässung der Fassade begünstigt hätte. Die entsprechenden Bereiche wurden daher händisch versiegelt (Abb. 9).

Bereits 1980/81 wurde eine zweite Betonsanierung angesetzt. Dabei wurden die unmittelbar nach der Rohbauphase ausgeführten Betoninstandsetzungsmaßnahmen rückstandslos beseitigt. Nach dem Behandeln der freiliegenden Bewehrung wurde eine 2-3 cm dicke Spritzbetonschicht aufgetragen, um die Betondeckung auf mindestens 2 cm zu erhöhen. Es folgte die Beschichtung eines mineralischen Flächendichtungsmaterials. Zuletzt wurde ein Farbanstrich auf Mineralfarb- bzw. Acrylfarbbasis appliziert.



Abb. 9: Links: Abschnitt der aus einer Kombination aus Buntglasfenstern und Mauerwerk gefertigten Fassade im Zeltdachbereich. Rechts: Detailaufnahme zeigt die Ausführung einer ersten Sanierungsmaßnahme, bei der die Oberseite der freiliegenden Ziegelbereiche händisch abgedichtet werden musste, da Lochziegel anstatt planmäßig vorgesehener Vollziegel verwendet wurden.

In den Jahren 2013/14 erfolgte die bislang letzte Instandsetzung des Kirchengebäudes, sowie des Glockenturms. Nach Freilegen der korrodierten Bewehrung wurde die als Rostschutz dienende Eisenmennige, die bei der Instandsetzung in den 1980er Jahren aufgetragen wurde, abgestrahlt. Zur Reprofilierung der geöffneten Stellen wurde größtenteils ein

polymervergüteter, zementgebundener Betonersatz und Feinspachtel der Firma StoCretec eingesetzt. Gemäß der gültigen RiLi SIB (Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“) [3] des DAfStb (Deutscher Ausschusses für Stahlbeton) wurde die Instandsetzung konservativ mit einem Oberflächenschutzsystem OS5 inkl. Hydrophobierung ausgeführt.

4.2 Ergebnisse und Diskussion

4.2.1 Sichtprüfung

Die Instandsetzung an Kirche und Turm ist insgesamt in einem sehr gutem Zustand. Es konnten weder großflächige Hohllagen noch Abplatzungen festgestellt werden. An den Säulen, insbesondere entlang der Ost- und Westfassade wurde eine waagrechte Rissbildung auf Höhe des oberen Übergangs Mauerwerk zu Stahlbetonabschnitt der Fassade beobachtet (siehe Abb. 10 links). Außerdem konnten an annähernd allen Säulen der West- und Ostfassade waagrechte, zum Teil umlaufende Risse in ca. 30 cm bis 40 cm ab GOK (Geländeoberkante) ausgemacht werden. Die Rissbildung könnte möglicherweise dem Umstand geschuldet sein, dass wegen der Verputzung des Sockelgeschosses bei der Sanierung 1963/64 Materialien mit im Vergleich zum Untergrund unterschiedlichen Eigenschaften dienten. Wegen der natürlichen Schwindverformung des Instandsetzungsmaterials, könnte es auf dieser Höhe zur Rissbildung gekommen sein. Der genaue Grund lässt sich zerstörungsfrei nicht nachvollziehen. Untersuchungen mittels Abklopfen und stichpunktartige Messungen mit dem Ultraschall lassen jedoch nicht auf eine Entfestigung des Instandsetzungsmaterials schließen.



Abb. 10: Links: waagrechte Rissbildung im Anschlussbereich der Säule auf Höhe des Übergangs Mauerwerk zu Betonfassade. Rechts: Waagrechte, zum Teil umlaufende Rissbildung an einer Säule der Ostfassade.

4.2.2 Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen

Im Rahmen der Untersuchungskampagne konnten zwei Bereiche ausgemacht werden, die im Falle eines Monitorings beobachtet werden sollten.

Abb. 11 zeigt das im Untersuchungsfeld an der Ostfassade aufgenommene Wärmebild.



Abb. 11: Wärmebildaufnahme eines Stahlbetonelements der Ostfassade

Eine Besonderheit ist in diesem Fall, dass die Vertikalbewehrung augenscheinlich so oberflächennah liegt, dass sie Wärmeanomalien im IR-Bild verursacht. In Abb. 12 ist die Bewehrungsdetektion mit dem Radarverfahren dargestellt. Ein Projizieren der Messergebnisse auf das Bauteil bestätigt, dass die Vertikalbewehrung im Wärmebild zu sehen ist. Die Horizontalstäbe weisen einen Abstand von ca. 35 cm auf. Der vertikale Abstand der Bewehrung beträgt etwa 20 cm. Die Horizontalbewehrung tritt im IR-Bild nicht oder nur sehr schwach in Erscheinung, was darauf hindeutet, dass sie eine höhere Betondeckung und/oder einen geringeren Durchmesser aufweist. Gestützt wird dies von Untersuchungen der Materialprüfanstalt (MPA) Wiesbaden [36] im Vorfeld zur letzten Instandsetzung 2013/14. Die exemplarisch an einer Stemmstelle freigelegte Bewehrung ergab für die vertikal verlaufenden Eisen eine Betonüberdeckung von lediglich 3 mm. Die darunter befindliche Horizontalbewehrung oder Matte lag entsprechend tiefer eingebettet und hatte einen deutlich geringeren Durchmesser [36]. An der Untersuchungsfläche der Ostfassade wurden ergänzend Messungen mit dem Profometer durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen die höhere Betondeckung bei der Horizontalbewehrung. Während vertikal verlaufende Eisen in diesem Bereich eine Überdeckung von 16 ± 4 mm haben, liegt die Horizontalbewehrung etwa in 26 ± 7 mm Tiefe. Bei der in Abb. 12 dargestellten Radarmessung ist die Stärke der Reflexion der Bewehrungsstäbe ③, ④ und ⑤ schwächer als die der Horizontalbewehrung. Grundsätzlich gilt, dass die Signalstärke abnimmt je tiefer sich die Bewehrung im Bauteil befindet [21]. Die Messungen mit dem Profometer haben jedoch ergeben, dass diese 3 Bewehrungsstäbe mit $13,5 \pm 1,5$ mm zu jenen mit der geringsten Betonüberdeckung gehören. Da die Amplitude im Radargramm bei korrodiertem Eisen weniger stark ausgeprägt ist [13], könnte das schwächere Signal auf eine beginnende Bewehrungskorrosion hinweisen.

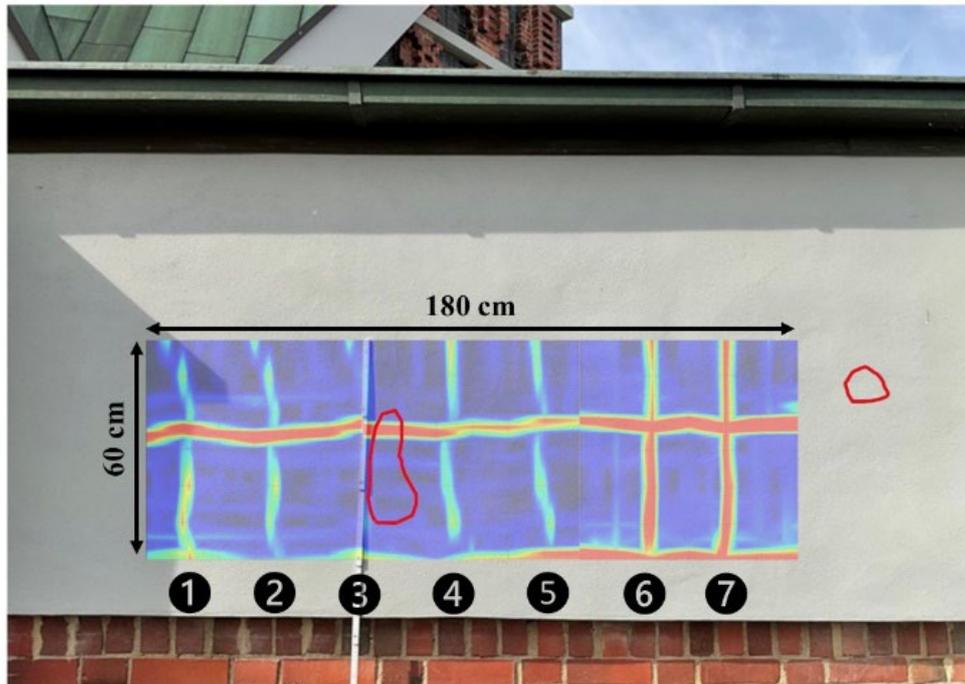


Abb. 12: Ergebnisse aus den Radarmessungen projiziert auf die Untersuchungsfläche an der Ostfassade (Tiefe: 2 – 5 cm, kumuliert). ① bis ⑦ kennzeichnen die einzelnen Stäbe der Vertikalbewehrung. Die rot markierten Bereiche sind Flächen, die bei der Sichtprüfung (inkl. Klopftest) Auffälligkeiten zeigten.

Der Klopfest im Rahmen der Sichtprüfung ergab an zwei Stellen leichte Klangunterschiede, die auf mögliche Fehlstellen hindeuten können. Diese Bereiche sind in Abb. 12 und Abb. 13 rot umrandet. Zwischen dem ③. und ④. vertikalen Bewehrungsstab (siehe Abb. 12) deuten die Ergebnisse der Ultraschalltomographie (siehe Abb. 13) ebenfalls auf zumindest eine beginnende, oberflächennahe Entfestigung hin. Das Rückwandecho ist in diesem Bereich nicht oder nur schwach zu sehen.

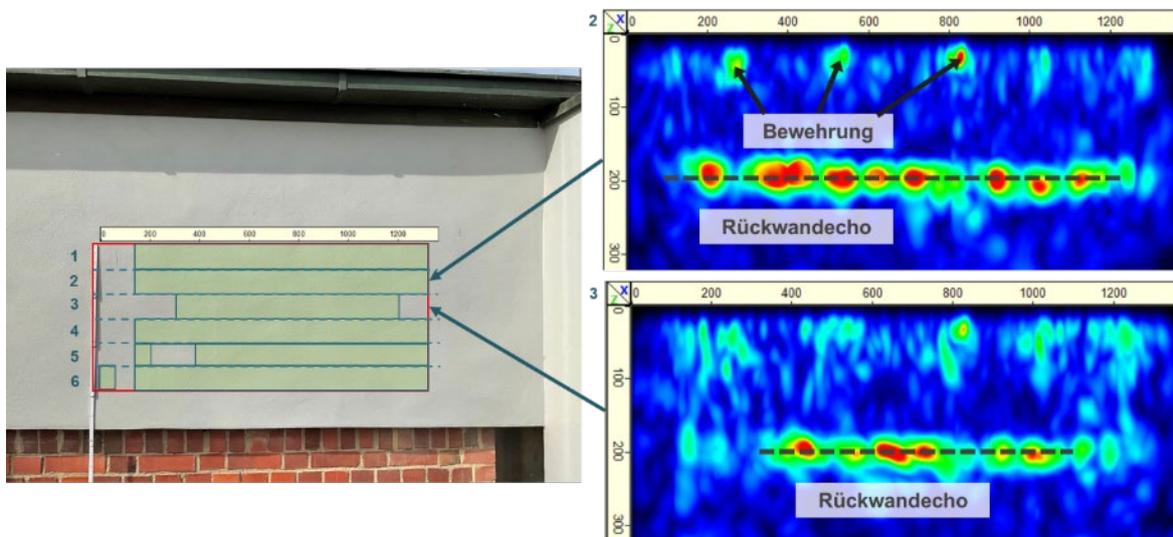


Abb. 13: Links: Auswertung der Ultraschalluntersuchungen an der Ostfassade. Rechts: Linienscans (B-Bilder) der Ultraschallmessungen.

Die in Abb. 14 gezeigten Ergebnisse der Impakt-Echo Messungen zeigen im Bereich der möglichen Verbundlockerung zwischen Betonfassade und Instandsetzungsmaterial ebenfalls Unregelmäßigkeiten. Ähnlich wie beim Ultraschallverfahren, können oberflächenparallele Delaminationen mit geringer Tiefe (wenige cm) nicht direkt detektiert werden. Abweichungen von der tatsächlichen Bauteildicke, die im Falle der Westfassade bei etwa 20 cm liegt, können daher auf interne Mängel oder Fehlstellen hindeuten. Die IR-Bilder (siehe Abb. 11) lassen allerdings darauf schließen, dass in diesem Bereich noch nicht von einer ausgeprägten Delamination auszugehen ist. Es ist jedoch zu empfehlen, bei einem zukünftigen Monitoring diesen Fassadenabschnitt zu beobachten.

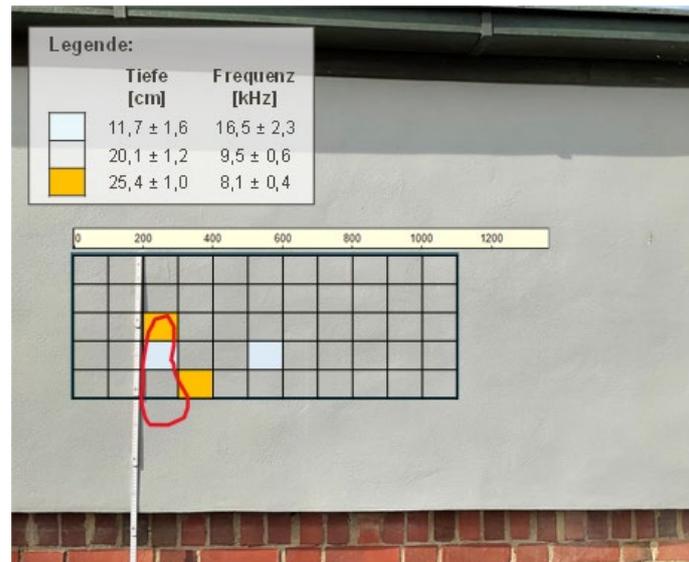


Abb. 14: Messraster der Impakt-Echo Untersuchungen. Die orange und hellblau hinterlegten Felder kennzeichnen Messpunkte mit Abweichungen zur tatsächlichen Bauteildicke.

Während an den Stahlbetonelementen der Wände des Kirchenbaus durchwegs geringe Betonüberdeckungen vorliegen, stellt sich die Situation an dem Campanile anders dar. Dort befindet sich die Bewehrung in einer Tiefe von im Mittel 10 cm, mit einem horizontalen und vertikalen Abstand von etwa 20 cm. Am Wärmebild ist die Bewehrung daher nicht darstellbar.

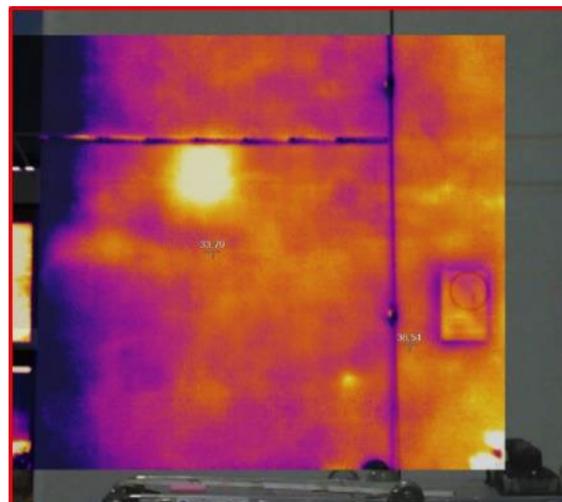


Abb. 15: Wärmebildaufnahme an der Südseite des Glockenturms.

Das in der nachfolgenden Abb. 15 dargestellte IR-Bild zeigt jedoch eine ausgeprägte Wärmeanomalie an der Südseite des Glockenturms.

Der Klopfest ergab Unregelmäßigkeiten im Bereich der Wärmeanomalie, eine klare Fläche konnte allerdings nicht abgegrenzt werden. Risse oder offensichtliche Abplatzungen waren nicht auszumachen.

Abb. 16 zeigt die vergleichende Auswertung der Radar- und Ultraschallmessungen. Der im Wärmebild auffällige Bereich ist rot umrandet.

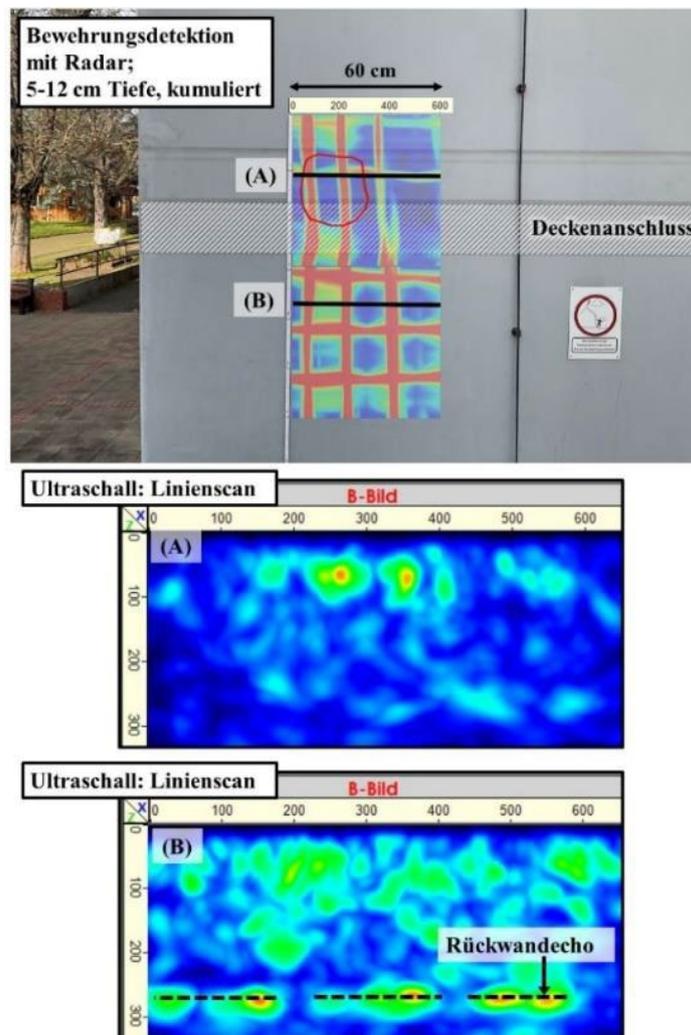


Abb. 16: Oben: Bewehrungsdetektion mittels Radarverfahren an der Südseite des Glockenturms; Der rot markierten Bereiche wies bei den IR-Messungen und der Sichtprüfung (inkl. Klopfest) Auffälligkeiten auf. Unten: Ultraschall-Linienscans (B-Bild)

Die Messfläche ($60 \times 120 \text{ cm}^2$) bildet den Übergang zwischen dem Erdgeschoss und dem 1. Stock des Turms ab. Die Bewehrungsmatte im Untersuchungsbereich unter dem Deckenanschluss konnte mit Radar deutlich verortet werden. Nennenswerte Reflexionen oberhalb der Bewehrung waren keine vorhanden. Mit Ultraschall konnte unterhalb des Deckenanschlusses annähernd durchgehend ein Rückwandecho (bei 26 cm Tiefe) dargestellt werden. Allerdings ist in den vertikalen Schnitten (B-Scans) auf Höhe der 2. und 3. Vertikalbewehrung durchgehend ein nur schwaches oder kein Rückwandecho auszumachen (bei $x=200 \text{ mm}$ und $x=400 \text{ mm}$, siehe Abb. 16 unterer Linienscan). Obwohl die Messergebnisse auf einen überwiegend intakten Bauteilabschnitt hinweisen, könnten sich um

oder an der Vertikalbewehrung Entfestigungen befinden. Von einer Bewehrungskorrosion ist wegen der hohen Betonüberdeckung nicht auszugehen. Der Ultraschallflächenscan unterhalb des Deckenanschlusses zeigt außerdem, trotz darstellbarem Rückwandecho, viele zum Teil diffuse Reflexionen. Diese könnten Artefakte vom Materialübergang Bestandsbeton zu Instandsetzungsmaterial sein oder könnten möglicherweise auf interne Schwindrisse zurückzuführen sein. Die Bewehrung konnte auf Grund dessen mit Ultraschall meist nicht eindeutig detektiert werden. Aussagekräftige Messungen und damit ein Urteil über die Qualität des Verbunds zwischen Bestandsbeton und applizierten Instandsetzungsmaterial war auf Höhe des Deckenanschlusses abschließend nicht möglich da keine Bauteilrückwand als Referenz vorhanden ist. Die Ultraschallmessungen oberhalb des Deckenanschlusses deuten hingegen auf vermehrte Materialinhomogenitäten hin. Die Bewehrung und das Rückwandecho konnten lediglich in den obersten 10 cm der Messfläche nachgewiesen werden (Ergebnisse nicht gezeigt). Der Bereich, auf dessen Höhe sich auch die mögliche Fehlstelle befindet, wies insgesamt nur ein vereinzelt, schwaches oder kein Rückwandecho aus (siehe Abb. 16, oberer Linienscan). Die deutlich abgegrenzten Reflexionen bei 6 cm Tiefe können der Vertikalbewehrung zugeordnet werden. Die Radaruntersuchungen im Messbereich oberhalb des Deckenanschlusses zeigten außerdem stark variierende Betonüberdeckungen von bis zu 12 cm Tiefe (Ergebnisse nicht gezeigt).

Die im IR-Bild dargestellte Wärmeanomalie konnte mit Ultraschall nicht klar abgegrenzt oder bestätigt werden. Da in dem Bereich aber überwiegend kein eindeutig nachweisbares Rückwandecho vorliegt, sollte dieser Fassadenabschnitt ebenfalls beobachtet und ggf. mit weiterer, ergänzender Messtechnik, wie beispielsweise dem Impakt-Echo Verfahren untersucht werden.

4.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Der aktuelle Zustand der evangelischen Christuskirche in Bingen-Büdesheim ist insgesamt noch als sehr gut zu bezeichnen. Es gibt am Kirchenbau vereinzelt, vermutlich durch Materialschwinden verursachte Risse in der applizierten Putzschicht. Die Sichtprüfung inkl. Klopfests, Thermographie und Ultraschalltomographie (stichprobenartig untersucht) deuten aber darauf hin, dass an diesen Stellen oberflächennah keine Delaminationen vorliegen. An der Südfassade des freistehenden Turms und an einem Abschnitt der Ostfassade des Kirchengebäudes finden sich kleinflächige Bereiche, deren Untersuchungsergebnisse auf eine beginnende Ablösung der Putzschicht hindeuten könnten (siehe Beschreibungen in Kapitel 4.2.2). Diese Bereiche stellen aber keinen nennenswerten Schaden der Instandsetzungsmaßnahme dar. Um ein frühzeitiges Eingreifen zu ermöglichen, für den Fall, dass sich Ausprägung und Umfang der beschriebenen Flächen vergrößert, ist es jedoch empfehlenswert, diese in Zukunft zu beobachten.

5 Beckerturm (Becker-Brauerei in St. Ingbert)

Auszüge des nachfolgenden Kapitels werden veröffentlicht in:

Steiner, S.; Grillich, P.; Auras, M.; Heese, C.: (im Druck) „Monitoring früherer Instandsetzungsmaßnahmen an Denkmälern aus Stahlbeton“

Fachtagung „Betoninstandhaltung am Baudenkmal - Methoden, Materialien, Dauerhaftigkeit“; Landesdenkmalamt Saarland und Institut für Steinkonservierung e. V.; Sender Berus, Überherrn; 21.06. 2023 (IFS-Bericht Nr. 65)

5.1 Objektbeschreibung, zeitliche und methodische Einordnung der Instandsetzungen

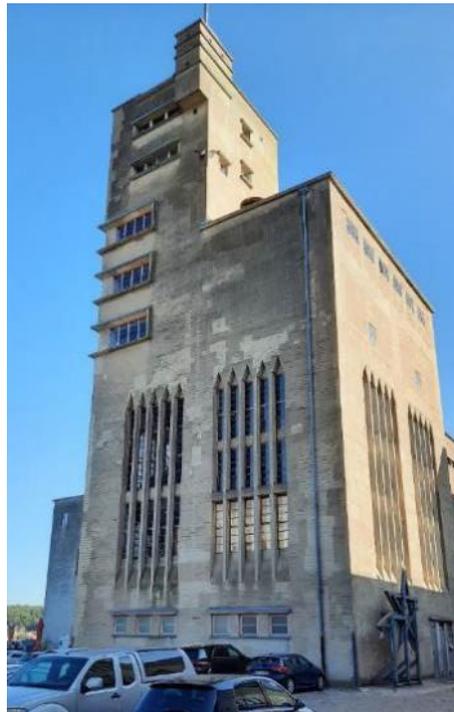


Abb. 17: Turm der Becker-Brauerei in St. Ingbert

Der 42 m hohe Turm des Sudhauses der Beckerbrauerei (Abb. 17) wurde in den Jahren 1925-1931 errichtet. Der Entwurf wurde vom Stuttgarter Architekten Hans Herkommer angefertigt und ist im damaligen Stil des Neuen Bauens mit stark expressionistischem Einschlag erbaut [37]. Zur Erbauungszeit war der in Sichtbeton hergestellt. Der Sichtbeton zeigt bei der original erhaltenen Oberfläche der Südfassade Wechsel zwischen senkrecht als auch waagrecht ausgerichteten Schalbrettstrukturen (siehe Abb. 18).

Während der ersten Sanierung im Jahr 1950 bis 1952 wurden die Nord- und Westfassade überputzt, um schadhafte Beton zu ersetzen. Bei der Ausführung dieser ersten Instandsetzung erfolgte bereits ein Angleichen des optischen Erscheinungsbildes durch die Nachahmung der Schalbrettstruktur, die aber ausschließlich in horizontaler Richtung angeordnet wurde.

Im Jahr 1997-2000 erfolgten weitere Instandsetzungsmaßnahmen am Turm, welche als behutsame Instandsetzung umgesetzt wurden. Im ersten Bauabschnitt wurde 1997 die Nordfassade mit einem kunststoffmodifiziertes Instandsetzungssystem überarbeitet. In den

folgenden Bauabschnitten (1998 Westfassade, 2000 Ost- und Südfassade) kam hingegen ein rein mineralisch gebundenes System zum Einsatz [37].



Abb. 18: Südfassade des Beckerturms

5.2 Ergebnisse und Diskussion

5.2.1 Drohnenbasierte Erfassung der Instandsetzungsflächen

Mittels Drohnenflug wurden hochauflösende Bilder des Beckerturms aus verschiedenen Blickwinkeln gemacht. Anschließend wurde mit der Software *Agisoft Metashape* ein 3D Modell des Bauwerks (siehe Abb. 19 und Abb. 20) erstellt. Zusätzlich sind Orthobilder der Nord-, West-, und Süd-Fassaden generiert worden. Auf Grundlage der Orthobilder erfolgte eine Kartierung der Instandsetzungsflächen. Der Anteil der behutsamen Instandsetzungen der Nordfassade sind 25,4% bezogen auf die Gesamtfläche. An der Westfassade wurden 21,4% während der ersten Instandsetzung von 1950 bis 1952 vollflächig aufgetragenen Putzes behutsam instandgesetzt. Die behutsame Instandsetzung des historischen Sichtbetons der Südfassade umfasst 17,5% der gesamten Fassadenfläche. Abb. 21 zeigt die Orthobilder der Westfassade (links), sowie der Südfassade (rechts). Die instandgesetzten Flächen sind rot umrandet bzw. rot hinterlegt.



Abb. 19: 3D-Modell mit Ansicht der Nordfassade



Abb. 20: 3D-Modell mit Ansicht der Südfassade



Abb. 21: Links: Kartierung der Instandsetzungsflächen an der Westfassade und Rechts: Instandsetzungsflächen an der Südfassade (rechts)

5.2.2 Sichtprüfung und Schadenskartierung

Die behutsame Instandsetzung fügt sich gut in die Struktur der Brettschaloptik ein. Die Grenzen der Instandsetzungsflächen verlaufen überwiegend entlang der Stöße der Brettschalung. Ein stellenweiser vorhandener Versatz in der Brettschalstruktur wurde in die Instandsetzungsfläche übernommen. Die farbliche Anpassung an den bauzeitlichen Sichtbeton bzw. den in den 1950er Jahren applizierten Putz ist insbesondere im unteren Drittel sehr gut gelungen. Die Instandsetzungsflächen erscheinen im oberen Bereich des Beckerturms heller als der umgebende Sichtbeton bzw. Putz.

Während im Zuge der Instandsetzungsarbeiten von 1997 bis 2001 an der Südfassade direkt der bauzeitliche Sichtbeton instandgesetzt wurde, erfolgten an der Nord-, und Westfassade Reparaturen des von 1950 bis 1952 vollflächig aufgetragenen Putzes (erste Instandsetzung). Entsprechend unterscheiden sich auch die Schadensbilder. Abb. 22 zeigt die Schadenskartierung der Nordfassade. Die Schadenskartierung der Westfassade ist in Abb. 23 dargestellt.



Abb. 22: Schadenskartierung Nordfassade

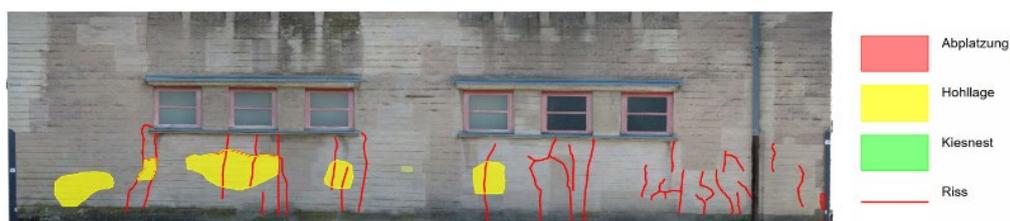


Abb. 23: Schadenskartierung Westfassade

Die Sichtprüfung inkl. Klopftests offenbarte an der Nord- und Westseite stellenweise großflächige, schollenartige Hohllagen. Derlei Ablösungen konnten sowohl unter dem Putz der ersten Instandsetzung (1950/52), als auch unter der ab 1997 durchgeführten behutsamen Instandsetzung beobachtet werden. Eine zum Teil ausgeprägte Rissbildung ist ebenfalls sowohl im Putz als auch in den Bereichen der behutsamen Instandsetzung vorhanden. Vereinzelt verlaufen die Risse vom Putz in die behutsame Instandsetzung oder aus dieser in den 1950er Jahren aufgetragenen Putz. Die Südfassade hingegen weist im untersuchten Bereich nur vereinzelt auftretende, münzgroße Abplatzungen im bauzeitlichen Beton auf. An einer beginnenden Abplatzung konnte zudem mittels Magnettest das Vorhandensein einer oberflächennahen Bewehrung bestätigt werden.

Sowohl im bauzeitlichen Sichtbeton als auch im instandgesetzten Bereich konnten an der Südfassade Risse beobachtet werden. Ähnlich wie bei der Nord- und Westfassade setzen sich auch hier stellenweise Risse über die Grenzen der behutsamen Instandsetzung hinaus fort bzw. führen in diese hinein. Da es sich bei der Südfassade um den originalen Sichtbeton handelt, treten zusätzlich noch vermehrt Kiesnester auf. Die Schadenskartierung ist in Abb. 24 dargestellt.

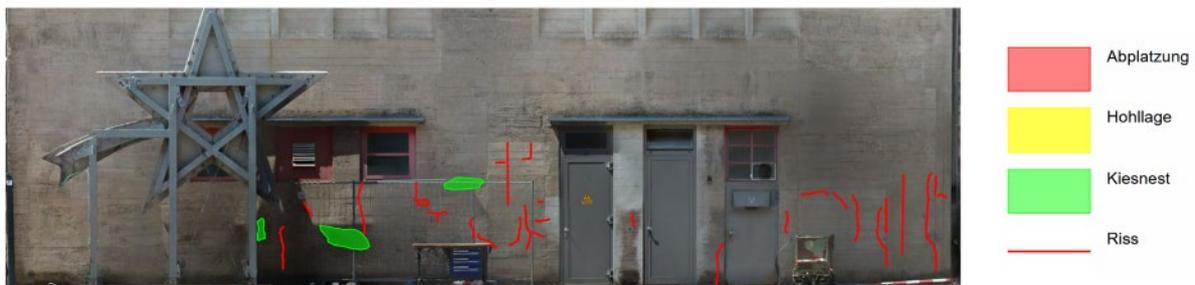


Abb. 24: Schadenskartierung Südfassade

5.2.3 Zerstörungsfreie Charakterisierung von Schäden an den Instandsetzungsflächen

Die besondere Situation der Nord- und Westfassade hat die Untersuchungen mit Ultraschall erheblich erschwert. Die vielfache Rissbildung und der Materialwechsel des mittlerweile gealterten Putzes zum bauzeitlichen Beton führen zu überlagernden Mehrfachreflexionen, sodass eine belastbare Aussage zu einer möglichen Delamination mit Ultraschall alleine nicht gemacht werden kann. An der Nord- und Westseite wurden zudem Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde durchgeführt. Dabei sind die Messungen in Bereichen durchgeführt worden, in denen durch die vorangegangene Sicht-, und Klopfprüfung keine Hohlstellen detektiert wurden. Die aufgenommenen Linienmessungen zeigen in den untersuchten Bereichen keine Auffälligkeiten (Ergebnisse nicht gezeigt), was die Ergebnisse der Sicht- und Klopfprüfung stützt.

An der Südfassade durchgeführte Radarmessungen zeigen, dass sich die Risse stellenweise entlang der Bewehrungslagen ausbreiten, was darauf hindeutet, dass es hier zu fortschreitender Bewehrungskorrosion gekommen ist. Abb. 25 zeigt repräsentative Untersuchungen an einer behutsamen Instandsetzung der Südfassade. Das Radargramm wurde auf den Untersuchungsbereich projiziert. Die roten Linien kennzeichnen Risse, die sich sowohl in der behutsamen Instandsetzung (schwarz umrandet) als auch darunter ausgebildet haben.



Abb. 25: Auf den Sichtbeton projiziertes Radargramm an einem repräsentativen Bereich der Südfassade. Die roten Linien kennzeichnen Risse. Der instandgesetzte Bereich ist schwarz umrandet.

Der in Abb. 25 dargestellte Fassadenabschnitt wurde zusätzlich mit dem Ultraschallgerät und der Wenner-Sonde untersucht. Die Kiesnester und die oberflächliche Rissbildung haben bei den Ultraschallmessungen zu überlagernden Mehrfachreflexionen geführt, sodass hier keine aussagekräftigen Messungen generiert werden konnten. Die Ergebnisse der Widerstandsmessung ist in Abb. 26 dargestellt.



Abb. 26: Messergebnisse des elektrischen Widerstands mit der Wenner-Sonde. Die roten Linien kennzeichnen Risse. Der instandgesetzte Bereich ist schwarz umrandet.

Die Ergebnisse zeigen insbesondere im rechten Abschnitt der Instandsetzung erhöhte Werte, was auf eine partielle Verbundlockerung bzw. im Bereich unter der Instandsetzung auf eine beginnende Abplatzung durch Bewehrungskorrosion hindeutet. Der niedrige Widerstand (90 kΩcm) beim Kreuzungspunkt der Horizontal- und Vertikalbewehrung entspricht wegen des Vorhandenseins des Bewehrungsstahls nicht dem elektrischen Widerstand des Betons. Es ist zu beachten, dass dieser Wert verzerrt ist, und daher bei der Beurteilung der Verbundfestigkeit nicht berücksichtigt werden kann. Die der Untersuchungsfläche durchgeführte Sicht- und Klopfprobe deutet darauf hin, dass es sich hier noch nicht um eine ausgeprägte Schadstelle handelt. Dennoch wird dringend empfohlen, den untersuchten Fassadenabschnitt im Rahmen eines fortführenden Monitorings zu beobachten.

Eine weitere repräsentative Untersuchungsstelle an der Südfassade ist in Abb. 27 dargestellt. Ultraschalluntersuchungen und Widerstandsmessungen mittels Wenner-Sonde deuten darauf

hin, dass es bei dieser Instandsetzung bereits zu beginnenden Verbundlockerungen im oberen Bereich gekommen ist. Die in Abb. 27 (A) dargestellten B-Bilder der Ultraschalltomographie lassen aufgrund der klaren Detektion eines Rückwandechos auf einen intakten Beton unmittelbar oberhalb des Instandsetzungsbereichs schließen. Im oberen Drittel der Instandsetzung konnte hingegen kein Rückwandecho nachgewiesen werden. Die Ergebnisse des senkrecht durchgeführten Linienscans weisen durch sprunghaftes Auftreten von höheren Widerständen bei Erreichen der Instandsetzung auf einen mangelhaften Verbund zum bauzeitlichen Beton hin. Die geringen Widerstände mit abnehmender Messhöhe kennzeichnen den unteren intakten Bereich der Instandsetzung. Die Verbundlockerung des oberen Randes der Instandsetzung könnte jedoch auch bereits während der Ausführung der Maßnahmen entstanden sein. Bei einem besonders fließfähigen Instandsetzungsmörtel könnte es während der Aushärtung zu einem Absetzen des Materials gekommen sein, das einen partiellen Abriss der oberen Kante verursacht hat. Solche Instandsetzungen sollten bei einem weiterführenden Monitoring dahingehend beobachtet werden, ob sich der Bereich der möglichen Verbundlockerung vergrößert.

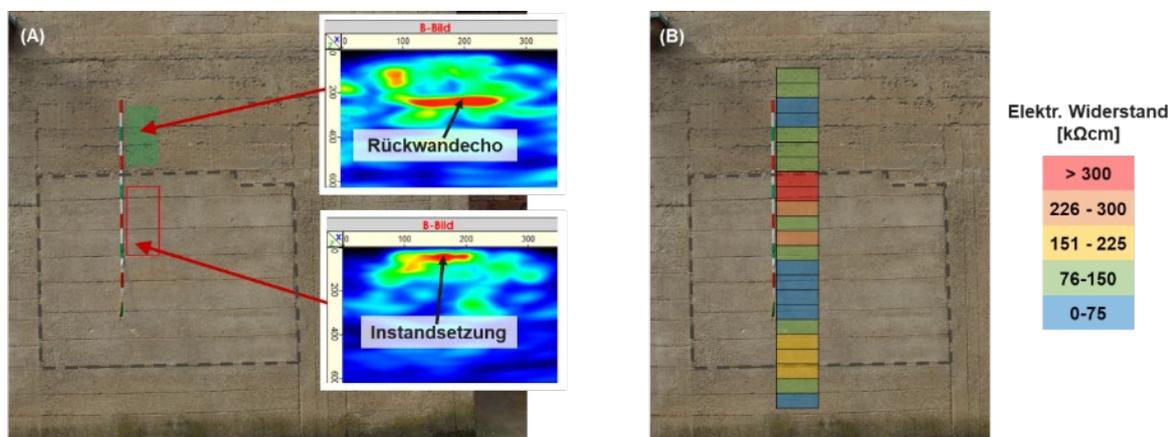


Abb. 27: Behutsame Instandsetzung (grau eingerahmt) an der Südfassade. (A): Ergebnisse aus der Ultraschalltomographiemessung. (B): Auswertung einer vertikal angelegten Messreihe mit der Wenner-Sonde.

5.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für die Instandsetzung der 1950er Jahre (vollflächiger Putz an Nord- und Westfassade) wegen der zum Teil ausgeprägten Hohllagen und Rissbildungen mittelfristig Handlungsbedarf besteht.

An den behutsam instandgesetzten Flächen der Südfassade konnten eine Rissbildung beobachten werden, die sich stellenweise mit der Bewehrungslage deckt. Dieser Umstand kann auf eine erneute Bewehrungskorrosion hindeuten, weshalb ein weiterführendes Monitoring der Südfassade dringend empfohlen wird. Tatsächlich hohl liegende Instandsetzungen konnten im Untersuchungsbereich nicht nachgewiesen werden. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse besteht an den Instandsetzungsflächen daher kein unmittelbarer Handlungsbedarf. Allerdings wurden am historischen Sichtbeton Schäden verortet, deren kurz- bis mittelfristige Behebung eine größtmögliche Bewahrung der Sichtbetonoberflächen des Baudenkmals sicherstellen würde.

6 Neue Einsegnungshalle (Hauptfriedhof Saarbrücken)

Auszüge des nachfolgenden Kapitels werden veröffentlicht in:

Steiner, S.; Grillich, P.; Auras, M.; Heese, C.: (im Druck) „Monitoring früherer Instandsetzungsmaßnahmen an Denkmälern aus Stahlbeton“
Fachtagung „Betoninstandhaltung am Baudenkmal - Methoden, Materialien, Dauerhaftigkeit“;
Landesdenkmalamt Saarland und Institut für Steinkonservierung e. V.; Sender Berus, Überherrn; 21.06. 2023 (IFS-Bericht Nr. 65)

6.1 Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen

Die 1966 von dem Architekten Paul Seeberger erbaute Neue Einsegnungshalle auf dem Saarbrücker Hauptfriedhof lässt sich in drei Bereiche teilen:

1. Den öffentlichen Bereich der Ein- bzw. Aussegnung,
2. den nördlich anschließenden Verwaltungs- und Gärtnertrakt und
3. den freistehenden Campanile auf der Ostseite.

Abb. 28 zeigt die neue Einsegnungshalle in der Ostansicht.



Abb. 28: Ostansicht der Neuen Einsegnungshalle am Hauptfriedhof Saarbrücken

Die eigentliche Einsegnungshalle ist allseitig von eingeschossigen Anbauten umgeben. Der gesamte Komplex wurde aus Stahlbeton in Sichtbetonbauweise erbaut. Teile der Wände wurden aus rahmenartigen, quadratischen Betonformsteinen hergestellt. Am Ortbeton stellt die horizontale Brettschalstruktur das dominierende Gestaltungselement dar. Teils wird sie durch Grate verursacht, an denen Zementleim in die Stoßfugen der Schalbretter (Brettfugen) gelaufen ist, wo er nach Entfernen der Schalung als erhabene Struktur erhalten blieb. In den meisten Bereich zeichnen sich die ehemaligen Brettfugen jedoch in Form schmaler, horizontal verlaufender Kiesnester ab, vermutlich verursacht durch das Auslaufen des Zementleims im

Bereich der Brettstöße. Zu sehen sind solche Strukturen in Abb. 30 im Bereich des bauzeitlichen Sichtbetons. Auf den Betonoberflächen ist meist die Struktur sägerauer Schalbretter erkennbar, Teile des Bauwerks wurden jedoch mit gehobelten Schalbrettern betoniert. An der Einsegnungshalle mit ihren öffentlichen Begleitbauten wurde in den Jahren 2010/11 eine behutsame Betoninstandsetzung durchgeführt. Der Verwaltungs- und Gärtnertrakt ist noch unbehandelt und sanierungsbedürftig. Am Campanile war bereits vorher eine konventionelle Instandsetzung durchgeführt worden, die im Folgenden nicht weiter betrachtet wird.

Der behutsamen Instandsetzung vorangegangen waren Bauwerksuntersuchungen im Rahmen einer studentischen Arbeit [38] sowie eine Zustandsaufnahme und Instandsetzungsplanung durch das Institut für Baustoffuntersuchung und Sanierungsplanung GmbH, Saarbrücken [39]. Ergänzend wurden Musterflächen angelegt, um die Instandsetzungsmethodik und Verarbeitung zu erproben und die Instandsetzungsmörtel zu entwickeln [40].

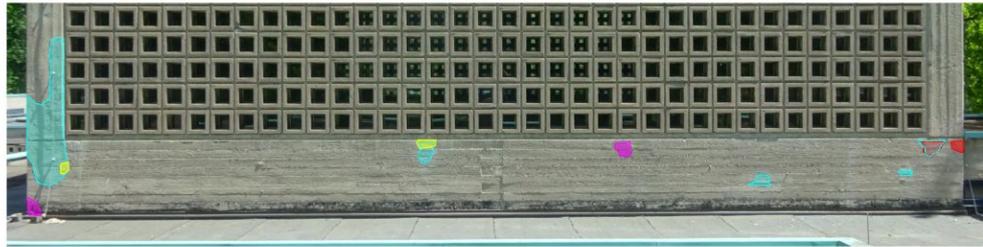
Das damalige Instandsetzungskonzept berücksichtigte u.a. folgende denkmalpflegerische Vorgaben:

- Erhaltung der historischen Substanz in größtmöglichem Umfang
- Reduzierung der Eingriffe auf das unbedingt technisch Notwendige
- Erhalten der vorhanden Oberflächenmängel wie Kiesnester, Lunker, Inhomogenitäten etc. als Zeugnis der historischen Bearbeitungsqualität
- Erhaltung und Wiederherstellung der historischen Oberflächenstrukturen, wie z.B. Brettschalung, Schalungsgrate etc.

6.2 Ergebnisse und Diskussion

6.2.1 Sichtprüfung und Schadenskartierung

An zehn Teilflächen erfolgte eine handnahe Prüfung, d.h. eine visuelle Inspektion in Kombination mit einer Klopfproben zur ersten Detektion von Hohlstellen und Ablösungen im Beton. Die Ergebnisse von 5 Teilflächen wurden in eine Schadenskartierungen übertragen und flächenmäßig ausgewertet. Bei der Auswertung der Zahlen ist vorzuschicken, dass nicht jede Hohlstelle an den Reparaturmörteln als Schaden zu betrachten ist. Teilweise wurden bei den Instandsetzungsarbeiten die unteren Bereiche der Grundmörtel im Kontakt zum Altbeton ungenügend verdichtet, sodass nun in Teilbereichen hochporöse Mörtellagen unter dem kompakten Deckbeton liegen. Dieser Aufbau ist handwerklich mangelhaft und kann - muss aber nicht - zu Schäden führen. Unabhängig von einer Ablösung des Deckmörtels vom Untergrund kann die ungenügende Verdichtung zu Klangveränderungen bei der Klopfprobe und zu Irritationen bei der Messwertinterpretation führen. Daher wird für die Reparaturstellen allgemein von „Mängeln und Schäden“ gesprochen, bei eindeutigen Ablösungen im Bauzeitlicher Bestandsbeton jedoch von „Schäden“. Für die bislang anhand der Kartierungen (siehe Abb. 29) ausgewerteten Teilflächen von insgesamt 45 m² lässt sich ableiten, dass bei der Maßnahme von 2010 ca. 8 % der Gesamtfläche überarbeitet wurde und dass heute ca. 10 % dieser Reparaturflächen Risse oder Ablösungen aufweisen bzw. sich akustisch als Hohllage von ihrer Umgebung abgrenzen lassen (Tab. 3). Am Bestandsbeton haben sich in 0,3 % der kartierten Teilflächen neue Abplatzungen gebildet. Insgesamt sind heute 1,1 % der ausgewerteten Fläche mangel- oder schadhafte.



Westfassade Dach



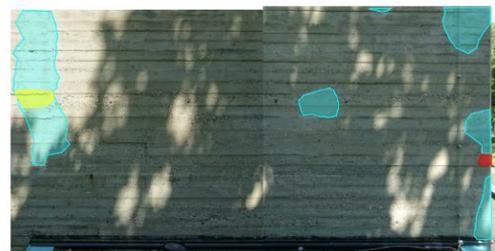
Ansicht Süd Dach West



Ansicht Süd Dach Ost



Ansicht West Dach



Ansicht Ost Dach

Abb. 29: Bestands- und Zustandskartierung repräsentativer Teilflächen (Blau: Instandsetzung; Gelb: Hohlstelle; Rot: Schaden an Instandsetzung; Violett: Schaden am bauzeitlichen Sichtbeton).

Tab. 3: Flächenauswertung der Zustandskartierungen an der Neuen Einsegnungshalle

Kartierungsmerkmal	Flächen	
Summe kartierter Teilflächen	44,8	m ²
Reparaturfläche 2010	3,7	m ²
Mängel und Schäden an Reparaturflächen 2021	0,4	m ²
Schäden am Altbeton 2021	0,1	m ²
Anteil Reparaturflächen	8,3	%
Anteil Mängel und Schäden in Reparaturflächen	9,5	%
Anteil Rep.schäden in Gesamtfläche	0,8	%
Anteil Schäden in Altbeton	0,3	%
Anteil Mängel und Schäden an Gesamtfläche	1,1	%

Bemerkenswert ist die handwerkliche Nachstellung der durch die Kiesnester entlang der ehemaligen Brettfolgen vorgegebenen Linearstruktur. Hierfür wurden händisch Kieselsteine in den frischen Reparaturmörtel eingedrückt, um die Entmischungen an den Schalbrettfolgen nachzuahmen (siehe Abb. 30).



Abb. 30: Einarbeiten von Kieselsteinen in die Reparaturflächen zur Nachstellung der teilweise durch Bindemittelgrate, teilweise durch freiliegende Kieselsteine vorgezeichneten Schalbrettstruktur.

6.2.2 Nachuntersuchung und Schadensdokumentation der Instandsetzung

Unter geeigneten Bedingungen (Exposition des Sichtbetons, ausreichender Temperaturgradient, etc.) eignet sich die Thermographie sehr gut, um schnell einen Überblick zu erlangen, wo sich schadhafte Bereiche, insbesondere Abplatzungen oder Delaminationen, gebildet haben. An der neuen Einsegnungshalle wurden Wärmebildaufnahmen der instandgesetzten Sichtbetonfassaden und des noch nicht instandgesetzten Gebäudetrakts erstellt.

Abb. 31 zeigt links ein Foto des Fassadenabschnitts rechts neben dem Hauptportal. Dieser, noch nicht instandgesetzte Bereich ist gekennzeichnet durch deutliche Abplatzungen mit bereits offenkundiger Bewehrung. Das dazugehörige IR-Bild ist in Abb. 31 rechts dargestellt. Die Wärmebildaufnahme zeigt, dass das tatsächliche Ausmaß des Schadens über die offensichtlichen Schäden hinaus geht. Die beginnenden, an der Oberfläche noch nicht ersichtlichen Abplatzungen (IR-Bild: pink) heben sich im Wärmebild durch ihre im Vergleich zur umgebenden Fassade (IR-Bild: violett) höheren Temperaturen ab. Neben einer beginnenden Ablösung im linken Wandbereich (mittig) deuten die Ergebnisse zudem darauf hin, dass sich im gesamten Bereich der Vertikalbewehrung nahe der Glastür (rechts) bereits Bewehrungskorrosion mit beginnender Betonabplatzung gebildet hat.



Abb. 31: Links: Foto des Fassadenabschnitts. Rechts: Im noch nicht instandgesetzten Teil des Bauwerks zeigt das Wärmebild bei direkter Sonneneinstrahlung neben den visuell erkennbaren Abplatzungen eine Vielzahl von beginnenden Ablösungen.

Eine repräsentative Untersuchung mit Thermographie einer behutsamen Instandsetzung ist in Abb. 32 dargestellt. Das IR-Bild wurde an der Südwestfassade auf Höhe des ersten Obergeschosses gemacht und lässt neben intakten Instandsetzungsbereichen auch eine partielle Delamination erkennen. Die in Abb. 32 (Rechts) mit 1 markierte Stelle zeigt fast die gleiche Oberflächentemperatur wie der umgebende Bestandsbeton, was auf eine gute Ankopplung des Reparaturmörtels hinweist. Die Temperatur von Stelle 2 unterscheidet sich etwas stärker vom Bestandsbeton, was in diesem Fall vermutlich durch etwas größere Farbunterschiede des instandgesetzten Bereichs vom Bestandsbeton bedingt ist. Jedoch zeichnet sich der Teilbereich 2a besonders stark ab, da er sich vom Untergrund gelöst hat, wie die Klopffprobe bestätigt. Bei Stelle 3 überlagern sich ablösungs- und geometriebedingte Effekte.

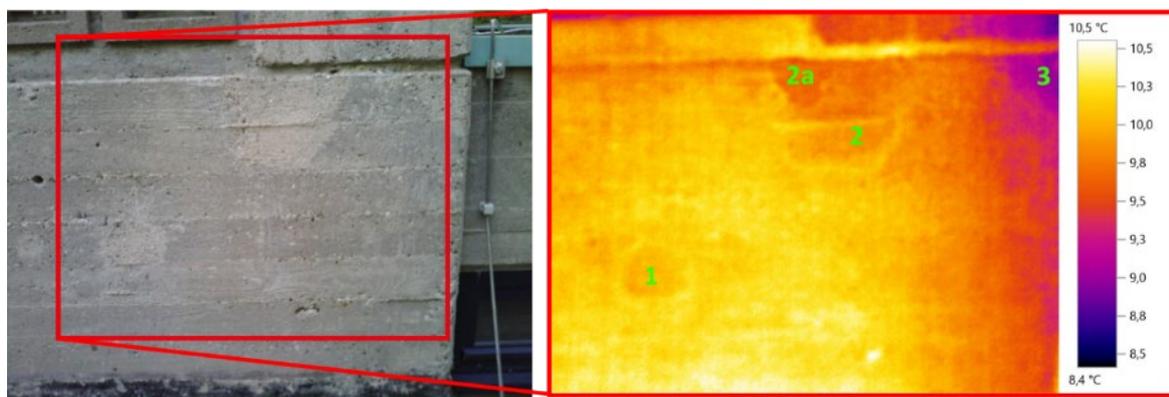


Abb. 32: Links: behutsame Instandsetzung an der Südwestfassade auf Höhe des ersten Obergeschosses. Rechts: Der rote Rahmen markiert die Wärmebildaufnahme.

An der Südostfassade wurden an einer freistehenden Sichtbetonwand des Laubengangs von beiden Seiten Untersuchungen mit dem Ultraschallgerät durchgeführt. Die beidseitige Messung erlaubte an dieser Stelle eine genaue Interpretation der Daten.

Abb. 33 zeigt die Auswertung der Ultraschalltomographie an der außen liegenden Fläche der freistehenden Sichtbetonwand. Die grün hinterlegten Flächen kennzeichnen Bereiche mit intakten Instandsetzungen bzw. Sichtbetonabschnitten ohne Schäden oder Mängel. An der linken, größeren Instandsetzungsfläche konnte nur im unteren Bereich zweifelsfrei eine gute Untergrundhaftung des Instandsetzungsmörtels an den bauzeitlichen Beton nachgewiesen

werden. Dennoch deuten die Untersuchungsergebnisse darauf hin, dass lediglich in der oberen Randzone der Instandsetzung eine Verbundlockerung stattgefunden hat (siehe Abb. 33 A)). Im rechten Bereich der Instandsetzung war eine aussagekräftige Ultraschallmessung wegen eines Kiesnestes nahe der Rückwand nicht möglich (siehe Abb. 34). Eine Bohrkernentnahme an dieser Stelle deutet jedoch auf eine noch ausreichende Untergrundhaftung hin (Abb. 33 B)). Eine klare Schadstelle konnte hingegen im rechten Randbereich des Untersuchungsareals im bauzeitlichen Beton nachgewiesen werden. Die beginnende Abplatzung ist bereits mit bloßem Auge am rechten Rand neben der Instandsetzung sichtbar (siehe Abb. 33 D)). Im gesamten Randbereich war es nicht möglich, ein Rückwandecho nachzuweisen. Insbesondere im oberen Drittel der Instandsetzung könnte sich die Delamination im Inneren des Bauteils bis unter den instandgesetzten Bereich ausgebreitet haben.

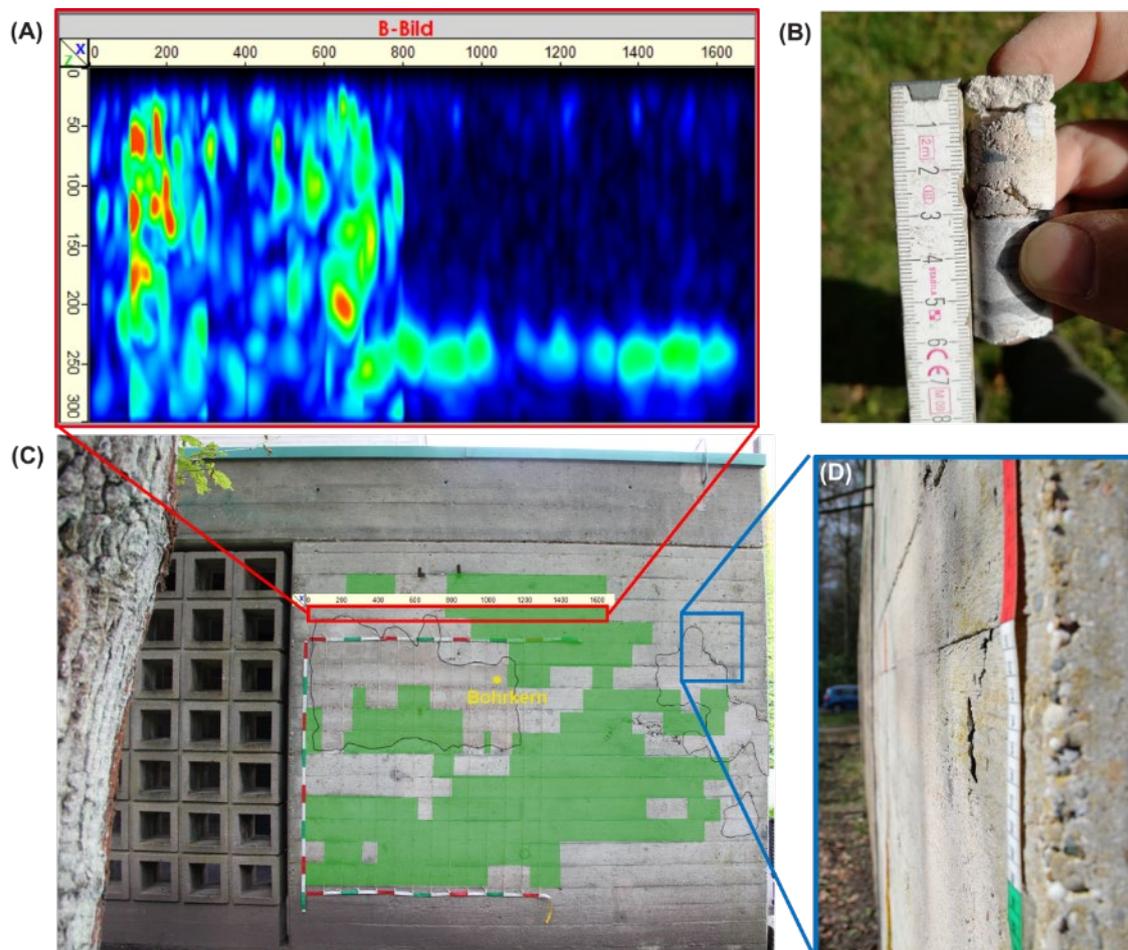


Abb. 33: (A): B-Bild einer Ultraschallmessung an einem Abschnitt der Südostfassade. Die Position des B-Bildes ist in dem unten dargestellten Foto der Sichtbetonwand rot markiert. (B): Bild des entnommenen Bohrkerns. (C): Die grün hinterlegten Flächen kennzeichnen jene Bereiche, in denen das Rückwandecho darstellbar ist und das Bauteil somit als intakt angesehen werden kann. Die behutsam instandgesetzten Abschnitte sind schwarz umrandet. Der gelbe Punkt markiert die Position der Bohrkernentnahme. (D): Bildaufnahme der beginnenden Abplatzung im bauzeitlichen Sichtbeton.

Die Rückseite der freistehenden Wand ist in Abb. 34 abgebildet. Die durchgeführten Ultraschallmessungen zeigen im B-Bild deutlich, dass im Bereich eines Kiesnestes, welches in diesem Fall direkt an der Oberfläche liegt, keine Reflexionen detektiert wurden. Es zeigt, dass bei dem Vorhandensein eines Kiesnestes keine Aussage über die Güte des Verbunds

im instandgesetzten Bereich getroffen werden kann. Allerdings bestätigen die Messungen an der Rückseite, die in Abb. 33 dargestellte Kartierung der intakten Wandabschnitte. Im unteren Bereich der Instandsetzung und im unteren Drittel der Sichtbetonwand wurde mittels Ultraschall eine Wandstärke von etwa 26,6 cm ermittelt. Dies entspricht der gemessenen Wanddicke. Jedoch im oberen Randbereich der Instandsetzung wird das vermeintliche Rückwandecko sprunghaft bei nur noch 24,5 cm Tiefe gemessen. Es ist daher davon auszugehen, dass sich der Verbund im oberen Bereich der Instandsetzung gelöst hat.

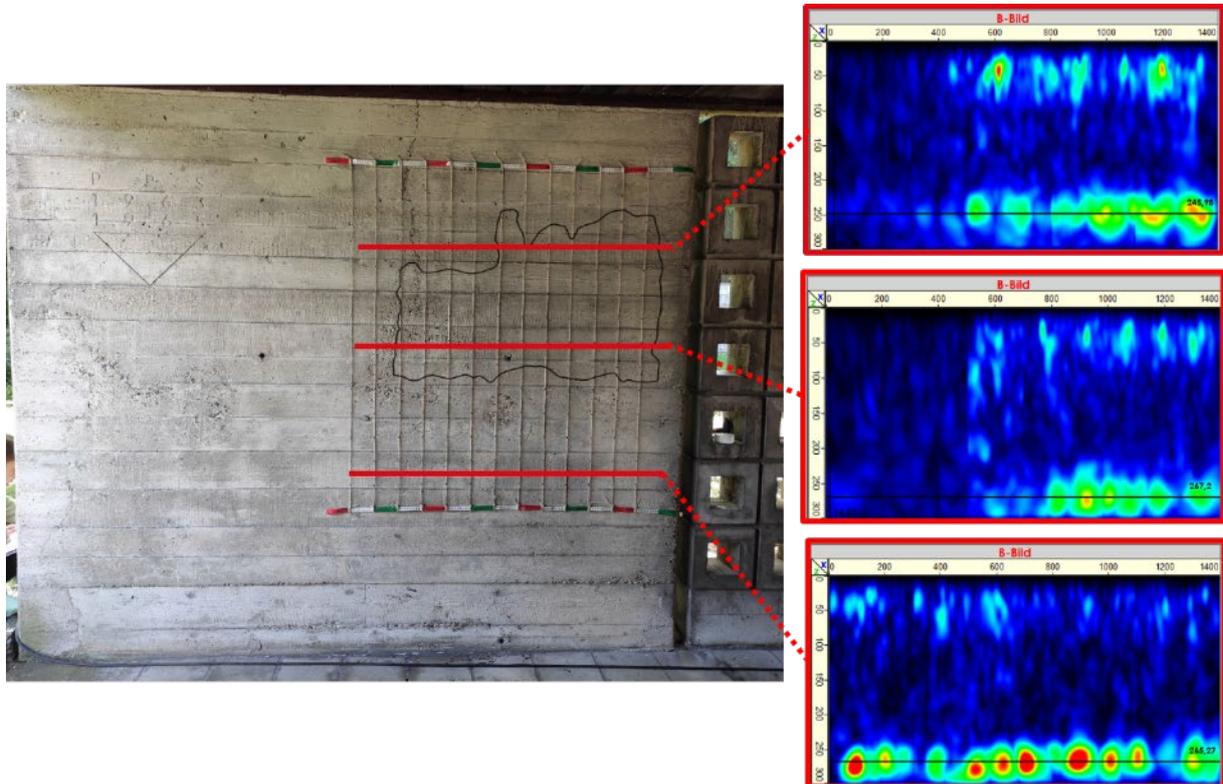


Abb. 34: Rückseite der in Abb. 33 gezeigten freistehenden Wand eines Laubengangs (links) und die B-Bilder aus den Ultraschallmessungen (rechts)

Wegen der starken Verschattung dieses Fassadenabschnitts konnten die Ergebnisse nicht mittels Thermographie validiert werden. Im Rahmen eines nachfolgenden Monitorings sollte dieser Wandabschnitt laufend auf eine Ausbreitung der beginnenden Verbundlockerungen hin kontrolliert werden. Zudem wäre es empfehlenswert, mittelfristig Maßnahmen für weitere behutsame Instandsetzungen in die Wege zu leiten, damit die bauzeitliche Sichtbetonoberfläche so vollständig wie möglich erhalten werden kann.

Die Untersuchungen eines Fassadenabschnitts (Südost) in Höhe des ersten Obergeschosses haben einen internen Mangel offengelegt. Abb. 35 zeigt auf der linken Seite ein Foto des untersuchten Sichtbetons mit der Auswertung der Ultraschallmessungen. Die grün hinterlegten Bereiche kennzeichnen intakten Bestandsbeton. Im gesamten instandgesetzten Bereich war es nicht möglich, ein Rückwandecko nachzuweisen. Dies deutet auf interne Schäden oder Mängel hin. Bei der stichprobenartigen Entnahme eines Mikro-Bohrkerns stellte sich heraus, dass unter dem farblich angepassten Instandsetzungsmörtel ein konfektionierter Aufbaumörtel eingebracht wurde, der aufgrund ungenügender Verdichtung sehr porös ist. Dieser Umstand muss nicht zwingend eine Delamination der Instandsetzung verursachen. Ein weiterführendes Monitoring wäre jedoch auch an diesem Abschnitt empfehlenswert.

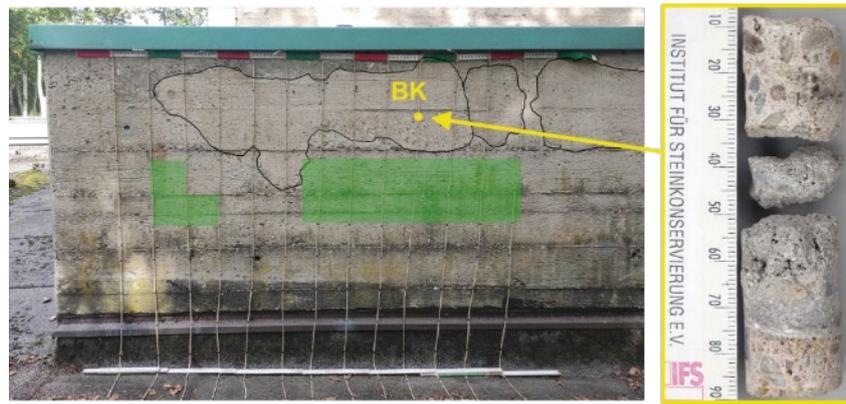


Abb. 35: Links: Abschnitt der Südost-Fassade des ersten Obergeschosses. Die behutsame Instandsetzung ist schwarz umrandet. Die grün markierten Bereiche kennzeichnen intakte Fassadenabschnitte (Rückwandecho nachweisbar). Rechts: Aufnahme des entnommenen Mikro-Bohrkerns (BK)

Bei der Maßnahme wurde viel Wert auf die optisch-ästhetische Angleichung der Reparaturstellen gelegt. Dies gilt sowohl für die Farbigkeit des Reparaturmörtels als auch für die handwerkliche Oberflächengestaltung mit Schalbrettendrucken sowie Graten und Kiesnestern entlang der Fugen zwischen den Schalbrettern. Schon visuell war festzustellen, dass die Farbe der Reparaturmörtel meist sehr gut an den Bestand angepasst wurde. An manchen Stellen jedoch schien die Anpassung weniger gut gelungen zu sein. Mittels farbmessenden Messungen nach DIN EN 15886 sollte diese Einschätzung verifiziert und quantifiziert werden.

Zum Einsatz kam das Konica Minolta Spectro-Photo-Meter CM-600d, bei dem jeder Messwert aus fünf Einzelmessungen gemittelt wird. Je Untersuchungsstelle (Messbereich) wurden wiederum 5 Messungen an unterschiedlichen Stellen durchgeführt. Für jeden Messort wurde die Farbigkeit des umgebenden Bauzeitlichen Bestandsbetons in gleicher Weise erfasst. Die Messergebnisse werden als $L^*a^*b^*$ -Werte ausgewertet. Im $L^*a^*b^*$ -Farbraum stellt der a^* -Wert dabei die grün-rot-Achse dar, der b^* -Wert die blau-gelb-Achse. Die Skalierung reicht jeweils von -90 bis +90. Je näher die a^* - und b^* -Werte bei Null liegen, desto eher entsprechen sie einem neutralen Grau, je weiter sie vom Nullpunkt abweichen, desto intensiver werden die Farben. Die L^* -Achse stellt die Lumineszenz dar, vereinfacht die Helligkeit. Die Skalierung der L^* -Achse reicht von Null (schwarz) bis 100 (weiß).

Die a^* - und b^* -Einzelwerten der Farbmessungen sind in Abb. 36 (links) dargestellt. Sie zeigen, dass die Reparaturmörtel gegenüber dem bauzeitlichen Beton (Altbeton) etwas stärker ins Rötliche tendieren. Auffällig sind die Unterschiede der L^* -Werte (Lumineszenz), insbesondere bei Mittelwertbildung für die 6 untersuchten Teilflächen (Abb. 36, rechts). Der bauzeitliche Bestandsbeton zeigt starke Unterschiede in der Lumineszenz, d.h. der bauzeitliche Bestandsbeton (Altbeton) der Flächen Zentralbau Dach Nord und West unten (Signatur Dach N/W unten in Abb. 36) ist deutlich dunkler als in den übrigen Flächen des Bestandsbetons (siehe Abb. 37).

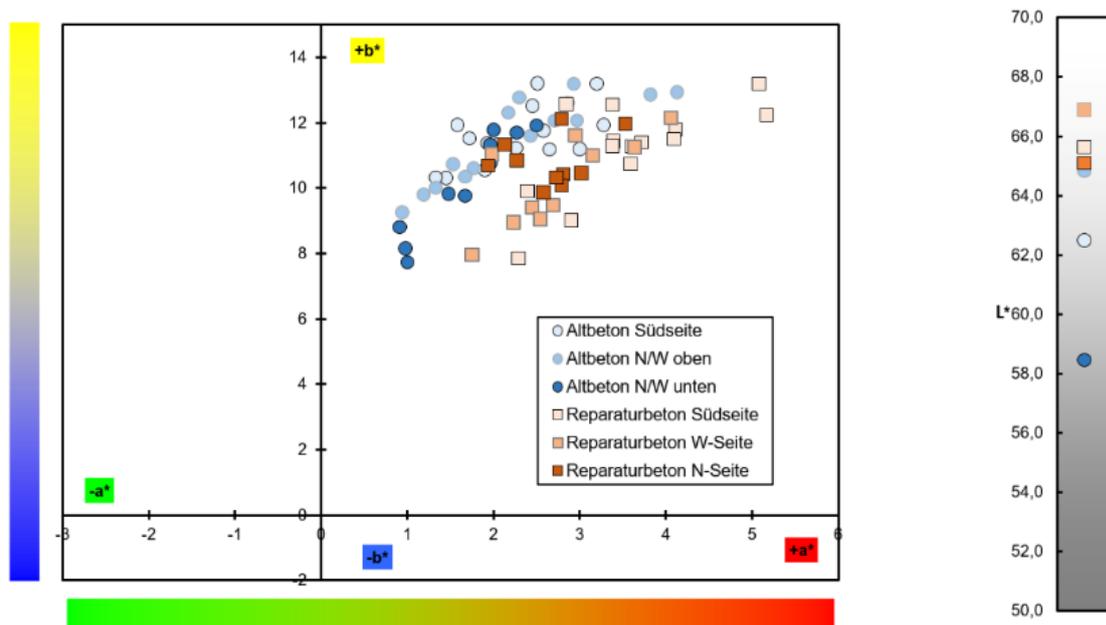


Abb. 36: Links: Einzelwerte der a*- und b*-Werte im XY-Diagramm; Rechts: Mittelwerte der L*-Werte für die drei untersuchten Teilflächen, jeweils Bestandsbeton (Altbeton) und Reparaturbeton.

Aufgrund dieser farblichen Varianzen vor allem im bauzeitlichen Bestandsbeton, und in geringerem Maß auch in den Reparaturmörteln, zeichnen sich die Reparaturflächen teils nur minimal, teils deutlich erkennbar vom Bestand ab (siehe Abb. 37).



Abb. 37: Sehr gute farbliche Anpassung des Reparaturmörtels an den Bestandsbeton des oberen Betonierabschnitts, jedoch deutlicher Unterschied zum Bestandsbeton des unteren, etwas dunkleren Abschnitts (Zentralbau, Dach, Nordfassade).



6.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Ausführungsdetails, wie die händisch eingearbeiteten Kieselsteine zur Nachahmung der bauzeitlichen Strukturen (Entmischungen an Brettstößen), und die gute farbliche Anpassung der Reparaturmörtel tragen wesentlich zur gelungenen ästhetischen Integration der Reparaturstellen in den Bestand bei.

In den kartierten Teilbereichen wurde ein Anteil von 10% der Reparaturstellen als mangel- oder schadhaft klassifiziert, wobei nicht zwischen Ausführungsmangel (ungenügende Verdichtung des Grundmörtels) und Neuschaden (beginnende Ablösung des Reparaturmörtels) unterschieden wurde. Der tatsächlich schadhafte Anteil liegt also niedriger. Am umgebenden Bestandsbeton sind nur wenige Neuschäden zu konstatieren.

In der Gesamtwertung erscheint mittelfristig eine punktuelle Überarbeitung sinnvoll.

7 Kirche Maria Königin des Friedens „Fatimakirche“ (Kassel)

Auszüge des nachfolgenden Kapitels werden veröffentlicht in:

Steiner, S.; Grillich, P.; Auras, M.; Heese, C.: (im Druck) „Monitoring früherer Instandsetzungsmaßnahmen an Denkmälern aus Stahlbeton“

Fachtagung „Betoninstandhaltung am Baudenkmal - Methoden, Materialien, Dauerhaftigkeit“; Landesdenkmalamt Saarland und Institut für Steinkonservierung e. V.; Sender Berus, Überherrn; 21.06. 2023 (IFS-Bericht Nr. 65)

7.1 Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen

Die Kirche Maria Königin des Friedens, kurz „Fatimakirche“ in Kassel-Wilhelmshöhe (siehe Abb. 38) wurde in den Jahren 1956 bis 1959 erbaut und 1998 unter Denkmalschutz gestellt. Nach den Entwürfen des deutschen Architekten Gottfried Böhm ausgeführt, ist neben der kubischen Form des Kirchenbaus, insbesondere die Beschaffenheit und Farbgebung der Sichtbetonfassade kennzeichnend.



Abb. 38: Kirche Maria Königin des Friedens - Fatimakirche

Die klare Linie der Nord- und Südfassade wird von je einer konvex gewölbten Konche mit spitz zulaufendem Kegel unterbrochen. An der Ost- und Westseite umrahmen zwei monumentale Glasflächen, welche ebenfalls von Gottfried Böhm gestaltet wurden, die mittigen Sichtbetonelemente. Durch die Herstellung der Seitenwände in Schüttrbetonbauweise entstanden wellenartige Unregelmäßigkeiten, die die einzelnen Betonierabschnitte nachzeichnen (siehe Abb. 39). Das Erscheinungsbild ist außerdem durch schlierenartig auftretende Kiesnester geprägt. Bei der Gestaltung der Kirche legte Böhm großen Wert auf die Ausbildung der Materialien. Durch die Arbeitsvorgänge beim Schütten des Betons für die 50 cm dicken Wände sollte eine lebendige und edle Oberflächenstruktur ausgebildet werden [41]. Charakteristisch ist jedoch die rötliche Färbung des Sichtbetons, hervorgerufen durch ein Beimischen von rotem Ziegelsplitt aus dem Trümmerschutt des zweiten Weltkrieges und Farbpigmenten. Um die Betonierfugen sowie das unterschiedliche Setzen und Verdichten des

Betons zu zeigen, wurden hier die Oberflächen nach dem Ausschalen steinmetzmäßig abgearbeitet und dadurch stark aufgeraut [42].

Im Kontrast hierzu wurde der Glockenturm in grauem Sichtbeton mit durchgehend waagrechter Schalbrettstruktur ausgeführt. Das freiliegende Zuschlagskorn und die etwas verschwommene Schalbrettstruktur deuten darauf hin, dass die Betonoberfläche nach dem Ausschalen nachgewaschen wurde. Der schlanke (4 mal 4 Meter im Grundriss und 45 m hoch), ansonsten freistehende Turm findet über eine Werktagskapelle Anschluss an die Kirche. Die umlaufenden Betonsockel sind passend zum Turm in grauem Sichtbeton, allerdings mit durchgängig senkrechter Schalung, ausgeführt.

In den Jahren 2005 bis 2008 wurde die Kirche punktuell (behutsam) instandgesetzt [43]. Die Zusammensetzung des Instandsetzungsmörtels wurde aus Prüfergebnissen des historischen Betons abgeleitet und anschließend in ästhetischer und materialtechnologischer Hinsicht angepasst. Mit anschließendem Sandstrahlen erfolgte eine Oberflächenbehandlung zur Nachahmung der Oberflächenhaptik des historischen Betons. An den spitz zulaufenden Kegeln der Konchen erfolgte eine vollflächige Instandsetzung mit Spritzbeton [44]. Die Schüttnlinien waren aufgrund einer höheren Durchlässigkeit des Betons in der Vergangenheit häufig anfällig für einen Wassereintritt. An der Nordfassade fand daher zudem eine partielle Injektion mit einem farblich angepassten Zementleim statt [45].



Abb. 39: Wellenförmige Schüttnlinien und dunkle Kiesnester im Ziegelsplittbeton

7.2 Ergebnisse und Diskussion

7.2.1 Sichtprüfung und Schadenskartierung

Die Sichtprüfung ließ im Bereich der untersuchten Flächen keine Flankenabriss, Abplatzungen oder Rissbildungen erkennen. Eine Hohlstellendetektion mittels Klopfprobe war wegen der rauen Oberfläche an der Kirche nicht möglich. Die optische Anpassung der Reparaturmörtel war sehr gut gelungen, jedoch haben sich die Reparaturmörtel infolge der Bewitterung seit der Instandsetzung etwas aufgehellt. Die Kegel der Konchen haben sich schwarz verfärbt (siehe Abb. 40). Sie wurden vermutlich im Zug der Instandsetzung wasserabweisend behandelt.

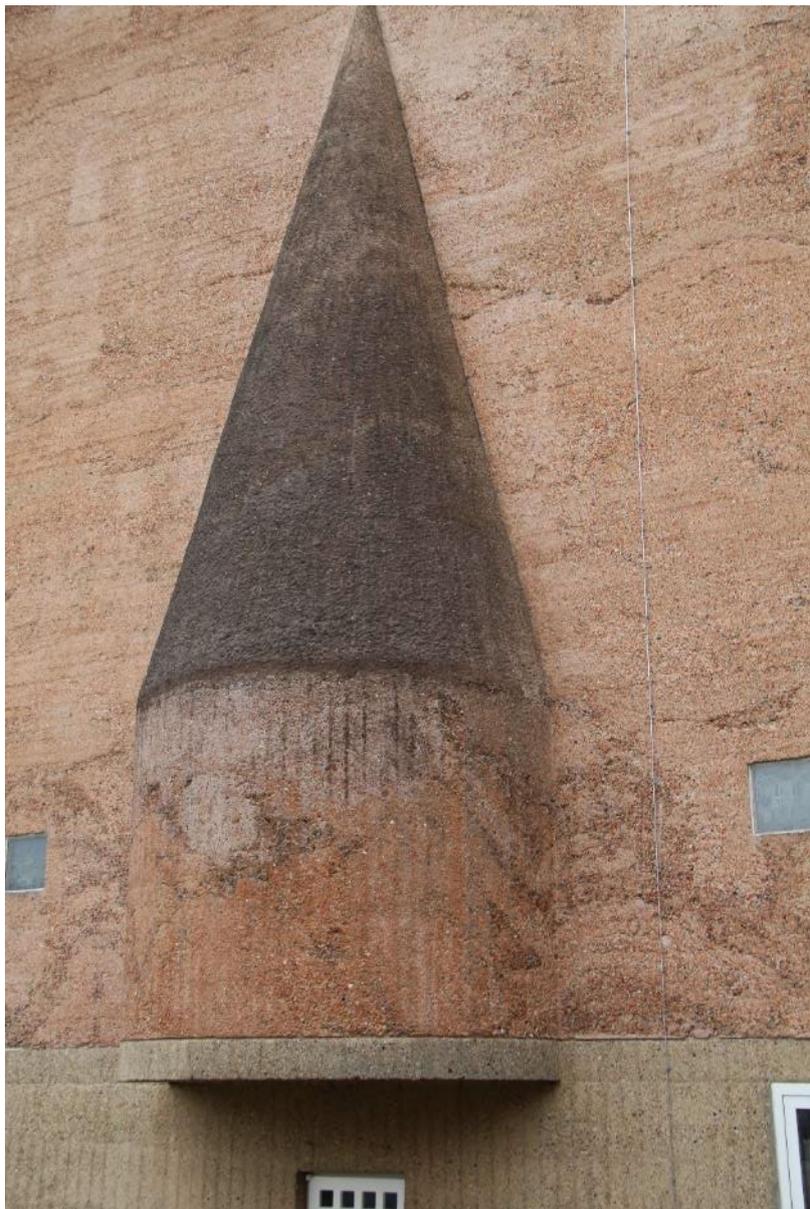


Abb. 40: Dunkle Verfärbung der Instandsetzung (Spritzbeton auf Kegel)

7.2.2 Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen

Zur Bestimmung der Betonüberdeckung und der Detektion der Bewehrungslagen erfolgten Messungen mit dem Profometer. Die Messreihen im Bereich einer Instandsetzungsfläche der Nordfassade des Kirchengebäudes sind in Abb. 41 dargestellt. Die aufgenommene Vertikalbewehrung weist hohe Differenzen in der Betonüberdeckung auf, wobei die Betonüberdeckung im Untersuchungsgebiet von links nach rechts zunimmt. Die Differenz in den Überdeckungsmaßen liegt bei etwa 30 mm. Über der Horizontalbewehrung außerhalb der Reparaturstelle (Messlinie 3) besteht eine gleichmäßige Betonüberdeckung von circa 40 mm. Deutlich höhere Betondeckungswerte wurden im Bereich der Instandsetzung gemessen (Messlinie 4), was darauf hindeutet, dass die Horizontaleisen hier teilweise entnommen wurden. Die Horizontalbewehrung liegt hier bei $\varnothing = 72,2$ mm Tiefe.

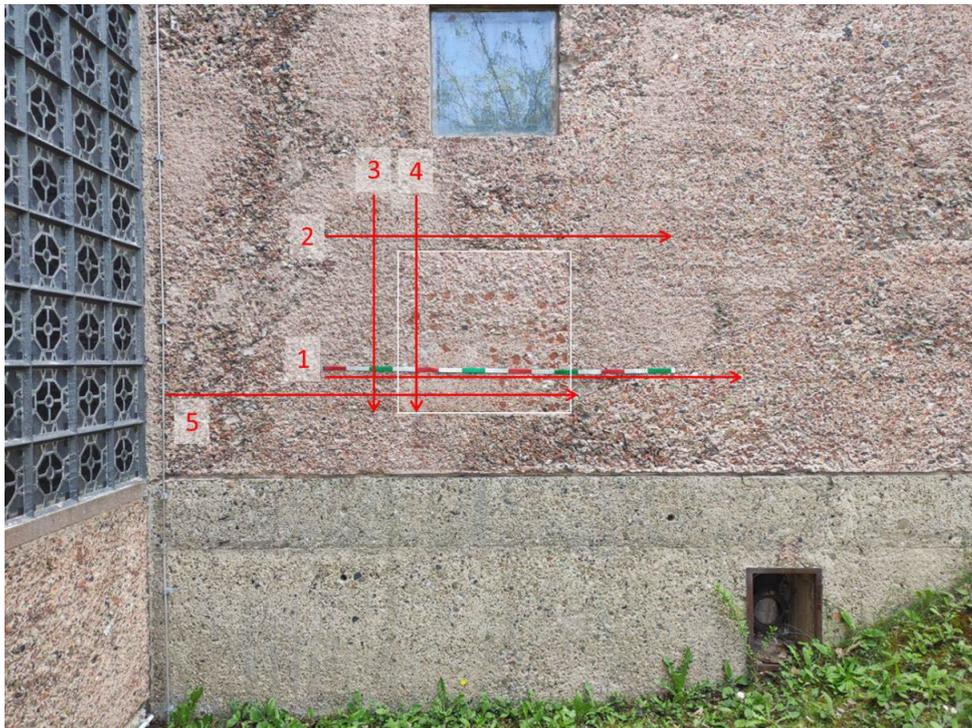


Abb. 41: Nordfassade: die Position der Profometermesslinien sind durch rote Pfeile gekennzeichnet; die behutsame Instandsetzung ist weiß umrahmt

Ergänzend wurde die Betondeckung an der Nordfassade des Turms der Fatimakirche überprüft. Die Messpositionen und das Messbild der horizontalen Messlinie 6 sind in Abb. 42 dargestellt. Die Messergebnisse zeigen eine in zwei Lagen eingebrachte Bewehrung. Messlinie 6 (Abb. 42 unten), welche eine Horizontalmessung über die gesamte Breite der Nordseite des Turms darstellt, deutet darauf hin, dass die obere Vertikalbewehrung relativ konstant in einer Tiefe von circa 35 mm liegt. Allerdings verliert sich die Gleichmäßigkeit der Bewehrungslage, sobald das Prüfgerät im Bereich der Reparaturstelle misst, was auf die stellenweise Entnahme schadhafter Bewehrung während der Instandsetzungsmaßnahmen zurückgeführt werden kann. In derselben Messlinie sind nach der Reparaturstelle wieder regelmäßige und dichtere Bewehrungsabstände zu erkennen, wobei die Betonüberdeckung stetig zunimmt. Es wurden zusätzlich drei vertikale Messlinien aufgenommen, die die Horizontalbewehrung zeigen, welche in 2 Lagen und einem regelmäßigen Abstand eingebracht wurde. Die obere Lage liegt in einer Tiefe von ca. 25 mm hinter der Betonoberfläche. Die untere Bewehrungslage hat eine Überdeckung von rund 50 mm. Die

Messungen deuten darauf hin, dass im Bereich der Instandsetzung die Horizontalbewehrung ebenfalls teilweise entnommen wurde.

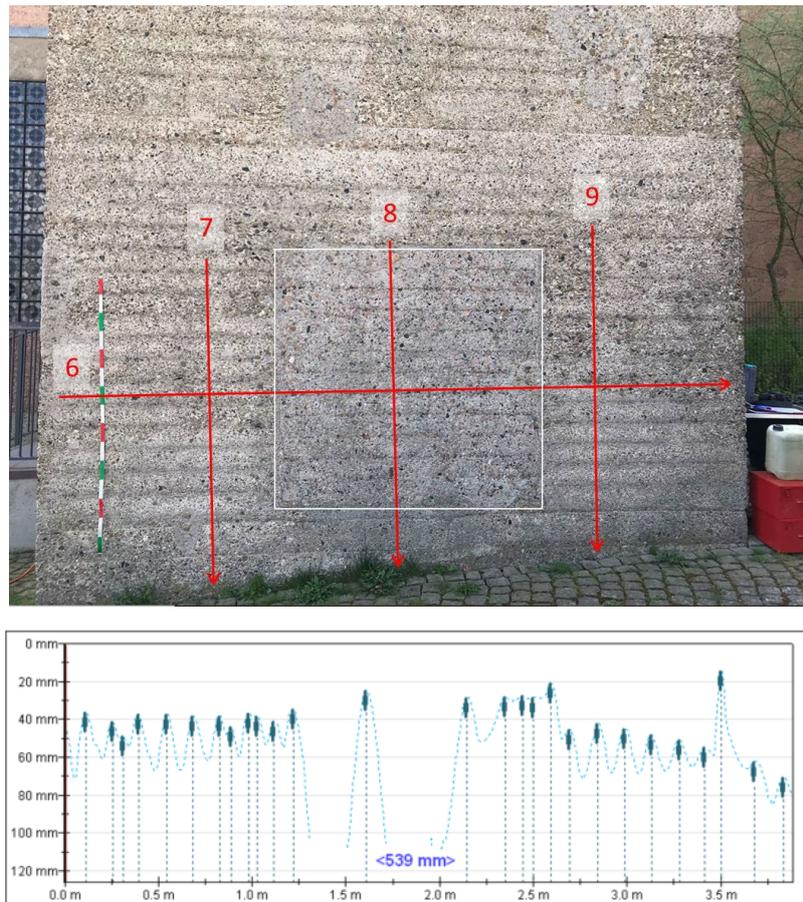


Abb. 42: Oben: Nordfassade des Glockenturms mit Messlinien der zur Bewehrungsdetektion (rote Pfeile). Die behutsame Instandsetzung ist weiß umrahmt. Unten: Messbild der Untersuchungen mit dem Profometer (Messlinie 6)

Die gemessenen Betonüberdeckungen können Tab. 4 entnommen werden.

Tab. 4: Ergebnisse aus den Betondeckungsmessungen mit dem Profometer

Nr.	Bauteil		Betondeckung			
			Min [mm]	Max [mm]	Median [mm]	Mittel [mm]
1	Instandsetzungsbereich 2 Wand	Horizontal	34	90	67,4	66,1
2		Horizontal	44	73	64,1	62,8
3		Vertikal	37	45	42,2	42,0
4		Vertikal	68	78	71,3	72,2
5		Horizontal	32	75	61,4	59,3
6	Turm Nordwand	Horizontal	14	40	38,0	39,2
7		Vertikal	23	58	33,1	38,4
8		Vertikal	15	81	64,3	59,4
9		Vertikal	28	70	41,1	42,0

An der Kirche und am Glockenturm wurden stichprobenartig Ultraschallmessungen durchgeführt. Die Sichtbetonfassade der Kirche erhielt durch die steinmetzmäßige Bearbeitung eine deutliche Rauigkeit, die das Ankoppeln des Ultraschallgerätes an den Beton erschwerte. Dadurch entstanden Vielfachreflexionen, die sich als Artefakte in der Tiefe fortpflanzten und eine Interpretation der Ultraschallmessungen erschwerten. Zum Teil war eine Auswertung der Ultraschallmessungen nicht möglich. Die Kombination mit ergänzenden Prüfmethoden (z.B. Thermographie, Widerstandsmessung mit der Wenner-Sonde, etc.) ist daher sinnvoll.

Die graue Sichtbetonfassade des Glockenturms weist ebenfalls eine gewisse Rauigkeit auf, im Gegensatz zur Kirche sind hier jedoch auswertbare Ultraschallmessungen möglich. In Abb. 43 ist exemplarisch die Ultraschalltomographie eines behutsam instandgesetzten Bereichs an der Nordfassade des Glockenturms dargestellt. Die Auswertung, projiziert auf den Sichtbeton (Abb. 43: A)), zeigt, dass insbesondere im oberen und unteren Viertel der untersuchten Fläche kein Rückwandecho darstellbar ist. Abplatzungen oder eine ausgeprägte Rissbildung im bauzeitlichen Beton konnten durch eine Sichtprüfung an dieser Stelle nicht nachgewiesen werden. Im Untersuchungsbereich oberhalb der Instandsetzung ist das Fehlen eines Rückwandechos allerdings eindeutig (zu sehen im B-Bild in Abb. 43: B). Die diffusen, vielfachen vorkommenden Echos bis etwa 20 cm Tiefe können an dieser Stelle durch das ausgeprägte Oberflächenrelief oder ein oberflächennahes Kiesnest entstanden sein. Das Fehlen des Rückwandechos sollte an dieser Stelle daher nicht mit einer internen Schädigung des bauzeitlichen Sichtbetons gleichgesetzt werden.

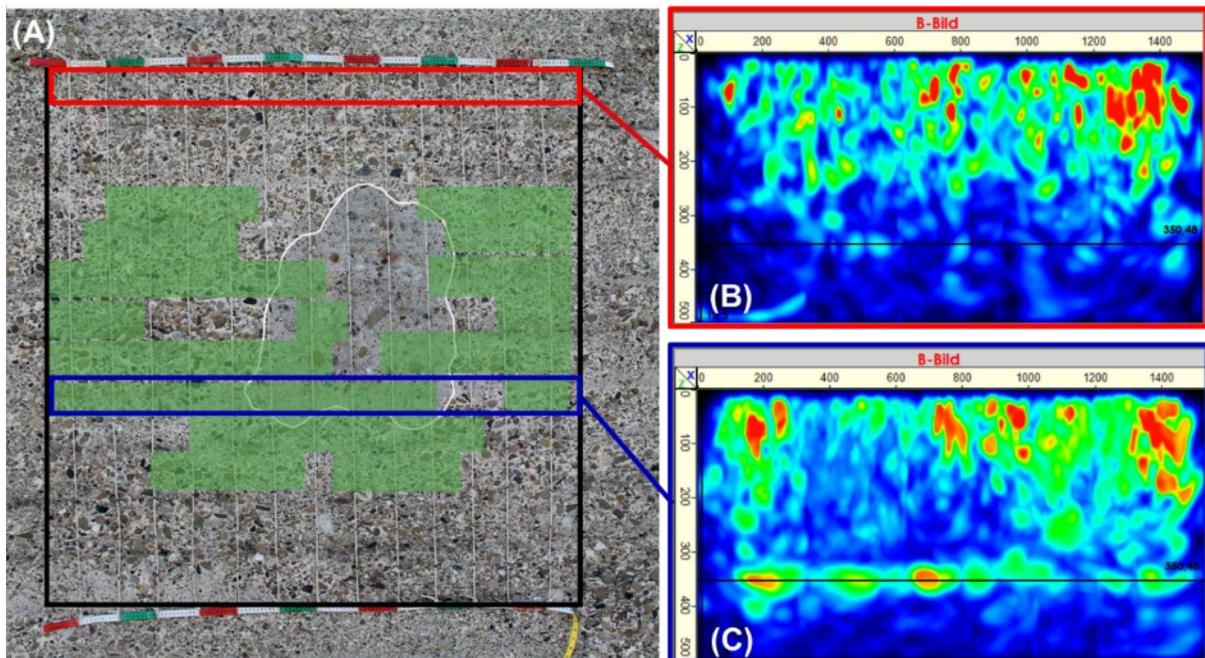


Abb. 43: A): Auswertung der Ultraschallmessungen an der Nordfassade des Glockenturms. Die Instandsetzungsfläche ist weiß umrahmt. Grün hinterlegte Abschnitte kennzeichnen Wandbereiche ohne Delamination. B): Im B-Bild ist kein eindeutiges Rückwandecho darstellbar; C): Rückwandecho ist trotz hohem Signalrauschen im oberflächennahen Bereich weitgehend nachweisbar.

Ergänzend zu den Ultraschallmessungen in Abb. 43 wurden an demselben Bereich Untersuchungen mit dem Radar und Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde durchgeführt. Die Ergebnisse der Radaruntersuchungen, dargestellt in Abb. 44, zeigen, dass

im Bereich der behutsamen Instandsetzung die erste Bewehrungslage entfernt wurde. Eine Beeinflussung der Widerstandsmessung durch oberflächennahe Bewehrung kann hier daher ausgeschlossen werden.

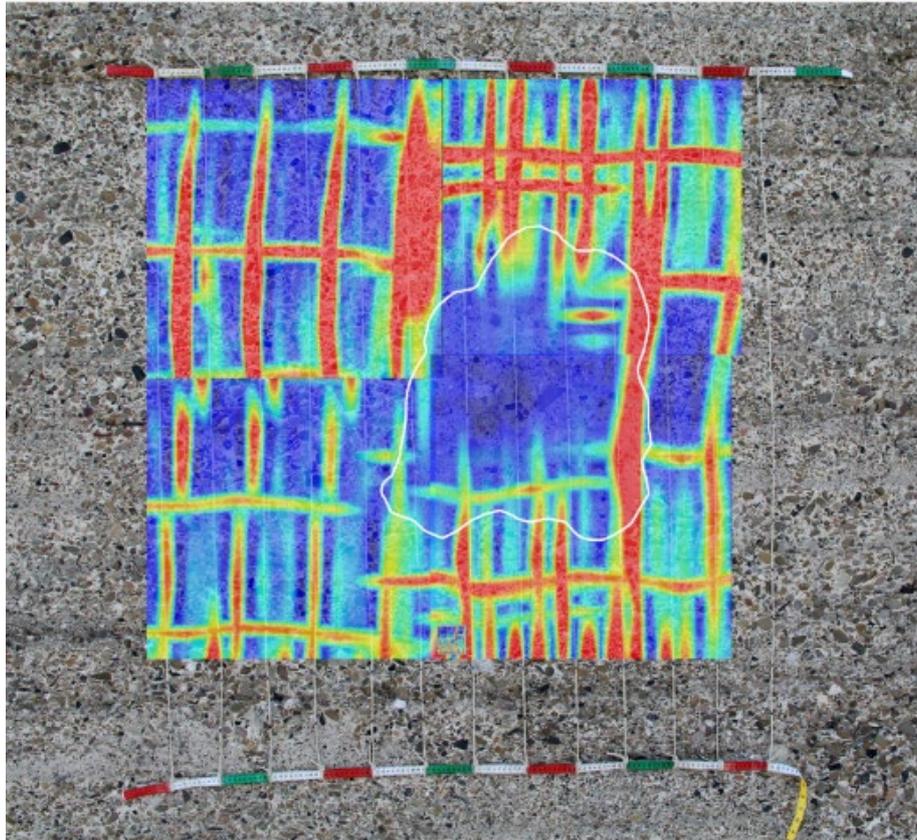


Abb. 44: Radargramm (Tiefe 0-6 cm; kumuliert) projiziert auf den untersuchten Bereich der Sichtbetonfassade des Glockenturms. Die Instandsetzung ist weiß umrahmt.

Die Ergebnisse der Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde sind in Abb. 45 dargestellt. An der oberen Randzone der Instandsetzung wurde ein erhöhter elektrischer Widerstand gemessen, was gemeinsam mit den Ergebnissen der Ultraschalltomographie darauf hindeutet, dass es hier zu einer beginnenden Ablösung oder Verbundlockerung gekommen ist. Die geringen Widerstände im Bereich der Instandsetzung lassen hingegen auf eine gute Untergrundanbindung schließen (keine Lufteinschlüsse durch Delamination/ Verbundlockerung zwischen Instandsetzungsmörtel und bauzeitlichen Beton). Obwohl bei den Ultraschallmessungen zum Teil kein Rückwandecho detektiert werden konnte, deuten die Ergebnisse der Widerstandsmessungen in diesem Bereich auf eine intakte Instandsetzung hin. Gestützt wird dies durch die Durchführung eines „Klopftests“, der auf keine ausgeprägten Hohlstellen schließen ließ.

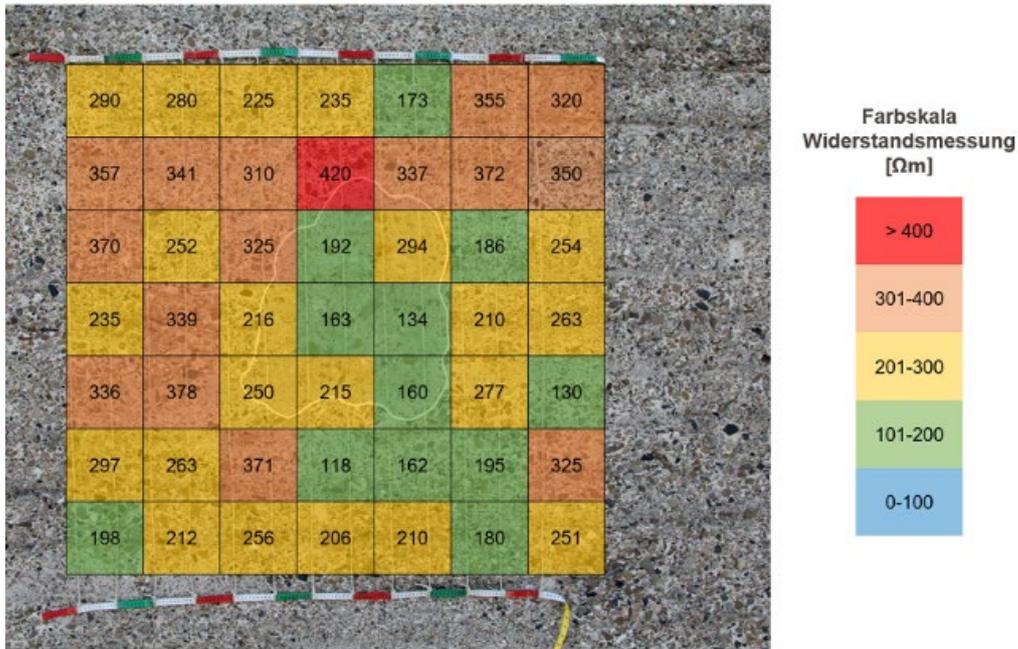


Abb. 45: Widerstandsmessung mittels Wenner-Sonde an der Nordfassade des Glockenturms. Die Instandsetzungsfläche ist weiß umrahmt.

Abb. 46 zeigt eine Wärmebildaufnahme der Westfassade der Kirche. Das IR-Bild umfasst die oberen zwei Drittel der Westfassade und dient daher als Übersicht um bestehende oberflächennahe Delaminationen oder Mängel orten zu können. Die Messungen an der noch nicht instandgesetzten Westfassade offenbarten einige beginnende Betonabplatzungen aufgrund von Bewehrungskorrosion.

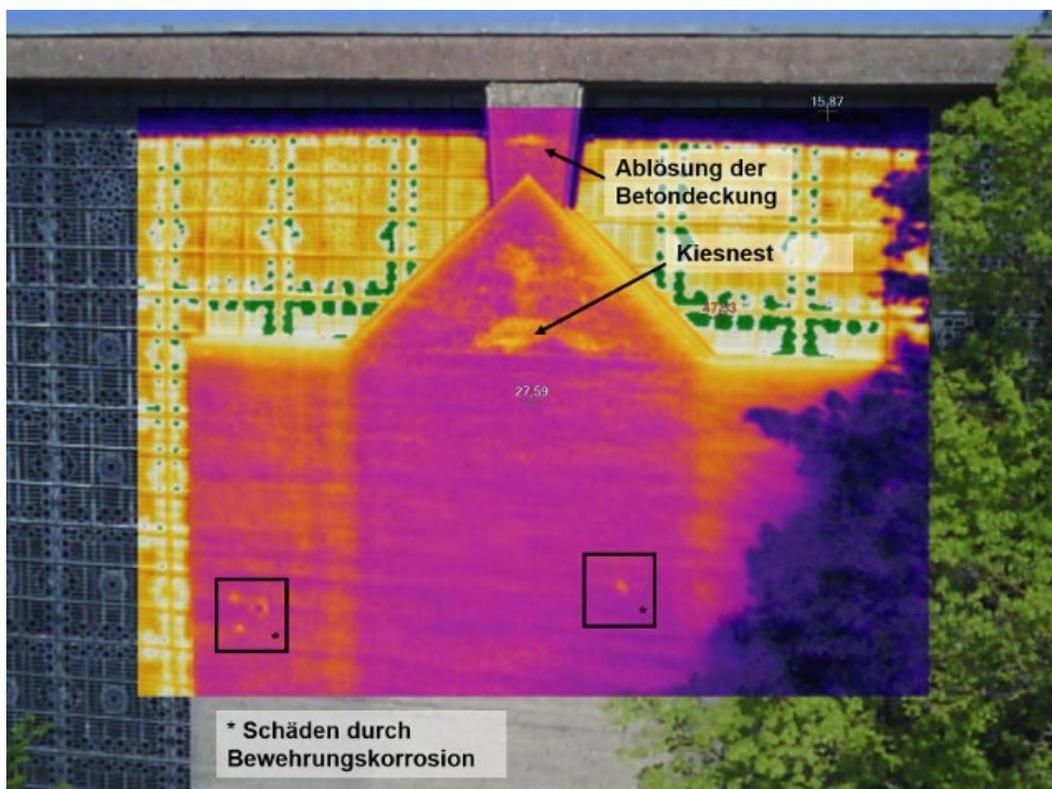


Abb. 46: Detektion von Schadstellen mittels Thermographie – Übersichtsaufnahme der Westfassade.

Das in Abb. 47 dargestellte IR-Bild zeigt eine Übersichtsaufnahme der Südfassade. Durch die steinmetzmäßige Bearbeitung der Fassade traten Kiesnester und Schüttlinien stärker hervor was sich auch in Farbunterschieden äußerte. Dieser Umstand ist auch im Wärmebild zu erkennen, da sich die dunkleren Bereiche der Kiesnester und Schüttlinien stärker erwärmen als der umliegende hellere Sichtbeton. Etwaige, einzelne, kleinerer Abplatzungen gehen hier im Übersichtsbild aufgrund der überlagernden Struktureffekte nicht hervor.

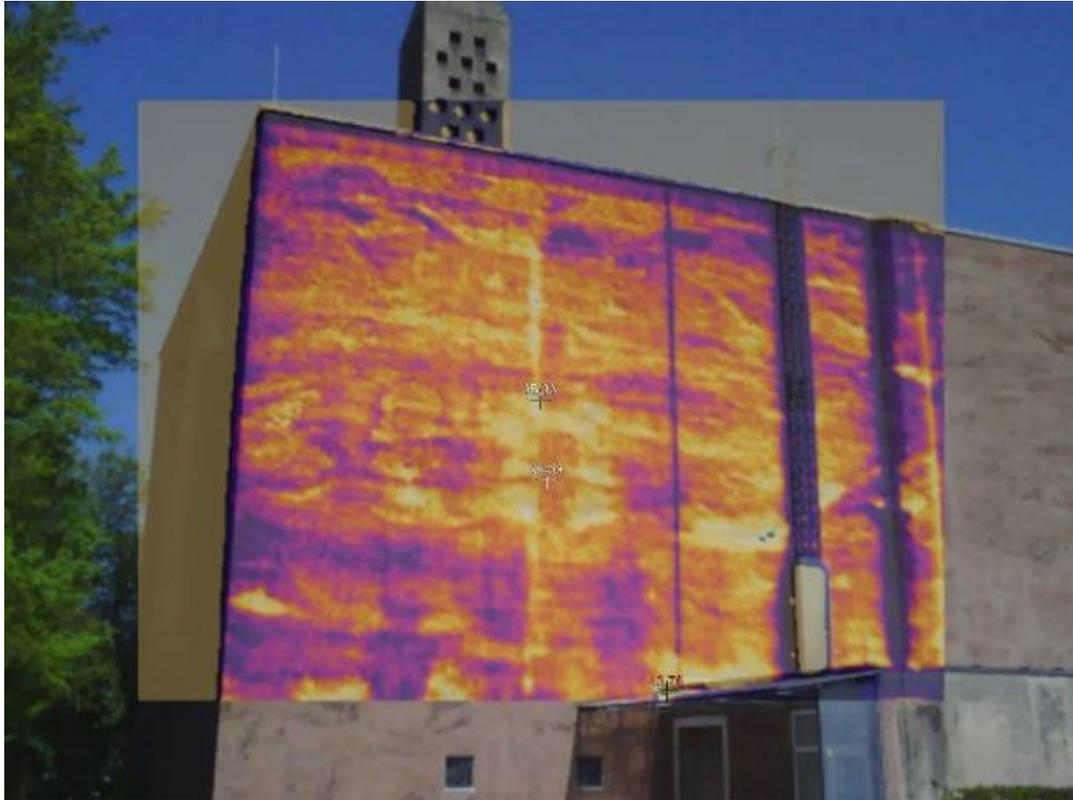


Abb. 47: Im IR-Bild sichtbare Kiesnester und Schüttlinien – Übersichtsaufnahme der Südfassade

7.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Der Zustand der instandgesetzten Bereiche ist als gut bis sehr gut zu klassifizieren. Farblich fügen sich die Instandsetzungsflächen an der Kirche gut in den bauzeitlichen Sichtbeton ein. Lediglich die Kegelflächen der Konchen erscheinen dunkler. Die Instandsetzungsmörtel des Glockenturms heben sich farblich etwas von umgebenden Sichtbeton ab. An einer Instandsetzung am Glockenturm besteht der Verdacht der beginnenden Verbundlockerung im oberen Drittel der instandgesetzten Fläche. Es ist empfehlenswert den entsprechenden Teilbereich bei einem nachfolgenden Monitoring zu beobachten. Visuell erkennbare Neuschäden im bauzeitlichen Beton (in Form von Abplatzungen oder einer ausgeprägten Rissbildung) wurden in den untersuchten Teilbereichen der Nord- und Ostfassade keine vorgefunden. An der noch nicht instandgesetzten Westfassade sind jedoch weitere Schäden infolge von Bewehrungskorrosion offensichtlich. Um eine fortschreitende Schädigung an der denkmalgeschützten Bausubstanz zu vermeiden sollten diese möglichst zeitnah instandgesetzt werden.

8 Weltkulturerbe Völklinger Hütte (Völklingen)

8.1 Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen

Das spätere Weltkulturerbe Völklinger Hütte wurde 1873 durch den Hütteningenieur Julius Buch gegründet, zwischenzeitlich wieder stillgelegt und 1881 von Carl Röchling erworben. Unter dem Namen Röchling'sche Eisen- und Stahlwerke wurde 1883 der erste Hochofen angeblasen. Bereits 1890 galt die Hütte als der größte Eisenträgerhersteller Deutschlands. Bis 1903 wuchs die Zahl auf insgesamt sechs Hochöfen, die durch ihre imposanten Stahlkonstruktionen das heutige Erscheinungsbild prägen.

Ende des 19. Jahrhunderts wurden Bauten und Maschinen nach und nach auf Betonfundamente errichtet, anstelle der bisherigen Fundamente aus Bruch- und Vogesensandstein. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts sind daraufhin auch Bahntrassen und große Silogebäuden aus Stahlbeton errichtet worden [46].

Der immer weiter anwachsende Anfall von Hüttensand führte 1927 zum Bau der hütteneigenen Zementfabrik inklusive eines Drehofens. Ab Sommer 1927 ist davon auszugehen, dass sämtliche hütteneigenen Betongebäude mit selbstproduziertem Zement erbaut wurden [46]. Bis Mitte der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erfuhr die Anlage kontinuierliche Erweiterungen und Ausbauten bis die Produktivität mit der weltweiten Stahlkrise im Jahre 1975 stark zurück ging. 1986 wurden Hochofenanlage und Gasgebläse schließlich stillgelegt und Teile der Anlage unter Denkmalschutz gestellt. Das Eisenwerk erhielt 1994 von der UNESCO als erstes Industriedenkmal aus der Blütezeit der Industrialisierung den Welterbe-Status.

Rohstoffbunker – behutsame Instandsetzung

Der Rohstoffbunker (Abb. 48) wurde 1928 gemeinsam mit der Sinteranlage gebaut. Vermutlich handelt es sich um einen Umbau eines bereits vor 1911 dort vorhandene Silos. Mit der Erweiterung der Sinteranlage im Jahr 1938 wurde auch der Rohstoffbunker nochmals vergrößert [46]. Das rund 80 m lange und bis zu 16 m hohe Rohstofflager wurde in Stahlbeton errichtet. Der Sichtbeton weist eine Schalbrettstruktur auf.

Durch die hohe CO₂ Belastung während der Roheisenherstellung beschleunigten sich Karbonatisierung und Bewehrungskorrosion erheblich. Die Planung zur Instandsetzung der daraus resultierenden Schäden am Stahlbeton erfolgten ab 2008 gemeinsam mit dem Landesamt für Denkmalpflege. Die Entscheidung fiel auf eine lokal begrenzte, behutsame Instandsetzung, um die bauzeitliche Sichtbetonoberfläche mitsamt den Nutzungsspuren während des Betriebs der Anlage möglichst zu erhalten. Das Instandsetzungskonzept sah überdies vor, vorhandene Betonschalen, die aufgrund von korrodierter Bewehrung abgeplatzt sind, möglichst zu erhalten und an gleicher Stelle wiedereinzusetzen. Andernfalls sollte die bauzeitliche Oberflächenstruktur originalgetreu wieder hergestellt werden [47]. Die Ausführung der Instandsetzungsmaßnahmen erfolgte 2011. Abb. 48 zeigt den Rohstoffbunker wie er im Zuge der Bauwerksuntersuchungen in 2022 vorgefunden wurde.



Abb. 48: Foto des Rohstoffbunkers, Zustand 2022.

Kohlenturm – konventionelle Instandsetzung

Während des Zweiten Weltkrieges war der Stahl- und damit auch der Koksbedarf extrem hoch, weshalb die Kokerei ausgebaut wurde. Die Kapazität des alten Stahlkohleturms reichte daraufhin nicht mehr aus, und es wurde ein neuer Kohleturm (Abb. 49) gebaut. Erste Entwurfszeichnung im Archiv des Weltkulturerbes sind auf 1941 datiert. Vermutlich wegen der knappen Ressourcen während des Krieges, kam eine um sämtliche dekorativen Elemente bereinigte Version zur Ausführung. Der Mangel an Baumaterialien führte dazu, dass die Stahlbetonkonstruktion mit sehr wenig Zement hergestellt wurde; obgleich davon auszugehen ist, dass es sich um Zement aus hütteneigener Produktion handelte [46]. Unzureichende Verdichtung während der Ausführung führte zu starken Entmischungen mit Kiesnestern. Eine unzureichende Betondeckung förderte zudem durch Bewehrungskorrosion induzierte Abplatzungen.

2007/2008 wurde der Turm umfangreich saniert. Da der oberflächennahe Sichtbeton der Nord-West und Südfassade nahezu vollständig zerstört war, mussten die Wände vollflächig erneuert werden. Die Dicke des applizierten Spritzbeton wurde um 2 cm erhöht, um eine ausreichende Betonüberdeckung zu gewährleisten. In einem zweiten Schritt wurde ein pigmentierter Feinspachtel aufgebracht, der dem ursprünglichen Farbton nachempfunden war [46]. Da die den Koksboxen zugewandte Ostseite des Kohleturms in einem wesentlich besseren Zustand war, fand hier nur eine partielle Reparatur der Schadstellen statt. Die Ostfassade war mit gesinterter Kohlestaub überzogen, der offenbar eine schützende Wirkung hatte [46].

In Abb. 49 ist die konventionell instandgesetzte Südfassade des Kohleturms dargestellt. Abb. 50 zeigt die Ostseite des Kohleturms, an der der bauzeitliche Sichtbeton nur partial und lokal begrenzt instandgesetzt wurde.



Abb. 49: Südfassade des Kohlenturms



Abb. 50: Partiiell instandgesetzte Ostseite des Kohlenturms

8.2 Ergebnisse und Diskussion

8.2.1 Sichtprüfung und Schadenskartierung

Bei der behutsamen Instandsetzung wurde Wert auf die Nachstellung der Schalbrettstruktur auf der Oberfläche des Instandsetzungsbetons gelegt. Dabei wurde sowohl die Breite der Schalbretter beachtet als auch ihre Positionierung in Fortsetzung der Abdrücke im Bestandsbeton. Da die gesamte Anlage geprägt ist von der in erster Linie auf ihre ursprüngliche Funktion ausgerichteten Gestaltung der einzelnen Bauwerke, von ihren Gebrauchsspuren und von der Verschmutzung durch den allgegenwärtigen, rotbraunen Hüttenstaub, fügt sich der Duktus der pragmatischen, deutlich ablesbaren Reparatur gut in das Erscheinungsbild des Rohstoffbunkers ein.

Zur farblichen Anpassung an die mit originaler Verschmutzung belassenen Bereiche von Bestandsbeton wurde der Instandsetzungsbeton abschließend farblich lasiert. Die Reparatur fügt sich gut in das insgesamt heterogene Erscheinungsbild ein (Abb. 51).



Abb. 51: Deutlich ablesbare Instandsetzungsbereiche mit Nachstellung der originalen Schalbrettstruktur und dem insgesamt heterogenen Erscheinungsbild.

Mittels Hubsteiger wurden Teilbereiche der Betonwände detailliert visuell inspiziert und mit Klopfbprobe kontrolliert. Die Befunde wurden in Kartierungen übertragen, ein Beispiel gibt Abb. 52. Es zeigten sich Kiesnester, etliche Rissbildungen und wenige, sehr kleine Hohllagen im Bestandsbeton. Am Instandsetzungsbeton wurden keine Schäden festgestellt.



Abb. 52: Zustandskartierung eines Teilbereichs des Rohstoffbunkers (Dunkelblaue Linie: Offenliegende Bewehrung; rote Linie: Riss; hellblau: Instandsetzung; hellgrün: Kiesnest; gelb: Hohllage).

An konventionell instandgesetzten Flächen des Kohlenbunkers treten massive Neuschäden in Form von Rissen auf (Abb. 53 und Abb. 54). An einem vom Boden aus zugänglichem Riss zeigte eine kleine Öffnung, dass die Bewehrung Blattrost aufweist und noch im Bestandsbeton liegt (Abb. 53). Es hat den Anschein, als sei hier die Bewehrung nur unvollständig freigelegt und ohne Freistrahlen und Auftrag einer Korrosionsschutzbeschichtung mit dem Reparaturbeton überdeckt worden.



Abb. 53: Links: Riss in einer konventionell instandgesetzten Fläche des Kohlenbunkers, Rechts. Detail mit Blattrost auf der Bewehrung.

In anderen Bereichen hat sich ein regelrechtes Risskrakelee gebildet, das vermutlich die Lage der oberflächennahen Bewehrung nachzeichnet (Abb. 54).



Abb. 54: Das überwiegend orthogonal ausgebildete Rissmuster am Kohlenbunker scheint die Lage der Bewehrung nachzuzeichnen.

Teilbereiche des Kohlenbunkers wurden noch nicht instandgesetzt. An diesen lässt sich der Schädigungsgrad des Betons erkennen (siehe Abb. 55).



Abb. 55: An den noch nicht instandgesetzten Flächen des Kohlenbunkers ist die Schädigung der Betonoberfläche weit fortgeschritten.

8.2.2 Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen

Die untersuchten Bauwerke in der Völklinger Hütte stellten im Hinblick auf die zerstörungsfreie Prüfung einen Sonderfall dar, da einige Prüfmethoden nicht oder nur eingeschränkt angewandt werden konnten.

Rohstoffbunker – behutsame Instandsetzung

Die Lage des Rohstoffbunkers ließ keine aussagekräftigen Thermographie-Messungen zu, da die untersuchte Fassade weitestgehend im verschatteten Bereich lag. Zusätzlich erfolgte eine Erwärmung der Rückwand der Stahlbetonelemente durch direkte Sonneneinstrahlung, was die Möglichkeit, oberflächennahe Delaminationen zu erkennen, erheblich einschränkte.

Die Einflüsse der Umgebungsbedingungen führten außerdem dazu, dass sich auf der Oberfläche des Sichtbetons Ablagerungen aus rotbraunem Staub und Feinpartikeln (vermutlich Sinterstaub mit hohem Eisenoxidgehalt) zu einer feinblättrigen Schicht verbunden haben. Diese flächendeckend vorkommenden Ablagerungen verhindern ein ausreichendes Ankoppeln an den Sichtbeton. Bei Messungen mit Ultraschall waren eindeutige Messungen daher an vielen Stellen nicht möglich. Abb. 56 zeigt exemplarisch eine Ultraschallmessung an der Nordwand des Rohstoffbunkers. Ein eindeutiges Rückwandecho ohne weitere interne Echos war in keinem der B-Bilder gemessen worden. Das grün umrahmte B-Bild in Abb. 56, Rechts zeigt eine im Rahmen der Messkampagne typische Ultraschallmessung. Das rot umrahmten B-Bild (Abb. 56, Rechts) wurde im behutsam Instandgesetzten Bereich aufgenommen. Es ist ein Rückwandecho bei 20 cm Tiefe darstellbar. Allerdings war es innerhalb des Linienscans die einzige Einzelmessung, in der das Rückwandecho detektiert wurde. Im Rahmen der Untersuchungen wurden noch zwei weitere Flächenmessungen durchgeführt. Deren Ergebnisse lassen, ähnlich wie die des Linienscans, keine eindeutige Interpretation des inneren Aufbaus zu.

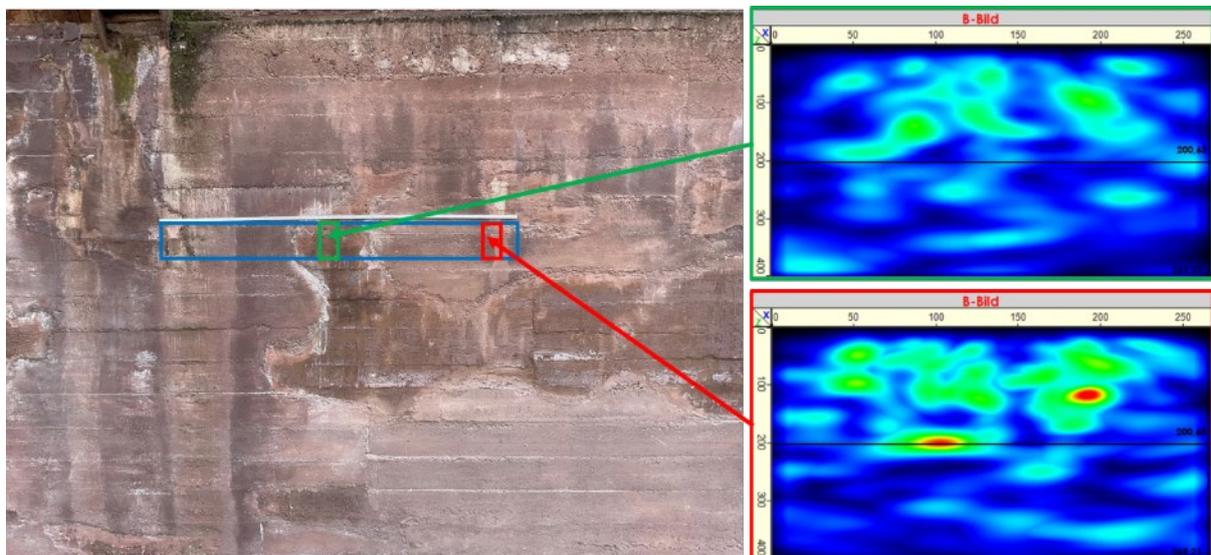


Abb. 56: Links: Nordseite des Rohstoffbunkers. Der blaue Rahmen markiert die Position des über 2 m aufgenommenen Linienscans. Rechts: Detailaufnahmen (B-Bilder) der einzelnen Messstellen.

Ähnlich verhielt es sich mit den Untersuchungen mittels Impakt-Echo-Verfahren. Die unzureichende Ankoppelung an den Untergrund verhinderte zuverlässige Messungen. Bei

einem weiterführenden Monitoring müsste daher vorab eine großflächige Reinigung der Oberfläche erfolgen um für Ultraschall und Impakt-Echo geeignete Bedingungen zu schaffen.

Kohlenturm – konventionelle Instandsetzung

Die Bewehrungskorrosion an der Nord-, West-, und Südfassade war augenscheinlich derart fortgeschritten, sodass es bereits zu z.T. großflächigen Abplatzungen des 2007/2008 aufgetragenen Instandsetzungssystems kam. Zum Zeitpunkt der Untersuchung konnte eine massive Rissbildung dokumentiert werden. Die Untersuchungen beschränkten sich daher auf eine Sichtprüfung inkl. Klopftests. Messungen mit Ultraschall, Impakt-Echo oder der Wenner-Sonde ließ angesichts der fortgeschrittenen Schädigung der konventionell instandgesetzten Flächen keinen weiteren Erkenntnisgewinn erwarten.

8.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Der Zustand des Rohstoffbunkers wird als gut bewertet. Die Reparaturen sind optisch und technisch gut an den Bestand angepasst und weisen in den untersuchten Teilbereichen keine Schäden auf. Am Bestandsbeton treten hingegen einige Schäden, insbesondere etliche Rissbildungen auf.

Die konventionelle Instandsetzung am Kohlenbunker ist als weniger gelungen zu bezeichnen. Der Neuschaden ist nach einer Standzeit von nur 14 Jahren massiv. Da aufgrund der augenfälligen Schädigung keine eingehende Untersuchung des Objektes stattfand, konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen kein Nachweis über die Schadensursachen geführt werden.

9 Kultur- und Kongresszentrum Liederhalle (Stuttgart)

9.1 Objektbeschreibung, zeitliche und methodische Einordnung der Instandsetzung

Die in den Jahren 1954 bis 1956 erbaute Liederhalle gilt als eine der bedeutendsten Kulturbauten der Nachkriegszeit. Entworfen wurde das Konzerthaus von den Architekten Rolf Gutbrod und Adolf Abel. Errichtet wurde die Liederhalle in Stahlbeton, teilweise in Sichtbeton, verklindert und mit Naturstein verkleidet. Die Voruntersuchung des Bauwerks sowie die Entwicklung der Zustandsbewertung und des Instandsetzungskonzeptes erfolgte im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 315 „Erhaltung historischer Bauwerke“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter Federführung der TU Karlsruhe. Die Umsetzung der Maßnahme gilt als Ausgangspunkt für die Methode der behutsamen Betoninstandsetzung.

Im Unterschied zu manch einer restauratorischen Instandsetzungsmaßnahme steht hier die ingenieurwissenschaftliche Betrachtung des Bauwerks im Vordergrund. Auf Basis der Ergebnisse gründlicher Voruntersuchungen wurden die Schadenspotentiale der verschiedenen Risikofaktoren ermittelt. Schließlich wurde für jedes Bauteil das künftige Schädigungsrisiko abgewogen [8]. Mit der von 1991 bis 1993 durchgeführten behutsamen Instandsetzung wurde erstmals das Konzept der partiellen Reparatur auf solch einer wissenschaftlichen Grundlage umgesetzt. Die Schadstellen wurden in Anlehnung an Steinmetztechniken in Art rechteckiger Vierungen ausgearbeitet und mit physikalisch an den Bestandsbeton angepassten Reparaturbetonen geschlossen [9]. Dabei wurden denkmalpflegerisch wichtige Merkmale, wie die Farbigkeit des Reparaturbetons und die für viele Sichtbetonbauwerke charakteristische Schalbrettstruktur, nachgestellt [48]. Zudem konnten weite Bereiche der originalen Oberfläche betonsichtig erhalten werden. Abb. 57 zeigt die behutsam instandgesetzte, gekrümmte Fassade des Beethovensaals.

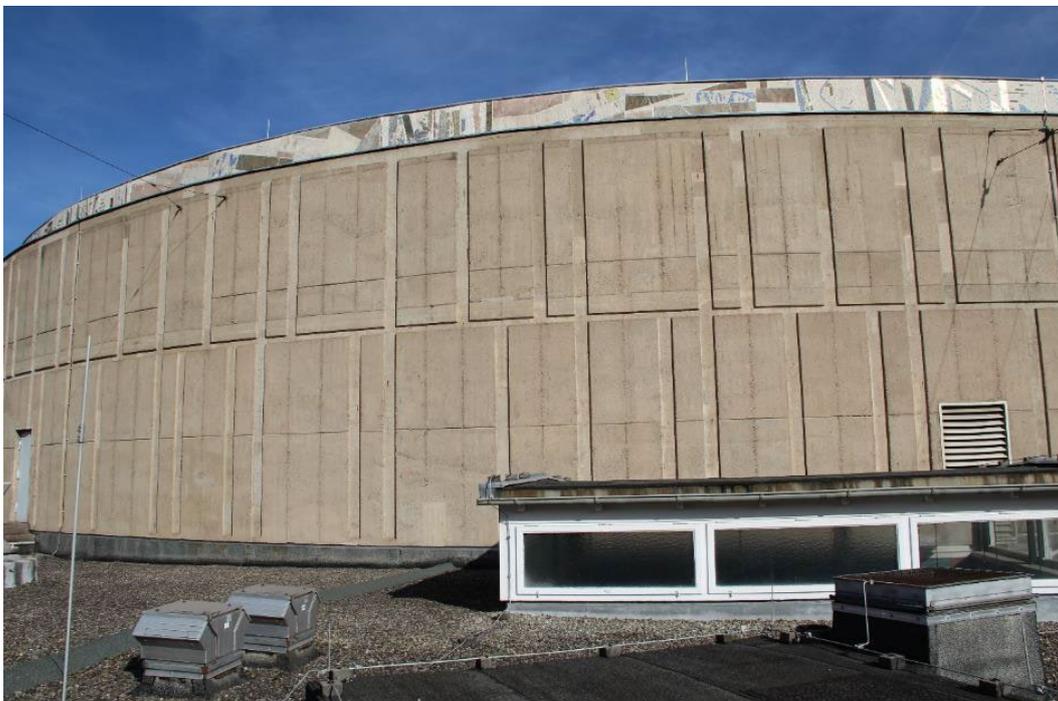


Abb. 57: Blick auf einen Ausschnitt der hufeisenförmig gekrümmten Außenwand des Beethovensaals mit charakteristischer Felderung und leicht aufgehellten Instandsetzungsstellen.

9.2 Ergebnisse und Diskussion

9.2.1 Sichtprüfung

An den Instandsetzungsbetonen wurden nur sehr wenige, kleine Schäden festgestellt, z.B. die Bildung von Kakeleerissen an der Oberfläche oder - sehr selten - beginnende Flankenablösungen oder kleine Abplatzungen (Abb. 58).



Abb. 58: Links: Kakeleerisse im Reparaturbeton, Rechts: kleine Abplatzung in Bestands- und Reparaturbeton

Wie aus Abb. 59 und Abb. 60 ersichtlich haben sich am bauzeitlichen Bestandsbeton ebenfalls wenige kleinteilige Schäden entwickelt



Abb. 59: Oben (Überblickfoto): Fehlstelle im Bestandsbeton über dem Dachanschluss. Unten (Detailfoto): Die Ablösung infolge Bewehrungskorrosion ist bereits weiter nach rechts fortgeschritten. Die am rechten Bildrand anschließende hellere Reparaturstelle ist jedoch intakt.

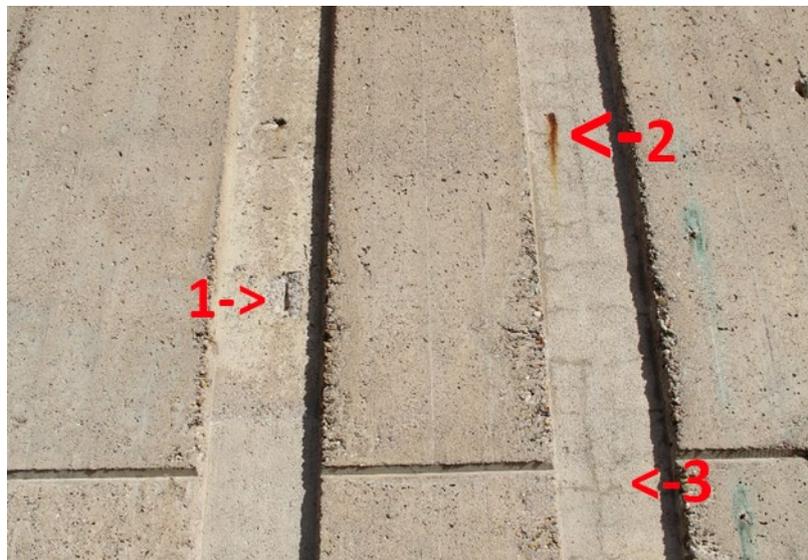


Abb. 60: In den Vertiefungen finden sich geringfügige Schäden am Bestandsbeton: (1) Betonabplatzung über Bewehrung, (2) Rostfahne am Durchstoßpunkt eines freien Endes eines Bewehrungskorbs. Das Risskrakelee in der Bindemittelhaut (3) scheint stabil zu sein, es hat nicht zu Abplatzungen geführt.

9.2.2 Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen

An der Liederhalle kamen die zerstörungsfreien Prüfmethoden Thermografie, Ultraschalltomographie, Radar und Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde zum Einsatz. Wärmebildaufnahmen (Übersicht,- und Detailbilder) wurden entlang der gesamten Südostfassade des Beethovensaals erstellt. Zusätzlich erfolgten repräsentative Messungen mittels Ultraschalltomographie und Wenner-Sonde (Position der Messstellen siehe Abb. 61). Abb. 62 zeigt die Lage der mit Radar untersuchten Bereiche.

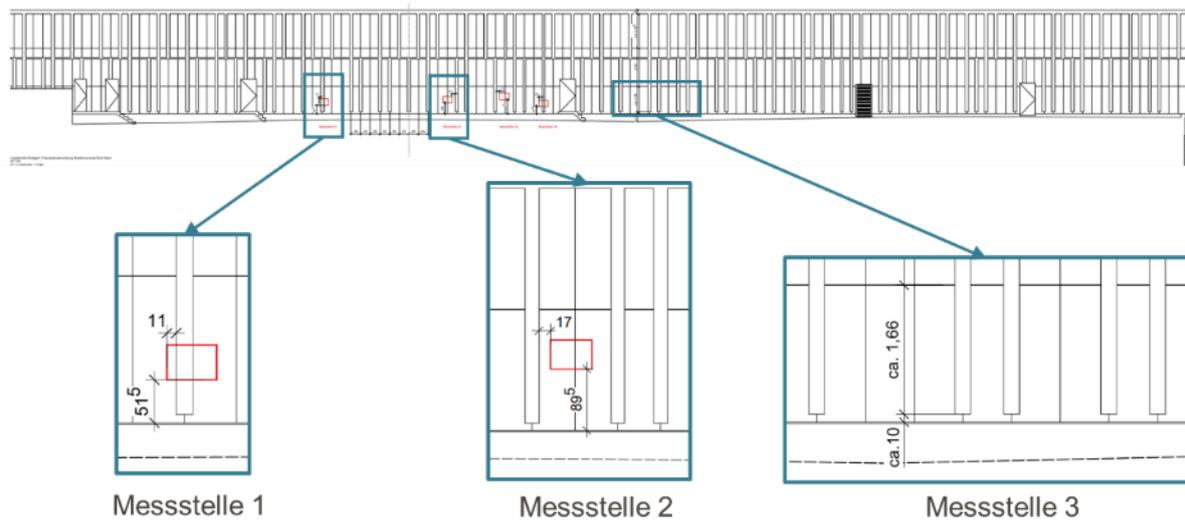


Abb. 61: Übersichtsplan der Fassade des BeethovensaaIs. An den eingezeichneten Messstellen wurden Messungen mit Ultraschall und Wenner-Sonde durchgeführt.

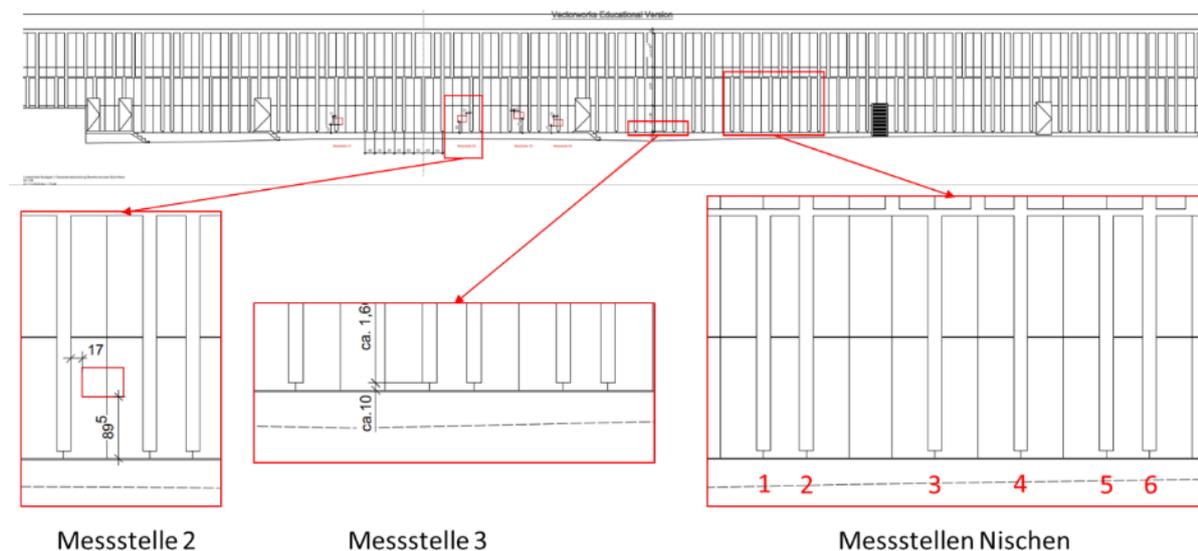


Abb. 62: Übersichtsplan der Fassade des BeethovensaaIs. An den eingezeichneten Messstellen wurden Radar-Messungen durchgeführt.

An den Messstellen 1 wurden 4 Linienscans mit dem Ultraschallgerät durchgeführt. Die Auswertung der Daten ist in Abb. 63 dargestellt. Der bauzeitliche Sichtbeton und der Instandsetzungsbereich rechts der Nische sind weitgehend schadfrei. Entlang der Nische wurden 3 Teilabschnitte behutsam instandgesetzt.

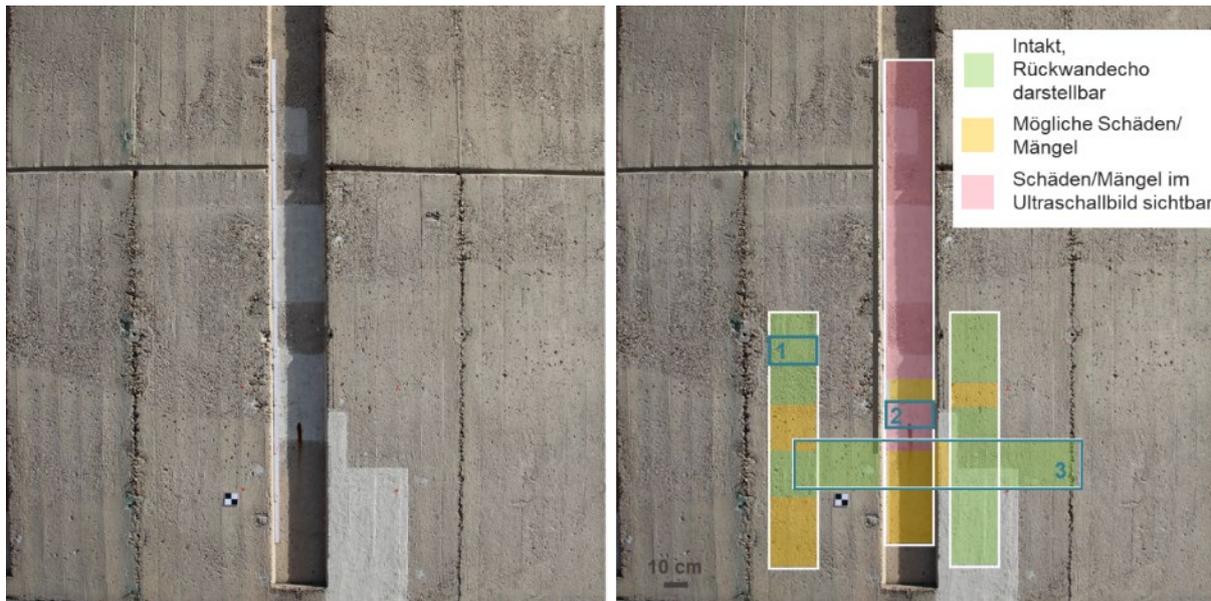


Abb. 63: Links: Foto der Messstelle 1. Rechts: Auswertung der Ultraschallmessungen projiziert auf die Sichtbetonfassade. Die Bereiche 1 – 3 kennzeichnen die Positionen der in Abb. 64 gezeigten B-Bilder.

Die Ergebnisse der Ultraschallmessungen (siehe Abb.) deuten darauf hin, dass alle drei Instandsetzungen, sowie der umgebende bauzeitliche Beton eine Verbundlockerung bzw. eine beginnende Abplatzung aufweisen. Auf Höhe der untersten Instandsetzungsfläche ist zudem eine Rostfahne ersichtlich, was zumindest auf eine lokale Bewehrungskorrosion hindeutet.

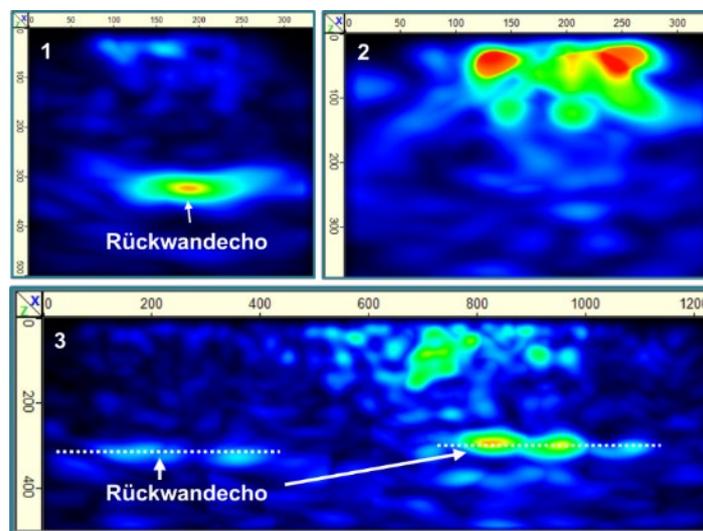


Abb. 64: B-Bilder aus der in Abb. 63 gezeigten Auswertung der Ultraschallmessungen. 1: Bereich intakt (Rückwandecho darstellbar); 2: oberflächennahe interne Schäden bzw. Verbundlockerung; 3: Rückwandecho teilweise darstellbar.

Die in Abb. 65 dargestellten Ergebnisse der Widerstandsmessungen ergaben für die unterste Instandsetzung hingegen nur ein mittleres Korrosionsrisiko.

Die beiden Instandsetzungen, sowie der umgebende bauzeitliche Beton weisen vergleichsweise hohe elektr. Widerstände auf (siehe Abb. 65), was auf ein hohes Korrosionsrisiko hindeutet. Die erhöhten Widerstände im Bereich der Instandsetzungen könnte zudem auf eine beginnende Verbundlockerung zurückzuführen sein, was den Ergebnissen der Ultraschallmessung entsprechen würde (vgl. Abb. 63). Die Untersuchungen mit Ultraschall

ergaben für das unterste Viertel der Nische keine eindeutigen Messwerte. Die Ergebnisse der Wenner-Sondenmessung deuten hingegen aufgrund der niedrigen elektr. Widerstände auf einen intakten Abschnitt mit niedrigem Korrosionsrisiko hin.

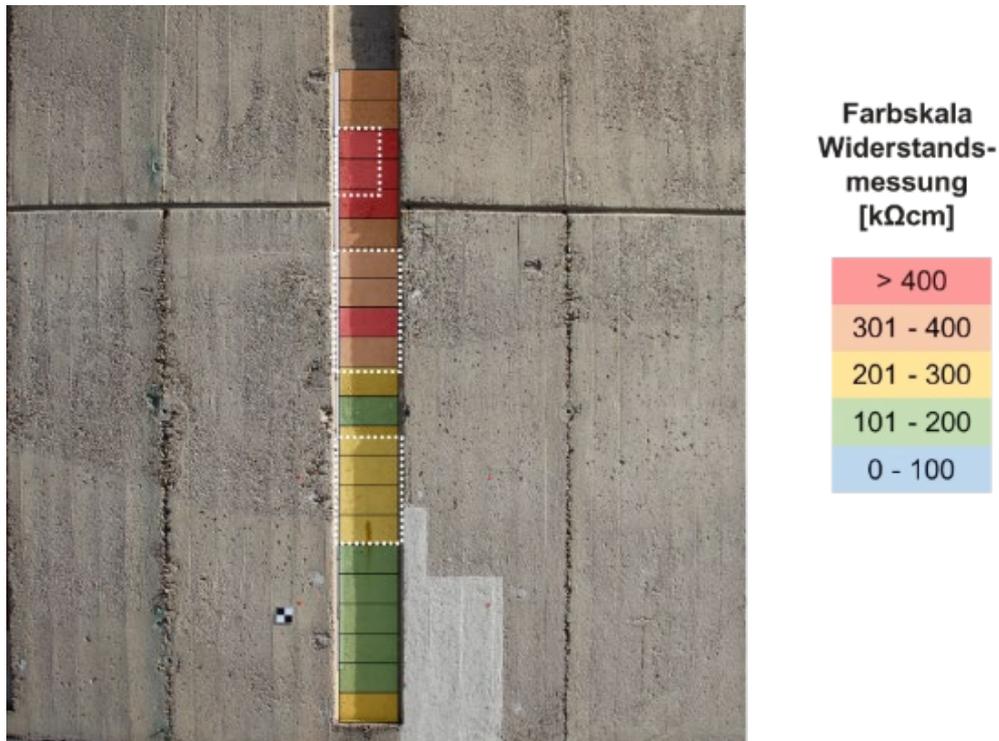


Abb. 65: Ergebnisse der Widerstandsmessung (Wenner-Sonde) an Messstelle 1. Die Instandsetzungsflächen sind weiß umrahmt.

Die Untersuchungsergebnisse an der Messstelle 2 sind in Abb. 66 (Ultraschalltomographie) und Abb. 67 (Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde) dargestellt. Die Flächenmessung mit Ultraschall ergab eine weitgehend intakte Instandsetzung. Verdeutlicht wird das durch ein klares Rückwandecho im B-Bild. Die Reflexionen bei etwa 3 cm Tiefe sind auf den Materialwechsel von Instandsetzungsmaterial zu bauzeitlichen Beton zurück zu führen (siehe unteres B-Bild in Abb. 66). Im bauzeitliche Sichtbeton des untersuchten Areals gab es ebenfalls keine Anzeichen auf interne Schäden oder Mängel. Lediglich im Bereich der oberen Kante der Instandsetzung ist das Rückwandecho nicht eindeutig darstellbar. Zudem ist der Materialwechsel von Instandsetzungsmörtel zu Beton stark ausgeprägt, was auf einen Abriss (Verbundlockerung) des obersten Bereichs der Instandsetzung hindeuten kann.

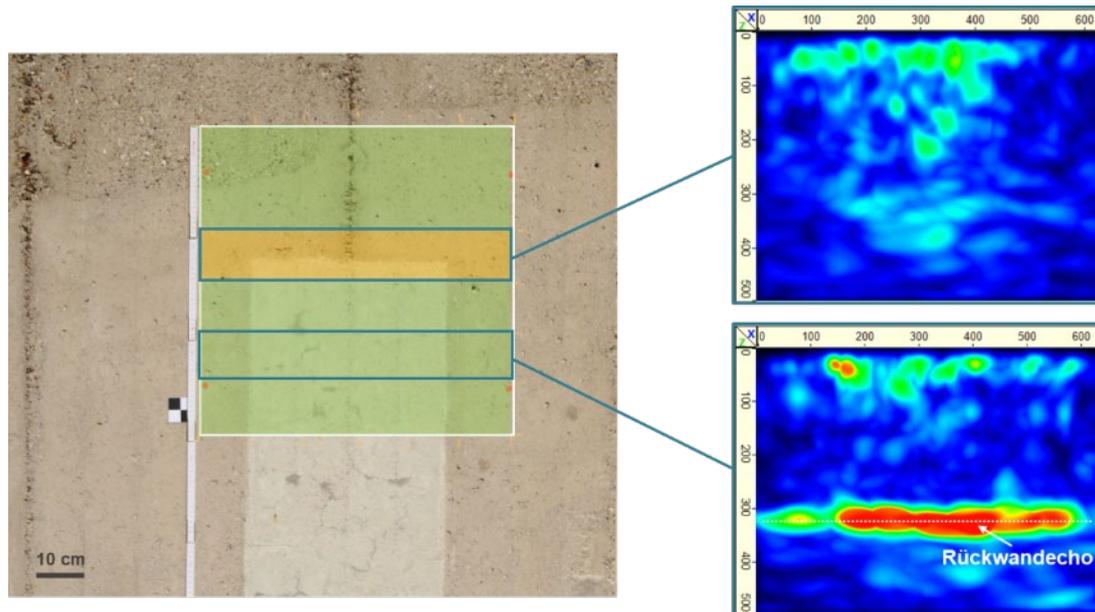


Abb. 66: Auswertung der Ultraschallmessung an Messstelle 2

Gestützt werden diese Ergebnisse durch die Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde. Wie aus Abb. 67 ersichtlich wurden an der oberen Kante der Instandsetzung vergleichsweise hohe Widerstände gemessen, was durch eine beginnende mangelnde Untergrundanbindung des Instandsetzungsmaterials hervorgerufen werden könnte. Insgesamt kann die Instandsetzung der Messstelle 2 noch als intakt angesehen werden. Bei einem weiterführenden Monitoring wäre es jedoch empfehlenswert, die Instandsetzungsfläche dahingehend zu prüfen, ob sich an der oberen Kante eine ausgeprägte Verbundlockerung entwickelt.

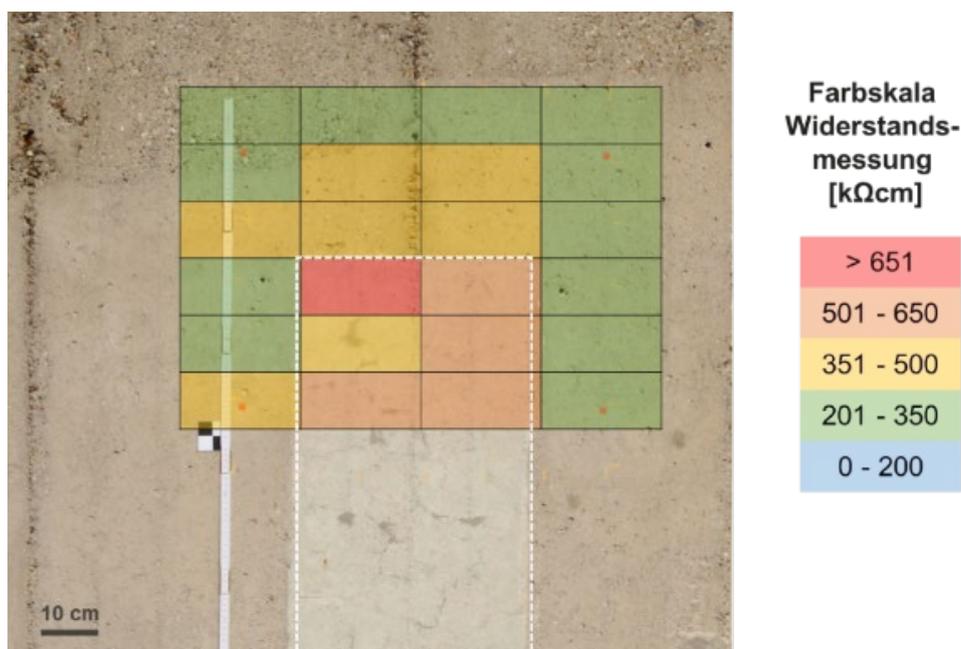


Abb. 67: Ergebnisse der Messung des elektr. Widerstandes (Wenner-Sonde) an Messstelle 2

Abb. 68 zeigt auf der linken Seite die Wärmebildaufnahme der Messstelle 3. Zu sehen sind zwei Abplatzungen der unteren Kante im bauzeitlichen Sichtbeton durch fortschreitende Bewehrungskorrosion.

Eine Wärmeanomalie in der linken Nische oberhalb der Instandsetzung deutet auf eine weitere beginnende Abplatzung im bauzeitlichen Beton hin. Bemerkenswert sind zudem die im IR-Bild ersichtlichen geringen Temperaturen aufgrund der helleren Farbgebung des Instandsetzungsmaterials, im Vergleich zum bauzeitlichen Sichtbeton. Da sich allerdings innerhalb der Instandsetzungsflächen im Wärmebild keine Bereiche mit deutlich höheren Temperaturen zeigen, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Instandsetzung in einem guten Zustand befinden. Bestätigt werden die Ergebnisse der Thermographie durch die Ultraschallmessungen, anhand derer ebenfalls die Abplatzungen im bauzeitlichen Sichtbeton an der unteren Kante nachgewiesen werden konnten. Exemplarisch durchgeführte vertikale Linienmessungen im bauzeitlichen Beton deuten darauf hin, dass sich die Abplatzung bislang nicht in den Bereich oberhalb der Abplatzung fortgepflanzt hat (siehe Abb. 68 rechts).

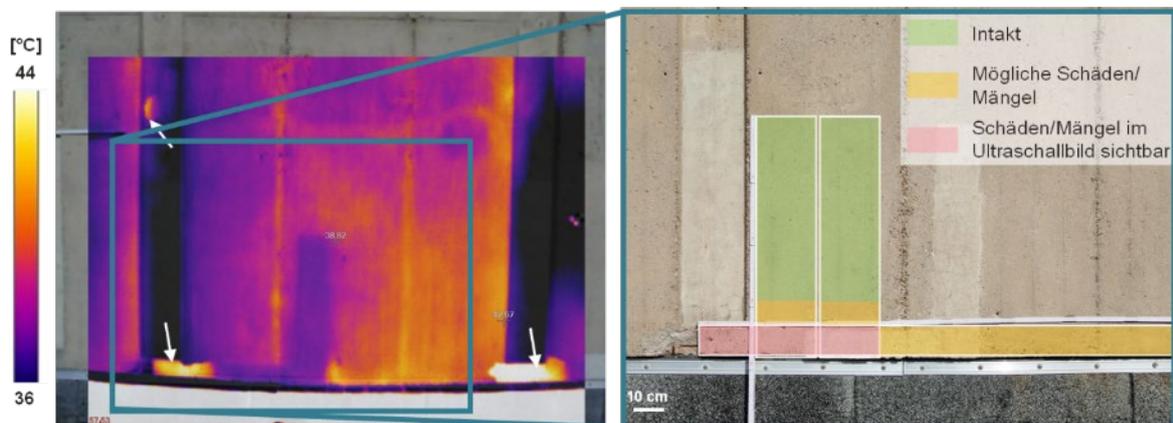


Abb. 68: Links: IR-Bild der Messstelle 3. Rechts: Auswertung der Ultraschallmessungen projiziert auf die Sichtbetonfassade

Die Ergebnisse der Thermographie- und Radarmessungen der Messstelle „Nischen“ sind in Abb. 69 A) und B) dargestellt. Die Messergebnisse deuten darauf hin, dass im Bereich der Instandsetzung eine gute Untergrundanbindung gegeben ist. Im bauzeitlichen Beton konnten hingegen 4 kleinere Abplatzungen lokalisiert werden. Die Radarmessungen ergaben variierende Betonüberdeckungen von ca. 0,7 cm bis 4 cm. Die Abplatzungen befinden sich überwiegend in Bereichen mit geringer Betondeckung (siehe Abb. 69 C)).

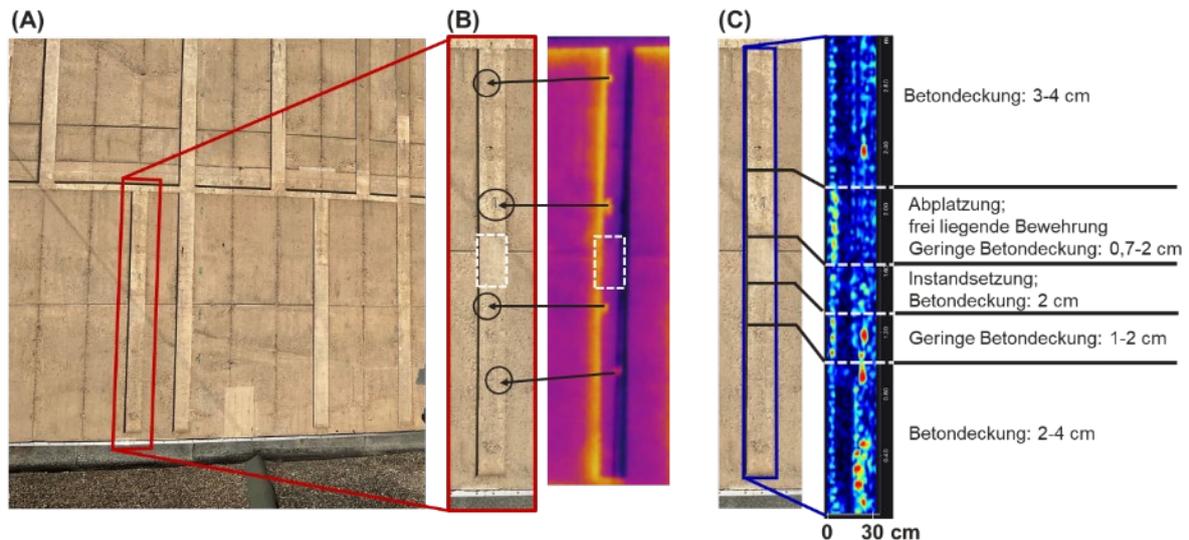


Abb. 69: A) Übersichtsbild der Messstelle „Nischen“. B) Wärmebildaufnahme eines Detailbereichs. Die instandgesetzte Fläche ist weiß umrahmt. C) Ergebnisse der Radarmessung.

9.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Die behutsame Instandsetzung wurde vor etwa 30 Jahren (1991 bis 1993) ausgeführt und gehört damit zu ältesten dokumentierten Beispielen einer lokalen, denkmalgerechten Instandsetzung von Sichtbeton. Gemessen an der Standzeit befinden sich die Instandsetzungsflächen in einem guten Zustand. Vereinzelt ergaben die Messwerte den Verdacht auf eine Verbundlockerung (insbesondere im oberen Viertel) der Instandsetzungen. Die fraglichen Bereiche sollten im Rahmen eines weiterführenden Monitorings beobachtet werden. Der bauzeitliche Sichtbeton weist stellenweise Kantenabbrüche (Abplatzungen an unterer Kante) und vereinzelt Abplatzungen mit offenliegender korrodierteter Bewehrung auf. Die dokumentierten Schäden befinden sich mit Hinblick auf die lange Standzeit jedoch in einem sehr geringen Rahmen.

10 Stadthalle (Lahnstein)

10.1 Objektbeschreibung und Instandsetzungsmaßnahmen

Die in den Anfang der 1970er Jahre erbaute Stadthalle wurde vom Wiesbadener Architekturbüro Planungsring entworfen, unter der künstlerischen Leitung des Stuttgarter Künstlers Otto Herbert Hajek. Gelegen ist der Baukörper in mitten des historischen Salhofplatzes mit mittelalterlichen Gebäudeteilen. Zu diesem Platz hin erstreckt sich die 50 m lange Fassade der Stadthalle, die ein farbig gestaltetes Betonrelief von Otto Hajek ziert, welches 2/3 der Fassade einnimmt. Es ist eingebettet in den polygonalen Baukörper aus Stahlbeton (siehe Abb. 70)



Abb. 70: Stadthalle in Lahnstein

Als Bindemittel für den Stahlbeton kam Dyckerhoff-Weiss zur Anwendung. Die Fassaden wurden teils in Fertigteilbauweise, teils als Ortbeton hergestellt.

Das Objekt wurde im Jahr 2018 umfangreich saniert, wobei besonderer Wert auf die Erhaltung der bauzeitlichen Betonoberfläche und deren Gestaltung gelegt wurde. Das Instandsetzungskonzept beinhaltet die lokale Ausbesserung der Schäden, um die größtmögliche Fläche als originalen Sichtbeton zu erhalten (behutsame Instandsetzung). Die Voruntersuchungen wurden im Rahmen des Projektes 33968/01 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Die Instandsetzungsplanung erfolgte durch SMP Ingenieure im Bauwesen GmbH und Architekt Baumstark, beide Karlsruhe. Die Ergebnisse der Voruntersuchung sowie Berichte über die Instandsetzung wurden in IFS-Bericht 56 [49] publiziert. Es wurde festgestellt, dass je nach Bauteil lediglich zwischen 0,1 und 1,2 der Betonflächen durch Abplatzungen und Hohlstellen geschädigt waren [10]. Diese wurden behutsam in einer großen Zahl kleiner Reparaturstellen instandgesetzt.

10.2 Ergebnisse und Diskussion

10.2.1 Sichtprüfung und Schadenskartierung

Vom Bauherrn wurde der Projektgruppe der Zugang zu einer Teilfläche auf dem Dach der Stadthalle gewährt, der vom Boden aus nicht einsehbar ist. Die Fläche besteht aus Fertigteilen, an denen zu Beginn der Instandsetzungsarbeiten die Arbeitsproben angelegt wurden. Deshalb zeichnen sich die kleinen Instandsetzungsflächen durch unterschiedliche Farbtöne und unterschiedliche Oberflächenbearbeitung teils deutlich, teils kaum erkennbar vom Bestand ab (siehe Abb.).



Abb. 71: Teil des Untersuchungsbereichs auf dem Dach der Stadthalle

Bei Betrachtung der vom Boden einsehbaren Fassaden ist zu konstatieren, dass die meist kleinen Reparaturstellen zum größten Teil optisch sehr gut an den Altbestand angepasst und i.d.R. mit bloßem Auge nicht oder nur bei speziellen Lichtverhältnissen erkennbar sind. Insgesamt befand sich das Bauwerk zum Zeitpunkt der Inspektion (2020) in einem sehr guten Zustand. Bei der Untersuchungsfläche auf dem Dach zeigen sich an einigen Stellen kleinere Risse und an den nicht instandgesetzten Flächen einige Fehlstellen, die sich vermutlich nach der Instandsetzungsmaßnahme gebildet haben.

10.2.2 Zerstörungsfreie Nachuntersuchung der Instandsetzungsflächen

Die an der Südostfassade, im Dachbereich der Stadthalle durchgeführten Untersuchungen umfassten Thermographie, Ultraschallmessungen, Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde, Radarmessungen und die Wassereindringprüfung nach Karsten. Nachdem die Fassadenfläche mittels Wärmebildaufnahmen erfasst wurden, sind zwei Plattenelemente stichprobenartig für weitere Untersuchungen ausgewählt worden. Der strichlierte Rahmen in Abb. 72 umfasst eine der detailliert untersuchten Platten. Die im Wärmebild vorhandenen Temperaturabweichungen (grüne Kreise in Abb. 72) deuten auf beginnende Abplatzungen im bauzeitlichen Sichtbeton hin.

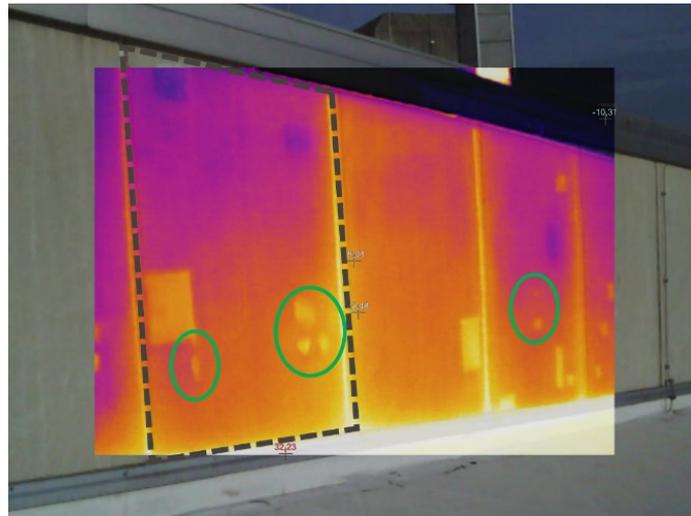


Abb. 72: IR-Bild der Betonplatten im Fassadenabschnitt der Südostseite. Beginnende Betonabplatzungen sind grün markiert. Die strichlierte Linie umfasst den in Abb. und Abb. gezeigten Untersuchungsbereich.

Die Untersuchungsergebnisse aus den Ultraschallmessungen (Abb. und Abb.) bestätigen die aus den IR-Bildern ersichtlichen Schäden. Die Auswertung des horizontalen Linienscans ist in Abb. dargestellt. Während das Rückwandecho im intakten Bereich klar detektiert werden konnte (grün hinterlegter Bereich) zeichnen sich die schadhaften Abschnitte durch ein Fehlen jeglicher Echos aus. Die Abplatzungen liegen im „blinden Bereich“ der Messung und können daher nicht direkt abgebildet werden. Die Schäden im bauzeitlichen Sichtbeton sind teilweise bereits mit bloßem Auge zu erkennen. (siehe Fotos in Abb.).

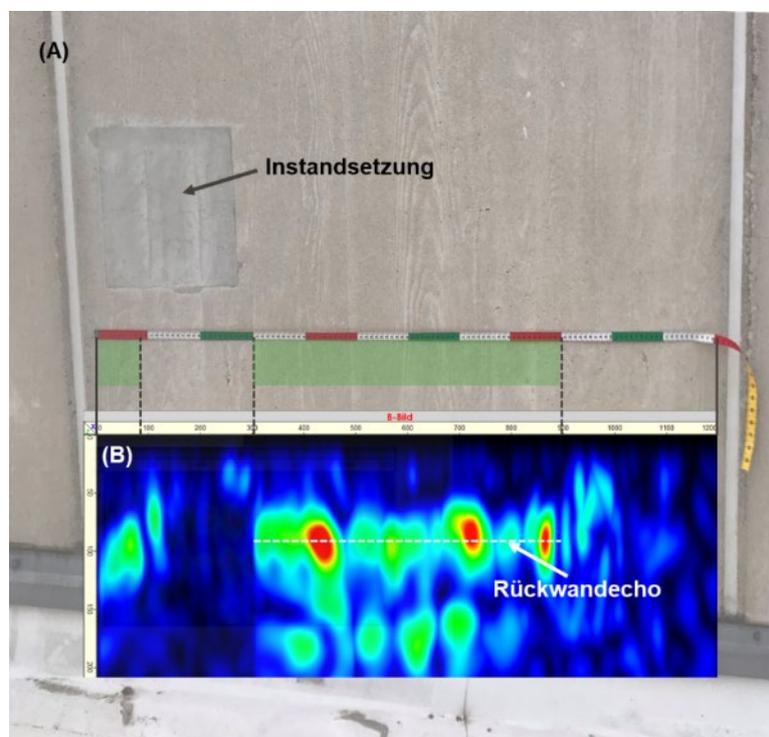


Abb. 73: A) Bild eines Sichtbetonelements an der Südost-Fassade. Die Auswertung der Ultraschallmessung ist auf das Bild projiziert. Grün hinterlegter Bereich: intakter Beton. B) B-Bild über die Länge des Linienscans

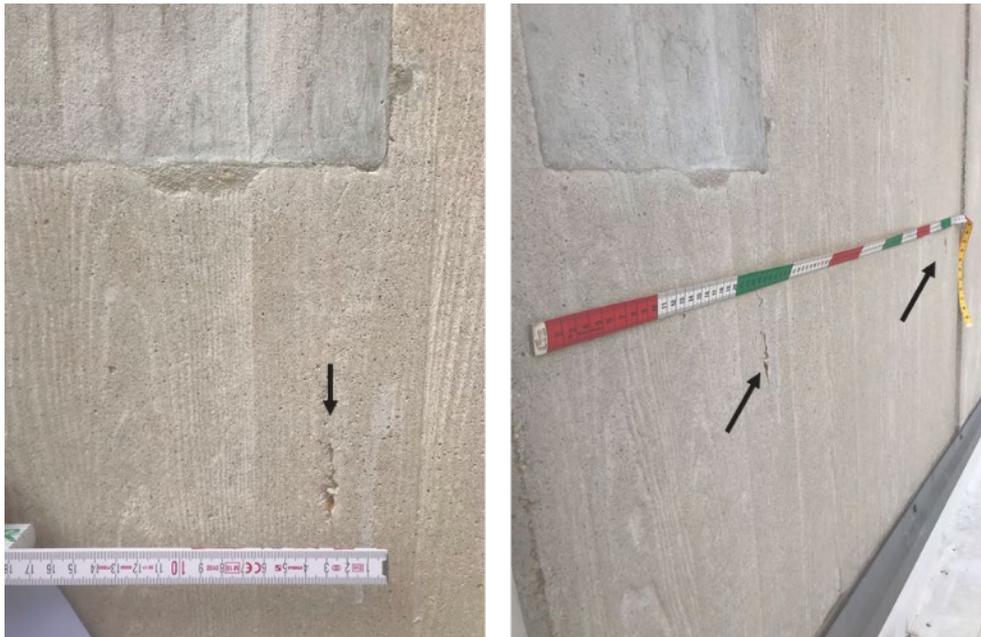


Abb. 74: Abplatzungen im bauzeitlichen Sichtbeton

Um festzustellen, ob die beginnende Abplatzung im linken Bereich der Platte bis unter die behutsame Instandsetzung reicht, wurde ein vertikaler Linienscan durchgeführt. Die Lage des Linienscans und die Auswertung der Messung sind in Abb. dargestellt. Der bauzeitliche Sichtbeton oberhalb der Instandsetzung und die oberen zwei Drittel des instandgesetzten Bereichs weisen keine internen Schädigungen auf (exemplarisch dargestellt im B-Bild Abb. 75 B). Ab dem unteren Viertel der Instandsetzung war kein Rückwandecho mehr darstellbar (siehe B-Bilder in Abb. 75 C) und D)), was darauf hindeutet, dass sich die Abplatzung bereits bis unter die Instandsetzungsfläche fortpflanzt.

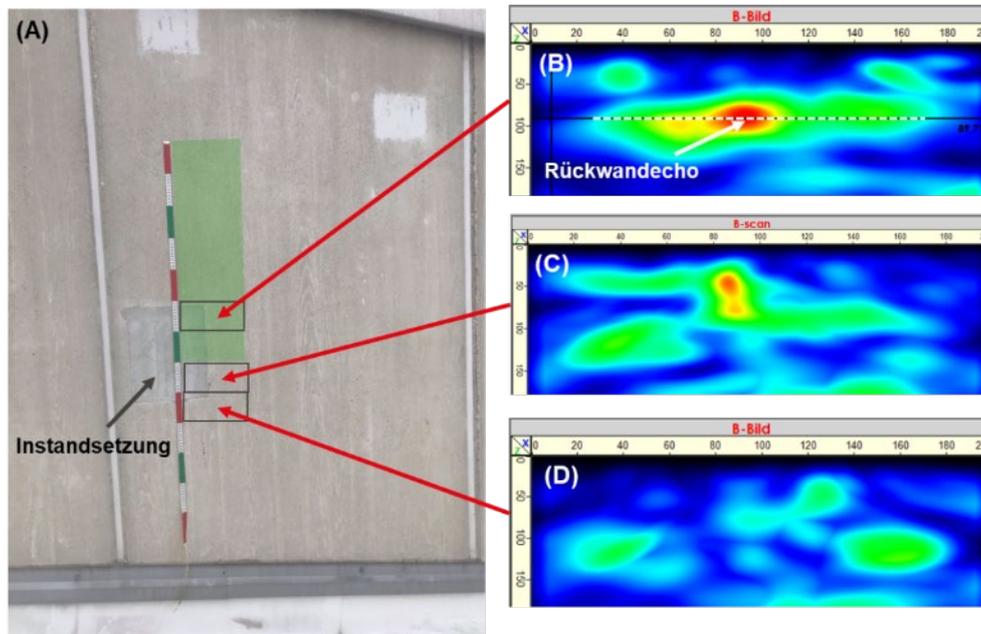


Abb. 75: A): Auswertung des vertikalen Linienscans mit Ultraschall projiziert auf die Sichtbetonoberfläche. B) bis D): Einzelmessungen (B-Bilder) aus dem durchgeführten Linienscan

Die herrschenden Bedingungen zur Zeit der Untersuchungen beeinflussten die ergänzend durchgeführte Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde derart, dass die Ergebnisse nicht als zuverlässig erachtet werden. Auf die Darstellung der Ergebnisse der Wenner-Sonden-Messung wird deshalb verzichtet. Die geringe Dicke der Sichtbetonplatte von 8,5 cm und die windigen Bedingungen, gemeinsam mit der starken Sonneneinstrahlung, führten dazu, dass der Sichtbeton zu trocken für Messungen war. Zudem trocknete der Beton nach einem aktiven Bewässern der Oberfläche derart schnell, dass es nicht möglich war gleichbleibende Feuchtebedingungen für vergleichbare Widerstandsmessungen herzustellen.

10.3 Zustandsbewertung Bauwerk

Die Instandsetzungsmaßnahmen an der Hauptfassade (Nordwestfassade) der Stadthalle Lahnstein sind in einem guten bis sehr guten optischen Zustand. Die Instandsetzungsflächen konnten aufgrund fehlender Zugänglichkeit meist nicht direkt untersucht, sondern nur visuell begutachtet werden. Mit bloßem Auge sind die instandgesetzten Flächen jedoch kaum zu erkennen und passen sich gut in den bauzeitlichen Sichtbeton ein. Untersuchungen mittels Thermografie brachten ebenfalls keine schadhafte Stellen zum Vorschein. Die Instandsetzungen im untersuchten Abschnitt der Südostfassade im Dachbereich zeichnen sich demgegenüber farblich deutlich vom Bestandsbeton ab. Anzumerken ist hier allerdings, dass es sich bei den Instandsetzungen an dieser Fassade teilweise um Musterflächen handelt. Übersichtsbilder mit der Wärmebildkamera konnten kaum schadhafte Instandsetzungen nachweisen. Exemplarisch durchgeführte Messungen mit Ultraschall zeigten geringfügige Verbundlockerungen die bei einem nachfolgenden Monitoring beobachtet werden sollten. Im bauzeitlichen Sichtbeton ist es vereinzelt zu neuen Abplatzungen von noch geringem Ausmaß gekommen.

11 Eignung und Einschränkungen der zerstörungsfreien Prüfmethode für ein Monitoring von Instandsetzungsmaßnahmen

Methoden der zerstörungsfreien Prüfung von Bauwerken haben sich in den letzten Jahrzehnten ständig weiterentwickelt und ermöglichen immer genauere Einblicke in den inneren Aufbau eines Bauteils bzw. eine zuverlässigere Ortung von Schäden und Mängeln. Insbesondere die bildgebenden Methoden Radar [12; 13], Ultraschalltomographie [14–16] und Thermografie [17; 18] haben sich dabei etabliert. Vielfach kommen bei der Zustandsbewertung von Bauwerken jedoch unter anderem auch die Widerstandsmessung nach Wenner [29–31] oder das Impakt-Echo Verfahren [34] zum Einsatz. Meist hat sich die Kombination aus mehreren zerstörungsfreien Prüfverfahren als sinnvoll erwiesen, da sich die Ergebnisse dieser Methoden zum Teil gegenseitig stützen oder ergänzen können [19–21]. Die im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass sich bei der Detektion von oberflächennahe Delaminationen die Thermografie bei geeigneten Randbedingungen sehr gut eignet. Wird die Sonneneinstrahlung als Wärmequelle genutzt ist es an manchen Bauwerken zudem möglich ganze Fassadenflächen aufzunehmen. Dieser Umstand kann hervorragend dazu genutzt werden, einfach und rasch mögliche schadhafte Bereiche zu identifizieren um diese ggf. genauer in Augenschein zu nehmen. So hilfreich die Thermografie bei der Bewertung von Instandsetzungsflächen ist, so unterliegt sie auch einigen Einschränkungen. Zu den wichtigsten Einflussfaktoren gehören eine geeignete Exposition der Fassade (kein Schattenwurf) und ein ausreichender Temperaturgradient. Die Thermografie kann daher nicht überall und zu jeder Zeit erfolgreich zum Einsatz gebracht werden. Wird eine ein Bauteil durch umliegende Gebäude oder nahestehende Vegetation (teilweise) verschattet oder an bewölkten Tagen ist eine aussagekräftige Messung meist nicht möglich. Zudem wird die im IR-Bild dargestellte Oberflächentemperatur von der Farbgebung des Materials beeinflusst. Behutsam instandgesetzte Flächen heben sich im Wärmebild teilweise allein durch die dunklere oder hellere Färbung vom umliegenden Sichtbeton ab. Ergänzend können hier Messungen mit dem Radarverfahren oder Ultraschalltomographie wertvolle Ergebnisse liefern. Diese Prüfmethode können allerdings meist erst ab einer Bauteiltiefe von 3 bis 10 cm sinnvolle Messergebnisse erzielen [22]. Die Untersuchungen zeigten, dass mit der Ultraschalltomographie jedoch auch sehr oberflächennah liegende Delaminationen (< 5 cm) zumindest indirekt, über ein Fehlen des Rückwandechos, nachgewiesen werden können. Die Messungen zeigten aber auch, dass die teilweise ausgeprägte Oberflächenstruktur (Brettschalstruktur oder steinmetzmäßige Oberflächenbehandlung) von denkmalgeschützten Sichtbetonbauwerken die Auswertung der Ultraschalldaten erheblich erschweren kann. Ein zu starkes Oberflächenrelief verhindert teilweise die erforderliche Ankopplung an den Untergrund was zu Signalrauschen in Form von vielfachen Reflexionen führt. Zudem kann es bei einem hohen Impedanzunterschied von Instandsetzungsmörtel zu bauzeitlichem Beton zu sich in der Tiefe wiederholenden Mehrfachreflexionen (Artefakte) kommen, die eine eindeutige Bestimmung des Rückwandechos erschweren. Ähnliche Herausforderungen bringt die Untersuchung mit dem Impakt-Echo mit sich. Ergänzende, aufschlussreiche Ergebnisse können an dieser Stelle Widerstandsmessungen mit der Wenner-Sonde liefern. In Kombination mit der genauen Ortung der Bewehrungslagen mittels Radars liefern die Untersuchungen des elektrischen Widerstandes bei geeigneten Randbedingungen weitere Hinweise auf oberflächennahe Delaminationen. Zudem können Rückschlüsse über die Güte der Hydrophobierung der Instandsetzung oder einem erneuten Potential der Bewehrungskorrosion gezogen werden. Die Ergebnisse der Wennersondenmessungen sind



jedoch stark abhängig von den lokalen Bedingungen (insbesondere Feuchtegehalt des Materials). An unterschiedlichen Fassaden gemessene Widerstände können daher meist nicht direkt in Bezug zueinander gesetzt werden. Ein Vergleich mehrerer Untersuchungsbereiche ist daher nur qualitativ möglich. Die Erkenntnisse aus den im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die gezielte Kombination mehrerer Methoden die zuverlässigsten Ergebnisse bringt. Die Grundlage aller Untersuchungen bildet hierbei jedoch eine gewissenhaft durchgeführte Sichtprüfung (inkl. Klopfest) und die Interpretation der Messdaten durch einen geschulten, erfahrenen Anwender. Die im Rahmen des Forschungsprojekts verwendeten Prüfmethode bieten jedoch vielfache Möglichkeiten bestehende und beginnende Schäden an Instandsetzungsmaßnahmen nachzuweisen, und können somit eine hilfreiche Ergänzung zur Schadenskartierung auf Grundlage der klassischen Sichtprüfung sein.

12 Einschätzung zur Dauerhaftigkeit der untersuchten Instandsetzungsmaßnahmen

Im Rahmen des Projektes wurde ein Monitoring von acht Instandsetzungsmaßnahmen mit Standzeiten zwischen 4 und 30 Jahren durchgeführt. Die Methodik orientierte sich am Vorgehen bei Natursteinbauten [50]. Die Untersuchungen wurden fast ausnahmslos mit zerstörungsfreien Prüfmethode (Sicht- und Klopfprüfung, Infrarotthermographie, Radar, Ultraschalltomographie, Widerstandsmessung mittels Wenner-Sonde, Impakt-Echo-Verfahren und im Einzelfall farbmischer Messung) durchgeführt. Nur an einem Bauwerk wurden zur Überprüfung und Kalibrierung von Messergebnissen mehrere Mikro-Bohrkerne entnommen. Die Bewertung des Zustands der untersuchten Bauwerke bzw. Bauteile beruht zum einen auf der visuellen Inspektion der Fassaden bzw. Außenwände vom Boden oder Zwischenebenen aus. In einigen Fällen konnten Hilfsmittel wie Hubsteiger oder Drohnenshots genutzt werden. Zum anderen fließen die Ergebnisse von Zustandskartierungen und zerstörungsfreien Prüfungen in die Bewertung ein. Voraussetzung für die Bewertung der Maßnahmen und ihres aktuellen Zustands waren aussagekräftige Dokumentationen, die von Denkmalbehörden und Fachplanern zur Verfügung gestellt wurden oder aus Publikationen entnommen wurden.

Einen Überblick über die Zustandsbewertung bzw. eine Zusammenfassung der Zustandsbewertung der einzelnen Bauwerke gibt Tab. 5.

Tab. 5: Zusammenfassende Zustandsbewertung der Instandsetzungsmaßnahmen

Objekt	Erbauung	Instandsetzung (Standzeit, Art)	Bewertung
Bingen-Büdesheim, Christuskirche	1962-63	8 Jahre, konventionell	Sehr gut keine neuen Schäden, aber zwei Stellen mit Anzeichen beginnender Delamination erkennbar
Kassel, Fatimakirche	1956-59	14 Jahre, behutsam	Gut bis sehr gut Instandsetzungsmörtel und Bestandsbeton setzen sich etwas voneinander ab; keine visuell erkennbaren Neuschäden in den instandgesetzten Bereichen; Schadensfortschritt aber an den noch nicht instandgesetzten Fassaden
Lahnstein, Stadthalle	1971-73	4 Jahre, behutsam	Gut bis sehr gut Hauptfassade: sehr gute farbliche Anpassung der Reparaturmörtel; Untersuchte Südostfassade: wenige Flankenabriss; wenige Schäden am instandgesetzten Beton, gelegentlich Neuschäden am unbehandelten Bestandsbeton
Saarbrücken, Neue Einsegnungshalle	1966	14 Jahre, behutsam	Mittel Sehr gute optische Anpassung der Reparaturmörtel; ca. 10% der Reparaturstellen erneut mangel- oder schadhafte; wenige Schäden am umgebenden Bestandsbeton; punktuelle Überarbeitung mittelfristig erstrebenswert
St. Ingbert, Beckerturm	1925-31	22 – 25 Jahre, behutsam	Gut (behutsame Instandsetzung), Mittel (Gesamtgebäude) wenige Risse im Instandsetzungsmörtel, aber noch keine Abplatzungen. Jedoch deutliche Schäden am Bestandsbeton und am Putz der früheren Instandsetzung (1950-52), daher mittelfristiger Handlungsbedarf
Stuttgart, Liederhalle (Beethovensaal)	1955-59	30 Jahre, behutsam	Gut Instandsetzungsmörtel mit gutem Verbund; zeichnen sich optisch deutlich vom Bestand ab; an wenigen Stellen neue Abplatzungen und Bewehrungskorrosion am Bestandsbeton
Völklinger Hütte, Kohlenbunker	1941	14 Jahre, konventionell	Schlecht zahlreiche Risse in Beschichtung und Beton; erneuter Instandsetzungsbedarf
Völklinger Hütte, Rohstoffbunker	1928	11 Jahre, behutsam	Gut Gute Anpassung der Reparaturen an Bestand; keine Schäden am instandgesetzten Beton; einige Neuschäden am Bestandsbeton

13 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse des Forschungsvorhaben wurden im Rahmen der nachfolgenden Fachvorträge und Veröffentlichungen vorgestellt.

Fachvorträge bei Veranstaltungen:

Steiner, S.; Auras, M.; Grillich, P.; Heese, C.: „Dauerhaftigkeit von Instandsetzungsmaßnahmen an Denkmälern aus Beton“

DREIKÖNIGSTREFFEN 2023 „Konventionelle und behutsame Instandsetzung denkmalgeschützter Sichtbetonflächen“; Hochschule RheinMain; 10.01.2023

Steiner, S.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring von Instandsetzungsmaßnahmen an Sichtbetonbauwerken der Nachkriegsmoderne - Untersuchungen an der neuen Einsegnungshalle – Hauptfriedhof Saarbrücken“

Forschungskolloquium „Eisenbeton – Sichtbeton – Betoninstandsetzung“ der Professur für Neuere Baudenkmalpflege; Prof. Dr. Putz (TUM) und des Instituts für Bau- und Materialforschung, Prof. Dr.-Ing. Dauberschmidt (HM); Technische Universität München / Alte Architekturbibliothek und On-line; 27.02.2023

Steiner, S.; Grillich, P.; Öztürk, T.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring von Sichtbetonbauwerken der Nachkriegsmoderne mit bildgebenden, zerstörungsfreien Prüfverfahren“

In: 8. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken - Beurteilung, Instandsetzung und Denkmalpflege von Bauwerken“; Technische Akademie Esslingen; 14.-15.02.2023

Steiner, S.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring früherer Instandsetzungsmaßnahmen an Denkmälern aus Stahlbeton“

In: Fachtagung „Betoninstandhaltung am Baudenkmal - Methoden, Materialien, Dauerhaftigkeit“; Landesdenkmalamt Saarland und Institut für Steinkonservierung e. V.; Sender Berus, Überherrn; 21.06. 2023 (geplant)

Fachveröffentlichungen:

Steiner, S.; Grillich, P.; Öztürk, T.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring von Sichtbetonbauwerken der Nachkriegsmoderne mit bildgebenden, zerstörungsfreien Prüfverfahren“

In: 8. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken - Beurteilung, Instandsetzung und Denkmalpflege von Bauwerken“, Esslingen 2023, Tagungsband (Raupach, M.; Schwamborn, B.; Wolff, L. (Hrsg.)), *expert verlag GmbH*, ISBN: 3816985564, S. 239-250,

Steiner, S.; Grillich, P.; Auras, M.; Heese, C.: „Monitoring früherer Instandsetzungsmaßnahmen an Denkmälern aus Stahlbeton“

Fachtagung „Betoninstandhaltung am Baudenkmal - Methoden, Materialien, Dauerhaftigkeit“; Landesdenkmalamt Saarland und Institut für Steinkonservierung e. V.; Sender Berus, Überherrn; 21.06. 2023 (geplant)

14 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass sich die verwendeten, im Wesentlichen zerstörungsfreien Mess- und Untersuchungsmethoden eignen, um den Zustand von behutsam und konventionell instandgesetzten Baudenkmalern aus Sichtbeton zu beurteilen. Für das Bauwerksmonitoring ist jedoch vorab eine individuelle Festlegung der zu verwendenden Methoden auf Basis der jeweiligen projektspezifischen Randbedingungen erforderlich.

Behutsame Instandsetzungen können lange Standzeiten erreichen und auch nicht behandelte Bereiche des bauzeitlichen Bestandsbetons können lange schadensfrei bleiben. Voraussetzung hierfür sind u.a.:

- eine sehr detaillierte fachkundige Zustandserfassung an allen Bauteilen inklusive der Einschätzungen des Korrosionsrisikos für die verbleibenden Bereiche des bauzeitlichen Bestandsbetons (siehe z.B.: [10; 51]). So kann entschieden werden, ob eine behutsame oder eine konventionelle Instandsetzung sinnvoll ist, und ob unterschiedliche Bauteile unter Umständen unterschiedlicher Bearbeitung bedürfen.
- eine detaillierte Fachplanung und engmaschige fachliche Begleitung der Ausführung [48; 52]
- eine auf den Bestandsbeton abgestimmte Auswahl der Instandsetzungsmaterialien und Arbeitsweisen mit einer handwerklich präzisen Durchführung der Maßnahmen.
- regelmäßiges Bauwerksmonitoring; an besonders exponierten Bauteilen und repräsentativen Teilbereichen konnte dies im vorgestellten Projekt durchgeführt werden. Visuelle Inspektionen und Klopfproben können insbesondere in der Anfangsphase in vielen Fällen ausreichen. Fallweise werden vertiefende Untersuchungen mit vorzugsweise zerstörungsfreien Methoden durch qualifizierte Fachleute benötigt. In schwer zugänglichen Bereichen können Drohnenaufnahmen unterstützen.

Darüber hinaus können im Sinne der Nachhaltigkeit in wesentlichem Umfang Ressourcen eingespart werden, wenn nur kleinere Anteile der Sichtbetonflächen überarbeitet werden müssen. Zudem bleibt das Erscheinungsbild der Baudenkmale bei der behutsamen Instandsetzung im Wesentlichen erhalten. Die Argumentation, dass die Dauerhaftigkeit einer behutsamen Instandsetzung aufgrund der lokal begrenzten Instandsetzungsmaßnahmen eingeschränkt ist, sehen die Autoren auf Basis der im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse (siehe Liederhalle in Stuttgart) als nicht bestätigt. Wie eines der beiden erfassten konventionell instandgesetzten Fallbeispiele zeigt (siehe Kohleturm, Völklinger Hütte), können auch hier nach vergleichsweise kurzen Standzeiten Folgeschäden auftreten.

Die Ergebnisse des vorgestellten Projekts verdeutlichen, dass bei einer gewissenhaften Planung und fachkundigen Ausführung der Instandsetzungsmaßnahmen lange Standzeiten gewährleistet werden können. Um die denkmalgeschützte Bausubstanz bestmöglich zu erhalten bleibt eine kontinuierliche Zustandskontrolle, verbunden mit einer unter Umständen sinnvollen Instandhaltung, bei beiden Vorgehensweisen (konventionell und behutsam) gleichermaßen relevant.

15 Literaturverzeichnis

Literaturverzeichnis

- [1] Liersch, A.; Asef, D. (2018) *Bildung und Kultur – Spartenbericht Baukultur, Denkmalschutz und Denkmalpflege*. Statistisches Bundesamt [Hrsg.] [Artikelnummer 5216206-18900-4 [PDF]].
- [2] Gieler, R. (2019) *Denkmalgerechte Instandsetzung historischer Stahlbetonbauwerke – Regelwerke und technische Möglichkeiten* in: Eßmann, F.; Klawun, R. [Hrsg.] *Flugdach - Faltwerk - Fertigteile: Der bauliche Umgang mit Denkmälern der 1950er- bis 1980er-Jahre*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, S. 6–18.
- [3] DAfStb-Richtlinie:2001-10 *Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie) RL SIB*. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik ("DIBt") *Instandhaltung von Bauwerken ("TR Instandhaltung") – Teil 1 - Anwendungsbereich und Planung der Instandhaltung*. Mai 2020.
- [5] Alexandra Fink; Martin Günter (0105) *Der Weg der behutsamen Betoninstandsetzung. Das Beispiel Stadthalle in Lahnstein* in: *Die Denkmalpflege*, H. 1, S. 13–25.
- [6] Müller, H. S.; Günter, M.; Bohner, E.; Vogel, M. (2006) *Gentle Concrete Repair - Scientific Background and Practical Methods / Behutsame Betoninstandsetzung - wissenschaftliche Grundlagen und ihre praktische Umsetzung* in: *Restoration of Buildings and Monuments* 12, 5-6, S. 109–120. <https://doi.org/10.1515/rbm-2006-6084>
- [7] Hilsdorf, H.; Günter, M. (1998) *Beton und Stahlbetonkonstruktionen. Möglichkeiten und Grenzen der Instandsetzung* in: *ICOMOS-Hefte des Deutschen Nationalkomitees* 24, S. 108–113.
- [8] Müller, S. H. (2004) *Denkmalgerechte Betoninstandsetzung - Überblick und technischwissenschaftliche Grundlagen* in: *Tagungsband zum Symposium Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten in der Moderne in Deutschland, 30.04.2004, Universität Karlsruhe (TH)*, (Hrsg.): Müller, H.S.; Nolting, U.; Vogel, M.; Haist, M., H. 1, 35–44. ISBN: 978-86644-098-2.
- [9] Günter, M. (2004) *Instandsetzungswerkstoffe - Entwicklung, Eigenschaften, Verarbeitung*. in: *Tagungsband zum Symposium Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten in der Moderne in Deutschland, 30.04.2004, Universität Karlsruhe (TH)*, (Hrsg.): Müller, H.S.; Nolting, U.; Vogel, M.; Haist, M., H. 1, 45–53. ISBN: 978-86644-098-2.
- [10] Günter, M.; Hörenbaum, W. (2019) *Die Sichtbetonfassade der Stadthalle in Lahnstein – Technische Aspekte der behutsamen Instandsetzung* in: *Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.] Modellhafte, behutsame Sichtbetoninstandsetzung an der denkmalgeschützten Stadthalle in Lahnstein*. Mainz, S. 25–44.
- [11] Bundschuh, P.; Duppel, C.; Heese, C.; Urban, F.; Egloffstein, P. (2019) *BIRDS – Ein Baukastensystem für die Instandsetzung von Sichtbeton in der Denkmalpflege* in: *Tagungsband zum 6. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken“*, Esslingen, S. 133–140.
- [12] Maierhofer, C. (2000) *Radaranwendungen im Bauwesen* in: *ZfP-Zeitung* 72, S. 43–50.
- [13] Walther, A.; Hasenstab, A. (2012) *Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau* in: *Bauphysik-Kalender 2012*. John Wiley & Sons, Ltd, S. 157–202.

- [14] Maack, S.; Küttenbaum, S.; Epple, N.; Aligholizadeh, M. (2021) *Die Ultraschall-Echomethode – von der Messung zur bautechnischen Kenngröße* in: Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 3, S. 200–211. <https://doi.org/10.1002/best.202000091>
- [15] Zatar, W. A.; Nguyen, H. D.; Nghiem, H. M. (2020) *Ultrasonic pitch and catch technique for non-destructive testing of reinforced concrete slabs* in: Journal of Infrastructure Preservation and Resilience 1, H. 1. <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00012-z>
- [16] Li, Z. (2020) *A study on ultrasonic echo tomography for non-destructive evaluation of hardened cementitious concrete* in: Journal of Building Pathology and Rehabilitation 5, H. 1. <https://doi.org/10.1007/s41024-020-00079-x>
- [17] Mold, L.; Auer, M.; Strauss, A.; Hoffmann, M.; Täubling, B. (2020) *Thermografie zur Erfassung von Schäden an Brückenbauwerken* in: Bautechnik 97, H. 11, S. 789–801. <https://doi.org/10.1002/bate.201800057>
- [18] Lai, W. W.-L.; Lee, K.-K.; Poon, C.-S. (2015) *Validation of size estimation of debonds in external wall's composite finishes via passive Infrared thermography and a gradient algorithm* in: Construction and Building Materials 87, S. 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.032>
- [19] Maierhofer, C.; Röllig, M.; Hasenstab, A.; Schönitz, A. (2008) *Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen* in: Fachtagung Bauwerksdiagnose, 21.-22.02. 2008, Berlin.
- [20] Streicher, D.; Taffe, A.; Boller, C. (2010) *Quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Radar an Stahl- und Spannbetonbauteilen* in: *Berichtsband der DGZfP-Jahrestagung 2010*.
- [21] Streicher, D.; Kurz, J.; Boller, C. (2011) *Radar, Ultraschallecho und die Bestimmung der Betondeckung an Stahl- und Spannbetonbauteilen* in: DGZfP-Jahrestagung.
- [22] Maierhofer, C.; Röllig, M.; Hasenstab, A.; Schönitz, A. (2008) *Praktische Anwendung der aktiven Thermografie zur Untersuchung von Stahlbetonbauteilen* in: Fachtagung Bauwerksdiagnose, 21.-22.02. 2008, Berlin.
- [23] Maierhofer, C.; Brinke, A.; Hillemeier, B.; Rieck, C.; Rölling, M.; Wiggerhauser, H. (2003) *Struktur- und Feuchteuntersuchung in Betonstrukturen mit der Impuls-Thermografie* in: Bauphysik 25, H. 1, S. 22–26. <https://doi.org/10.1002/bapi.200300050>
- [24] Rocha, J. H.; Póvoas, Y. V. (2017) *Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art* in: Revista ALCONPAT 7, H. 3, S. 200–214.
- [25] Vaghefi, K.; Ahlborn, T. M.; Harris, D. K.; Brooks, C. N. (2015) *Combined Imaging Technologies for Concrete Bridge Deck Condition Assessment* in: Journal of Performance of Constructed Facilities 29, H. 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000465](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000465)
- [26] Patitz, G. [Hrsg.] (2010) *Zerstörungsfreie Untersuchung an altem Mauerwerk – Radar, Ultraschall und Seismik in der Baupraxis*. Berlin: Beuth.
- [27] Hoegh, K.; Khazanovich, L.; Yu, H. T. (2012) *Concrete Pavement Joint Diagnostics with Ultrasonic Tomography* in: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2305, H. 1, S. 54–61. <https://doi.org/10.3141/2305-06>
- [28] Schulze, S. (2020) *Bauwerksuntersuchung mit Ultraschall* in: Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 9, S. 653–661. <https://doi.org/10.1002/best.202000013>
- [29] Wenner, F. (1916) *A Method of Measuring Earth Resistivity*. U.S. Government Printing Office.

- [30] Rudolph, M.; Orgass, M.; Schneider, J.; Lorenz, H.; Reichel, S.; Schmidt, J. (2021) *Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton – Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Brücken- und Ingenieurbau.* Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG.
- [31] Polder, R. B. (2001) *Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEM TC-154 technical recommendation* in: *Construction and Building Materials* 15, 2-3, S. 125–131. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)
- [32] Gehlen, C. (2000) *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion.* Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 510. Beuth Verlag.
- [33] Hunkeler, F. (1994) *Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten* in: Forschungsauftrag AGB 86/90, VSS-Bericht Nr. 510.
- [34] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP):2022-02. B11 *DGZfP-Merkblatt B11: Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen.* Berlin.
- [35] ASTM International. Edition 2015 *ASTM C 1383-15: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.* West Conshohocken, PA.
- [36] Kreye, J. (2013) *Prüfbericht P 1309-254 – Evangelische Christuskirche in Bingen-Büdesheim; Materialprüfanstalt Wiesbaden.* Materialprüfanstalt Wiesbaden [Hrsg.].
- [37] Schneider, R. (2004) *Betoninstandsetzung am Beispiel Sudhaus Becker-Brauerei St. Ingbert.* Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.]. IFS-Bericht 17.
- [38] Engel, M.; Zimmer, M. (2001) *Schadensanalyse, -kataster, Instandsetzungskonzept mit Leistungsverzeichnis und Kostenvoranschlag für das Bauwerk Aussegnungshalle Zentralfriedhof in Saarbrücken* [Diplomarbeit]. Hochschule für Technik und Wirtschaft des Saarlands.
- [39] Sauder, M.; Meyer, W.; Twellmeyer, C. (2007) *Neue Einsegnungshalle, Hauptfriedhof Saarbrücken – Bestandsaufnahme von Bauwerksschäden: Dach, Stahlbeton, Haustechnik – Untersuchungsbericht B10-2007.* Institut für Baustoffuntersuchung und Sanierungsplanung, Saarbrücken [Hrsg.].
- [40] Sauder, M.; Meyer, W.; Schwarz, M. (2008) *Neue Einsegnungshalle, Hauptfriedhof Saarbrücken – Leistungsverzeichnis für Betoninstandsetzungsmaßnahmen an einer denkmalgeschützten Betonfassade, Bereich: Musterfläche.* Institut für Baustoffuntersuchung und Sanierungsplanung, Saarbrücken [Hrsg.].
- [41] Markgraf, M.; Oelker, S.; Schwarting, A.; Huse, N. (2011) *Denkmalpflege der Moderne – Konzepte für ein junges Architekturerbe.* Stuttgart: Karl Krämer Verlag.
- [42] Preußler, B. (2008) *Maria Königin des Friedens – Baukunst und Baupflege* in: Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.] *Substanzschonende Betoninstandsetzung denkmalgeschützter Bauwerke.* Mainz.
- [43] Egloffstein, P. (2008) *Die Restaurierung des Schüttbetons an der Kirche Maria Königin des Friedens in Kassel-Bad Wilhelmshöhe* in: *Denkmal an Beton! Material, Technologie, Denkmalpflege, Restaurierung; Berichte zur Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland*, H. 16, S. 218–226.
- [44] Keil, A.; Fröhlich, S. (2008) *Fatimakirche: Materialuntersuchungen und Instandsetzungskonzept.* Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.]. IFS-Bericht Nr. 30.

- [45] Rassek, J.; Rubba, U. (2008) *Spritzbeton und Injektionstechnik am Beispiel der Fatimakirche*. Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.]. IFS-Bericht Nr. 30.
- [46] Reck, C. (2008) *Beton als Baustoff für Silo- und Lagergebäude der Völklinger Hütte* in: Doose, M. [Hrsg.] *Denk-mal an Beton!: Material, Technologie, Denkmalpflege, Restaurierung*. Petersberg: Michael Imhof Verlag GmbH & Co. Kg, Petersberg, S. 53–58.
- [47] Sauder, M. *Einer der spannendsten Orte der Welt – Betonrestaurierung im UNESCO-Weltkulturerbe Völklinger Hütte* in: *Bauen im Bestand B + B*, H. 2, S. 71–76.
- [48] Baumstark, H. (2007) *Umsetzung gestalterischer Aspekte der Instandsetzung* in: Müller, H. S. [Hrsg.] *Symposium Instandsetzung Bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland: Betoninstandsetzung* ; 1. *Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 30. März 2004 - Betoninstandsetzung*. 2. Aufl. Karlsruhe: Univ.-Verl. Karlsruhe, S. 73–76.
- [49] Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.] (2019) *Modellhafte, behutsame Sichtbetoninstandsetzung an der denkmalgeschützten Stadthalle in Lahnstein*. Mainz.
- [50] Auras, M.; Meinhardt, J.; Snethlage, R. [Hrsg.] (2010) *Leitfaden Naturstein-Monitoring – Nachkontrolle und Wartung als zukunftsweisende Erhaltungsstrategien*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.
- [51] Günter, M. (2008) *Die „behutsame“ Betoninstandsetzung – Durchführung, Kosten, Dauerhaftigkeit* in: Hassler, U. [Hrsg.] *Beton: Was der Architekt von Stahlbeton wissen sollte*. Zürich: gta Verlag.
- [52] Baumstark, H. (2019) *Die Sichtbetonfassade der Stadthalle in Lahnstein – Es kommt darauf an, was man macht* in: Institut für Steinkonservierung e.V. [Hrsg.] *Modellhafte, behutsame Sichtbetoninstandsetzung an der denkmalgeschützten Stadthalle in Lahnstein*. Mainz, S. 19–24.