



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e della comunicazione DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Monitoring der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken: Bedürfnisse der Praxis und Chancen neuer Entwicklungen

**Monitoring de la durabilité des ouvrages en béton
armé: Besoins de la pratique et opportunités de
nouveaux développements**

**Monitoring the durability of reinforced concrete
structures: Practical needs and opportunities for
new developments**

TFB Romandie SA
Pascal Kronenberg

TFB AG
Yves Schiegg
Stefanie v. Greve-Dierfeld

Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH
Till Felix Mayer

Forschungsprojekt BGT_20_08A_02
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
Juni 2026 | 1825

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet. Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière. Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima. Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee. Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)

Monitoring der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken: Bedürfnisse der Praxis und Chancen neuer Entwicklungen

Monitoring de la durabilité des ouvrages en béton armé: Besoins de la pratique et opportunités de nouveaux développements

Monitoring the durability of reinforced concrete structures: Practical needs and opportunities for new developments

TFB Romandie SA
Pascal Kronenberg

TFB AG
Yves Schiegg
Stefanie v. Greve-Dierfeld

Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH
Till Felix Mayer

Forschungsprojekt BGT_20_08A_02
auf Antrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA
Juni 2026 | 1825

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Pascal Kronenberg

Mitglieder

Yves Schiegg

Till Felix Mayer

Stefanie v. Greve-Dierfeld

Federführende Fachkommission

BGT - Brücken, Geotechnik und Tunnel

Begleitkommission

Präsident

Ueli Angst

Mitglieder

Eleni Chatzi

Martin Brem

Rade Hajdin

Walter Waldis / Dimitrios Papastergiou

Feltrin Glauco

Antragsteller

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von
<https://www.mobilityplatform.ch/>
heruntergeladen werden.

Juni 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	10
Tabellenverzeichnis	12
Abkürzungsverzeichnis	13
Zusammenfassung.....	14
Résumé	19
Summary	25
1 Einleitung.....	31
1.1 Grundlagen.....	31
1.1.1 Nationale und internationale Forschung	32
1.2 Ziele des Forschungsprojektes	34
1.3 Methodik	34
2 Bedürfnisse der Praxis, Workshop vom 4. Juni 2024.....	37
2.1 Einleitung	38
2.2 Iris Hindersmann – Herausforderungen und Bedürfnisse für den Einsatz von Monitoring.....	38
2.3 Ann Schumacher – Dauerhaftigkeit im Ingenieurbau der SBB	39
2.4 Till F. Mayer – Sensoren: Stand und zukünftige Anforderungen	39
2.5 Frank Spörel – Langzeiterfahrungen zum Dauerhaftigkeitsmonitoring im Verkehrswasserbau ..	40
2.6 Rade Hajdin – Umgang mit Daten – Erfassung, Analyse und Visualisierung	41
2.7 Johannes Lohner – Umgang mit Daten: Erfassung, Analyse und Visualisierung	41
2.8 Pascal Kronenberg – Entwicklung und Anwendung...	42
2.9 Martin Brem und Johannes Lohner – Langzeitstudie zur Wirksamkeit einer Hydrophobierung in einem Strassentunnel.....	43
2.10 Generelle Zusammenfassung des Workshops.....	43
3 Schädigungsmechanismen	45
3.1 Übersicht	45
3.2 Bewehrungskorrosion.....	46
3.3 Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR)	47
3.4 Frost- und Frost-/Tausalz-Angriff (FT).....	48
4 Relevante Messgrößen und Verfahren	49
4.1 Einleitung	49

4.2	Temperaturmessung im Beton	49
4.2.1	Verfahrensbeschreibung.....	49
4.2.2	Messgrösse.....	50
4.2.3	Sensorkomponenten.....	50
4.2.3.1	Thermoelemente.....	50
4.2.3.2	RTD-Temperatursensoren.....	51
4.3	Potenzialmessung zur Lokalisierung von Korrosion ...	52
4.3.1	Verfahrensbeschreibung.....	52
4.3.2	Messgrösse.....	53
4.3.3	Sensorkomponenten.....	53
4.3.4	Anwendungsgebiete.....	53
4.3.5	Einflussgrössen.....	54
4.3.6	Bewertungskriterien	55
4.3.7	IoT-Kompatibilität.....	55
4.4	Elektrischer Betonwiderstand.....	56
4.4.1	Verfahrensbeschreibung.....	56
4.4.2	Messgrössen.....	57
4.4.3	Einflussgrössen.....	59
4.4.4	Bewertungskriterien	62
4.4.5	IoT-Kompatibilität.....	63
4.5	Chloridgehaltsbestimmung.....	64
4.5.1	Verfahrensbeschreibung.....	64
4.5.2	Messgrösse.....	64
4.5.3	Anwendungsgebiete.....	64
4.5.4	Sensorkomponenten.....	64
4.5.5	Einflussgrössen.....	65
4.5.6	Bewertungskriterien	65
4.5.7	IoT-Kompatibilität.....	65
4.6	pH-Wert Messung.....	66
4.6.1	Verfahrensbeschreibung.....	66
4.6.2	Messgrösse.....	66
4.6.3	Anwendungsgebiete.....	66
4.6.4	Sensorkomponenten.....	67
4.6.5	Einflussgrössen.....	67
4.6.6	Bewertungskriterien	67
4.6.7	IoT-Kompatibilität.....	68
4.7	Elementstrommessung	68
4.7.1	Verfahrensbeschreibung.....	68
4.7.2	Messgrösse.....	68
4.7.3	Sensorkomponenten.....	68
4.7.4	Anwendungsgebiete.....	69
4.7.5	Einflussgrössen.....	69
4.7.6	Bewertungskriterien	69
4.7.7	IoT-Kompatibilität.....	70
4.8	LPR-Messung.....	71
4.8.1	Verfahrensbeschreibung.....	71
4.8.2	Sensorkomponenten.....	72
4.8.3	Anwendungsgebiete.....	72

4.8.4	Einflussgrößen	73
4.8.5	Bewertungskriterien.....	73
4.8.6	IoT-Kompatibilität	73
4.9	Mikrostrukturelle Schädigungen im Beton	74
4.9.1	Verfahrensbeschreibung	74
4.9.2	Messgrösse	75
4.9.3	Sensorkomponenten	75
4.9.4	Anwendungsgebiete	76
4.9.5	Einflussgrößen	76
4.9.6	Bewertungskriterien.....	76
4.9.7	IoT-Kompatibilität	77
4.10	Verformungsmessungen.....	78
4.10.1	Verfahrensbeschreibung	78
4.10.2	Messgrößen	79
4.10.3	Sensorkomponenten	79
4.10.4	Anwendungen	80
4.10.5	Einflussgrößen	80
4.10.6	Bewertungskriterien.....	81
4.10.7	IoT-Kompatibilität	81
4.10.8	Fazit	81
5	Kommerzielle Sensorsysteme	83
5.1	Einleitung	83
5.2	ECi-Sensoren von SMARTSTRUCTURES.....	83
5.3	CS-040 und CS-322 von TFB Diagnostic Systems	84
5.4	ERE 20 von FORCE Technology	86
5.5	CorroWatch von FORCE Technology	87
5.6	Multisensoren von DuraMon	88
5.7	Concreteintel von Precision Structural Health Sensors	89
5.8	Anodenleiter der Sortec GmbH.....	90
5.9	Spreizringanode der Sortec GmbH	91
5.10	Betonwiderstandssensoren	92
5.11	CorroDec2G-Korrosionssensor von infrasolute AG	94
5.12	LVDT-Wegaufnehmer	95
5.13	Linearpotentiometrische Wegaufnehmer	96
5.14	Piezoelektrische Sensoren (Frost)	98
5.15	Faseroptische Sensoren (FOS)	99
5.15.1	Einleitung.....	99
5.15.2	Faseroptische Korrosionssensoren	100
5.15.3	Faseroptische relative Feuchte-Sensoren	101
5.15.4	Faseroptische Chlorid-Sensoren	102
5.15.5	Faseroptische pH-Sensoren	103
5.15.6	Faseroptische Temperatur-Sensoren.....	103
5.15.7	Faseroptische Sensoren für Verformungsmessungen	104
5.15.8	Bewertung der Praxistauglichkeit von FOS ...	107

6	Datenakquisitionsgeräte, Datenlogger	109
6.1	Einleitung.....	109
6.2	Anforderungen.....	109
6.3	Kommerziell erhältliche Geräte	110
6.3.1	DS-Log4.o (TFB Diagnostic Systems AG)	110
6.3.2	DuraMon Datenlogger (DuraMon AG).....	112
6.3.3	Camur III-System (Protector KKS GmbH).....	112
6.3.4	CAB ONE-System (CORR-NOLOGY GmbH). 113	
6.3.5	CorroDec Auslesegerät (infrasolute AG)	114
6.3.6	Universal-Datenlogger.....	114
6.3.7	Schallemissionsanalyse und Codawellen- Interferometer	114
7	Datenübertragung und IoT	117
7.1	Einleitung: Rolle der Datenkommunikation im Bauwerksmonitoring.....	117
7.2	Anforderungen.....	117
7.3	Kabelgebundene Übertragung: Architekturen, Protokolle und Bewertung	118
7.3.1	Serielle Feldbusse (RS-232/RS-485/Modbus)118	
7.3.2	Industrial Ethernet (Ethernet/IP, PROFINET, Modbus TCP)	118
7.4	Funkbasierte Übertragung: Architekturen, Protokolle und Bewertung.....	118
7.4.1	Wireless Sensor Networks (z.B. ZigBee).....	118
7.4.2	WLAN (Wi-Fi) und Bluetooth Low Energy (BLE)	119
7.4.3	LPWAN (z.B. LoRaWAN)	119
7.4.4	IoT-Mobilfunk (LTE-M, NB-IoT)	119
7.5	Typische Systemarchitektur für Dauerhaftigkeitsmonitoring (Best-Practice).....	120
7.5.1	Reine Funk-Architektur.....	120
7.5.2	Alternative: Hybride Kabel-/Funk- Architektur: Feldbus + LPWAN	121
7.6	Fazit	121
8	Bewertung von Monitoringsystemen und Sensoren	123
9	Modularer Werkzeugkoffer	127
9.1	Einleitung.....	127
9.2	Neubauten.....	127
9.2.1	Auswahl der geeigneten Sensorik.....	127
9.2.2	Wahl der Anzahl Sensoren für ein Korrosionsmonitoring	133
9.3	Bestandsbauten.....	136
9.3.1	Korrosion	137
9.3.2	Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR)	139
9.3.3	Frost und Frost/Tausalz	140

9.4 Geeignete Sensoren	141
10 Anwendungsbeispiele.....	143
10.1 Allgemeines	143
10.2 Praxisbeispiel Neubau – Tunnelbauwerk.....	143
10.2.1 Bauwerksbeschreibung	143
10.2.2 Zielsetzung	144
10.2.3 Monitoring-Layout.....	144
10.2.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	145
10.3 Praxisbeispiel bestehende Brücke	148
10.3.1 Bauwerksbeschreibung	148
10.3.2 Zielsetzung	148
10.3.3 Monitoring-Layout.....	148
10.3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	150
10.4 Praxisbeispiel Brückenbauwerk – Dichtigkeit der Brückenplatte nach der Instandsetzung.....	151
10.1 Praxisbeispiel AAR-geschädigte Stützmauer – Einfluss von Instandsetzungsmassnahmen auf die AAR-Entwicklung	155
11 Weiteres Vorgehen	161
Literaturverzeichnis	162
Datenverwendung.....	168
Projektabschluss.....	169

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schädigungsmechanismen für Bewehrungs- und Betonkorrosion sowie Messverfahren und Sensorik für das Monitoring von Betonbauten	45
Abbildung 2: Aufbau und Prinzip eines Thermoelements	51
Abbildung 3: Pt1000 Sensorelement, gekapselt in einer Hülse aus nichtrostendem Stahl.....	52
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Potential und Korrosionszustand von Bewehrungsstahl nach [29].....	54
Abbildung 5: Anordnung der vier Elektroden an einem zylindrischen Prüfkörper, Wenner-Verfahren [6].....	58
Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem spezifischen elektrischen Betonwiderstand.....	60
Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf des elektrischen Betonwiderstandes (Messwerte und temperaturkompensiert) und der Betontemperatur an einer Widerlagerwand in der Region San Bernardino	61
Abbildung 8: Zusammenhang zwischen der Betontemperatur und dem elektrischen Betonwiderstand in einer instandgesetzten Brückenplatte.	61
Abbildung 9: Links, Zusammenhang zwischen Temperatur und Betonwiderstand nach zwei Frostzyklen. Rechts, Illustration der Methode zur Bestimmung der Aktivierungsenergie (b-Wert) bei Temperaturen oberhalb der Phasenumwandlungstemperatur.	62
Abbildung 10: Kalibrierkurve zur Bestimmung der Chloridkonzentration in neutralen und hochalkalischen Lösungen (aus [48]).....	64
Abbildung 11: Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands als Steigung der Tangente im Stromdichte-Potential-Diagramm (aus [53]).....	72
Abbildung 12: Schematische Illustration einer typischen IoT-Monitoring-Systemarchitektur	83
Abbildung 13: Korrosionsmonitoring-System von SmartStructures. Links, ECI-2 und Rechts, ECI-1	84
Abbildung 14: Betonstahlsensoren des Typs CS-040 der TFB Diagnostic Systems AG.....	85
Abbildung 15: Kombiniertes Korrosionsstrom- und Widerstandssensor des Typs CS-322 der TFB Diagnostic Systems AG.....	85
Abbildung 16: ERE 20 Referenzelektrode von FORCE Technology (Bild aus Datenblatt von FORCE)	86
Abbildung 17: CorroWatch multi-sensor von FORCE Technology (Bild aus Datenblatt von FORCE)	87
Abbildung 18: DuraMon Sensor-System für Neubauten, an Bewehrungsseisen fixiert (Bild von duramon.ch)	88
Abbildung 19: Links, concreteintel-P4. Rechts, concreteintel-mini (Bilder von precisionstructuralhealthsensors.com/concrete-corrosion-monitoring)	89
Abbildung 20: Korrosionssensor Anodenleiter nach Montage auf der oberen Bewehrungslage	90

Abbildung 21: Potenzial- und Elementstromverlauf bei Korrosionsinitiiierung an der ersten Sensorsprosse [67].....	91
Abbildung 22: Korrosionssensor “Spreizringanode” zur nachträglichen Sensorinstallation an Bestandsbauwerken	92
Abbildung 23: Sortec Multiringelektrode. Links, MRE im Beton. Rechts, Aufbau der MRE, Messprinzip und Tiefenprofil der elektrischen Betonwiderstände (Bilder aus technischem Datenblatt von SENSORTEC)	92
Abbildung 24: CorroDec2G Feuchtigkeitssensor der infrasolute AG, Zug	93
Abbildung 25: Leiterförmiger Betonwiderstandssensor CS-402 der TFB Diagnostic Systems AG	93
Abbildung 26: CorroDec2G Korrosions-Sensor (Bild von infrasolute).....	94
Abbildung 27: Aufbau und Funktionsweise eines LVDT-Wegaufnehmers (schematisch) (aus blog.pickeringtest.com)	96
Abbildung 28: Rissaufnehmer mit linearpotentiometrischem Wegaufnehmer (Bild Ginger CEBTP).....	97
Abbildung 29: Piezoelektrische Sensoren zur Detektion von Frostschädigungen ..	98
Abbildung 30: Datenlogger DS-Log4.0	110
Abbildung 31: Datenübertragungskette	117
Abbildung 32: Illustration eines LoRaWAN-Funknetzes mit über das Bauwerk verteilten Datenlogger-Knoten (Bild von TFB Diagnostic Systems)	119
Abbildung 33: Entscheidungsbaum (Gesamtansicht) für die Bestimmung der relevanten Schädigungsrisikoklassen bei Neubauten.....	129
Abbildung 34: Ast «Tunnel»	130
Abbildung 35: Ast «Stützmauer»	131
Abbildung 36: Ast «Brücke»	132
Abbildung 37: Ast «Galerie»	133
Abbildung 38: Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Niveau der Schadenerkennung	135
Abbildung 39: Relevante Messgrößen für eine Auswahl an typischen Korrosions-Schadensszenarien (Bestandsbauten)	139
Abbildung 40: Optische Oberflächenanalyse zur automatischen Erfassung und Quantifizierung von Frost-/Frosttausalzschäden.....	140
Abbildung 41: Tunnelquerschnitt.....	143
Abbildung 42: links: Sensoranordnung im Portalbereich; rechts: montierter Korrosionssensor vor Schliessen der Schalung	145
Abbildung 43: links: Feuchtesensor MRE in der vorbereiteten Brückentafel; rechts: Sensorpositionen am Widerlager Ost [73].....	149
Abbildung 44: Lage der Sensoren im Querschnitt der Bolli Viadukte	152
Abbildung 45: (a) MRE Sensor (b) MRE Sensor im Mörtel eingebettet, (c) CS-402 Sensor (d) CS- 402 im Mörtel eingebettet	153
Abbildung 46: Verlauf der Luft- und Betontemperatur	154
Abbildung 47: Verlauf der Betontemperatur und der elektrischen Betonwiderstände für die Widerstandsleitern CS6 (Positionierung bei Randfuge ÜS / Stützenbereich und CS8 (Positionierung bei Mittelfuge ÜS / Stützenbereich).....	154
Abbildung 48: Test- und Referenzflächen an der Stützmauer Wassen	156
Abbildung 49: Instrumentierung der Stützmauer (Längenmasse in m).....	157
Abbildung 50: Fertiggestellte Instrumentierung	157
Abbildung 51: Entwicklung der Betondehnung (gesamt)	158

Abbildung 52: Entwicklung der Betondehnung an 3 Messstellen (thermischer Anteil kompensiert).....	158
Abbildung 53: Entwicklung des Elektrolytwiderstands (Betonfeuchtigkeit)	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Präsentationen des Workshops vom 4. Juni 2024	37
Tabelle 2: Zusammenfassung Temperaturmessung	52
Tabelle 3: Zusammenfassung Potenzialmessung	56
Tabelle 4: Zusammenfassung elektrischer Betonwiderstand	63
Tabelle 5: Zusammenfassung Chloridgehaltsbestimmung.....	66
Tabelle 6: Zusammenfassung pH-Messung.....	68
Tabelle 7: Zusammenhang Stromdichte und Korrosionsaktivität nach [40]	70
Tabelle 8: Zusammenfassung Elementstrommessung	71
Tabelle 9: Zusammenfassung LPR-Messung.....	74
Tabelle 10: Zusammenfassung Codawelleninterferometrie (CWI)	77
Tabelle 11: Zusammenfassung Akustische Emission (AE)	78
Tabelle 12: Zusammenfassung Verformungsmessmethoden	82
Tabelle 13: Praxistauglichkeit faseroptische Sensortechnologien	107
Tabelle 14: Messspezifikationen DS-Log4.0.....	111
Tabelle 15: Vergleichstabelle Kabel vs. Funkübertragung	120
Tabelle 16: Vergleichende Beurteilung kommerzieller Sensorsysteme	125
Tabelle 17: Sinnvolle Messgrößen bei Neubauten, abhängig von der Schädigungsrisikoklasse (präventives Monitoring).	136
Tabelle 18: Messgröße – Sensormodell Eignungsmatrix	141
Tabelle 19: Kostenvergleich für Monitoring und vertiefte Bauwerksuntersuchungen (Szenario 1).....	146
Tabelle 20: Kostenvergleich für Monitoring und präventiven Bauwerkserhalt (Szenario 2)	147
Tabelle 21: Kostenvergleich für Monitoring und reaktiven Bauwerkserhalt (Szenario 3)	148
Tabelle 22: Kostenvergleich Monitoring und reaktiver Bauwerkserhalt.....	151

Abkürzungsverzeichnis

AAR	Alkali-Aggregat Reaktion
DAQ	Datenakquisitionsgerät
DFOS	Distributed fiber optical sensor
DMS	Dehnmessstreifen
FBG	Fiber Bragg Grating
FOS	Fiber optical sensor
IoT	Internet of things
LPFG	Long period fiber grating
LPR	Linear polarisation resistance
LVDT	Linear variable differential transformer
MRE	Multiringelektrode
SHM	Structural Health Monitoring

Zusammenfassung

Ausgangslage und Zielsetzung

Ein Grossteil der Schweizer Verkehrsinfrastruktur hat das Ende seiner geplanten Lebensdauer erreicht oder nähert sich diesem. Brücken, Tunnel, Stützmauern und Galerien sind dauerhaft hohen mechanischen und chemischen Beanspruchungen ausgesetzt. Bei begrenzten Instandhaltungsbudgets erfordert dies eine zielgerichtete, faktenbasierte Erhaltungsstrategie.

Das vorliegende Forschungsprojekt zielt darauf ab, bestehende und neuartige Monitoringtechnologien zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit eines Bauwerks zu sichten und zu bewerten und daraus einen praxisorientierten «Werkzeugkoffer» für zukünftige Projekte zusammenzustellen. Neben der Bewehrungskorrosion werden auch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) und Frost-/Frosttausalzangriff berücksichtigt.

Das Projekt baut auf dem abgeschlossenen ASTRA-Projekt «Technologien zur Überwachung der Infrastruktur (NTech)» auf, das primär auf das Structural Health Monitoring (SHM) zur Tragsicherheit ausgerichtet war. Das vorliegende Projekt erweitert den Fokus auf das Dauerhaftigkeitsmonitoring, das in der Praxis bisher einen deutlich geringeren Stellenwert einnimmt. Konkrete Projektziele waren:

- Sichten und Bewerten bestehender und absehbarer Monitoringtechnologien
- Abklärung der Bedürfnisse seitens ASTRA
- Vorschlag geeigneter Monitoringkonzepte für Neu- und Bestandsbauten
- Erarbeitung eines Prozesses für die Sensorauswahl und Instrumentierung von Betonbauteilen

Bedürfnisse der Praxis

Als Kick-Off fand am 4. Juni 2024 ein eintägiger Workshop statt, an dem Bauherren, Expertinnen und Experten aus Deutschland und der Schweiz sowie die Mitglieder der Forschungsstelle teilnahmen.

Die Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) versteht Monitoring als zyklischen Prozess: von der Fragestellung über Konzept, Messung und Auswertung bis zur Massnahmenentscheidung. Hauptanwendungen bestehen bislang bei Spannbetonbrücken der 1960er bis 1980er Jahre. Hemmnisse für breiteren Einsatz sind unklarer Nutzen, Fachkräftemangel und fehlende Standardisierung. Gefordert werden klare Ausschreibungsvorlagen, Wirtschaftlichkeitsmodelle und systematische Schulungen

Die SBB überwacht rund 17'000 Ingenieurbauwerke, darunter über 6'000 Brücken, viele davon älter als 100 Jahre. Überwachung erfolgt nach Intervallklassen (0–3) gemäss Versagenskonsequenzen. Monitoring wird gezielt dort eingesetzt, wo klassische Inspektionen an Grenzen stossen – z.B. bei messwertbasierten Ermüdungsnachweisen. Die Integration von Monitoringdaten in das Life-Cycle-Management-System ermöglicht eine direkte Verknüpfung mit Substanzerhalt und Massnahmenplanung.

Für Langzeitmessungen mittels im Beton eingebauten Sensoren werden sich zukünftig LoRaWAN-basierte oder andere IoT-Systeme durchsetzen. Gefragt sind drahtlose, bat-

teriebetriebene und kostengünstig installierbare Systeme. Beim Datenmanagement sind projektbezogenes Monitoring und Berücksichtigung bei der strategischen Erhaltungsplanung zentral. Als Schlüsseltechnologien der Zukunft gelten KI-gestützte Datenauswertung, digitale Zwillinge und standardisierte Datenplattformen.

Eine eindruckliche Fallstudie lieferte das 12-jährige Monitoring der Zwischendecke des Gotthard-Strassentunnels, wo die Wirksamkeit einer Hydrophobierung nachgewiesen werden konnte. Die messbare Reduktion der Korrosionsaktivität konnte den wirtschaftlichen Mehrwert von zielgerichtetem Monitoring demonstrieren.

Der Workshop zeigte, dass das Monitoring der Dauerhaftigkeit in bestehenden Überwachungsprozessen noch unterrepräsentiert ist. Eine frühzeitige Verankerung von Monitoringstrategien in der Bauwerkserhaltung sollte zukünftig vermehrt berücksichtigt werden.

Schädigungsmechanismen an Betonbauwerken

Für Infrastrukturbauwerke sind drei Hauptschädigungsmechanismen relevant, denen je unterschiedliche Monitoring-Ansätze gegenüberstehen.

Bei der Bewehrungskorrosion werden primär chloridinduzierte und karbonatisierungsinduzierte Korrosion unterschieden. In beiden Fällen erfolgt zuerst eine Einleitungsphase (Schadstoffeintrag ohne Schädigung), dann die Initiierung der Korrosion und anschliessend die Schädigungsphase (Korrosionsfortschritt). Sensorunterstütztes Monitoring erlaubt die Messungen des Schadstoffeintrags, die Feststellung der Korrosionsaktivierung sowie die Quantifizierung des Korrosionsfortschritts. Frühzeitiges Eingreifen vor der Schädigungsphase kann die Instandsetzungskosten erheblich verringern.

Bei der Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) reagiert die alkalische Porenlösung mit reaktiven Bestandteilen der Gesteinskörnung; das entstehende Silikagel hat eine quellende Wirkung und verursacht Rissbildung im Beton. Bis zum Erscheinen eines sichtbaren Schadensbilds können zwei bis drei Jahrzehnte vergehen. Mittels Monitoring von Ausdehnungen und dem Feuchtehaushalt des Betons können die Auswirkungen von AAR messtechnisch erfasst werden.

Frost- und Frosttausalz-Angriffe: Beim Gefrieren des Porenwassers im Beton kommt es zu Volumenausdehnungen, Rissbildungen, Absandungen und Betonabplatzungen. Praxistaugliche Monitoringsysteme für diesen Schädigungsmechanismus befinden sich noch weitgehend im Forschungsstadium. Da es sich bei Frost- und Frosttausalzschäden primär um ein Oberflächenphänomen handelt, kommt der zerstörungsfreien Prüfung (z.B. visuelle Inspektion oder Oberflächen-Scanning mit Bildauswertung) eine höhere Bedeutung zu.

Relevante Messverfahren und Sensorik

Der Bericht gibt einen umfassenden Überblick über verfügbare Messverfahren und massgebende Parameter für ein Monitoring.

Die Betontemperatur ist eine wichtige Hilfsgrösse, da z.B. der Betonwiderstand und die Korrosionsrate stark temperaturabhängig sind. Für die Messung eingesetzt werden

Thermoelemente (Typ K oder T) und RTD-Sensoren (Pt100/Pt1000). RTD-Sensoren bieten eine ca. 10-fach höhere Genauigkeit, aber einen kleineren Messbereich, der in den meisten Fällen jedoch ausreichend ist. Temperaturdaten sind für die Kompensation zahlreicher Messgrößen unerlässlich.

Der elektrische Betonwiderstand ist eines der vielseitigsten und wichtigsten Messverfahren. Er korreliert mit dem Feuchtegehalt und damit indirekt mit der Korrosionsrate. Der Betonwiderstand ist bei nahezu allen Schädigungsszenarien als Leit- oder Hilfsgrösse nützlich und eine für den Langzeitbetrieb geeignete Messgrösse. Eingesetzt werden hauptsächlich tiefengestaffelte Systeme.

Für die Erfassung der Bewehrungskorrosion stehen mehrere Verfahren zur Verfügung: Die Potenzialmessung liefert qualitative Hinweise auf den Korrosionszustand. Die Elementstrommessung mit leiterförmig angeordneten Betonstahl-Sensoren detektiert sowohl den Zeitpunkt der Depassivierung, kann aber auch zur Verfolgung des Korrosionsfortschritts verwendet werden. Die lineare Polarisationswiderstandsmessung (LPR) erlaubt ebenfalls Rückschlüsse auf die Korrosionsrate, erfordert jedoch einen Drei-Elektroden-Aufbau und einen Potentiostaten. Da die Anodenfläche in der Regel nicht genau bekannt ist, wird eine quantitative Bewertung der Korrosionsgeschwindigkeit nur mit Vorsicht empfohlen.

Eingebettete ionenselektive Elektroden (z.B. Ag/AgCl) ermöglichen die direkte Chloridgehaltsbestimmung im Porenwasser. IrOx-Elektroden erlauben pH-Messungen. Beide Verfahren sind für die Früherkennung in der Einleitungsphase wertvoll, haben aber noch Herausforderungen bezüglich Langzeitstabilität und Validierung.

Für das AAR-Monitoring sind Dehnungsmessungen (LVDT, Linearpotentiometer, faseroptische Sensoren) besonders relevant. Die Codawelleninterferometrie (CWI) detektiert Mikrostrukturveränderungen im Beton, befindet sich jedoch noch im Forschungsstadium. Akustische Emissionsverfahren können Risswachstum erfassen, erfordern aber komplexe Signalauswertung und kabelgebundene Infrastruktur.

Kommerziell verfügbare Sensorsysteme

Der Bericht gibt einen systematischen Überblick über verfügbare Sensortypen für Neu- und Bestandsbauten. Es existieren zahlreiche Systeme für die Messung des elektrischen Betonwiderstandes und korrosionstechnische Größen wie das Korrosionspotenzial oder der Makroelementstrom. Ebenfalls verfügbar sind IoT-fähige Datenloggersysteme und Cloud-Lösungen für die Speicherung und Visualisierung der Messdaten. Faseroptische Sensoren können für Temperatur-, Feuchte und Dehnungsmessungen eingesetzt werden. Bei Fragestellungen im Zusammenhang mit Schadstoffeintrag oder Korrosion befinden sich FOS noch im Forschungsstadium.

Eine vergleichende Bewertung anhand von Dauerhaftigkeit, IoT-Fähigkeit, Temperaturquerempfindlichkeit, Robustheit, Stromverbrauch und Unterhaltskosten zeigt: Kein einzelnes System ist für alle Anwendungsfälle optimal. Für Korrosions- und Feuchtemessungen eignen sich Widerstands- und Elektrodensysteme gut. Faseroptische Systeme bieten Vorteile bei Mehrpunktmessungen in elektromagnetisch gestörten Umgebungen.

Datenübertragung und IoT-Integration

Für den Langzeitbetrieb von Monitoringsystemen sind Datenlogger und Übertragungstechnologie entscheidend. Der Bericht unterscheidet kabelgebundene Systeme (Feldbusse, Industrial Ethernet) und funkbasierte Systeme. Für das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Infrastrukturbauwerken hat sich LoRaWAN als besonders geeignet erwiesen:

- Sehr geringer Stromverbrauch: Batterielaufzeiten über 5 Jahre
- Grosse Reichweite: mehrere Kilometer Übertragungsdistanz
- Einfache Installation ohne lokale IT-Infrastruktur
- Direkte Cloud-Anbindung mit webbasierter Visualisierung und Alarmwerten

Moderne Datenlogger ermöglichen flexible Messintervalle, Datenaggregation, Alarmwertdefinition und Remote-Zugriff. Konfigurations- und Qualitätssicherungsanforderungen umfassen unter anderem: Temperaturkompensation der Messwerte, Langzeitstabilität der Elektronik und Kompatibilität mit bestehenden Systemen.

Modularer Werkzeugkoffer für die Planung von Monitoringsystemen

Ein zentrales Projektergebnis ist der entwickelte Werkzeugkoffer, der Planern und Bauherren eine strukturierte Vorgehensweise für die Monitoringplanung bietet. Unterschieden werden präventives Monitoring (Einbau beim Neubau) und nachträgliches Monitoring bei Bestandsbauten.

Ein mehrstufiger Entscheidungsbaum leitet anhand von Bauwerkstyp (Tunnel, Brücke, Stützmauer, Galerie), Bauteiltyp und dem Zustand der Abdichtung die relevanten Schädigungsrisikoklassen ab. Daraus werden geeignete Messgrössen und empfohlene Sensordichte abgeleitet. Für jeden Bauwerkstyp existieren spezifische Entscheidungsäste.

Für die Bestimmung der erforderlichen Anzahl Sensoren enthält der Bericht ein statistisches Modell zur Detektionswahrscheinlichkeit und eine ausführliche Tabelle, in der für verschiedene Schädigungsrisikoklassen die sinnvollen Messgrössen und eine Empfehlung für die Sensordichte (Anzahl Sensoren pro m²) zusammengestellt sind.

Bei Bestandsbauten orientiert sich die Sensorauswahl an identifizierten Schädigungsprozessen und technischen Möglichkeiten der Nachrüstung. Eine Eignungsmatrix (Messgrösse vs. Sensormodell) unterstützt die gezielte Auswahl. Nachträgliche Monitoringsysteme können auch zur Qualitätskontrolle nach Instandsetzungen eingesetzt werden.

Praxisbeispiele

Der Bericht erläutert einige Praxisanwendungen bei Neubauten und bestehenden Bauwerken. Die gewählten Monitoringkonzepte können anhand des Werkzeugkoffers verifiziert werden. In zwei Fällen wurde das Überwachungsprojekt mit einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ergänzt.

An einem Tunnelneubau wurden 12 Anodenleiter-Korrosionssensoren in den Tunnelwandsockeln installiert, ergänzt durch LoRaWAN-Datenlogger und Cloud-Anbindung. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigte in drei Szenarien, dass das Monitoring leicht

günstiger ist als periodische Chloridprofilentnahmen, längerfristig voraussichtlich eine Beschichtungsgeneration eingespart werden kann und dank dem Monitoring (Frühwarnsystem) grossflächige Betoninstandsetzungen vermieden werden können. An einer städtischen Brücke (Baujahr 1967–1969, Instandsetzung 2005–2007) wurden 12 Multiringelektroden (MRE) zum Feuchtemonitoring unterhalb der Brückenabdichtung eingebaut. Die Messergebnisse bestätigen die Dichtigkeit der Abdichtung.

An der Zwillingsbrücke «Bolli» (Projekt Küssnacht-Brunnen) wurde UHFB als Verstärkung und Abdichtung eingebaut. Zur Überwachung der UHFB-Dichtigkeit wurden MRE- und CS-402-Feuchtigkeitssensoren installiert. Die Datenübertragung erfolgt via LoRaWAN-IoT in die Cloud, die Visualisierung der Daten über ein Web-Portal. Die langjährigen Messdaten zeigen eine langsame Austrocknung des Betons und bestätigen die anhaltende Dichtigkeit der UHFB-Schicht.

Folgerungen und Empfehlungen

Das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Stahlbetonbauwerken hat einen hohen technischen Reifegrad erreicht. Für Bewehrungskorrosion und AAR stehen marktreife Sensorsysteme, geeignete Datenlogger und IoT-Lösungen zur Verfügung. Der elektrische Betonwiderstand hat sich als zentrales Verfahren etabliert. Herausforderungen bestehen möglicherweise bei der Langzeitstabilität von permanent eingebauten Referenzelektroden (z.B. ERE 20) oder ionenselektiven Elektroden. Für das Monitoring von Frostangriffen existieren noch keine praxistauglichen Lösungen.

Die Praxisbeispiele belegen, dass Dauerhaftigkeitsmonitoring in vielen Fällen wirtschaftlich vorteilhaft ist. Monitoringkosten machen typischerweise unter 1% der Bau- oder Instandsetzungskosten aus. Der Nutzen entsteht durch frühzeitige Schadenerkennung, Optimierung des Instandsetzungszeitpunkts und Verlängerung der Nutzungsdauer.

Die Forschungsstelle empfiehlt, die erarbeiteten Konzepte und Anwendungsempfehlungen in mehrjährigen Pilotprojekten unter Realbedingungen umzusetzen. Dies schafft die Grundlage zur Validierung des Kosten-/Nutzen-Verhältnisses im Vergleich zur bestehenden Erhaltungspraxis, die Identifikation technischer Schwachstellen von Sensorsystemen und Datenübertragungselektronik im Langzeitbetrieb und die technische Weiterentwicklung innovativer Lösungen unter Praxisbedingungen. Ausserdem sollte in Betracht gezogen werden, das ASTRA-Projekt NTech mit einem Teil «Monitoring der Dauerhaftigkeit» zu ergänzen.

Mit einem praxisorientierten, stufenweisen Vorgehen kann das Dauerhaftigkeitsmonitoring in der Schweizer Strasseninfrastruktur langfristig als Standardwerkzeug einer vorausschauenden Erhaltungsstrategie etabliert werden.

Résumé

Situation initiale et objectifs

Une grande partie des infrastructures de transport suisses a atteint ou approche la fin de sa durée de vie planifiée. Les ponts, tunnels, murs de soutènement et galeries sont soumis en permanence à des sollicitations mécaniques et chimiques élevées. Avec des budgets de maintenance limités, cela nécessite une stratégie de conservation ciblée et fondée sur des données.

Le présent projet de recherche vise à examiner et évaluer les technologies de monitoring existantes et nouvelles pour évaluer la durabilité d'un ouvrage, et à élaborer une « boîte à outils » orientée vers la pratique pour les projets futurs. Outre la corrosion des armatures, la réaction alcali-granulat (RAG) et l'attaque par le gel/gel-dégel avec sels fondants sont également prises en compte.

Le projet s'appuie sur le projet OFROU terminé « Technologien zur Überwachung der Infrastruktur (NTech) », qui était principalement axé sur le Structural Health Monitoring (SHM) pour la sécurité structurale. Le présent projet élargit le focus au monitoring de la durabilité, qui occupe jusqu'à présent une place nettement moindre dans la pratique. Les objectifs concrets du projet étaient :

- Examen et évaluation des technologies de monitoring existantes et prévisibles
- Clarification des besoins de l'OFROU
- Proposition de concepts de monitoring adaptés aux constructions neuves et aux ouvrages existants
- Élaboration d'un processus pour la sélection des capteurs et l'instrumentation des éléments en béton

Besoins de la pratique

En guise de coup d'envoi, un atelier d'une journée a eu lieu le 4 juin 2024, auquel ont participé des maîtres d'ouvrage, des expert(e)s d'Allemagne et de Suisse ainsi que les membres du groupe de recherche.

L'Agence fédérale pour les routes (BASt) conçoit le monitoring comme un processus cyclique : de la question posée en passant par le concept, la mesure et l'analyse jusqu'à la décision d'action. Les principales applications concernent jusqu'à présent les ponts en béton précontraint des années 1960 à 1980. Les obstacles à une utilisation plus large sont le manque de clarté sur les avantages, la pénurie de spécialistes et l'absence de normalisation. Des modèles d'appels d'offres clairs, des modèles de rentabilité et des formations systématiques sont requis.

Les CFF surveillent environ 17 000 ouvrages d'art, dont plus de 6 000 ponts, beaucoup d'entre eux âgés de plus de 100 ans. La surveillance s'effectue selon des classes d'intervalle (0 à 3) en fonction des conséquences en cas de défaillance. Le monitoring est utilisé de manière ciblée là où les inspections classiques atteignent leurs limites — par ex. pour les vérifications de fatigue basées sur des mesures. L'intégration des données de

monitoring dans le système de gestion du cycle de vie permet un lien direct avec la préservation de la substance et la planification des mesures.

Pour les mesures à long terme au moyen de capteurs intégrés dans le béton, les systèmes basés sur LoRaWAN ou d'autres systèmes IoT s'imposeront à l'avenir. Des systèmes sans fil, alimentés par batterie et installables à moindre coût sont demandés. Pour la gestion des données, le monitoring lié aux projets et sa prise en compte dans la planification stratégique de la conservation sont centraux. L'analyse de données assistée par IA, les jumeaux numériques et les plateformes de données standardisées sont considérés comme les technologies clés du futur.

Une étude de cas impressionnante a été fournie par le monitoring de 12 ans du plancher intermédiaire du tunnel routier du Gotthard, où l'efficacité d'un traitement hydrofuge a pu être démontrée. La réduction mesurable de l'activité de corrosion a permis de démontrer la valeur économique ajoutée d'un monitoring ciblé.

L'atelier a montré que le monitoring de la durabilité est encore sous-représenté dans les processus de surveillance existants. Un ancrage précoce des stratégies de monitoring dans la conservation des ouvrages devrait être davantage pris en compte à l'avenir.

Mécanismes d'endommagement des ouvrages en béton

Pour les ouvrages d'infrastructure, trois principaux mécanismes d'endommagement sont pertinents, auxquels s'opposent différentes approches de monitoring.

Pour la corrosion des armatures, on distingue principalement la corrosion induite par les chlorures et la corrosion induite par la carbonatation. Dans les deux cas, il y a d'abord une phase d'initiation (pénétration de polluants sans endommagement), puis le déclenchement de la corrosion, et enfin la phase d'endommagement (progression de la corrosion). Le monitoring assisté par capteurs permet de mesurer la pénétration de polluants, de détecter l'activation de la corrosion et de quantifier la progression de la corrosion. Une intervention précoce avant la phase d'endommagement peut réduire considérablement les coûts de réparation.

Dans la réaction alcali-granulat (RAG), la solution poreuse alcaline réagit avec les composants réactifs des granulats ; le gel de silice résultant a un effet gonflant et provoque la fissuration du béton. Il peut s'écouler deux à trois décennies avant qu'un dommage visible n'apparaisse. Grâce au monitoring des expansions et du bilan hydrique du béton, les effets de la RAG peuvent être saisis par des mesures.

Lors du gel de l'eau des pores dans le béton, il se produit des expansions de volume, des fissurations, des effrités et des éclatements de béton. Les systèmes de monitoring pratiques pour ce mécanisme d'endommagement sont encore largement au stade de la recherche. Étant donné que les dommages par le gel et le gel-dégel avec sels fondants sont principalement un phénomène de surface, les examens non destructifs (p. ex. inspection visuelle ou scanning de surface avec analyse d'images) jouent un rôle plus important.

Méthodes de mesure et capteurs pertinents

Le rapport donne un aperçu complet des méthodes de mesure disponibles et des paramètres déterminants pour un monitoring.

La température du béton est une grandeur auxiliaire importante, car par exemple la résistance du béton et le taux de corrosion dépendent fortement de la température. On utilise des thermocouples (type K ou T) et des capteurs RTD (Pt100/Pt1000). Les capteurs RTD offrent une précision environ 10 fois supérieure, mais une plage de mesure plus petite, qui est cependant suffisante dans la plupart des cas. Les données de température sont indispensables pour la compensation de nombreuses grandeurs de mesure.

La résistance électrique du béton est l'une des méthodes de mesure les plus polyvalentes et les plus importantes. Elle est corrélée à la teneur en humidité et donc indirectement au taux de corrosion. La résistance du béton est utile comme grandeur de guidage ou auxiliaire pour presque tous les scénarios d'endommagement et est une grandeur de mesure adaptée au fonctionnement à long terme. On utilise principalement des systèmes échelonnés en profondeur.

Pour la saisie de la corrosion des armatures, plusieurs méthodes sont disponibles : la mesure de potentiel fournit des indications qualitatives sur l'état de corrosion. La mesure du courant macrogalvanique avec des capteurs en acier d'armature disposés en forme d'échelle détecte le moment de la dépassement, mais peut également être utilisée pour suivre la progression de la corrosion. La mesure de résistance de polarisation linéaire (LPR) permet également de tirer des conclusions sur le taux de corrosion, mais nécessite un montage à trois électrodes et un potentiostat. Étant donné que la surface de l'anode n'est généralement pas connue précisément, une évaluation quantitative de la vitesse de corrosion n'est recommandée qu'avec prudence.

Les électrodes ionosélectives intégrées (p. ex. Ag/AgCl) permettent la détermination directe de la teneur en chlorures dans l'eau des pores. Les électrodes IrOx permettent des mesures de pH. Les deux méthodes sont précieuses pour la détection précoce en phase d'initiation, mais présentent encore des défis en termes de stabilité à long terme et de validation.

Pour le monitoring de la RAG, les mesures de déformation (LVDT, potentiomètre linéaire, capteurs à fibre optique) sont particulièrement pertinentes. L'interférométrie par ondes de coda (CWI) détecte les modifications microstructurales dans le béton, mais se trouve encore au stade de la recherche. Les procédés d'émission acoustique peuvent détecter la croissance de fissures, mais nécessitent une analyse de signal complexe et une infrastructure câblée.

Systèmes de capteurs disponibles dans le commerce

Le rapport donne un aperçu systématique des types de capteurs disponibles pour les constructions neuves et les ouvrages existants. Il existe de nombreux systèmes pour la mesure de la résistance électrique du béton et des grandeurs technico-corrosives telles que le potentiel de corrosion ou le courant macro-galvanique. Des systèmes de data loggers compatibles IoT et des solutions cloud pour le stockage et la visualisation des

données de mesure sont également disponibles. Les capteurs à fibre optique peuvent être utilisés pour les mesures de température, d'humidité et de déformation. Pour les questions liées à la pénétration de polluants ou à la corrosion, les FOS se trouvent encore au stade de la recherche.

Une évaluation comparative basée sur la durabilité, la compatibilité IoT, la sensibilité transversale à la température, la robustesse, la consommation d'énergie et les coûts de maintenance montre : aucun système unique n'est optimal pour tous les cas d'application. Pour les mesures de corrosion et d'humidité, les systèmes à résistance et à électrodes conviennent bien. Les systèmes à fibre optique offrent des avantages pour les mesures multipoints dans des environnements à perturbations électromagnétiques.

Transmission de données et intégration IoT

Pour le fonctionnement à long terme des systèmes de monitoring, les data loggers et la technologie de transmission sont décisifs. Le rapport distingue les systèmes câblés (bus de terrain, Ethernet industriel) et les systèmes radio. Pour le monitoring de la durabilité des ouvrages d'infrastructure, LoRaWAN s'est avéré particulièrement adapté :

- Très faible consommation d'énergie : durée de vie des batteries supérieure à 5 ans
- Grande portée : plusieurs kilomètres de distance de transmission
- Installation simple sans infrastructure informatique locale
- Connexion directe au cloud avec visualisation web et valeurs d'alarme

Les data loggers modernes permettent des intervalles de mesure flexibles, l'agrégation de données, la définition de valeurs d'alarme et l'accès à distance. Les exigences en matière de configuration et d'assurance qualité comprennent notamment : la compensation de température des valeurs mesurées, la stabilité à long terme de l'électronique et la compatibilité avec les systèmes existants.

Boîte à outils modulaire pour la planification du monitoring

Un résultat central du projet est la boîte à outils développée, qui offre aux planificateurs et aux maîtres d'ouvrage une approche structurée pour la planification du monitoring. On distingue le monitoring préventif (installation lors de la construction neuve) et le monitoring ultérieur pour les ouvrages existants.

Un arbre de décision à plusieurs niveaux dérive les classes de risque d'endommagement pertinentes sur la base du type d'ouvrage (tunnel, pont, mur de soutènement, galerie), du type d'élément structurel et de l'état de l'étanchéité. Les grandeurs de mesure appropriées et la densité de capteurs recommandée en sont déduites. Des branches de décision spécifiques existent pour chaque type d'ouvrage.

Pour la détermination du nombre de capteurs nécessaires, le rapport contient un modèle statistique pour la probabilité de détection et un tableau détaillé dans lequel les grandeurs de mesure sensées et une recommandation pour la densité de capteurs (nombre de capteurs par m²) sont compilées pour différentes classes de risque d'endommagement.

Pour les ouvrages existants, la sélection des capteurs est orientée vers les processus d'endommagement identifiés et les possibilités techniques de mise à niveau. Une matrice d'aptitude (grandeur de mesure vs modèle de capteur) soutient la sélection ciblée.

Les systèmes de monitoring ultérieurs peuvent également être utilisés pour le contrôle de qualité après réparations.

Exemples pratiques

Le rapport explique quelques applications pratiques pour les constructions neuves et les ouvrages existants. Les concepts de monitoring choisis peuvent être vérifiés à l'aide de la boîte à outils. Dans deux cas, le projet de surveillance a été complété par une analyse de rentabilité.

Pour la construction neuve d'un tunnel, 12 capteurs de corrosion à conducteur d'anode ont été installés dans les socles des parois du tunnel, complétés par des data loggers LoRaWAN et une connexion cloud. L'analyse de rentabilité dans trois scénarios a montré que le monitoring est légèrement moins coûteux que les prélèvements périodiques de profils chlorures, qu'une génération de revêtement peut probablement être économisée et que grâce au monitoring (système d'alerte précoce), les réparations de béton à grande échelle peuvent être évitées.

Sur un pont urbain (construit 1967–1969, remis en état en 2005–2007), 12 électrodes multi-annulaires (MRE) ont été installées pour le monitoring de l'humidité sous l'étanchéité du pont. Les résultats des mesures confirment l'étanchéité.

Sur le pont jumeau « Bolli » (projet Küssnacht-Brunnen), de CFUP a été mis en place comme renforcement et étanchéité. Pour surveiller l'étanchéité de la couche de CFUP, des capteurs d'humidité ont été installés. La transmission de données s'effectue via LoRaWAN-IoT dans le cloud, la visualisation des données via un portail web. Les données de mesure sur plusieurs années montrent un séchage lent du béton et confirment l'étanchéité continue de la couche de CFUP.

Conclusions et recommandations

Le monitoring de la durabilité des ouvrages en béton armé a atteint un haut niveau de maturité technique. Pour la corrosion des armatures et la RAG, des systèmes de capteurs arrivés à maturité commerciale, des data loggers adaptés et des solutions IoT sont disponibles. La résistance électrique du béton s'est établie comme procédé central. Des défis subsistent éventuellement concernant la stabilité à long terme des électrodes ionosélectives ainsi que pour le monitoring du gel, pour lequel il n'existe pas encore de solutions pratiques.

Les exemples pratiques prouvent que le monitoring de la durabilité est économiquement avantageux dans de nombreux cas. Les coûts de monitoring représentent généralement moins de 1% des coûts de construction ou de réparation. Le bénéfice résulte de la détection précoce des dommages, de l'optimisation du moment de la réparation et de la prolongation de la durée d'utilisation.

Recommandations d'action

Le groupe de recherche recommande de mettre en œuvre les concepts élaborés et les recommandations d'application dans des projets pilotes de plusieurs années dans des conditions réelles. Cela crée la base pour valider le rapport coût/bénéfice par rapport à la pratique de conservation existante, identifier les faiblesses techniques des systèmes de capteurs et de l'électronique de transmission de données en fonctionnement

à long terme, et poursuivre le développement technique de solutions innovantes dans des conditions pratiques. En outre, il faudrait envisager de compléter le projet OFROU « NTech » avec une partie « Monitoring de la durabilité ».

Avec une approche pratique et progressive, le monitoring de la durabilité dans l'infrastructure routière suisse peut être établi à long terme comme outil standard d'une stratégie de conservation anticipative.

Summary

Background and Objectives

A large proportion of Swiss transport infrastructure has reached or is approaching the end of its planned service life. Bridges, tunnels, retaining walls and galleries are permanently exposed to high mechanical and chemical stresses. With limited maintenance budgets, this requires a targeted, fact-based preservation strategy.

The present research project aims to review and evaluate existing and novel monitoring technologies for assessing the durability of a structure, and to compile a practice-oriented 'toolbox' for future projects. In addition to reinforcement corrosion, alkali-aggregate reaction (AAR) and frost/frost-de-icing salt attack are also considered.

The project builds on the completed FEDRO project "Technologies for Infrastructure Monitoring (NTech)", which was primarily focused on Structural Health Monitoring (SHM) for structural safety. The present project extends the focus to durability monitoring, which has so far received significantly less attention in practice. Specific project objectives were:

- Review and evaluation of existing and foreseeable monitoring technologies
- Clarification of FEDRO's needs
- Proposal of suitable monitoring concepts for new and existing structures
- Development of a process for sensor selection and instrumentation of concrete components

Practical Needs

As a kick-off, a one-day workshop was held on 4 June 2024, attended by clients, experts from Germany and Switzerland, and members of the research team.

The Federal Highway Research Institute (BAST) views monitoring as a cyclical process: from the initial question, through concept, measurement and evaluation, to the decision on action. Main applications have so far been in prestressed concrete bridges from the 1960s to 1980s. Wider adoption is hindered by unclear benefits, a shortage of specialists and a lack of standardisation. Clear tender templates, economic models and systematic training are required.

Swiss Federal Railways (SBB) monitors around 17,000 engineering structures, including over 6,000 bridges, many are older than 100 years. Monitoring is carried out according to interval classes (0–3) mirroring failure consequences and deployed in a targeted manner where classical inspections reach their limits – e.g. for measurement-based fatigue assessments. The integration of monitoring data into the life-cycle management system enables a direct link with substance preservation and action planning.

For long-term measurements using sensors embedded in concrete, LoRaWAN-based or other IoT systems will prevail in the future. There is growing demand for wireless, battery powered systems that are easy and cost effective to install. For data management, project-related monitoring and consideration in strategic maintenance planning

are central. AI-supported data analysis, digital twins and standardized data platforms are considered the key technologies of the future.

An impressive case study was provided by the 12-year monitoring of the intermediate ceiling of the Gotthard Road Tunnel, where the effectiveness of a hydrophobic treatment could be demonstrated. The measurable reduction in corrosion activity was able to demonstrate the economic value of targeted monitoring.

The workshop showed that durability monitoring is still under-represented in existing monitoring processes. Early integration of monitoring strategies in structural preservation should be given greater consideration in the future.

Damage Mechanisms in Concrete Structures

For infrastructure structures, three main damage mechanisms are relevant, each associated with different monitoring approaches.

For reinforcement corrosion, chloride-induced and carbonation-induced corrosion are primarily distinguished. In both cases, the process starts with an initiation phase (pollutant ingress without damage), followed by corrosion initiation, and subsequently the damage phase (corrosion progression). Sensor-supported monitoring allows measurement of pollutant ingress, detection of corrosion activation, and quantification of corrosion progression. Early intervention before the damage phase can significantly reduce repair costs.

In alkali-aggregate reaction (AAR), the alkaline pore solution reacts with reactive constituents of the aggregate; the silica gel formed in the process swells, causing cracking in the concrete. Two to three decades may pass before visible damage appears. By monitoring expansions and the moisture balance of the concrete, the effects of AAR can be recorded by measurements.

When the pore water in concrete freezes, volume expansions, cracking, scaling and concrete spalling occur. Practical monitoring systems for this damage mechanism are still largely at the research stage. Since frost and frost-de-icing salt damage is primarily a surface phenomenon, non-destructive testing (e.g. visual inspection or scanning with image analysis) is of greater importance.

Relevant Measurement Methods and Sensors

The report provides a comprehensive overview of available measurement methods and key parameters for monitoring.

Concrete temperature is an important auxiliary variable, as the concrete resistance and corrosion rate, for example, are strongly temperature-dependent. Thermocouples (Type K or T) and RTD sensors (Pt100/Pt1000) are used. RTD sensors offer approximately 10 times higher accuracy, but a smaller measurement range, which is however sufficient in most cases. Temperature data are indispensable for compensating numerous measurement variables.

Electrical concrete resistance is one of the most versatile and important measurement methods. It correlates with moisture content and thus indirectly with the corrosion rate. Concrete resistance is useful as a key or auxiliary variable for almost all damage scenarios and is a measurement variable suitable for long-term operation. Depth-graded systems are mainly used.

For recording reinforcement corrosion, several methods are available: potential measurement provides qualitative indications of the corrosion state. Macrocell current measurement with ladder-shaped reinforcing steel sensors detects the time of depassivation, but can also be used to track corrosion progression. Linear polarisation resistance measurement (LPR) also allows conclusions to be drawn about the corrosion rate, but requires a three-electrode setup and a potentiostat. Since the anode surface is generally not precisely known, quantitative assessment of corrosion rate is only recommended with caution.

Embedded ion-selective electrodes (e.g. Ag/AgCl) enable direct determination of chloride content in the pore water. IrOx electrodes allow pH measurements. Both methods are valuable for early detection in the initiation phase, but still have challenges regarding long-term stability and validation.

For AAR monitoring, strain measurements (LVDT, linear potentiometer, fibre-optic sensors) are particularly relevant. Coda wave interferometry (CWI) detects microstructural changes in concrete, but is still at the research stage. Acoustic emission methods can detect crack growth, but require complex signal analysis and wired infrastructure.

Commercially Available Sensor Systems

The report provides a systematic overview of available sensor types for new and existing structures. Numerous systems exist for measuring electrical concrete resistance and corrosion-related variables such as corrosion potential or macrocell current. IoT-capable data logger systems and cloud solutions for storage and visualisation of measurement data are also available. Fibre-optic sensors can be used for temperature, moisture and strain measurements. For questions related to pollutant ingress or corrosion, FOS are still at the research stage.

A comparative evaluation based on durability, IoT capability, temperature cross-sensitivity, robustness, power consumption and maintenance costs shows: no single system is optimal for all applications. For corrosion and moisture measurements, resistance and electrode systems are well-suited. Fibre-optic systems offer advantages for multi-point measurements in electromagnetically disturbed environments.

Data Transmission and IoT Integration

For the long-term operation of monitoring systems, data loggers and transmission technology are decisive. The report distinguishes between wired systems (field buses, industrial Ethernet) and wireless systems. For durability monitoring of infrastructure structures, LoRaWAN has proven particularly suitable:

- Very low power consumption: battery life over 5 years
- Long range: several kilometres transmission distance
- Simple installation without local IT infrastructure
- Direct cloud connection with web-based visualisation and alarm values

Modern data loggers enable flexible measurement intervals, data aggregation, alarm threshold settings and remote access. Configuration and quality assurance requirements include, among others: temperature compensation of measured values, long-term stability of electronics and compatibility with existing systems.

Modular Toolbox for Monitoring Planning

A central project result is the developed toolbox, which offers planners and clients a structured approach for monitoring planning. A distinction is made between preventive monitoring (installation during new construction) and retrofitted monitoring for existing structures.

A multi-level decision tree derives the relevant damage risk classes based on structure type (tunnel, bridge, retaining wall, gallery), component type and the condition of the waterproofing. Suitable measurement variables and recommended sensor density are derived from this. Specific decision branches exist for each structure type.

For determining the required number of sensors, the report contains a statistical model for detection probability and a detailed table compiling the sensible measurement variables and a recommendation for sensor density (number of sensors per m²) for different damage risk classes.

For existing structures, sensor selection is oriented towards identified damage processes and technical possibilities for retrofitting. A suitability matrix (measurement variable vs. sensor model) supports targeted selection. Retrofitted monitoring systems can also be used for quality control after repairs.

Practical Examples

The report explains some practical applications for new and existing structures. The chosen monitoring concepts can be verified using the toolbox. In two cases, the monitoring project was supplemented with a cost-benefit analysis.

In a new tunnel construction, 12 anode conductor corrosion sensors were installed in the tunnel wall bases, supplemented by LoRaWAN data loggers and cloud connection. The cost-benefit analysis in three scenarios showed that monitoring is slightly less expensive than periodic chloride profile sampling, that one coating generation can probably be saved, and that large-scale concrete repairs can be avoided thanks to monitoring (early warning system).

On an urban bridge (built 1967–1969, repaired 2005–2007), 12 multi-ring electrodes (MRE) were installed for moisture monitoring under the bridge waterproofing. The measurement results confirm the tightness of the waterproofing.

On the twin bridge 'Bolli' (Küssnacht-Brunnen project), UHPFRC was installed as reinforcement and waterproofing. To monitor the UHPFRC tightness, MRE and CS-402 moisture sensors were installed. Data transmission is via LoRaWAN IoT to the cloud, data visualization via a web portal. The long-term measurement data show a slow drying of the concrete and confirm the continued tightness of the UHPFRC layer.

Conclusions and Recommendations

Durability monitoring of reinforced concrete structures has reached a high level of technical maturity. For reinforcement corrosion and AAR, market-ready sensor systems, suitable data loggers and IoT solutions are available. Electrical concrete resistance has established itself as a central method. Challenges may exist regarding the long-term stability of ion-selective electrodes and frost monitoring, for which no practical solutions yet exist.

The practical examples demonstrate that durability monitoring is economically advantageous in many cases. Monitoring costs typically represent less than 1% of construction or repair costs. The benefit arises from early damage detection, optimization of the repair timing and extension of the service life.

Recommendations for Action

The research team recommends implementing the developed concepts and application recommendations in multi-year pilot projects under real conditions. This creates the basis for validating the cost-benefit ratio compared to existing preservation practice, identifying technical weaknesses of sensor systems and data transmission electronics in long-term operation, and further technical development of innovative solutions under practical conditions. Furthermore, consideration should be given to supplementing the FEDRO project "NTech" project with a 'Durability Monitoring' component.

With a practice-oriented, stepwise approach, durability monitoring in Swiss road infrastructure can be established in the long term as a standard tool of a proactive preservation strategy.

1 Einleitung

1.1 Grundlagen

Der grösste Teil unserer heutigen Verkehrsinfrastrukturen hat seine Lebensdauer erreicht und wird durch die intensive Nutzung und die vielfältigen Umwelteinflüsse dauerhaft hohen und immer extremer werdenden Beanspruchungen ausgesetzt. Damit mit den zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel ein sicherer Betrieb der Nationalstrassen künftig gewährleistet werden kann, müssen die Mittel zielgerichtet eingesetzt werden, das heisst die Instandsetzungsmassnahmen müssen am richtigen Ort zum richtigen Zeitpunkt umgesetzt werden [1].

Mit dem Einsatz von Überwachungssystemen, bestehend aus Sensortechnik und drahtloser Datenübertragung, können gravierende Schäden, beginnende Schadensmechanismen oder eine negative Veränderung der Einwirkungen schnell und zuverlässig detektiert werden. Andererseits erlauben (teil-)automatisierte und digitale Zustandserfassungsmethoden eine viel effizientere und vor allem viel genauere und umfangreichere Zustandserfassung, als dies bei den herkömmlichen Methoden der Fall ist/war. Durch die Kombination von neuen Technologien können die entsprechenden Massnahmen zur Erhaltung der Bausubstanz rechtzeitig und gezielt eingeleitet werden. Die Digitalisierung bietet zudem neue Möglichkeiten, eine Vielzahl an Daten zu sammeln, zu extrahieren und zu analysieren und somit eine kontinuierliche Diagnose des Zustands eines Bauwerks in der Planung, bei Projekten oder im Betrieb jederzeit zur Verfügung zu stellen.

Während das Structural Health Monitoring (SHM), welches sich in erster Linie mit der Überwachung und Beurteilung von mechanischen Eigenschaften auf Tragwerksniveau befasst (statische und dynamische Tragwerksantwort zu einer bestimmten Lasteinwirkung, Schadenserkennung und -lokalisierung), schon seit den 1990er Jahren Ziel der Forschung ist und bereits erfolgreich in der Praxis eingesetzt wird, ist das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Bauwerken noch wenig bekannt und fand in der Praxis bisher oft nur einen experimentellen, stiefmütterlichen Einsatz.

Dauerhaftigkeitsmonitoring bezeichnet die systematische, zeitlich strukturierte Erfassung, Auswertung und Beurteilung von Zustandsgrößen eines Tragwerks oder Baustoffs, die für die Aufrechterhaltung der Dauerhaftigkeit im Sinne der Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und Tragsicherheit über die geplante Nutzungsdauer maßgebend sind. Im Unterschied zum strukturellen Monitoring, das primär auf Verformungen, Schwingungen oder Schnittgrößen zielt, erfasst das Dauerhaftigkeitsmonitoring insbesondere:

- Umgebungs- und Einwirkungsgrößen (z. B. Chloridexposition, CO₂-Konzentration, Temperatur, Feuchtigkeit);
- Schädigungsrelevante Zustandsgrößen im Baustoff (z. B. Karbonatisierungstiefe, Chloridprofil, Korrosionspotential der Bewehrung) sowie;
- Indikatoren des Widerstandsabbaus (z. B. Rissbreiten infolge Bewehrungskorrosion, Betondeckung).

Zu den dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen des Stahlbetons zählen die Bewehrungskorrosion (schlaff und vorgespannt) aufgrund einer Chloridkontamination und/oder Betonkarbonatisierung, der Frost-/Frosttausalzangriff und die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR).

Die Erfahrungen der Forschungsstelle mit Online-Monitoring zeigen, dass eine kontinuierliche Überwachung einen entscheidenden Vorteil gegenüber periodischen Inspektionen oder sporadischen Messungen (z.B. einmal pro Jahr) hat. Da einige der Parameter wie der spezifische Widerstand und der Korrosionsstrom stark von den Umgebungsbedingungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) beeinflusst werden, können mit der neuen Messtechnik sowohl kurzfristige Veränderungen wie z.B. tägliche Schwankungen als auch langfristige Veränderungen, die auf saisonale Schwankungen zurückzuführen sind, erfasst werden. Dieses Verfahren erlaubt es, zwischen Perioden geringer oder erhöhter Korrosionsaktivität zu unterscheiden. Das Monitoring bietet hier, gemeinsam mit Entwicklungen in der Digitalisierung, neue Chancen für ein besseres Verständnis der Dauerhaftigkeit, sowie für eine verfeinerte Instandsetzungsplanung. Dieses Projekt soll dazu beitragen, die Bedürfnisse der Praxis abzuklären und die Chancen des Dauerhaftigkeits-Monitorings aufzuzeigen.

1.1.1 Nationale und internationale Forschung

Die nationale und internationale Forschung im Bereich der Sensor- und Messtechnik zum Monitoring der Bewehrungskorrosion im Stahlbeton ist fortgeschritten und verschiedene Technologien haben sich schon seit längerem in der Praxis etabliert [2], [3]. Nebst elektrischen Methoden zur Bestimmung der Betonfeuchte (elektrischer Widerstand), der Korrosionsströme und -potentiale [4], [5] und des linearen Polarisationswiderstands, welche seit Jahren erfolgreich angewendet werden, beschäftigt sich die aktuelle Forschung mehr mit chemischen Sensoren zur Bestimmung der korrosionskritischen Parameter (Chlorid- und pH-Sensoren) [6]. Diese müssen ihre Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit in der Praxis jedoch noch beweisen. In Deutschland ist das DGZfP-Merkblatt B12 [3] ein erster Versuch, die mit Monitoring beschäftigten Anwender mit den bereits etablierten Methoden des Korrosionsmonitorings für Stahl- und Spannbetonbauwerke vertraut zu machen und sie bei der Planung und Betrieb in der Praxis zu unterstützen.

Daten von Dauerhaftigkeitsmonitoring können mittels Ansätze zur Lebensdauerplanung (neue Bauwerke oder Aktualisierung der Lebensdauerplanung bestehender Bauwerke) oder zur Berechnung der Restlebensdauer verwendet werden [7]. Von der Bundesanstalt für Strassen und Verkehrswesen «BAST» existieren diverse neuere Berichte und Planungshilfen, die beim Einsatz von Monitoring im Rahmen der Bauwerkserhaltung als Unterstützung beigezogen werden können [8], [9], [10], [11], [12], [13].

Einen guten Überblick bieten auch die ausgewählten Beiträge des 3. Weltkongresses für Zustandsüberwachung (WCCM 2024), welche in drei Tagungsbänden zusammengestellt wurden [14]. Die Konferenzartikel befassen sich mit Methoden der Zustandsüberwachung, darunter Schwingungs-, Akustik-, Optik-, Elektromagnetismus-, Infrarot-Wärmebild-, geführte Wellen- und Spannungsmessungen usw. Zu den behandelten Themen gehören Signalerfassung und -verarbeitung, Messgeräte und Methoden der Zustandsüberwachung, Diagnose, Bewertung und Vorhersage sowie fortschrittliche Technologien der Zustandsüberwachung. Die Bände behandeln zudem die vielfäl-

tigen Anwendungsmöglichkeiten der Zustandsüberwachung bei Bauteilen und Anlagen in verschiedenen Branchen.

Die Forschung im Bereich AAR-Monitoring ist etwas weniger aktiv und behandelt vor allem die Folgen einer schädigenden AAR (Betonexpansion, Rissbildung) sowie die Einflussgrößen der Reaktionskinetik (Betonfeuchte, Temperatur). Wir selbst haben seit längerer Zeit Monitoring-Erfahrung mit AAR-geschädigten Bauwerken (z.B. Monitoring des Langzeitexpansionsverhaltens von verstärkten, AAR-geschädigten Stützmauern an der Nationalstrasse N09 und N12, Monitoring der Betonfeuchte und der Expansion nach der Instandsetzung von AAR geschädigten Stützmauern an der Simplonpassstrasse [15]. Ein weiteres Langzeit-AAR-Monitoringprojekt steht kurz vor dem Start (N09, Viaduc de Riddes). Seitens SHM hat [16] ein interessantes Anwendungsbeispiel zur Beurteilung des Tragverhaltens einer AAR-geschädigten, mit UHFB verstärkten Brückenplatte mittels Vibrations-Messungen und modalen Analyse publiziert.

Im Bereich des Frostangriffs (mit oder ohne Tausalze) auf Beton gibt es kaum Forschung zum Thema Monitoringsysteme. Da es sich bei Frostschäden hauptsächlich um ein Oberflächenproblem handelt welches relativ einfach bei Bauwerksinspektionen diagnostiziert werden kann, ist dieser Schädigungsmechanismus weniger relevant für ein Monitoring. Es gibt Ansätze, die klimaabhängigen, frostkritischen Einwirkungen messtechnisch zu erfassen (Wassersättigung des Betons und Temperatur, Gefrier- und Auftauzyklen über das Jahr) und daraus das Frostpotenzial im Beton abzuleiten. Seitens ZfP gibt es Ansätze, Frostschäden (Abplatzungen) mittels optischer Oberflächenanalyse zu erfassen und zu quantifizieren.

Auf Systemebene des Dauerhaftigkeits-Monitorings (Integration von verschiedenartigen Sensoren und Datenquellen, Datenübermittlung und -aggregation) ist die Forschung noch relativ jung. Eine gute Übersicht über die Möglichkeiten von automatisierten (intelligenten) Monitoring-Systemen im Betonbau findet sich im CIRIA-Bericht von [17]. Zum Monitoring von Stahlbetonbrücken liefert [18] einen umfassenden Sachstandbericht mit generellen Empfehlungen für effiziente Instrumentierungs- und Messkonzepte. Die aktuellen Entwicklungen rund um das Internet-of-Things (IoT) haben grosses Potenzial für das Bauwerksmonitoring. Dazu hat [19] eine IoT-basierte Plattform für Structural Health Monitoring (SHM) vorgeschlagen. IoT-basierte Monitoringsysteme dienen dazu, Langzeitmessungen mit einer grösseren Anzahl an kostengünstigen Sensoren, kontinuierlich und automatisch mit sofortiger Datenübertragung auf einen Datenserver im Internet durchzuführen. Erste Vorschläge für ein IoT-basiertes Korrosions-Monitoring von Stahlbetonbauwerken gibt es bereits, jedoch nur in konzeptueller Form [20]. Hinsichtlich der Zuverlässigkeit eines Monitoringsystems, d.h. der Detektionswahrscheinlichkeit von Schadstellen, spielt bei einem sensorbasierten System mit Punktmessungen die Verteilung, Anzahl und Art der Sensoren eine wesentliche Rolle [21].

Im Bereich Datenauswertung und Schädigungsbeurteilungen und -prognosen hat sich die Forschung bisher hauptsächlich mit modellbasierten Ansätzen befasst [22]. Da Dauerhaftigkeitsmodelle sehr komplex sein können und von zahlreichen Parametern abhängen, gab es in letzter Zeit auch Vorschläge, die Daten-Zeitreihen modellfrei mit

künstlicher Intelligenz-basierten Datenanalysemethoden auszuwerten [23], [20]. Mit der wahrscheinlichen Zunahme an Daten (IoT, bigdata) werden solche Methoden sicher noch an Bedeutung gewinnen. Die Robustheit und Genauigkeit solcher Analysen von Schädigungsprozessen im Bereich der Dauerhaftigkeit muss sich jedoch noch zeigen.

1.2 Ziele des Forschungsprojektes

Ziel des vorliegenden Projektes ist es zu eruieren, welche bestehenden und neuartigen Monitoring-Technologien dem ASTRA einen Mehrwert hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Kunstbauten bringen und diese als eine Art «Werkzeugkoffer» zusammenzustellen, so dass sie später in Pilotprojekten erprobt und gegebenenfalls weiterentwickelt werden können. Neben der Bewehrungskorrosion werden auch die Technologien für die AAR- und Frostangriff-Monitorings untersucht. Im Detail sollen folgende Projektziele verfolgt werden:

- Sichten und Bewerten von bestehenden und aufkommenden Technologien
- Abklärung Bedürfnisse und zur Verfügung stehende Mittel seitens ASTRA
- Überprüfung der Kompatibilität neuer Technologien mit bestehenden Systemen
- Übersicht über eine mögliche Nutzung von artfremden Datenquellen
- Vorschlag geeigneter Monitoringkonzepte
- Empfehlung von Themen für Pilot- und weitere Forschungsprojekte
- Erarbeitung eines Prozesses für die Auswahl und Instrumentierung von Pilotprojekten und eines Konzepts für den Wissenstransfer
- Empfehlungen für die Über- bzw. Erarbeitung neuer Standards (Richtlinien, Merkblätter)

Mit dem kürzlich abgeschlossenen ASTRA-Projekt «NTech» [24] wurden Monitoring-technologien zusammengestellt und bewertet. Massgebend geht es dabei um Monitoring für die Tragsicherheit. Sensoren und Monitoringverfahren für die Dauerhaftigkeit werden lediglich angeschnitten und werden deshalb in diesem Projekt vertieft betrachtet.

1.3 Methodik

Der Forschungsbericht ist wie folgt aufgebaut:

- Als Kick-Off des Forschungsvorhabens fand am 04.Juni 2024 ein eintägiger Workshop statt, der der Klärung der Bedürfnisse des ASTRA diente. Eine Zusammenfassung des Workshops und der dort gezeigten Präsentationen enthält Kap. 2.
- In Kap. 3 werden die für Infrastrukturbauwerke wesentlichen Schädigungsmechanismen von Beton und Bewehrung und mögliche Messgrössen für ein Monitoring während der unterschiedlichen Schädigungsphasen vorgestellt.
- Kap. 4 enthält eine detaillierte Darstellung der zuvor eingeführten Messgrössen und eine Beschreibung der zugehörigen Messverfahren.
- Eine Zusammenstellung marktreifer Sensorsysteme für das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Infrastrukturbauwerken enthält Kap. 5, eine Zusammenstellung der zugehörigen Datenakquisitionsgeräte und Datenlogger Kap. 6.

- In Kap. 7 wird der aktuelle Stand der Technik in der Datenübertragung für Monitoringsysteme und der Einbindung von Monitoringsysteme in IoT-Lösungen präsentiert.
- Aufbauend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel enthält Kap. 8 eine kritische Beurteilung der verfügbaren Monitoringsysteme und Sensoren und anwendungsfallbezogene Empfehlungen für geeignete Sensorsysteme.
- In Kap. 9 wird aus den vorherigen Ergebnissen eine Standardvorgehensweise entwickelt, in der - getrennt für Neu- und Bestandsbauten – für unterschiedliche Bauwerks- und Bauteiltypen und mögliche Schädigungsarten Empfehlungen zu Sensorart, Anzahl und Positionierung abgeleitet werden.
- Diese Systematik wird in Kap. 10 anhand von drei realen Anwendungsbeispielen für unterschiedliche Anwendungsfälle (Tunnelneubau, Brückeninstandsetzung, AAR-Instandsetzung Stützmauer) illustriert.
- Der Forschungsbericht schliesst in Kap. 11 mit Empfehlungen zum weiteren Vorgehen.

2 Bedürfnisse der Praxis, Workshop vom 4. Juni 2024

Zur Klärung der Bedürfnisse des ASTRA für Monitoring der Dauerhaftigkeit wurde von der Forschungsstelle am 4. Juni 2024 ein eintägiger Workshop mit dem Titel «Monitoring der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken: Bedürfnisse der Praxis und Chancen neuer Entwicklungen» durchgeführt. Teilgenommen haben verschiedene Expertinnen und Experten aus Deutschland und der Schweiz. Während dem Workshop wurden Anforderungen an das Monitoring bzw. die Überwachung von Bauwerken für die Instandsetzung aus Sicht von Bauherren, Anbietern von Monitoring Verfahren und der Forschung angesprochen. Konkret wurden die Themen gemäss **Tabelle 1** präsentiert und diskutiert. In den nachfolgenden Kapiteln wird von jedem Experten/Referenten eine Zusammenfassung seiner Ausführungen und die Ergebnisse der Diskussion wiedergegeben.

Präsentationen des Workshops vom 4. Juni 2024

Referent/in	Zugehörigkeit	Thema/Präsentation
Dr. Yves Schiegg	TFB AG, Baustoffprüflabor	Einführung, Workshop Leitung
Dr. Iris Hindersmann	Bundesanstalt für Strassenwesen, bast	Herausforderungen und Bedürfnisse für den Einsatz von Monitoring
Dr. Ann Schumacher	Schweizerische Bundesbahnen, SBB	Dauerhaftigkeit im Ingenieurbau der SBB
Dr. Till F. Mayer	Ingenieurbüro Schiessl · Gehlen · Sodeikat	Sensoren – Stand, zukünftige Anforderungen
Dr. Frank Spörel	Bundesanstalt für Wasserbau, BAW	Langzeiterfahrungen zum Dauerhaftigkeitsmonitoring im Verkehrswasserbau
Prof. Dr. Rade Hajdin	Infrastructure Management Consultants GmbH	Umgang mit Daten – Erfassung, Analyse und Visualisierung
Dr. Johannes Lohner	Sika Schweiz AG, CONCRETELY Bauwerkserhaltung 4.0	Datenmanagement – Bauteil Monitoring
Dr. Pascal Kronenberg	TFB Romandie SA, Prüflabor	Entwicklung und Anwendung
Dr. Martin Brem & Dr. Johannes Lohner	Schweizerische Gesellschaft für Korrosionsschutz	A long-term study on the effect of a hydrophobic treatment on the moisture balance and durability of a reinforced concrete structure in a road tunnel

Tabelle 1: Präsentationen des Workshops vom 4. Juni 2024

2.1 Einleitung

Als Einleitung zum Workshop wird von Yves Schiegg erläutert, in welchen Fällen ein Monitoring der Dauerhaftigkeit sinnvoll ist. Stahlbeton ist für Infrastrukturbauten ein kostengünstiges und dauerhaftes Baumaterial. Trotzdem weisen viele Bauwerke Korrosionsschäden an der Bewehrung oder Schäden am Beton auf. Nicht immer können solche Schädigungen rechtzeitig erkannt und instandgesetzt werden. Mit einer proaktiven Erhaltungsstrategie, die eine gezielte Überwachung und den Einsatz von Sensortechnik beinhaltet, können die hohen Kosten für die Einhaltung der geplanten Nutzungsdauer verringert werden.

Es gibt verschiedene Gründe, weshalb schadhafte Stahlbetonbauten während längerer Zeit nicht instandgesetzt werden. Bei solchen Bauten kann eine messtechnische Überwachung der Zustandsentwicklung sinnvoll sein. Gleiches kann auch für die Erfolgskontrolle von Instandsetzungsmassnahmen, von nicht inspizierbaren Bauteilen oder für die Früherkennung von Schädigungsprozessen gelten. Für Dauerhaftigkeitsüberwachungen sind heute verschiedene Arten von Sensoren und der zugehörigen Messtechnik auf dem Markt erhältlich. Bei Bedarf kann ein solches Messsystem mit zusätzlichen Sensoren wie Extensometern, faseroptischen Sensoren oder Kraftaufnehmern ergänzt werden (z.B. für das Monitoring von AAR-geschädigten Bauwerken). Bei Neubauten oder bestehenden Bauwerken erlauben moderne Sensoren die Messung wichtiger Kenngrössen der Dauerhaftigkeit wie z.B.: Korrosionsstrom, Korrosionspotential, elektrischer Betonwiderstand und Betontemperatur. Diese Parameter bilden die Grundlage für die Beurteilung des Korrosionszustandes der Bewehrung, des Schadenfortschritts und des Feuchtehaushaltes im Beton. Da diese Messgrössen aufgrund der klimatischen Bedingungen stark schwanken, braucht es ein geeignetes Mess- und Datenerfassungssystem, mit dem geeignete Messintervalle gewählt werden können. Diese Systeme sollten eine drahtlose Datenübermittlung erlauben (Funk, Mobilfunknetz).

2.2 Iris Hindersmann – Herausforderungen und Bedürfnisse für den Einsatz von Monitoring

Iris Hindersmann stellt das strategische Vorgehen der BASt und der AG «Monitoring» zur Förderung von Dauerhaftigkeitsmonitoring in der Bundesfernstrasseninfrastruktur vor. Ziel ist die Unterstützung der Strassenbauverwaltungen bei der Integration von Monitoring in die Bauwerkserhaltung. Monitoring wird als zyklischer Prozess verstanden – von der Definition der Fragestellung über die Konzepterstellung, Messung, Auswertung bis hin zur Bewertung und Integration in Massnahmenentscheidungen. Hauptanwendungen finden sich bislang bei Spannbetonbrücken der 1960er bis 1980er Jahre. Herausforderungen liegen in der fehlenden Verbreitung, begründet durch mangelndes Fachwissen, unklaren Nutzen und hohe Komplexität. Die AG Monitoring arbeitet an der Systematisierung über Anwendungsfälle, der Entwicklung von Regelwerken und der Förderung wirtschaftlicher Bewertungsansätze (z. B. Value of Information). Der Bedarf liegt in klaren Ausschreibungsvorlagen, der Etablierung von Standards und der Entwicklung praktikabler Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Ziel ist ein strategischer und verstetigter Einsatz von Monitoring.

Grösste Herausforderungen

- Komplexität von Monitoring-Anwendungen;
- Fachkräftemangel;
- Fehlende Nutzen Kommunikation.

Zukünftiger Bedarf

- Standardisierung;
- Wirtschaftlichkeitsmodelle;
- Systematische Schulung.

2.3 Ann Schumacher – Dauerhaftigkeit im Ingenieurbau der SBB

Ann Schumacher erläutert das Instandhaltungs- und Monitoringkonzept der SBB-Infrastruktur, das über rund 17'000 Ingenieurbauwerke mit Fokus auf über 6'000 Brücken verfügt, viele davon mit einem Alter von über 100 Jahren. In vielen Fällen handelt es sich dabei um Stahlbrücken. Die Überwachung erfolgt gemäss Intervallklassen (0–3), abgestuft nach Versagenskonsequenzen. Hauptinspektionen führen zur Klassifikation der Zustände (1–5), auf deren Basis Massnahmen definiert und Prioritäten gesetzt werden. Beispielhaft wird die Aarebrücke in Uttigen vorgestellt, bei der Ermüdungsnachweise auf Basis von real gemessenen Spannungswerten durchgeführt wurden. Die SBB nutzt dabei ein Life-Cycle-Management-System, das Monitoringdaten direkt mit Substanzerhalt, Massnahmenplanung und Wirtschaftlichkeitsanalysen verknüpft. Herausforderungen bestehen im Bau unter Betrieb, in Denkmalschutzvorgaben sowie in der zunehmenden Digitalisierung. Ziel ist es, Monitoring gezielt dort einzusetzen, wo klassische Inspektionen an ihre Grenzen stossen, und gleichzeitig die Planungs- und Entscheidungsprozesse im Ingenieurbau zu professionalisieren.

Grösste Herausforderungen

- Bauen unter Betrieb;
- Digitalisierungskomplexität;
- Denkmalschutzanforderungen.

Zukünftiger Bedarf

- Integration von Monitoringdaten in Planungsprozesse;
- Weiterentwicklung von Ermüdungsprognosen.

2.4 Till F. Mayer – Sensoren: Stand und zukünftige Anforderungen

Till Felix Mayer gibt einen umfassenden Überblick über aktuelle Sensoren zur Erfassung von Dauerhaftigkeitsparametern in Stahlbetonbauwerken. Er stellt verschiedene Sensorlösungen vor, die in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen zum Einsatz kommen. Die Multiring-Elektrode (MRE) erlaubt ein feinstufiges Feuchteprofil durch Messung des Wechselstromwiderstands zwischen benachbarten, im Beton eingebetteten Stahrlingen. Die Anodenleiter mit Betonstahlsensoren auf unterschiedlicher Tiefe im

Überdeckungsbeton erlaubt die Detektion der Depassivierung der Bewehrung durch Chloride und/oder Karbonatisierung. Fallbeispiele aus den Autobahnprojekten A96 und A99 zeigen die Anwendung: In der A96-Galerie wurden Hydrophobierungen überwacht, im Projekt A99 die Leistungsfähigkeit von Top12-Stahl im Vergleich zu herkömmlichem Betonstahl untersucht. Darüber hinaus beschreibt Till Mayer auch Sensorprinzipien zur Erfassung von Mikrorissbildung, etwa durch Codawelleninterferometrie (CWI). Die Anforderungen an zukünftige Systeme betreffen vor allem Langlebigkeit, Robustheit, Verlässlichkeit unter Baustellenbedingungen sowie die Fähigkeit zur Integration in Langzeit- und Lebensdaueranalysen. Er unterstreicht die Relevanz der Sensorik für die Prognose und Interpretation von Dauerhaftigkeitseigenschaften sowie zur Validierung von Instandsetzungsstrategien.

Grösste Herausforderungen

- Sensorrobustheit im Bauumfeld;
- Integration in Langzeitmodelle.

Zukünftiger Bedarf

- Standardisierte Sensorplattformen;
- multifunktionale Sensorplattformen;
- hohe Zuverlässigkeit.

2.5 Frank Spörel – Langzeiterfahrungen zum Dauerhaftigkeitsmonitoring im Verkehrswasserbau

Erfahrungen aus rund 20 Jahren Praxisbeobachtung und Forschung im Verkehrswasserbau werden von Frank Spörel präsentiert. Im Zentrum stehen Monitoringstrategien zur Erfassung von Schäden durch Frost, Chloride und Karbonatisierung. Ziel des Monitorings ist die rechtzeitige Erkennung kritischer Zustände und die Ableitung geeigneter Erhaltungsmaßnahmen. Als Schlüsselparameter gilt der Elektrolytwiderstand, der stark mit dem Sättigungsgrad und der Temperatur des Betons korreliert. Besonders die Multiring-Elektrode (MRE) hat sich als zuverlässiges Instrument bewährt. Frank Spörel verweist jedoch auf deutliche Unterschiede zwischen Labor- und Praxisverhalten, insbesondere beim Frostangriff. Diese Diskrepanzen erschweren die Interpretation der Messergebnisse. Weitere Herausforderungen bestehen in der langfristigen Datenauswertung, in der Frage der Verantwortlichkeit und in der Dauerhaftigkeit der Monitoringtechnik selbst. Der Referent betont ausserdem die Relevanz von Baustoffentwicklungen wie klinkerarmen Zementen und verweist auf die Notwendigkeit, Monitoringdaten stärker mit KI-gestützten Verfahren auszuwerten. Abschliessend fordert er die Integration des Monitorings in Inspektionsprozesse und die Entwicklung von Strategien zur Definition von Grenzzuständen.

Grösste Herausforderungen

- Abweichung Labor/Praxis;
- Langzeitstabilität der Sensorik;
- unklare Verantwortlichkeiten.

Zukünftiger Bedarf

- Strategien zur Grenzwertdefinition;

- KI-gestützte Dateninterpretation;
- Systemintegration in Prüfprozesse.

2.6 Rade Hajdin – Umgang mit Daten – Erfassung, Analyse und Visualisierung

Rade Hajdin zeigt in seinem Beitrag, wie datengetriebene Methoden und physikalische Modelle zur Zustandserfassung und Lebensdauerprognose von Bauwerken zusammengeführt werden können. Im Rahmen des ASTRA-Projektes NTech wurden Technologien systematisch katalogisiert und über einen digitalen Zugang verknüpft. Die Datenerfassung basiert u.a. auf 3D-Scans, Fotogrammetrie und manueller Befundung, ergänzt durch KI-gestützte Bildauswertung, z.B. konvolutionale neuronale Netze (KNN) zur Erkennung von Abplatzungen. Die Datenintegration erfolgt modellbasiert: Monte-Carlo-Simulationen auf Basis von DURACRETE-Modellen erlauben statistische Prognosen über Korrosionsfortschritt und Abplatzungen. Zusätzlich kommen Markov-Ketten basierte Zeitreihenmodelle zum Einsatz, die auch unvollständige Datensätze integrieren können. Die Modelle ermöglichen es, Wahrscheinlichkeiten von Zustandsänderungen über die Zeit zu analysieren und bieten einen strukturierten Rahmen für Zustandsbewertung und Instandhaltungsplanung. Rade Hajdin fordert die Kombination von Expertenwissen, strukturierten Zustandsdaten und KI zur verbesserten Tragwerksdiagnostik und -prognose.

Grösste Herausforderungen

- Integration heterogener Datenquellen;
- Unsicherheiten in Prognosemodellen.

Zukünftiger Bedarf

- KI-gestützte hybride Modelle;
- strukturierte Datenplattformen;
- standardisierte Schnittstellen.

2.7 Johannes Lohner – Umgang mit Daten: Erfassung, Analyse und Visualisierung

Johannes Lohner beleuchtet das Thema aus Sicht der Datenflüsse und des organisatorischen Datenmanagements. Er betont, dass Monitoring nur dann Mehrwert liefert, wenn Daten systematisch erhoben, korrekt verarbeitet und sinnvoll interpretiert werden. Er unterscheidet zwischen projektbezogenem Monitoring zur Qualitätssicherung und portfolioorientiertem Monitoring zur strategischen Erhaltungsplanung. Zwei Ansätze stehen sich gegenüber: der ingenieurbasierte Bottom-up-Ansatz (technische Risikoanalyse) und der statistisch-top-down-Ansatz (z. B. Machine Learning, Anomalieerkennung, Deep Learning). Herausforderungen liegen in der Datenqualität, im Sensorfehlverhalten, in der Datenkompatibilität und Interoperabilität. Johannes Lohner zeigt verschiedene Übertragungsmodelle (Dashboard vs. Eigentümercloud), verweist auf offene Datenformate, APIs und das Potenzial digitaler Zwillinge. Alarmierungssysteme, Konfidenzintervalle, Kalman-Filter und konforme Inferenzmethoden bilden die

Grundlage für belastbare Entscheidungsunterstützung. Ziel ist eine integrative, skalierbare und zukunftsfähige Infrastruktur für Datenmanagement im Bauwerksmonitoring.

Grösste Herausforderungen

- Datenhoheit;
- Systembrüche;
- Datenverarbeitung in Echtzeit.

Zukünftiger Bedarf

- Digitale Zwillinge;
- offene Schnittstellen;
- KI-gestützte Anomalieerkennung.

2.8 Pascal Kronenberg – Entwicklung und Anwendung

Pascal Kronenberg stellt ein praxisorientiertes, IoT-basiertes Monitoringsystem vor, das speziell auf die Anforderungen im Bauwesen zugeschnitten ist. Kern des Systems ist die Nutzung von LoRaWAN (Low Power Wide Area Network), das eine drahtlose, energieautonome Sensorvernetzung erlaubt. Sensoren messen Korrosionsstrom, Potenzial, Betonfeuchte, Temperatur, Impedanz und Rissbewegung. Die Daten werden kontinuierlich in die Cloud übertragen und über ein webbasiertes Dashboard visualisiert. Das System erlaubt die Definition von Warnschwellen, Langzeitaufzeichnung und Datenaggregation. Praxisbeispiele wie das AAR-Monitoring an einer Stützmauer zeigen die Umsetzbarkeit. Vorteile sind die hohe Skalierbarkeit, niedrige Installationskosten, lange Batterielaufzeiten (>5 Jahre) und die Unabhängigkeit von lokaler IT-Infrastruktur. Pascal Kronenberg argumentiert, dass IoT-basierte Systeme besonders für Dauerhaftigkeitsschäden geeignet sind, die mit Umweltparametern wie Feuchte und Temperatur korrelieren. Ziel ist eine robuste, flexible und wartungsarme Monitoringplattform zur Früherkennung und Entscheidungsunterstützung.

Grösste Herausforderungen

- Datensicherheit;
- langfristige Energieautonomie;
- Umgebungsstabilität.

Zukünftiger Bedarf

- Skalierbarkeit;
- Kosteneffiziente IoT-Standards für Infrastrukturmonitoring.

2.9 Martin Brem und Johannes Lohner – Langzeitstudie zur Wirksamkeit einer Hydrophobierung in einem Strassentunnel

Diese Langzeitstudie befasst sich mit der Wirkung einer silanbasierten Hydrophobierung, die 2006 an der Zwischendecke des Gotthard-Strassentunnels aufgetragen wurde, um chloridinduzierte Korrosion zu verlangsamen. Sensoren erfassen Parameter wie Korrosionsstromdichte, Betonfeuchte, Temperatur und Widerstand. Die Daten zeigen über einen Zeitraum von 12 Jahren eine signifikante Reduktion des Feuchteintrags sowie eine messbare Absenkung der Korrosionsaktivität in behandelten Bereichen. Besonders bemerkenswert ist die Erkenntnis, dass der Feuchteintrag nicht wie angenommen durch Spritzwasser, sondern durch winterliche Kondensation entsteht. Das Monitoring nutzt LoRaWAN und Cloudtechnologie und erlaubt eine kontinuierliche Überwachung auch ohne durchgehende Stromversorgung. Durch den Einsatz des Systems konnte eine geplante Totalsanierung (Kostenpunkt: 175 Mio. CHF) aufgeschoben werden. Die Studie demonstriert eindrucksvoll das Potenzial von zielgerichtetem Monitoring zur Schadensvermeidung und Lebensdauerverlängerung.

Grösste Herausforderungen:

- Kondenswasser als unerkannte Schadensursache;
- Langzeitstabilität.

Zukünftiger Bedarf

- Praxisvalidierung präventiver Massnahmen;
- verstärkte Nutzung cloudbasierter Langzeitdaten.

2.10 Generelle Zusammenfassung des Workshops

Aus Sicht der Anbieter und Forschung sollte der Bestand mit Hilfe von Monitoring in Versagenskonsequenzen und in Intervallklassen eingeteilt und anhand der Intervallklassen die Überwachungsintensität festgelegt werden. Im Allgemeinen erfolgt die Überwachung im Wesentlichen durch visuelle Kontrolle, vereinzelt (Tunnel) mittels Zustands-Mapping, und bei gering dokumentierten Bauwerken teils mit Drohneneinsatz. Anhand der Zustandserfassung erfolgt die Kategorisierung in Zustandsklassen. Monitorings Strategien finden derzeit erst Eingang im Prozessschritt Massnahmenplanung nicht im Prozessschritt Überwachung, was für die Zukunft ggf. denkbar wäre. Es wurde diskutiert, dass das derzeit Hauptaugenmerk die Ermüdung darstellt, die Dauerhaftigkeit und der Korrosionsschutz sind derzeit noch unterrepräsentiert. Es wurden die Verfahren der Messwertbasierten Ermüdungsnachweise diskutiert. Für zukünftiges Monitoring steht bei der SBB kein Host zur Verfügung. Auch hier erfolgt die Datenspeicherung beim Ingenieurbüro, welches die Zustandserfassung durchgeführt hat. Die Resultate sind im SAP basierten Infrastrukturdatenbankmanagement der SBB gespeichert. Das Datenbankmanagement lässt keine Rohdatenspeicherung zu.

3 Schädigungsmechanismen

3.1 Übersicht

In der nachfolgenden Übersicht (Abbildung 1) sind die für Infrastrukturbauwerke relevanten Schädigungsmechanismen in Bewehrungs- und Betonkorrosion aufgeteilt. Die Betonkorrosion beschränkt sich an dieser Stelle auf die bei Verkehrsbauwerken am häufigsten auftretenden Schädigungsmechanismen Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) und Frost-Tausalz-Angriff. Bei der Bewehrungskorrosion werden die Fälle Korrosion infolge Karbonatisierung und chloridinduzierte Korrosion unterschieden. Das Schema zeigt zudem, mit welchen Methoden bzw. Sensoren wichtige Parameter in den unterschiedlichen Stadien der Schädigung überwacht werden können. Es fällt auf, dass die Messung des elektrischen Betonwiderstands in der Praxis ein massgebendes Verfahren oder eine zentrale Hilfsgrösse bei zahlreichen Überwachungsaufgaben darstellt.

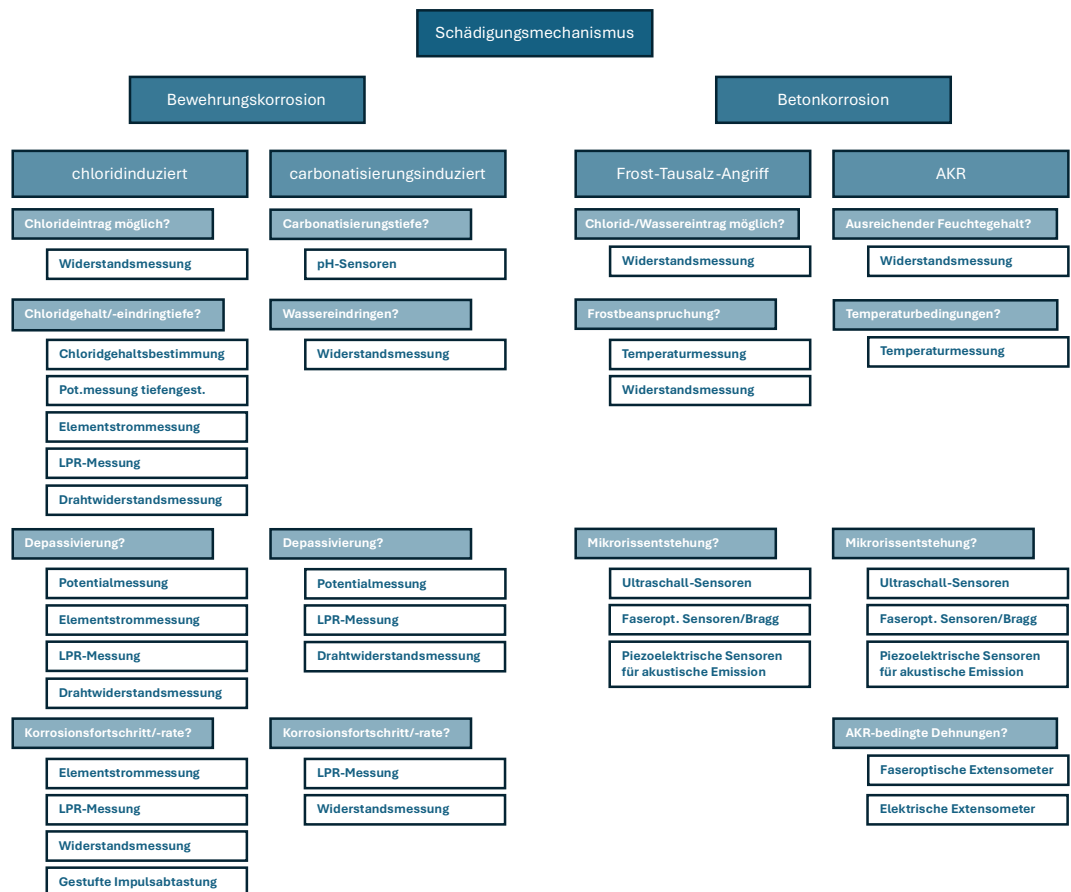


Abbildung 1: Schädigungsmechanismen für Bewehrungs- und Betonkorrosion sowie Messverfahren und Sensorik für das Monitoring von Betonbauten

In den folgenden Kap. 3.2 bis 3.4 wird nach Schädigungsmechanismen getrennt erläutert, wie die jeweiligen Messverfahren eingesetzt werden können, bevor in Kap. 4 detailliert auf die Anwendung der Messverfahren eingegangen wird. Marktreife Sensorsysteme, bei denen die hier beschriebenen Messverfahren angewandt werden, werden in Kap. 5 dargestellt.

3.2 Bewehrungskorrosion

Bei der Bewehrungskorrosion wird zwischen den beiden Schädigungsmechanismen der chloridinduzierten und der karbonatisierungsinduzierten Korrosion unterschieden. Bei beiden Mechanismen geht der tatsächlichen Schädigungsphase eine so genannte Einleitungsphase voraus, in der lediglich Transportprozesse innerhalb der Betondeckung stattfinden, ohne dass es zu einer Schädigung von Beton oder Bewehrung kommt. Erst nachdem infolge dieser Transportprozesse Korrosion hervorgerufen wird, tritt das Bauteil in die Schädigungsphase ein, während der durch Korrosion eine Reduzierung der Tragfähigkeit sowie ggf. eine Rissbildung und Abplatzungen innerhalb der Betondeckung auftreten können.

Die möglichen Messverfahren richten sich nach dem aktuellen Lebenszyklusstadium:

Einleitungsphase:

- Während der Einleitungsphase ist in beiden Fällen zunächst die Frage zu beantworten, ob eine Wasserbeaufschlagung der Betonoberflächen vorliegt und diese im Weiteren zu einem Wassereintrag (d.i. eine Wasseraufnahme in das Porensystem des Betons) in das Bauwerk führen kann oder dieser z.B. durch eine Beschichtung wirksam unterbunden wird. Ein Wassereintrag ist sowohl bei chloridinduzierter als auch bei karbonatisierungsinduzierter Korrosion eine Grundvoraussetzung für eine mögliche Schädigung. Zum Monitoring eines Wassereintrags ist z.B. ein tiefengestaffeltes Widerstandsmonitoring anwendbar.
- Liegt eine Wasserbeaufschlagung vor, kann durch das Monitoring die Eindringtiefe von Chloriden bzw. der Karbonatisierungsfront innerhalb der Betondeckung überwacht werden. Dies kann direkt über eine (tiefengestaffelte) Bestimmung des Chloridgehalts bzw. des pH-Werts des Betons erfolgen. Alternativ kann auch die Eindringtiefe der kritischen Chloridkonzentration bzw. der Karbonatisierungsfront über elektrochemische Messungen (Potenzialmessung, Elementstrommessung, Polarisationswiderstandsmessung) an tiefengestaffelten Sensoren innerhalb der Betondeckung überwacht werden. Zudem können hier auch Sensoren zum Einsatz kommen, bei denen die Eindringtiefe der Depassivierungsfront durch Drahtwiderstandsmessungen an tiefengestaffelten Sensordrähten erfolgt, die bei Durchrosten einzelner Drähte sprunghaft ansteigen.

Schädigungsphase

- Den Übergang zwischen Einleitungsphase und Schädigungsphase markiert die Depassivierung der Bewehrung. Zum Überwachen des Zeitpunkts der Depassivierung können die gleichen Monitoringverfahren zur Anwendung kommen wie während der Einleitungsphase (d.h. Chloridgehaltsbestimmung, pH-Wertbestimmung, elektrochemische Verfahren), allerdings nicht mehr innerhalb der Betondeckung, sondern auf Höhe der Bewehrung bzw. an der Bewehrung selbst.

- Liegt eine Depassivierung der Bewehrung vor, soll in der Regel durch das Monitoring vor allem der zeitliche Korrosionsfortschritt erfasst werden. Hierfür können Verfahren angewandt werden, die einen (qualitativen) Rückschluss auf die Korrosionsrate erlauben, also Polarisationswiderstandsmessungen, Elementstrommessungen oder Pulsmessungen an der Bewehrung oder an Stellvertreteranoden auf Bewehrungshöhe. Alternativ besteht ein qualitativer Zusammenhang zwischen Betonwiderstand und Korrosionsrate, sodass auch Widerstandsmessungen auf Bewehrungshöhe qualitative Aussagen zum Korrosionsfortschritt liefern können.

3.3 Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR)

Die Alkali-Aggregat-Reaktion – kurz AAR – ist ein langsam ablaufender chemisch-physikalischer Prozess im Beton¹. Die alkalische Porenlösung reagiert mit gewissen Bestandteilen der Gesteinskörnung, wobei es zu einer Volumenzunahme kommt – der Beton dehnt sich aus und es entstehen Risse. Bis ein klar sichtbares Schadensbild entsteht, können zwei bis drei Jahrzehnte vergehen. AAR wurde erstmals 1940 (Stanton) in den USA beschrieben, aber erst Ende der 1990er Jahre in der Schweiz erstmals nachgewiesen.

Bei der AAR reagiert die alkalische Porenlösung im Beton mit Anteilen der Gesteinskörnung. Dabei handelt es sich um feinkörnigen Quarz oder amorphes (nicht-kristallines, glasartiges) SiO_2 , welches im stark alkalischen Porenwasser zunächst gelöst und wieder als Silikagel ausgeschieden wird. Dieses Silikagel ist hygroskopisch und quillt unter Aufnahme von Wasser, welches zu Rissbildungen in den reagierenden Gesteinskörnern führt. In fortgeschrittenem Stadium verlaufen die AAR-Risse von den Gesteinskörnern ausgehend durch den Zementstein und es kann das oberflächlich sichtbare, für AAR typische Rissnetz entstehen.

Eine AAR kann sehr lokal oder auch grossflächig auftreten. Sie kann ein oberflächliches Phänomen sein oder den gesamten Bauteilquerschnitt betreffen. Mit der Bildung von Rissen werden zusätzliche Wege für den Feuchtigkeits-, Chlorid- und Alkalieneintrag geöffnet, was die Reaktion vorantreibt und u.U. auch beschleunigen kann. Drei Komponenten sind für die AAR nötig: reaktive Gesteinskörnung, alkalische Porenlösung und Feuchtigkeit. Die meisten Gesteine in der Schweiz enthalten mehr oder weniger feinkörnigen Quarz und müssen somit als potenziell reaktiv eingestuft werden. Die Alkalien im Beton stammen zur Hauptsache aus dem Zement. Wasser kann bei exponierten Bauwerken oft ungehindert Zutreten.

Durch eine fortschreitende AAR mit der Bildung vieler Risse werden Zugfestigkeit und E-Modul, später auch die Druckfestigkeit des Betons erniedrigt. Eine AAR kann insbesondere dann kritisch werden, wenn bewegliche oder eingespannte Bauteile oder Bauwerke wie Staumauern, Schleusentore oder Brückenlager betroffen sind.

Zum Monitoring der AAR-charakteristischen Schädigungsphänomene (Quelldehnung, Risse) eignen sich in erster Linie lange Verformungssensoren und Rissensoren. Für das Monitoring der inneren Mikrorissbildung eignen sich piezoelektrische Messverfahren. Für das Monitoring der Betonfeuchte und -temperatur, welche einen massgebenden Einfluss auf die AAR-Kinetik haben, eignen sich kerntiefe Feuchte- und Temperatursensoren.

¹ Die AAR gibt es als potenziell stark schädigende Alkali-Silikat-Reaktion (ASR) und als weniger aggressive Alkali-Karbonat-Reaktion (AKR). In der Schweizer Baupraxis ist mit dem Begriff AAR die ASR gemeint.

3.4 Frost- und Frost-/Tausalz-Angriff (FT)

Die Schädigungsmechanismen von Beton unter Frost-Tau-Angriff sind sehr komplex. Wenn das im Beton enthaltene Wasser gefriert und sein Volumen um 9 % vergrößert, wird die Bruchdehnung des Betons deutlich überschritten. Typische Schäden sind oberflächenparallele Risse entlang der Grenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein. Dennoch sind viele Frost-Tau-Wechsel erforderlich, bevor klar sichtbare Schäden auftreten. Powers stellte bereits fest, dass selbst weit unterhalb des Gefrierpunktes nur ein Teil des Wassers im Beton gefriert, [25].

Durch künstlich eingebrachte Luftporen können die hydraulischen Drücke reduziert werden. Nach [26] lässt sich der Schädigungsmechanismus in fünf Phasen einteilen: Eisbildung und Vordringen der Eisfront (0 bis -10°C), Feuchteumverteilung ($< -10^{\circ}\text{C}$), Auftauprozesse (-10 bis 0°C) und Wiederbefeuchtung ($< 0^{\circ}\text{C}$). Die Tauphase ist daher entscheidend für die Schädigung [26]. Besonders in Laborversuchen wird die Eisbildung und die Schädigung durch Unterkühlung des Betons verstärkt, was in der Praxis kaum vorkommt, da z.B. die Abkühlprozesse wesentlich langsamer ablaufen als im Labor [26].

Beton nimmt während der Frostphasen Feuchtigkeit auf, was Setzer mit der sogenannten Mikro-Eislinsen-Pumpe erklärt, [27]. Während des Gefrierens kühlt der Beton von aussen nach innen ab und bildet Eis. Das Gelporenwasser bleibt jedoch zunächst ungefroren. Mit weiter sinkender Temperatur entstehen Unterdrücke, die zu einer Kontraktion der Zementsteinmatrix führen. Dadurch wird Gelporenwasser herausgedrückt und gefriert an den Eislinsen grösserer Poren.

Beim Auftauen dehnt sich die Zementsteinmatrix wieder aus. Diese Ausdehnung erzeugt zusätzliche Porenräume, die schnell mit Wasser gefüllt werden wollen. Da das ursprünglich in den Gelporen enthaltene Wasser nach der Frostkontraktion noch als Eis an grösseren Poren anliegt, kann es nicht sofort zurücktransportiert werden. Das benötigte Wasser muss daher von aussen eindringen. Durch diese „Frostpumpe“ steigt der Sättigungsgrad im Beton kontinuierlich an. Wird die kritische Schädigungssättigung erreicht, wird die Betonmatrix durch die Volumenausdehnung des Eises zerstört. Das kontinuierliche Monitoring von Frostschädigungsprozessen war bisher kaum von Bedeutung. Da die Schädigungsphänomene üblicherweise an der Betonoberfläche sichtbar sind (Abplatzungen, Absanden), genügten in der Vergangenheit regelmässige visuelle Inspektionen, um Frostscha den zu bestimmen. Nichtsdestotrotz ist es grundsätzlich möglich, mittels piezoelektrischen oder ultraschallbasierten Monitoringsysteme auch unter der Betonoberfläche frostbedingte Schädigungsprozesse (Mikrorissbildung) auszumachen. Ergänzend dazu können die Frosteinflussfaktoren (Feuchte- und Temperaturprofile, Versalzung) mit Widerstands- und Temperatursensoren in der Oberflächenzone überwacht werden.

4 Relevante Messgrößen und Verfahren

4.1 Einleitung

Im vorliegenden Kapitel werden die Messgrößen sowie Messverfahren vorgestellt, welche für das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Bedeutung sind. Während es hauptsächlich um Verfahren geht, wird auch die Sensorik erwähnt, mit welcher die Messgrößen bestimmt werden können. Um es vorwegzunehmen, die Sensorik, als wesentliche Komponente eines Monitoringsystem, wird im nachfolgenden Kapitel 5 mit allen technischen Details behandelt. Daraus ergeben sich gewisse Überlappungen.

Bei den im Folgenden betrachteten Messgrößen handelt es sich sowohl um direkte Messgrößen, die unmittelbar Rückschluss auf eine Schädigung ermöglichen (z.B. lineare Polarisationswiderstandsmessungen, Elementstrommessungen), als auch z.T. Kontextvariablen und Frühindikatoren. Als Kontextvariablen kommen insbesondere der Temperatur und dem elektrischen Widerstand des Betons als Mass für den Feuchtegehalt eine wichtige Bedeutung zu, da diese auf nahezu alle anderen Messgrößen in diesem Kapitel unmittelbar Einfluss nehmen. Wichtige Frühindikatoren sind erneut der elektrische Betonwiderstand sowie der Chloridgehalt und der pH-Wert. Diese Messgrößen bzw. ihre zeitabhängige Veränderung liefern insbesondere in der Einleitungsphase Informationen über Transportprozesse innerhalb der Betondeckung vor Korrosionsbeginn.

4.2 Temperaturmessung im Beton

4.2.1 Verfahrensbeschreibung

Die Temperaturmessung im Beton dient als wichtige Hilfsgrösse bei der Beurteilung von dauerhaftigkeitsrelevanten Prozessen. Dazu werden unmittelbar vor dem Betonieren oder in den erhärteten Beton geeignete Temperaturfühler (z. B. Thermoelemente oder digitale Temperatursensoren) an definierten Messpunkten im Bauteil positioniert. Die Sensoren werden so angebracht, dass sie möglichst in direktem Kontakt mit dem Beton sind (ohne luftgefüllten Hohlraum welcher isolierend wirkt) und eine repräsentative Erfassung der Kern- bzw. Überdeckungsbetontemperatur gewährleisten. Ein nachträglicher Einbau von Temperatursensoren ist ebenfalls problemlos möglich.

Während der Temperaturmessung werden die Sensoren über ein Messgerät oder ein Datenaufzeichnungssystem kontinuierlich oder in festgelegten Intervallen ausgelesen. Die erfassten Temperaturwerte werden aufgezeichnet und hinsichtlich des Temperaturverlaufs sowie der Temperaturdifferenzen im Querschnitt und gegenüber der Lufttemperatur ausgewertet.

Die Messergebnisse dienen der Beurteilung des Erhärtungsfortschritts, der Einhaltung der vorgegebenen Temperaturgrenzwerte sowie der Kontrolle potenzieller Temperaturspannungen im Bauteil. Bei Abweichungen von den geforderten Grenzwerten werden geeignete Massnahmen wie Nachbehandlung, Temperaturmanagement oder Anpassungen des Bauablaufs eingeleitet.

4.2.2 Messgrösse

In den meisten Fällen handelt es sich bei den Messgrössen für die Temperaturmessung um Potenzialdifferenzen oder elektrische Widerstände.

4.2.3 Sensorkomponenten

4.2.3.1 Thermoelemente

Der Gebrauch von Thermoelementen zur Temperaturmessung im Beton ist weit verbreitet. Ein Thermoelement («thermocouple») besteht aus zwei unterschiedlichen Leitermaterialien, die an der Messstelle miteinander verbunden werden. Am anderen Ende (Übergang zur Messelektronik) sind die beiden Leiter nicht verbunden. Dies ist die Vergleichsstelle mit Vergleichstemperatur (Kaltstelle = «cold junction»). Zwischen der Kaltstelle und der Messstelle besteht eine Temperaturdifferenz ΔT , die eine Potenzialdifferenz (Spannung) zwischen den beiden Leitern bewirkt, was als Seebeck-Effekt bezeichnet wird (Abbildung 2). Ursache der Potenzialdifferenz ist die Ladungsverschiebung entlang des Leiters infolge eines Temperaturgefälles. Dabei werden Elektronen von der warmen zur kalten Stelle verschoben. Das Ausmass dieser Ladungsverschiebung ist abhängig vom Leiterwerkstoff und der Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Kaltstelle. Würde man für die Leiter das gleiche Material verwenden, wäre keine Potenzialdifferenz messbar.

Es gibt verschiedene Arten von Thermoelementen, die als Thermoelement-Typen bezeichnet werden. Diese unterscheiden sich nach den Kombinationen der Leiterwerkstoffe. Ein Thermoelement vom Typ K besteht beispielsweise aus den Leitermaterialien NiCr-Ni, während ein Typ T die Werkstoffe Cu-CuNi verwendet. Aufgrund der verschiedenen Leitermaterialien wird ein unterschiedlicher Temperaturbereich abgedeckt. K von -270 bis 1372 °C und T von -270 bis 400 °C. Der Typ K ist ein verbreitetes Massenprodukt und preislich vergleichsweise günstig zu bekommen. Der Preis vom Typ T ist um etwa einen Faktor 2 höher. Dieser Sensor ist dafür präziser und stabiler, insbesondere bei tiefen Temperaturen.

Der Messwert bei Thermoelementen ist, wie oben erwähnt, die Potenzialdifferenz zwischen den beiden Leitern. Es ist zu beachten, dass es sich dabei um eher kleine Spannungen im mV-Bereich handelt. Beispielsweise liegt die Spannung für ein Thermoelement-Typ K im Bereich von -20 bis +40 °C zwischen ca. -0.8 und 1.6 mV. Dies bedingt eine Messtechnik mit einer hohen Auflösung und Genauigkeit. Zudem sind die Kennlinien (Spannung vs Temperatur) der verschiedenen Thermoelement-Typen nicht linear, was eine einfache Umrechnung von Spannung zu Temperatur nicht zulässt. Zudem sollte die Thermospannung an der Kaltstelle ebenfalls berücksichtigt werden. Auf dem Markt sind Messgeräte mit Messwertspeicherung verfügbar, welche die Ergebnisse von Thermoelementen verschiedener Typen auswerten können.

Bei der Messung einer Temperatur mit einem Thermoelement gibt es verschiedene Einflussfaktoren, welche sich auf die Messunsicherheit auswirken:

- Genauigkeit der Spannungsmessung (μV -Bereich)
- Umrechnung der gemessenen Spannung in eine Temperatur (Wertetabellen oder Näherung mit Hilfe eines Polynoms)
- Kompensation der Temperatur an der Kaltstelle
- Toleranzklasse des Thermoelements

Aufgrund obiger Einflussfaktoren muss bei Thermoelementen gegenüber der effektiven Temperatur typischerweise mit Abweichungen von ± 1 bis $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ gerechnet werden.

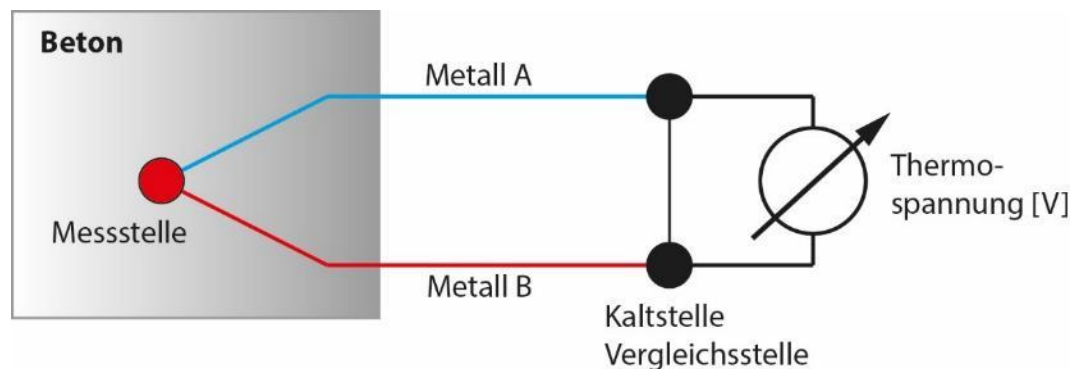


Abbildung 2: Aufbau und Prinzip eines Thermoelements

4.2.3.2 RTD-Temperatursensoren

RTD steht für «Resistance Temperature Detectors». Es handelt sich um sehr präzise Sensoren, meist aus Platin, die, wie es der Name sagt, auf der Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur basieren. Die bekanntesten RTD-Sensoren sind der Pt100 und der Pt1000. Pt100 bedeutet, dass bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein Widerstand von 100 Ohm (1'000 Ohm beim Pt1000) gemessen wird. Im Vergleich zu den Thermoelementen ist die Genauigkeit um ca. einen Faktor 10 besser. Dafür ist der Temperaturbereich von etwa -50 bis $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutlich geringer. Ein Vorteil der RTD-Sensoren ist der lineare Widerstand-Temperatur-Zusammenhang über einen grossen Temperaturbereich.

Für die Anwendung im Beton werden die RTD-Sensoren meist in einer dichten Hülse aus nichtrostendem Stahl gekapselt (Bsp. Abbildung 3, <https://ch.rs-online.com>). In vielen Fällen wird der Pt1000 gegenüber dem Pt100 bevorzugt. Gründe sind die niedrigere Empfindlichkeit gegenüber langen Messleitungen (Einfluss des Leitungswiderstandes) bei der 2-Pol-Messung und die geringere Stromaufnahme bei der Verwendung batteriebetriebener Messgeräte. Für die Temperaturmessung mit RTD-Sensoren kann ein Gleich- oder (niederfrequenter) Wechselstrom verwendet werden. Es muss darauf geachtet werden, dass der Messstrom gering ist (0.1 bis 0.5 mA), weil es sonst zu einer Selbsterwärmung des Sensors kommt, was falsche Messwerte zur Folge hat.



Abbildung 3: Pt1000 Sensorelement, gekapselt in einer Hülse aus nichtrostendem Stahl

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die wichtigsten Punkte zur Temperaturmessung im Beton zusammengefasst.

Zusammenfassung Temperaturmessung

Verfahren	a) Thermoelektrisch: Temperaturdifferenz entlang eines elektrischen Leiterpaars aus unterschiedlichen Metallen führt zu einer Spannungsdifferenz, was als Seebeck-Effekt bekannt ist b) RTD: Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands eines gewickelten Platin-, Nickel- oder Kupfer-Drahts
Messgrösse	a) Spannung b) Elektrischer Widerstand
Sensor-komponenten	a) Thermoelemente, Leiter aus verschiedenen Metallen/Metalllegierungen z.B. Typ K (Ni-CrNi) b) RTD, z.B. PT100 oder PT1000
Anwendungs-gebiete	Neubau und Bestand (Frost, AAR, Korrosion). Meist als Begleitmessung zu anderen Messgrössen (Kompensation Temperaturabhängigkeit der Sensoren oder der Messgrösse)
Einflussgrössen	Qualität des Messgeräts (Präzision und Genauigkeit)
Bewertungs-kriterien	Temperatur als direkte Grösse, wird auch zur T-Kompensation anderer Sensoren benötigt (z.B. elektrischer Betonwiderstand)
Sensortypen	Thermoelemente, Pt100, Pt1000; zahlreiche Anbieter
IoT-kompatibel	Thermoelemente und RTD: Ja

Tabelle 2: Zusammenfassung Temperaturmessung

4.3 Potenzialmessung zur Lokalisierung von Korrosion

4.3.1 Verfahrensbeschreibung

Die Potenzialmessung ist ein Verfahren zur Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit der Bewehrung oder gesondert eingebrachter Sensorkomponenten in Stahlbetonbauwerken [28]. Das Verfahren beruht auf der Messung der Spannung zwischen der Bewehrung oder einer Sensorkomponente (im weiteren „Arbeitselektrode“) und

einer Bezugselektrode mit einem hochohmigen Voltmeter. Bei Kenntnis des Standardpotenzials der Bezugselektrode kann daraus das Potenzial der Arbeitselektrode berechnet werden. Sofern keine Bezugselektrode vorhanden ist, kann zur qualitativen Bewertung der Potenzialänderungen auch die Spannungsdifferenz zwischen der Arbeitselektrode und dem Bewehrungskorb ermittelt werden. Das elektrochemische Potenzial erlaubt - unter Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren – eine orientierende Einordnung des Korrosionszustands der zu bewertenden Elektroden.

4.3.2 Messgrösse

Bei der Potenzialmessung wird die Potentialdifferenz zwischen der Arbeitselektrode und einer Bezugselektrode in [mV] gemessen, die bei Kenntnis des Bezugselektrodenpotenzials in das Potenzial der Arbeitselektrode umgerechnet werden kann.

4.3.3 Sensorkomponenten

Für die Potenzialmessung sind die folgenden Sensorkomponenten erforderlich:

- Arbeitselektrode: Als Arbeitselektrode kann – in Abhängigkeit von der Fragestellung – sowohl die Betonstahlbewehrung selbst als auch ein gesondert eingebrachter Sensor mit ggf. tiefengestaffelter Anordnung von mehreren Arbeitselektroden verwendet werden. Bei Messungen an der Bewehrung kann eine Aussage über eine mögliche Korrosionsinitiierung auf Bewehrungshöhe, nicht aber über mögliche Transportprozesse (z.B. von Chloriden) innerhalb der Betondeckung abgeleitet werden. Sollen diese überwacht werden, empfiehlt sich eine tiefengestaffelte Sensoranordnung mit mehreren Arbeitselektroden in unterschiedlichen Tiefenlagen zwischen Betonoberfläche und Bewehrung. Dabei ist darauf zu achten, dass die Arbeitselektroden aus einem Material hergestellt werden, das sich hinsichtlich seiner Korrosionseigenschaften nicht wesentlich von der Betonstahlbewehrung unterscheidet
- Bezugselektrode: Eine Bezugselektrode ist ein stabiles, nicht-polarisierbares Elektroden-System, das als Referenzpunkt für die Messung des Potenzials der Arbeitselektrode dient. Für diesen Zweck muss sie über einen langen Zeitraum über ein stabiles Potenzial verfügen, das reversibel ist und nur von der Ionenkonzentration und der Temperatur abhängt. Für Potenzialmessungen im Beton haben sich Mangandioxid-Elektroden (MnO_2) und Silber-/ Silberchlorid-Elektroden (Ag/AgCl) etabliert. Stehen keine Bezugselektroden zur Verfügung, die die oben genannten Kriterien erfüllen, kann alternativ auch der Bewehrungskorb als Pseudo-Bezugselektrode verwendet werden, wobei dieser über die Nutzungsdauer ggf. selbst Potenzialverschiebungen unterworfen ist.
- Hochohmiges Spannungsmessgerät: Die Potenzialmessung wird mit einem hochohmigen Spannungsmessgerät durchgeführt, das über einen Eingangswiderstand (Impedanz) von mindestens 10 M Ω verfügt.

4.3.4 Anwendungsgebiete

Potenzialmessungen können zum Monitoring von Stahl- und Spannbetonbauteilen angewandt werden, bei denen aufgrund einer wiederkehrenden Tausalzbeaufschlagung oder ungünstiger Randbedingungen für karbonatisierungsinduzierte Korrosion (z.B. geringe Betondeckungen, wiederkehrende Feuchtebeaufschlagung, ungünstige Bindemittelwahl, hohes Bauwerksalter) bereits Bewehrungskorrosion stattfindet oder während der weiteren Nutzungsdauer nicht ausgeschlossen werden kann. Das sind nahezu alle exponierten Bauteiloberflächen von Infrastrukturbauwerken, vorwiegend im Stüt-

zen- oder Wandsockelbereich bei Brücken- und Tunnel-/Galerienbauwerken, aber ggf. auch an Tunneldecken bei wiederkehrender Kondenswasserbildung. Dabei können Potenzialmessungen je nach dem Zeitpunkt des Monitorings sowohl an Stellvertreteranoden innerhalb der Betondeckung als auch an der Bewehrung selbst durchgeführt werden. Aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren auf das Bewehrungspotenzial werden Potenzialmessungen i.d.R. mit anderen Messungen kombiniert, z.B. mit Elementstrommessungen, LPR-Messungen oder Chloridgehaltsmessungen.

4.3.5 Einflussgrößen

Bewehrungspotenziale können in Abhängigkeit von den Randbedingungen stark streuen, ohne dass dies ein eindeutiger Indikator für aktive Korrosion sein muss. Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über mögliche Potenzialbereiche in Abhängigkeit vom Korrosionszustand der Bewehrung. Da anhand des Potenzials u.U. keine eindeutige Zuordnung des Korrosionszustands möglich ist, ist bei der Bewertung anhand der Potenzialwerte allein eine möglichst genaue Kenntnis und Berücksichtigung der Randbedingungen zwingend erforderlich. Generell wird zur Vermeidung von Fehlinterpretationen empfohlen, Potenzialmessungen mit weiteren Messverfahren zu kombinieren.

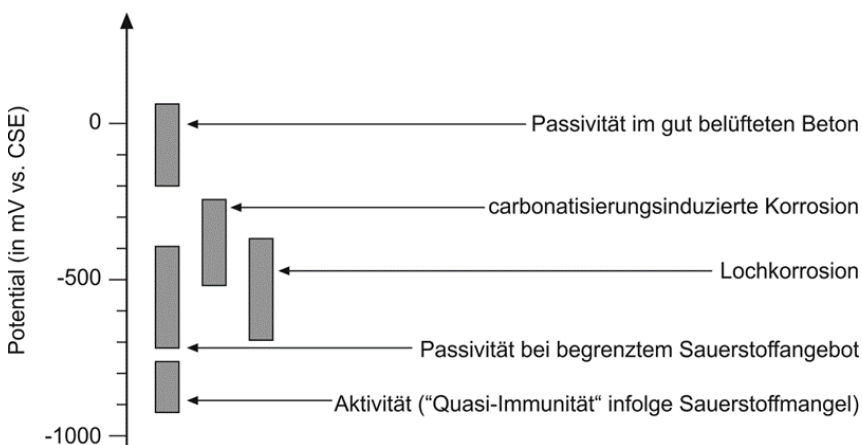


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Potential und Korrosionszustand von Bewehrungsstahl nach [29]

Wesentliche Einflussfaktoren auf die gemessenen Potenzialwerte sind:

- **der Feuchte- und Sauerstoffgehalt des Betons:** Der Feuchtegehalt beeinflusst unmittelbar den Elektrolytwiderstand des Betons, was insbesondere bei Bezugsselektroden, die in grösserer Entfernung zur Bewehrung installiert werden, Auswirkungen auf die gemessenen Potenziale haben kann. Daneben geht ein steigender Feuchtegehalt des Betons mit einer Verschiebung der Bewehrungspotenziale in negative Richtung einher. Bei wassergesättigtem Beton treten infolge von Sauerstoffarmut u.U. sehr negative Bewehrungspotenziale ein, die häufig als Hinweis auf aktive Bewehrungskorrosion fehlinterpretiert werden können. In diesem Fall empfiehlt sich eine zusätzliche Bewertung z.B. anhand von Polarisationswiderstandsmessungen.
- **die Temperatur:** Die Bauteiltemperatur beeinflusst die Korrosionskinetik und damit auch die Bewehrungspotenziale. Dies ist grundsätzlich bei der Bewertung von Zeitreihen zu berücksichtigen. Auf die Potenziale der üblicherweise verwendeten Bezugsselektroden hat die Temperatur nur einen vergleichsweise geringen Einfluss (Temperaturkoeffizient Ag/AgCl-Elektrode: $-0,65 \text{ mV/}^{\circ}\text{K}$ bzw. MnO₂-Elektrode: $0,77 \text{ mV/}^{\circ}\text{K}$). Daneben wirkt sich die Temperatur – insbesondere bei sehr niedrigen

Temperaturen – auch in hohem Masse auf den Elektrolytwiderstand des Betons und damit auf die gemessenen Potenziale aus, s. Kap. 0.

- Diffusionspotenziale: Diffusionspotenziale beschreiben die Potentialdifferenzen, die sich aus Konzentrationsunterschieden zwischen dem Elektrolyten im Inneren der Bezugselektrode und dem umgebenden Beton ergeben und die zu Diffusionsprozessen innerhalb des Diaphragmas führen, mit dem die Bezugselektrode an den Beton angekoppelt ist. Da für den Einsatz im Beton überwiegend Bezugselektroden mit hochalkalischem Innenelektrolyt verwendet werden, stellen sich signifikante Konzentrationsunterschiede und damit einhergehende Diffusionspotenziale insbesondere im karbonatisierten Beton ein, bei dem diese bis zu rund 100 – 150 mV betragen können [30].

4.3.6 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der gemessenen Potenzialwerte sind grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze möglich:

- Bewertung der Absolutwerte: Negativere Potenziale deuten auf eine grössere Korrosionswahrscheinlichkeit bzw. auf eine bereits erfolgte Korrosionsinitiierung hin. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gemessenen Potenziale von einer Vielzahl von Einflussfaktoren (s.o.), insbesondere aber dem Sauerstoffangebot bzw. der Wassersättigung des Betons abhängt, weshalb eine Bewertung nur auf Grundlage der gemessenen Potenzialwerte eine erhöhte Gefahr von Fehlinterpretationen beinhaltet.
- Bewertung der zeitlichen Veränderung der Potenzialwerte: eine zeitabhängige Veränderung der Potenzialwerte, z.B. ein distinkter Abfall des Potentials um > 100 mV innerhalb eines kurzen Betrachtungszeitraums kann ein deutlicher Hinweis auf Korrosionsinitiierung sein.

4.3.7 IoT-Kompatibilität

Eine IoT-Kompatibilität ist für Potenzialmessungen gegeben. Da i.d.R. Messfrequenzen von rund 1 Messung/h ausreichend sind, sind die anfallenden Datenmengen sehr gering. Eine automatisierte Bewertung ist sowohl anhand von Schwellenwerten als auch von Zeitreihen möglich und stellt die Grundlage für eine detaillierte Bewertung durch einen Experten dar.

Zusammenfassung Potenzialmessung

Verfahren	Messung der Potenzialdifferenz zwischen Arbeitselektrode (Sensorsprosse etc.) und einer Bezugselektrode mit einem hochohmigen Voltmeter zur Bewertung der Korrosionsgefährdung bzw. der Eindringtiefe der Depassivierungsfront
Messgrösse	Potenzialdifferenz in [mV]
Sensor-komponenten	• Bezugselektrode MnO_2 oder Ag/AgCl • Arbeitselektrode aus BST 500, bei Tiefenstaffelung mehrere Arbeitselektroden in unterschiedlichen Tiefenlagen
Anwendungs-gebiete	• Tausalzbeaufschlagte Bauteiloberflächen, insbesondere im wand- und Sockelbereich bzw. bei Hinweisen auf aktive Korrosion
Einflussgrössen	• Temperatur • Feuchtegehalt im Beton • Diffusionspotenziale z.B. infolge Karbonatisierung
Bewertungs-kriterien	• Bewertung aufgrund des Absolutwert (z.B. < -350 mV vs MnO_2 -> Korrosionsgefährdung) • Bewertung anhand zeitlicher Veränderung der Potenzialwerte (z.B. Potenzialabfall um > 100 mV gegenüber früherem steady-state-Potenzial)
Sensoranbieter	• MnO_2-Bezugselektrode «ERE20», Fa. Force • Ag/AgCl-Bezugselektrode «WE 10», Fa. Silvion
IoT-kompatibel	Ja

Tabelle 3: Zusammenfassung Potenzialmessung

4.4 Elektrischer Betonwiderstand

4.4.1 Verfahrensbeschreibung

Obwohl die Bestimmung des elektrischen Betonwiderstandes bereits seit einigen Jahrzehnten bekannt ist, existiert nur eine geringe Anzahl Normen auf diesem Gebiet. In Europa ist vor kurzem die Norm EN 12390-19:2023 erschienen [31]. Dieses Dokument gilt für wassergesättigten Beton und kann bei der Qualitätssicherung von Festbeton angewendet werden, wobei die Temperatur der Betonprobe zu Vergleichszwecken in einem eng definierten Bereich möglichst konstant gehalten werden soll. Das grundsätzliche Verfahren der Messung des elektrischen Betonwiderstand beruht auf der Einspeisung eines bekannten Wechselstromsignals (Frequenz häufig um 1 kHz) über zwei Elektroden in den Beton. Die über den beiden Elektroden entstehende Spannungsdifferenz wird gemessen und anhand der Stromstärke und mit Hilfe des ohmschen Gesetzes wird der elektrische Widerstand (Impedanz) berechnet.

Grundlagen zum elektrischen Betonwiderstand

Der elektrische Widerstand von Beton ist eine Werkstoffeigenschaft, die den ionischen Stromfluss durch den Zementstein begrenzt. Er ist zudem eine massgebende Steuergrösse bei der Korrosion von Stahl in Beton. Für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen spielt der Eintrag aggressiver Medien eine zentrale Rolle. Diese können gasförmig sein, wie das CO_2 aus der Luft, oder in Wasser gelöst durch verschiedene Transportmechanismen in den Beton gelangen. Die Transportprozesse und der Wassergehalt im Beton hängen mit seiner Porenstruktur zusammen. Das Porenvolumen, die Porenar-

ten und die Porengrößenverteilung sind massgebende Faktoren für die Feuchtigkeitsspeicherung und den Feuchtetransport in zementösen Werkstoffen. Damit verknüpft sind Schädigungsmechanismen wie die Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung und Chlorideintrag, Frosttausalzangriff, chemischer Angriff durch Sulfate oder lösende Angriffsmittel und die Alkali-Aggregat Reaktion. Mit dem Eintrag von Schadstoffen und der Variation der Betonfeuchtigkeit ändert sich die Zusammensetzung der Porenlösung im Beton, was sich massgebend auf den elektrischen Betonwiderstand auswirkt. Wichtige Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand werden nachfolgend genauer erläutert.

4.4.2 Messgrößen

Der elektrische Betonwiderstand R_e berechnet sich nach dem ohmschen Gesetz als Spannungsfall dividiert durch die Stromstärke (1).

$$R_e = \frac{U}{I} \quad (1)$$

U (V) ist der Spannungsfall vor und nach dem Anlegen des Stroms zwischen den Spannungselektroden, und I (A) ist die Stromstärke des durch die Elektroden fließenden Stroms [1]. Durch die Verwendung von Elektroden im Beton zur Messung des elektrischen Betonwiderstandes hat die Anordnung dieser Elektroden einen massgebenden Einfluss auf den Messwert. Dies bedeutet, dass der gemessene Widerstand abhängig von der Geometrie der Elektrodenanordnung ist. Der geometrieunabhängige Widerstand wird als spezifischer elektrischer Betonwiderstand bezeichnet und berechnet sich wie folgt (2):

$$\rho = k \cdot R_e = k \cdot \frac{U}{I} \quad (2)$$

Der Faktor k (m) wird als Zellkonstante bezeichnet. Diese ist ein geometrischer Faktor, der von der Grösse und Form der Probe sowie dem Abstand der Elektroden abhängig ist. Übliche Einheiten für den spezifischen Betonwiderstand sind $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ oder $\Omega \cdot \text{m}$, wobei $\Omega \cdot \text{m}$ multipliziert mit dem Faktor 10 in $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ umgerechnet werden kann. Die Variation des spezifischen Betonwiderstandes ist gross und reicht von etwa $10 \Omega \cdot \text{m}$ für wassergesättigten Beton bis ca. $10^6 \Omega \cdot \text{m}$ für ofengetrockneten Beton [32].

Eine bekannte Konfiguration zur Bestimmung des spezifischen Betonwiderstandes im Volumen («bulk resistivity») wird bei zylindrischen Prüfkörpern, Prismen oder Bohrkernen angewendet. Dabei werden beidseitig je eine Metallplatte und ein feuchter Schwamm zwischen Beton und Platte zusammengespannt. Die Zellkonstante k für diese Konfiguration wird wie folgt bestimmt (3):

$$k = \frac{A}{L} \quad (3)$$

wobei A der Querschnittsfläche senkrecht zum Stromfluss und L dem Elektrodenabstand (Länge des Prüfkörpers) entspricht. Diese Prüfmethode kann bei realen Bauteilen nicht angewendet werden, da beide Bauteilseiten in vielen Fällen nicht zugänglich

sind. In der Praxis häufig angewendet wird auch das Wenner-Verfahren («Wennerprobe»), bei dem eine 4-Punkt Messung an der Betonoberfläche durchgeführt wird (Abbildung 5). Bei dieser Methode werden vier Elektroden mit gleichem Abstand auf die Oberfläche gedrückt. An den äusseren beiden Elektroden wird eine Spannung angelegt (Stromeinspeisung), während über den beiden inneren Elektroden der Spannungsfall gemessen wird. Die Zellkonstante k beträgt gemäss Gleichung (4):

$$k = 2 \times \pi \times d \quad (4)$$

wobei d dem Abstand der Elektroden entspricht. Der Vorteil der 4-Punkt-Methode besteht darin, dass der Einfluss der Kontaktierung bei der Stromeinspeisung wegfällt, da der Spannungsfall über den beiden inneren Elektroden gemessen wird. Grundsätzlich würde sich die 4-Punkt-Methode für ein Bauwerksmonitoring eignen, indem man bspw. vier Stahlstifte mit gleichem Abstand in den Beton einzementiert, wie dies auch an Bohrkernen durchgeführt wurde [33]. Nachteile dieses Verfahrens sind die Verkabelungen an der Oberfläche, direkte Einflüsse an der Oberfläche wie Wasserfilme oder die geringe Verfügbarkeit von Datenloggern, die eine 4-Punkt-Messung mit Wechselstrom, Frequenz ca. 1 kHz, durchführen können. Aus diesem Grund wird das Wenner-Verfahren meist im Rahmen von Zustandsuntersuchungen verwendet um bspw. Feuchteunterschiede in Bauteilen erkennen und quantifizieren zu können, oder die Leitfähigkeit des Betons bei der Anwendung von kathodischem Korrosionsschutz besser einschätzen zu können. Für solche Anwendungen sind Messgeräte kommerziell erhältlich (z.B. das Resipod von Proceq).

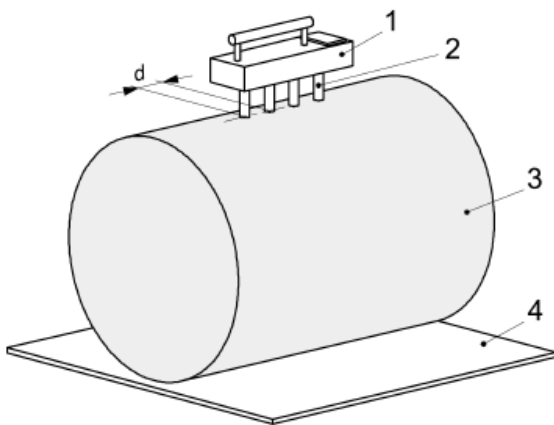


Abbildung 5: Anordnung der vier Elektroden an einem zylindrischen Prüfkörper, Wenner-Verfahren [6].
1 = Widerstandsmessgerät, 2 = Elektroden, 3 = Prüfkörper, 4 = nichtleitender Untergrund, d = Elektrodenabstand

In der EN 12390-19 [31] sind Zellkonstanten für verschiedene Elektrodenkonfigurationen und Prüfkörpergeometrien tabelliert. Damit können spezifische Betonwiderstände einfach berechnet werden, indem der Messwert mit der Zellkonstante multipliziert wird.

Weiter ist zu beachten, dass der elektrische Betonwiderstand mit Wechselstrom gemessen wird. Dabei sollte eine Frequenz zwischen 100 Hz und 10 kHz gewählt werden [34]. Diverse kommerziell erhältliche Widerstandsmessgeräte verwenden eine Frequenz von 1 kHz. Widerstandsmessungen mit Gleichstrom sollten vermieden werden,

weil die Messwerte wegen Polarisierungseffekten an den Elektroden oder im Beton verfälscht werden können.

4.4.3 Einflussgrößen

Einfluss der Betonfeuchtigkeit

Generell nimmt der elektrische Betonwiderstand mit zunehmendem Wassergehalt im Beton ab. Mit zunehmender Feuchtigkeit fällt der Widerstand zwischen etwa 60 und 70% relativer Luftfeuchtigkeit stark ab. Die zugehörige Kennlinie ist vergleichbar mit einer Sorptionsisotherme, wo bei Luftfeuchtigkeit über 70% ein steiler Anstieg der Wasseraufnahme erfolgt, der auf Kapillarkondensation zurückzuführen ist [35]. Bei trockenen Bedingungen ist das Wasser, welches in den Gelporen adsorbiert ist, nicht beweglich und hat folglich keinen Einfluss auf den Betonwiderstand [36]. Es gibt auch andere Verfahren die Betonfeuchtigkeit im Innern des Bauteils zu messen, z.B. [37].

Einfluss der Betonzusammensetzung und der Porenlösung

Die Zusammensetzung des Betons (Zementart, Zusatzstoffe, w/z-Wert) beeinflusst den elektrischen Betonwiderstand einerseits über die Porosität und die Durchgängigkeit des Porensystems und andererseits über die Zusammensetzung der Porenlösung. Generell nimmt der Betonwiderstand bei zunehmenden w/b-Werten ab, weil das wasserfüllbare Porenvolumen zunimmt. Es ist demzufolge zu erwarten, dass der zunehmende Hydratationsgrad eines Betons die Porosität reduziert und einen Anstieg des elektrischen Betonwiderstandes zur Folge hat [38].

Chemisch/physikalische Prozesse wie die Karbonatisierung oder das Calcium-Auslaugen des Betons verändern die Leitfähigkeit der Porenlösung. Dies ist auch der Fall, wenn Schadstoffe wie z.B. Chloride in den Beton eindiffundieren.

Es ist davon auszugehen, dass die mittlerweile grosse Palette an Zementen, insbesondere die klinkerreduzierten, CO₂-freundlichen Systeme, den Betonwiderstand ebenfalls beeinflusst. Dazu liegen jedoch nur wenige Untersuchungen vor, z.B. [32]. Jedoch ist bekannt, dass gewisse Zusatzstoffe den elektrischen Betonwiderstand erhöhen. In [39] wurde der Einfluss von Hüttensand, in [40] derjenige von Flugasche untersucht.

Einfluss der Temperatur

Die Temperatur hat einen signifikanten Einfluss auf den elektrischen Betonwiderstand, da sie die Ionenbeweglichkeit, die Ionen-Interaktionen und die Ionenkonzentration in der Porenlösung beeinflusst [41]. Ein Temperaturanstieg hat einen Abfall des Betonwiderstandes zur Folge, eine Abkühlung eine Widerstandszunahme. Gemäss [42] ändert sich der Widerstand um etwa 3 bis 5% pro °C, abhängig von der Betonfeuchtigkeit. Heute praktisch unbestritten ist die Verwendung der Arrhenius Gleichung (5) zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Betonwiderstand und Temperatur [43].

$$\rho_T = \rho_0 \cdot \exp \left[\frac{E_{a,\rho}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (5)$$

ρ_T ist der gemessene Betonwiderstand bei der Temperatur T (K), ρ_0 der Widerstand bei einer Referenztemperatur T_0 (K), R ist die Gaskonstante ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) und $E_{a,\rho}$ ist die Aktivierungsenergie für den Widerstand (J/mol). Der Quotient $E_{a,\rho}/R$ wird häu-

fig als b -Wert (Temperaturkoeffizient) bezeichnet. Der b -Wert (K) liegt meist zwischen 2'000 und 4'000 und weist eine deutliche Abhängigkeit von der Betonfeuchtigkeit, wie auch von der Porenstruktur des Zementsteins auf [44].

Abbildung 6 zeigt den Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem elektrischen Betonwiderstand für verschiedene Betonzusammensetzungen und wassergesättigten Proben [38]. Die Betone wurden in vier Gruppen unterteilt. Die Gruppen unterscheiden sich im Wesentlichen bei der Zementart (CEM I- und CEM II-Zemente) und den verwendeten Zusatzstoffen (Flugasche, Silikastaub und Schlacke). Es ist ersichtlich, dass alle Kennlinien einen exponentiellen Verlauf aufweisen, wobei die Widerstandsänderungen bei dichteren Betonen stärker ausgeprägt ist als bei den Betonen mit poröserem Gefüge. In Abbildung 6 ebenfalls erkennbar ist die Verringerung des Betonwiderstandes und die abnehmende Krümmung der Kurven mit zunehmender Wassersättigung des Betons.

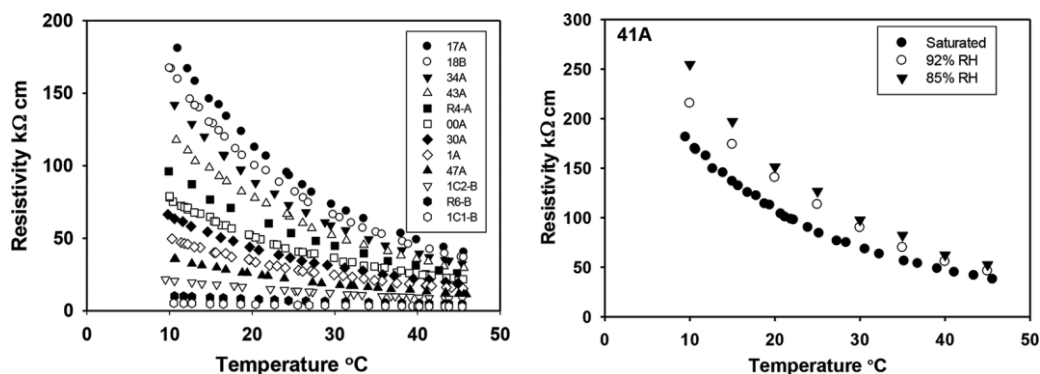


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem spezifischen elektrischen Betonwiderstand. Linkes Bild, für verschiedene Betonzusammensetzungen (wassergesättigte Proben). Rechtes Bild, Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem spezifischen elektrischen Betonwiderstand eines Betons für unterschiedliche Sättigungsgrade 85, 92 und 100% [38]

Ein Beispiel einer nahezu perfekten Temperaturkompensation des elektrischen Betonwiderstandes unter Anwendung der Arrhenius Gleichung zeigt Abbildung 7. Die Grafik zeigt für eine Widerlagerwand den zeitlichen Verlauf der Betontemperatur, den temperaturabhängigen Betonwiderstand auf einer Tiefe zwischen 20 und 27.5 mm und der entsprechende, temperaturkompensierte Widerstand über ein halbes Jahr. Der temperaturkompensierte Widerstand liegt unterhalb der Messwerte. Dies ist sinnvoll, da für die Bezugstemperatur $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293\text{ K}$ gewählt wurde, was deutlich oberhalb der der mittleren Temperatur der Widerlagerwand (ca. 5.5°C) liegt. Die Genauigkeit der Modellierung macht sich bei den Tagesschwankungen, die praktisch vollständig eliminiert werden konnten, besonders deutlich bemerkbar. Aufgrund der praktisch konstanten temperaturkompensierten Widerstände lässt sich schliessen, dass im betrachteten Zeitabschnitt keine tiefreichenden Feuchtwechsel stattgefunden haben.

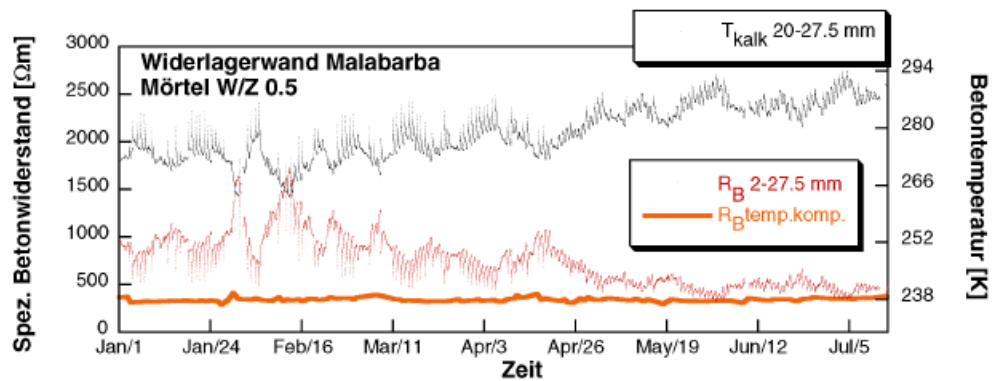


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf des elektrischen Betonwiderstandes (Messwerte und temperaturkompensiert) und der Betontemperatur an einer Widerlagerwand in der Region San Bernardino

Solange sich der Wassergehalt im Beton nicht signifikant verändert, bleibt der b-Wert weitgehend konstant. Bei sich ändernden Feuchtigkeitsbedingungen ist dies nicht mehr der Fall, wie Abbildung 8 zeigt. Die Temperatur-Widerstandskennlinien zeigen, wie in Abbildung 6, eine exponentielle Form mit unterschiedlichen Krümmungen. Kurz nach der Instandsetzung war die Brückenplatte stark durchfeuchtet, was über den Temperaturbereich von 0 bis 20 °C tiefe Betonwiderstände zur Folge hatte. Im Laufe der Zeit trocknete der Beton gegen die Plattenunterseite aus, bis ein verhältnismässig stabiler Feuchtezustand erreicht war und sich der b-Wert nicht mehr wesentlich änderte [45].

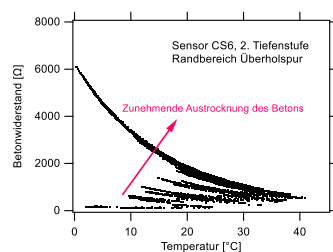


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen der Betontemperatur und dem elektrischen Betonwiderstand in einer instandgesetzten Brückenplatte.

Die Messwerte stammen von einbetonierten Temperatur- und Betonwiderstandssensoren aus einem langjährigen Monitoring Projekt an der A4 im Raum Küssnacht [45]

Solche fächerartigen Datenstrukturen sind typisch für Bauteile mit häufigen Feuchte-wechseln (Nass/Trocken-Zyklen). Dies hat zur Folge, dass der b-Wert innerhalb von kurzen Zeitabschnitten stark schwanken kann. Wenn bei der Temperaturkompensation der Betonwiderstände nur mit einem einzigen b-Wert gerechnet wird, kann dies zu temperaturbedingten Restschwankungen der Widerstände führen, welche die Interpretation des Wasserhaushalts im Beton erschweren dürfte. Mit automatisierten

Curve-Fitting Methoden über kurze Zeitperioden (z.B. eine Woche) kann die Genauigkeit der Modellierung verbessert werden, was beim Monitoring-Projekten, bei denen der Betonwiderstand eine wichtige Rolle spielt, berücksichtigt werden sollte.

In den Arbeiten von [38] konnte eine Beziehung zwischen der Aktivierungsenergie und dem Betonwiderstand bei einer Referenztemperatur von 21 °C hergeleitet werden. Anhand weiterer Berechnungen konnte eine universelle Gleichung für die Berechnung des temperaturkompensierten Betonwiderstandes (21 °C Bezugstemperatur), die nur den gemessenen Widerstand und den Messwert der Temperatur, unabhängig von der Betonmischung, berücksichtigt. Für die Bezugstemperatur kann auch ein anderer Wert als 21 °C eingesetzt werden.

Einfluss von Frost

Wenn die Betontemperatur unter 0 °C fällt, kommt es bei der sogenannten Phasenumwandlungstemperatur T_p (generell zwischen etwa -5 und 0 °C) zu einem Abknicken der exponentiellen Temperatur-Betonwiderstandskurven, wie Abbildung 9 zeigt [46]. Die plötzliche Widerstandsanstieg wird mit der Eisbildung in den Poren erklärt. Bis zu einer Temperatur von -10 bis -15 °C gilt das Arrhenius-Gesetz nicht mehr, bei tieferen Temperaturen stimmt die Zuordnung zum Arrhenius-Modell wieder. Das Auftreten des Knickpunktes bei T_p konnte auch in der Forschungsarbeit von [44] beobachtet werden. Da die Widerstandsänderungen beim Gefrieren des Wassers im Beton markant sind, könnte die Phasenumwandlungstemperatur T_p als Messgrösse für ein Monitoring von Frostangriffen verwendet werden. Dies bedingt, dass die äussersten Widerstandssensoren nahe der Betonoberfläche eingebaut werden müssen. Ob die Frost-/Auf-tauzyklen oberflächliches Absanden oder Ablösungen am Beton zur Folge haben, kann jedoch nach wie vor nur visuell oder mittels Kameraaufnahmen festgestellt werden.

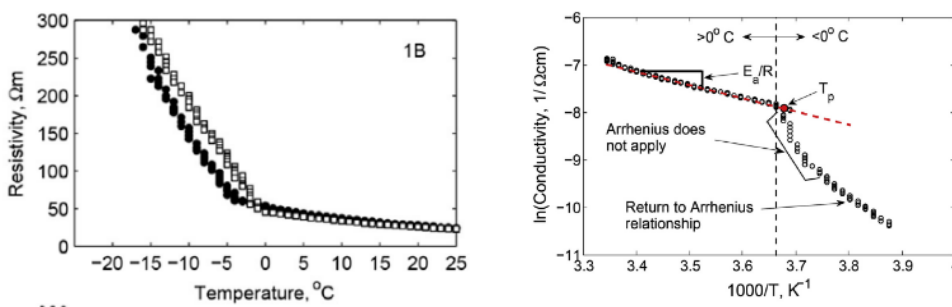


Abbildung 9: Links, Zusammenhang zwischen Temperatur und Betonwiderstand nach zwei Frostzyklen. Rechts, Illustration der Methode zur Bestimmung der Aktivierungsenergie (b-Wert) bei Temperaturen oberhalb der Phasenumwandlungstemperatur. Unterhalb dieser Temperatur nimmt die Aktivierungsenergie schlagartig zu, bevor die Messwerte wieder dem Arrhenius Modell zugeordnet werden können. Lesebeispiel für die X-Achse: -5 °C = 268.15 K, $1000/268.15 = 3.7$ [46]

4.4.4 Bewertungskriterien

Für die Bewertung der temperaturkompensierten, elektrischen Betonwiderstände sind grundsätzlich zwei verschiedene Ansätze möglich:

- **Bewertung der Absolutwerte:** Das der elektrische Betonwiderstand stark an die Betonfeuchtigkeit gekoppelt ist, kann aufgrund der Widerstandsmesswerte auf den effektiven Wassergehalt im Beton geschlossen werden. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn Betonprobekörper (z.B. Bohrkerne vom Bauwerk) für Widerstandsmessungen ausgerüstet [31] und bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten ausgelagert wer-

den. Durch Gewichtsmessungen kann auf diese Weise der Wassergehalt im Beton bestimmt werden.

- Bewertung der zeitlichen Veränderung der Betonwiderstände: Eine zeitabhängige Veränderung der Widerstandswerte deutet auf Wasseraufnahme oder Austrocknung des Betons hin. Insbesondere ein rascher und markanter Abfall des Betonwiderstandes in Oberflächennähe nach einer längeren Trockenphase ist ein klarer Hinweis darauf, dass die Betonoberfläche mit Regen- oder Spritzwasser beaufschlagt wurde und der Beton in der Lage war, die Feuchtigkeit durch kapillares Saugen in kurzer Zeit aufzunehmen. Mit solchen Betrachtungen kann beispielsweise die Wirksamkeit einer Oberflächenschutzmassnahme beurteilt und der Zeitpunkt des Versagens präzise dokumentiert werden.

4.4.5 IoT-Kompatibilität

Eine IoT-Kompatibilität ist für elektrische Widerstandsmessungen gegeben. Da i.d.R. Messfrequenzen von rund 1 Messung/h ausreichend sind, sind die anfallenden Datenmengen sehr gering. Eine automatisierte Bewertung ist sowohl anhand von Schwellenwerten als auch von Zeitreihen möglich und stellt die Grundlage für eine detaillierte Bewertung durch einen Experten dar.

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die wichtigsten Punkte zur elektrischen Widerstandsmessung im Beton zusammengefasst.

Zusammenfassung elektrischer Betonwiderstand

Verfahren	Messung des elektrischen Widerstands des Betons als Wechselstromwiderstandsmessung z.B. mit einem LCR-Gerät zwischen zwei (planparallelen) Elektroden
Messgrösse	Wechselstromwiderstand in [Ohm]
Sensor-komponenten	Zwei Elektroden in definiertem Abstand (idealerweise planparallel), bei Tiefenstaffelung mehrere Elektrodenpaare
Anwendungs-gebiete	Vorwiegend Neubauten, Bestand
Einflussgrössen	Temperatur, Betonfeuchtigkeit, Alkalinität
Bewertungs-kriterien	Widerstandsabfall um [n%] nach Temperaturkompensation deutet auf Feuchteintrag hin
Sensoranbieter	• CorroDec2G, infrasolute AG • Multiring-Elektrode, Sortec GmbH • Duramon Multisensor system • Tiefenaufgelöster Widerstandssensor (Leitervariante für Neu- und Stabvariante für Bestandsbau), TFB Diagnostic-Systems AG • Anodenleiter, Sortec GmbH • ECi-1 und -2, SMARTSTRUCTURES
IoT-kompatibel	Ja

Tabelle 4: Zusammenfassung elektrischer Betonwiderstand

4.5 Chloridgehaltsbestimmung

4.5.1 Verfahrensbeschreibung

Die Bestimmung der Chloridkonzentration mit ionenselektiven Elektroden (ISEs), im vorliegenden Fall Ag/AgCl-Elektroden, beruht auf dem Zusammenhang zwischen dem Potenzial der Elektrode und der Chloridkonzentration in der umgebenden Porenlösung. In Anwesenheit von Chloridionen findet ein Ionenaustausch über die Silberchlorid-Membran der Elektrode statt, der zu einer Potenzialverschiebung gegenüber einer Bezugs elektrode führt [47]. Die Potenzialänderung kann in eine Chloridkonzentration in der Porenlösung umgerechnet werden.

4.5.2 Messgrösse

Als Messgrösse wird das Potenzial der ionenselektiven Elektrode gegen eine Bezugs elektrode erfasst. Die Auswertung erfolgt durch Anwendung der Nernst-Gleichung, die das Potenzial der Elektrode in Beziehung zur Chloridionenaktivität setzt. Das gemessene Potenzial wird zunächst unter Berücksichtigung des Flüssigkeitsübergangspotentials korrigiert. Anschliessend wird die Chloridkonzentration anhand einer zuvor erstellten Kalibrierkurve bestimmt, die das Potenzial gegen bekannte Chloridkonzentrationen aufträgt. Abbildung 10 zeigt beispielhaft eine derartige Kalibrierkurve.

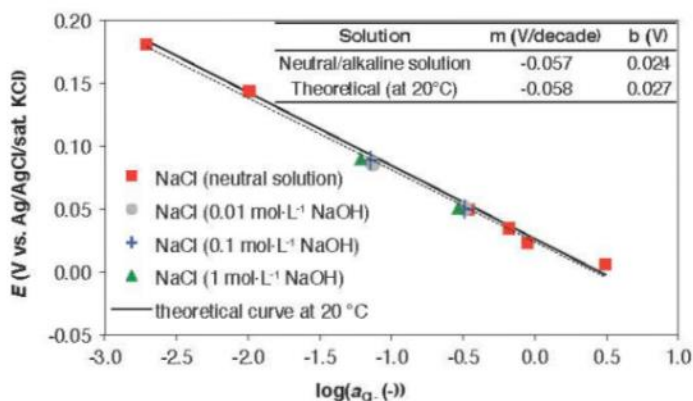


Abbildung 10: Kalibrierkurve zur Bestimmung der Chloridkonzentration in neutralen und hochalkalischen Lösungen (aus [48])

4.5.3 Anwendungsgebiete

Chloridgehaltsbestimmungen können bei allen Bauteiloberflächen angewandt werden, bei denen aufgrund der Exposition mit einer Chloridbeaufschlagung z.B. durch Tausalze zu rechnen ist.

4.5.4 Sensorkomponenten

Der Messaufbau zur Chloridgehaltsbestimmung in Beton besteht aus

- Einer ionenselektiven Silber/Silberchlorid-Elektrode (ISE), bestehend aus einem Silberdraht mit Silberchloridbeschichtung. Die Membran besteht aus den schwerlöslichen Silbersalzen des Chlorids, deren Potenzial von der Aktivität der Silberionen im Umgebungselektrolyt abhängt.

- einer Bezugselektrode mit stabilem, von der Zusammensetzung der umgebenden Porenlösung unabhängigen Bezugspotenzial. Zu diesem Zweck werden vorwiegend Ag/AgCl/sat. KCl-Elektroden verwendet.
- einem Potentiostat mit sehr hoher Eingangsimpedanz zum Messen der zeitabhängigen Potenzialänderungen

4.5.5 Einflussgrößen

Mehrere Einflussgrößen können die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Chloridgehaltsbestimmung mit Ag/AgCl-ISEs beeinflussen:

- Temperatur: Das Potenzial der ISE ist temperaturabhängig. Eine genaue Temperaturkontrolle oder -kompensation ist daher unerlässlich. Da Ag/AgCl/sat.KCl-Elektroden über eine sehr ähnliche Temperaturabhängigkeit verfügen, kann der Temperatureinfluss durch Verwendung dieser als Bezugselektrode minimiert werden. Interferenzen: Bromid, Sulfid und andere Ionen, die mit Silber unlösliche Verbindungen bilden, können die Messung stören. Die Selektivität der ISE ist begrenzt, und eine sorgfältige Berücksichtigung der Interferenzen ist erforderlich. Besonders bei Verwendung von hüttensandhaltigen Betonen können Sulfide die Ergebnisse deutlich beeinflussen.
- Flüssigkeitsübergangspotenzial: Das Flüssigkeitsübergangspotenzial an der Grenzfläche zwischen der Bezugselektrode und der Porenlösung kann die Messung beeinflussen und muss korrigiert werden.

4.5.6 Bewertungskriterien

Generell wird ein Chloridgehalt von 0,50 M.-%/z als unterer Schwellenwert für den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt C_{krit} angenommen. Eine Überschreitung dieses Chloridgehalts auf Höhe der ionenselektiven Elektrode kann daher – in Abhängigkeit von der Position des Sensors - als mögliches Bewertungskriterium herangezogen werden. Bei oberflächennahen Sensoren wird dieses Kriterium voraussichtlich bereits vergleichsweise früh überschritten, sodass der Bauherr in die Lage versetzt wird, ggf. erforderliche präventive Massnahmen frühzeitig zu ergreifen. Bei Sensoren in grösseren Tiefenlagen kann dementsprechend ein geringerer Chloridgehalt als Grenzwert angesetzt werden.

Da der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt bauwerksabhängig stark streuen kann, ist als Alternative zu einem festen Grenzwert als Kriterium auch eine zeitabhängige Änderung des Chloridgehalts möglich.

4.5.7 IoT-Kompatibilität

Da es sich bei den Chloridgehaltsbestimmungen über ionenselektive Elektroden letztlich um Potenzialmessungen handelt, sind diese analog zu den Potenzialmessungen IoT-kompatibel.

Zusammenfassung Chloridgehaltsbestimmung

Verfahren	Messung der Potenzialänderung einer ionensensitiven Ag/AgCl-Elektrode gegen eine Bezugsselektrode
Messgrösse	Potenzialänderung bzw. Potenzial [mV]
Sensor-komponenten	Ionensensitive Ag/AgCl-Elektrode Bezugsselektrode (z.B. Ag/AgCl/sat. KCl) Potentiostat
Anwendungs-gebiete	Tausalz beaufschlagte Bauteiloberflächen, insbesondere im Wand- und Sockelbereich
Einflussgrössen	Temperatur, Interferenzen, Flüssigkeitsübergangspotenzial
Bewertungs-kriterien	Chloridkonzentration im Beton in Bezug auf den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt
Sensoranbieter	• DuraMon • TFB Diagnostic Systems
IoT-kompatibel	ja

Tabelle 5: Zusammenfassung Chloridgehaltsbestimmung

4.6 pH-Wert Messung

4.6.1 Verfahrensbeschreibung

Die Bestimmung des pH-Werts in Beton mittels potentiometrischer pH-Sensoren erfolgt mithilfe von thermisch hergestellten Iridiumoxid-Elektroden (IrOx), die direkt in den Beton eingebettet werden. Das Potenzial der Elektrode ist abhängig von der Konzentration der Wasserstoffionen im umgebenden Porenwasser. Durch Messung des Potenzials der IrOx-Elektrode gegen eine langzeitstabile Bezugsselektrode kann die Potenzialänderung aufgezeichnet und in den pH-Wert des Betons überführt werden [49].

Zur pH-Wert-Bestimmung im Beton können neben potentiometrischen Sensoren auch faseroptische Sensorsysteme verwendet werden. Diese Darstellung beschränkt sich auf potentiometrische Sensoren; für die Anwendung faseroptischer Sensoren wird auf Kap. 5.15.5 verwiesen.

4.6.2 Messgrösse

Als Messgrösse wird die Potenzialdifferenz einer Iridiumoxid-Elektrode gegen eine Bezugsselektrode aufgezeichnet. Die Auswertung der Messungen erfolgt unter Anwendung der Nernst-Gleichung, die den Zusammenhang zwischen Elektrodenpotenzial und Wasserstoffionen-Konzentration bzw. pH-Wert beschreibt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die gemessene Potenzialdifferenz nicht direkt proportional zum pH-Wert ist, sondern durch Diffusionspotentiale durch Konzentrationsgradienten im Porenwasser beeinflusst wird.

4.6.3 Anwendungsgebiete

pH-Wert-Messungen können bei Bauteilen angewandt werden, bei denen eine erhöhte Gefahr einer karbonatisierungsinduzierten Korrosion besteht. Dies sind in der Regel Bauteiloberflächen ausserhalb der Spritzwasserzone, bei denen über einen ausrei-

chend langen Zeitraum nicht mit Wasser gefüllt sind, sodass ein relevanter Karbonatisierungsfortschritt eintreten kann.

4.6.4 Sensorkomponenten

Der Messaufbau zur potentiometrischen Bestimmung des pH-Werts besteht aus

- einer thermisch oxidierten Iridium/Iridiumoxid-Elektrode (IrOx-Elektrode).
- einer Bezugs elektrode mit stabilem, von der Zusammensetzung der umgebenden Porenlösung unabhängigem Bezugspotenzial. Zu diesem Zweck werden – analog zur Chloridgehaltsbestimmung - vorwiegend Ag/AgCl/sat. KCl-Elektroden verwendet.
- einem Potentiostat mit sehr hoher Eingangsimpedanz zum Messen der zeitabhängigen Potenzialänderungen

4.6.5 Einflussgrößen

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der pH-Wert-Bestimmung mit IrOx-Elektrode hängt u.a. von den folgenden Einflussgrößen ab [49]:

- Temperatur: das Elektrodenpotenzial ist temperaturabhängig, weshalb in der Regel eine Temperaturkompensation erforderlich ist, um genaue Messwerte zu erhalten.
- Diffusionspotenziale: In der Porenlösung des Betons entstehen durch pH- oder Chloridgradienten zwischen Sensor und Referenzelektrode zusätzliche Potenziale, die die gemessenen Potenziale beeinflussen.
- Interferenzen: Obwohl IrOx-Elektroden eine hohe pH-Selektivität aufweisen, können interferierende Ionen oder organische Substanzen in komplexen Medien wie Betonporenlösungen die Messgenauigkeit beeinträchtigen.

4.6.6 Bewertungskriterien

pH-Wert-Messungen dienen zum Monitoring eines möglichen pH-Wert-Abfalls. Dabei sind nach [50] zwei Bewertungskriterien relevant:

- Mit einem Rückgang des pH-Werts auf $\text{pH} = 12,5$ tritt bereits ein deutlicher Rückgang des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts ein, was insbesondere bei chloridbeaufschlagten Bauwerken in Verbindung mit einer Chloridgehaltsbestimmung relevant ist.
- Bei einem Rückgang auf $\text{pH} = 9,0$ auf Bewehrungshöhe besteht die Gefahr von karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion.

4.6.7 IoT-Kompatibilität

pH-Wert-Messungen sind grundsätzlich IoT-kompatibel.

Zusammenfassung pH-Messung

Verfahren	Messung der Potenzialänderung einer IrOx-Elektrode gegen eine Bezugsselektrode
Messgrösse	Potenzialänderung bzw. Potenzial [mV]
Sensor-komponenten	IrOx-Elektrode Bezugsselektrode (z.B. Ag/AgCl/sat. KCl) Potentiostat
Anwendungs-gebiete	Bauteiloberflächen mit erhöhter Gefahr für karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion
Einflussgrössen	Temperatur, Chloridgehalt
Bewertungs-kriterien	pH-Wert-Abfall auf pH = 12,5 und pH = 9
Sensoranbieter	Duramon-Sensorsystem
IoT-kompatibel	ja

Tabelle 6: Zusammenfassung pH-Messung

4.7 Elementstrommessung

4.7.1 Verfahrensbeschreibung

Bei der Elementstrommessung wird der elektrische Strom, der in einem Makrokorrosionselement zwischen der Arbeitselektrode (Anode) und der Gegenelektrode (Kathode) fliesst, gemessen und als Indikator für die Korrosionsaktivität der Anode in diesem Korrosionselement interpretiert. Sofern die Elementstrommessung bei einem permanenten Kurzschluss zwischen Anode und Kathode gemessen wird (stationäre Elementstrommessung), kann aus dem gemessenen Elementstrom – unter Berücksichtigung der Randbedingungen – eine qualitative bzw. semiquantitative Aussage über die Korrosionsrate und ihre zeitliche Veränderung abgeleitet werden. Bei Elementstrommessungen, bei denen der Kurzschluss nur kurzzeitig für die Dauer der Messung hergestellt wird, ist hingegen nur eine qualitative Aussage möglich, ob zum Zeitpunkt der Messung Korrosion stattfindet oder nicht.

4.7.2 Messgrösse

Als Messgrösse wird der Elementstrom I_{corr} in $[\mu\text{A}]$ zwischen Anode und Kathode aufgezeichnet. Da die Grösse der Anode den Elementstrom unmittelbar beeinflusst, wird alternativ zu I_{corr} häufig die Elementstromdichte i_{corr} in $[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$ als Quotient aus I_{corr} und der Anodenfläche verwendet.

4.7.3 Sensorkomponenten

Für die Elementstrommessung sind folgende Komponenten erforderlich:

- Arbeitselektrode/Anode: Als Anode können wahlweise die Betonstahlbewehrung selbst bzw. isolierte Bewehrungsabschnitte definierter Grösse oder gesondert eingebrachte Anoden aus einem Material mit vergleichbaren Korrosionseigenschaften

wie die Betonstahlbewehrung verwendet werden. Idealerweise wird auch hinsichtlich der Ausbildung der Kontaktzone und dem Oberflächenzustand zu diesem Zweck ebenfalls Betonstahl verwendet. Die Grösse der Anoden sollte gemäss [3] zwischen rund 1 cm² und 50 cm² betragen.

- Gegenelektrode/Kathode: Analog zur Anode sollte auch die Kathode idealerweise hinsichtlich des Potenzials, des Polarisationsverhalten etc. möglichst ähnliche Eigenschaften wie die Betonstahlbewehrung aufweisen. Daher empfiehlt sich in vielen Fällen die Verwendung der vorhandenen Betonstahlbewehrung als Kathode. Alternativ können auch gesondert eingebrachte Kathoden z.B. aus TiMMO verwendet werden, die unter den Bedingungen im Beton über ein stabiles, ausreichend edles Ruhepotenzial verfügen. Damit der Elementstrom nicht durch den kathodischen Polarisationswiderstand gesteuert wird, sollte die Kathode eine – im Vergleich zur Anode – ausreichend grosse Oberfläche aufweisen.
- Nullwiderstands-Amperemeter (ZRA): Zur Elementstrommessung sollte ein Amperemeter mit möglichst geringem Innenwiderstand verwendet werden. Diese Anforderung kann am besten durch den Einsatz eines Nullwiderstands-Amperemeter bzw. ZRA (‘Zero-Resistance-Amperemeter’) erfüllt werden. Bei Geräten mit zu hohem Widerstand besteht die Gefahr, dass der tatsächliche Elementstrom und damit die Korrosionsaktivität ggf. unterschätzt wird

4.7.4 Anwendungsgebiete

Elementstrommessungen können analog zur Potenzialmessung an allen Bauteiloberflächen durchgeführt werden, bei denen aufgrund einer wiederkehrenden Beaufschlagung mit Chloriden aus Tausalzanwendung oder ungünstiger Randbedingungen für Karbonatisierung bereits mit aktiver Bewehrungskorrosion gerechnet werden muss bzw. über die weitere Nutzungsdauer eine erhöhte Gefahr von Bewehrungskorrosion besteht. Dabei verändert sich die Art und Aussage der Elementstrommessung in Abhängigkeit vom Zeitpunkt, zu dem die Messung durchgeführt wird:

- werden Elementstrommessungen während der Einleitungsphase an tiefengestaffelt angeordneten Einzelanoden durchgeführt, dienen diese primär zum Überwachen des zeitabhängigen Eindringens der Depassivierungsfront ins Bauteilinnere,
- während der anschliessenden Schädigungsphase dienen Elementstrommessungen in erster Linie zur (qualitativen) Überwachung der zeitabhängigen Veränderung der Korrosionsaktivität auf Höhe der Bewehrung.

4.7.5 Einflussgrössen

Auf mögliche Einflüsse, die sich aus der Wahl von Anoden- bzw. Kathodengrösse und -materialien ergeben, wurde bereits in Kap. 4.7.3 hingewiesen. Daneben sind im Wesentlichen Einflüsse aus den klimatischen Randbedingungen relevant. Sollen die Ergebnisse von Korrosionsstrommessungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten verglichen werden, sind Temperaturabhängigkeiten bzw. Abhängigkeiten vom Elektrolytwiderstand zum Messzeitpunkt entsprechend zu berücksichtigen. Weitere mögliche Einflussgrössen auf den gemessenen Strom sind u.a. der Sauerstoffgehalt und der Wassergehalt.

4.7.6 Bewertungskriterien

Zur Bewertung der Korrosionsaktivität wird in [51] der folgende Zusammenhang gemäss Tabelle 7 vorgeschlagen. Dieser wurde ursprünglich zur Bewertung von Polarisations-

tionswiderstandsmessungen hergeleitet, ist aber sinngemäss auch auf stationäre Elementstrommessungen anwendbar. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass sich bei chloridinduzierter Makrokorrosion in der Regel vergleichsweise kleinflächige Anoden ausbilden, deren Ausdehnung zerstörungsfrei nicht bestimmt werden kann. Wird für die Bestimmung der Elementstromdichte die ganze Anodenfläche angesetzt, birgt dies die Gefahr, dass die tatsächliche Korrosionsrate signifikant unterschätzt wird. Zudem ist – insbesondere bei grösseren Arbeitselektroden – davon auszugehen, dass sich auf diesen neben den anodischen Teilflächen auch kathodische Teilflächen ausbilden, die durch die Elementstrommessung nicht erfasst werden und zu einer weiteren Unterschätzung der Korrosionsaktivität führen. Daher wird von einer quantitativen Bewertung der Korrosionsrate abgeraten und empfohlen, diese primär in Verbindung mit anderen Messgrössen als qualitativen Hinweis auf die zeitliche Veränderung von Korrosionsprozessen zu deuten.

Zusammenhang Stromdichte und Korrosionsaktivität

Stromdichte i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	Korrosionsaktivität
$\leq 0,1$	Vernachlässigbar
$0,1 - 0,5$	Gering
$0,5 - 1,0$	Moderat
$> 1,0$	Hoch

Tabelle 7: Zusammenhang Stromdichte und Korrosionsaktivität nach [51]

4.7.7 IoT-Kompatibilität

Elementstrommessungen sind IoT-kompatibel. Da i.d.R. Messfrequenzen < 1 Messung/h ausreichend sind, sind die anfallenden Datenmengen sehr gering. Eine automatisierte Bewertung ist sowohl anhand von Schwellenwerten als auch von Zeitreihen möglich und stellt die Grundlage für eine detaillierte Bewertung durch einen Experten dar.

Zusammenfassung Elementstrommessung

Verfahren	Messung des Elementstroms zwischen einer Arbeitselektrode und einer Gegenelektrode/Kathode mit einem ZRA zur Bewertung der Eindringtiefe der Depassivierungsfront bzw. zur Bewertung der zeitabhängigen Veränderung der Korrosion
Messgrösse	Elementstrom in $[\mu\text{A}]$ stationär/instationär und Überführung in Elementstromdichte
Sensor-komponenten	• Arbeitselektrode aus BSt 500 mit definierter Oberfläche (bei Tiefenstaffelung mehrere Arbeitselektroden in unterschiedlichen Tiefenlagen) • Gegenelektrode/Kathode mit ausreichend grosser Oberfläche
Anwendungs-gebiete	• Tausalzbeaufschlagte Bauteiloberflächen, insbesondere im Wand- und Sockelbereich bzw. bei Hinweisen auf aktive Korrosion
Einflussgrössen	• Temperatur • Anoden-/Kathodengrösse
Bewertungs-kriterien	• Bei Depassivierung: plötzlicher Anstieg des Korrosionsstroms um z.B. mehr als 400% innerhalb eines Monats oder Überschreiten eines Grenzwerts für den Elementstrom (z.B. Anodenleiter: $15 \mu\text{A}$) • Bei aktiver Korrosion: zeitabhängiger Anstieg/Abfall des Elementstroms
Sensoranbieter	• CorroWatch, Fa. Force Technology; • CorroRisk, Fa. Force Technology; • Anodenleiter, Fa. Sensortec; • CS-040, TFB Diagnostic Systems; • Duramon Multisensor system
IoT-kompatibel	Ja

Tabelle 8: Zusammenfassung Elementstrommessung

4.8 LPR-Messung

4.8.1 Verfahrensbeschreibung

Bei der linearen Polarisationswiderstandsmessung ('linear polarization resistance' LPR) wird die Arbeitselektrode von ihrem freien Korrosionspotenzial ausgehend in anodischer bzw. kathodischer Richtung (oder in beide Richtungen) geringfügig polarisiert und die daraus resultierende Änderung des Stroms ΔI bzw. der Stromdichte Δi aufgezeichnet. In der Regel erfolgt diese Polarisation potenzialgesteuert mit sehr geringen Polarisationsgeschwindigkeiten und um bis zu rund $\pm 20 \text{ mV}$ vom freien Korrosionspotenzial ausgehend. Da sich in diesem engen Bereich um das freie Korrosionspotenzial die Stromänderung bei Potenzialänderung annähernd linear verhält, kann der 'Lineare Polarisationswiderstand' R_p (in $[\Omega]$) als Quotient aus der Potenzialänderung ΔE (in $[\text{mV}]$) und der resultierenden Systemantwort (in diesem Fall Δi in $[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$) berechnet werden, Abbildung 11. Unter Verwendung der Stern-Geary-Gleichung kann R_p in die Korrosionsstromdichte i_{corr} überführt und somit unter gewissen Voraussetzungen als Mass zur Bewertung der Korrosionsaktivität über die Zeit verwendet werden [52].

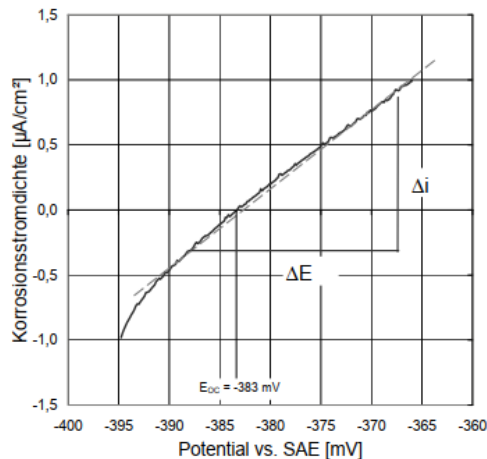


Abbildung 11: Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands als Steigung der Tangente im Stromdichte-Potential-Diagramm (aus [53])

4.8.2 Sensorkomponenten

Anders als bei der Elementstrommessung, bei der lediglich ein Zwei-Elektroden-Aufbau erforderlich ist, wird für die LPR-Messung ein Drei-Elektroden-Aufbau, bestehend aus Arbeitselektrode, Gegenelektrode und Bezugslektrode verwendet:

- **Arbeitselektrode:** Für die Arbeitselektrode gelten die Vorgaben aus Kap. 4.7.3 sinngemäss, d.h., es können wahlweise die Betonstahlbewehrung selbst oder aber gesondert eingebrachte Anoden aus einem Material mit vergleichbaren Korrosionseigenschaften wie die Betonstahlbewehrung verwendet werden. Auch hinsichtlich der Grösse der Arbeitselektrode gelten die Empfehlungen aus Kap. 4.7.3.
- **Gegenelektrode:** Als Gegenelektrode können sowohl die vorhandene Bewehrung als auch z.B. gesondert eingebrachte TiMMO-Elektroden verwendet werden. Im Gegensatz zur Elementstrommessung ist das freie Korrosionspotenzial sowie die Grösse der Gegenelektrode bei der LPR-Messung von untergeordneter Bedeutung, da die Polarisation der Arbeitselektrode potentiostatisch kontrolliert und nicht durch Herstellung eines Kurzschlusses erfolgt.
- **Bezugslektrode:** Die Vorgaben für Bezugslektroden aus Kap. 4.3.3 gelten sinngemäss. In der Regel werden Mangandioxid-Elektroden (MnO_2) und Silber-/ Silberchlorid-Elektroden (Ag/AgCl) verwendet.
- **Potentiostat:** Die Durchführung von LPR-Messung erfordert die Verwendung eines Potentiostats, mit dem der Arbeitselektrode relativ zur Bezugslektrode ein Potential aufgeprägt und gleichzeitig der aus der Polarisation resultierende Strom zwischen Arbeitselektrode und Gegenelektrode gemessen werden kann. Alternativ ist auch die Verwendung eines Galvanostaten möglich, bei dem ein definierter Strom aufgeprägt und die resultierende Polarisation gemessen wird. Potentiostatische oder potentiodynamische LPR-Messungen sind heute gebräuchlicher.

4.8.3 Anwendungsgebiete

LPR-Messungen können analog zu Elementstrommessungen an Bauteiloberflächen Anwendung finden, bei denen aufgrund einer wiederkehrenden Beaufschlagung mit Chloriden aus Tausalzanwendung oder ungünstiger Randbedingungen für Karbonatisierung bereits mit aktiver Bewehrungskorrosion gerechnet werden muss bzw. über die weitere Nutzungsdauer eine erhöhte Gefahr von Bewehrungskorrosion besteht. Ge-

genüber der Elementstrommessung bietet die LPR-Messung den Vorteil, dass sie in der Nähe des freien Korrosionspotenzials der Arbeitselektrode erfolgt und damit weitgehend unabhängig vom Potenzial und der Grösse der Gegenelektrode ist, womit sich die LPR-Messung u.U. bei Arbeitselektroden besonders eignet, bei denen aufgrund eines reduzierten Sauerstoffangebots (z.B. im Erdreich) eine deutliche Verschiebung des Potenzials in negative Richtung vorliegt und Potenzialmessungen und Elementstrommessungen zu einer Fehlinterpretation führen können.

4.8.4 Einflussgrössen

Die in Kap. 4.7.5 erläuterten Einflüsse aus klimatischen Bedingungen etc. gelten für die LPR-Messung sinngemäss. Daneben bestehen bei der LPR-Messung verfahrensbedingt einige zusätzliche Einflüsse aus dem Sensoraufbau, die insbesondere die Positionierung der Bezugselektrode und die Berücksichtigung des Betonwiderstands betreffen. Bei der Bestimmung des Polarisationswiderstands $R_P = \Delta E / \Delta i$ wird auch der ohmsche Widerstand aufgrund des Betonwiderstands zwischen Arbeits- und Bezugselektrode mitgemessen, der insbesondere bei aktiv korrodierenden Systemen mit entsprechend geringem Polarisationswiderstand zu einer Unterschätzung der Korrosionsaktivität führen kann. Daneben spielt auch die Polarisationsgeschwindigkeit bei der Ermittlung von R_P eine Rolle.

4.8.5 Bewertungskriterien

Der lineare Polarisationswiderstand R_P kann mit der Stern-Geary-Gleichung in die Korrosionsstromdichte i_{corr} überführt werden. Zur Bewertung der Korrosionsaktivität anhand von i_{corr} wird auf Kap. 4.7.6 verwiesen. Dabei ist analog zu den Ausführungen bei Elementstrommessungen zu berücksichtigen, dass sich bei chloridinduzierter Makrokorrosion in der Regel vergleichsweise kleinflächige Anoden ausbilden, deren Ausdehnung zerstörungsfrei nicht bestimmt werden kann. Wird für die Bestimmung von Δi die ganze Anodenfläche angesetzt, birgt dies die Gefahr, dass die tatsächliche Korrosionsrate unterschätzt wird. Zudem ist – insbesondere bei grösseren Arbeitselektroden – davon auszugehen, dass sich auf diesen neben den anodischen Teilflächen auch kathodische Teilflächen, die durch die Elementstrommessung nicht erfasst werden und zu einer Unterschätzung der Korrosionsaktivität führen. Daher ist eine Umrechnung des linearen Polarisationswiderstands in Korrosionsraten mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Eine qualitative Aussage über Korrosionsaktivität und zeitabhängige Veränderungen ist anhand von LPR-Messungen hingegen möglich.

R_P ist verfahrensbedingt nur auf den Potenzialbereich unmittelbar um das freie Korrosionspotenzial anwendbar und verliert bei stärkerer Polarisation seine Gültigkeit.

4.8.6 IoT-Kompatibilität

LPR-Messungen sind ebenso wie Potenzialmessungen und Elementstrommessungen IoT-kompatibel.

Zusammenfassung LPR-Messung

Verfahren	Bestimmung des linearen Polarisationswiderstands der Arbeitselektrode durch anodische/kathodische Polarisation ausgehend vom freien Korrosionspotenzial und Aufzeichnen des resultierenden Stromänderung. Das Verfahren benötigt einen Potentiostaten (erhöhter Energiebedarf ist zu beachten)
Messgrösse	Linearer Polarisationswiderstand R_P als Quotient aus Potenzialverschiebung ΔE und resultierender Stromantwort Δi
Sensor-komponenten	• Bezugslektrode MnO_2 oder $Ag/AgCl$ • Gegenelektrode (Ti/MMO oder Bewehrungskorb) • Arbeitselektrode aus BST500 mit definierter Oberfläche (bei Tiefenstaffelung mehrere Arbeitselektroden in unterschiedlichen Tiefenlagen)
Anwendungs-gebiete	Tausalzbeaufschlagte Bauteiloberflächen, insbesondere im Wand- und Sockelbereich bzw. bei Hinweisen auf aktive Korrosion
Einflussgrössen	• Temperatur • Betonfeuchtigkeit • Betonwiderstand • Polarisationsgeschwindigkeit
Bewertungs-kriterien	Einstufung der Korrosionsaktivität anhand von i_{corr} gemäss Tabelle 7 bzw. anhand von zeitabhängigen Veränderungen des Polarisationswiderstands (Abfall von R_P als Hinweis auf Korrosionsinitiierung)
Sensoranbieter	• CorroWatch, Fa. Force Technology • CorroRisk, Fa. Force Technology • Anodenleiter, Fa. Sortec
IoT-kompatibel	Ja

Tabelle 9: Zusammenfassung LPR-Messung

4.9 Mikrostrukturelle Schädigungen im Beton

4.9.1 Verfahrensbeschreibung

Die Ausbreitung von Ultraschall in Beton lässt sich in mehrere Frequenzbereiche einteilen, die durch unterschiedliche physikalische Bedingungen geprägt sind. Sehr hohe Frequenzen oberhalb von etwa 1 MHz unterliegen starker Dämpfung und eignen sich daher vorwiegend für oberflächennahe Untersuchungen. Auch der niederfrequenten Bereich unterhalb von etwa 20 kHz dient primär der Analyse globaler Struktureigenschaften, wie sie beispielsweise in der Modalanalyse betrachtet werden. Zwischen etwa 10 kHz und 150 kHz treten einfache Streueffekte auf, die viele klassische Ultraschallverfahren nutzen, um grössere Inhomogenitäten sicher zu identifizieren. Diese Bereiche bieten einen hilfreichen physikalischen Rahmen, stehen jedoch nicht im Zentrum der hier beschriebenen Verfahren.

Für die Codawelleninterferometrie ist der Bereich intensiver Mehrfachstreuung entscheidend. Dort wird die ausgesandte Welle wiederholt und zufällig an den heterogenen Bestandteilen des Betons gestreut, wodurch in den späteren Signalanteilen, der Coda, eine besonders hohe Sensitivität gegenüber minimalen strukturellen Veränderungen entsteht. Die Codawelleninterferometrie vergleicht Wellenformen verschiedener Zeitpunkte und nutzt diese erhöhte Sensitivität gezielt, um selbst mikroskopische

Änderungen im Material zu erkennen. Das Verfahren eignet sich damit besonders zur kontinuierlichen Überwachung feiner Schädigungsprozesse und zur Detektion schleichender Veränderungen, die in klassischen Ultraschallregimen nicht erfasst würden. Grundlegende Informationen zum Verfahren der Codawelleninterferometrie enthalten [54], [55], [56] und [57].

Im Gegensatz dazu ist die Akustische Emissionsprüfung (AE) ein passives Verfahren, bei dem spontane, durch Schädigungsereignisse verursachte Wellenformen registriert werden. Entscheidend sind dabei Kriterien wie Amplitude, Energie oder Häufigkeit, anhand derer ein Ereignis zunächst identifiziert und anschliessend klassifiziert wird. Da AE reale, schlagartige Vorgänge im Inneren des Materials erfasst – etwa das Aufreissen eines Mikrorisses – kann die Methode das Auftreten von Fehlstellen unmittelbar dokumentieren. Werden mehrere Signale gleichzeitig oder räumlich verteilt detektiert, ist zudem eine Lokalisierung des Ursprungs dieser Ereignisse möglich. Eine allgemeine Darstellung der Akustischen Emissionsprüfung enthalten [58], [59] und [60].

4.9.2 Messgrösse

Bei der Codawelleninterferometrie wird die zeitliche Verschiebung Δt zwischen zwei Wellenformen aufgezeichnet, die durch minimale strukturelle Veränderungen im Material entsteht. Über die Kreuzkorrelation der Signale wird daraus die relative Geschwindigkeitsänderung $\Delta v/v$ bestimmt, die als zentrale Messgrösse dient. Veränderungen in $\Delta v/v$ spiegeln kleinste Anpassungen der elastischen Eigenschaften wider. Bei der Akustischen Emission werden einzelne Ereignisse durch ihre Amplitude A in [dB] und ihre Energie E in [J] beschrieben. Ergänzend werden Parameter wie Anstiegszeit, Signaldauer sowie die Anzahl der Überschreitungen eines definierten Schwellenwerts registriert. Aus den Ankunftszeiten an mehreren Sensoren kann zudem die Quelle des AE-Ereignisses lokalisiert werden.

4.9.3 Sensorkomponenten

Für die Durchführung der Codawelleninterferometrie und der akustischen Emission werden im Wesentlichen ähnliche Sensorkomponenten benötigt, die allerdings unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Für die aktive Anregung im Rahmen der Codawelleninterferometrie sind Ultraschallsender erforderlich, die reproduzierbare Signale im gewünschten Frequenzbereich erzeugen und eine über den Messzeitraum stabile Kopplung an die Betonoberfläche gewährleisten. Alternativ ist eine Einbettung der Sensorik in das Bauteil möglich. Die zugehörigen Empfänger müssen eine hohe Empfindlichkeit aufweisen und die wiederholt gestreuten Signalanteile mit ausreichender Bandbreite erfassen können, da die Auswertung kleinster zeitlicher Verschiebungen eine hohe Signalstabilität und geringe Messrauschanteile voraussetzt.

Für die Akustische Emission kommen passive Sensoren zum Einsatz, die ohne Anregung arbeiten und in der Lage sind, spontane, impulsartige Ereignisse präzise und mit hoher Dynamik zu detektieren. Diese Sensoren müssen kurze Anstiegszeiten und einen grossen Dynamikbereich abbilden können, da Amplitude und Energie der einzelnen AE-Ereignisse die zentrale Grundlage für die Interpretation darstellen. Zusätzlich ist eine geeignete Vorverstärkung notwendig, um schwache Signale zuverlässig erfassen und überlagertes Rauschen minimieren zu können.

Da beide Verfahren auf der Detektion elastischer Wellen beruhen und im mittleren bis höheren Ultraschallfrequenzbereich arbeiten, ist der Einsatz kombinierter Sensorkonzepte grundsätzlich möglich. Eine gemeinsame Sensorplattform könnte sowohl aktive Signale für die Codawelleninterferometrie erfassen als auch impulsartige Ereignisse der Akustischen Emission detektieren, sofern ausreichend Bandbreite, Dynamik und eine anpassbare Signalverarbeitung bereitgestellt werden. Dies eröffnet die Möglichkeit, kontinuierliche Strukturveränderungen und plötzliche Schädigungsereignisse mit einem einzigen Messsystem zu überwachen, wodurch eine umfassendere und effizientere Zustandsbewertung des Materials erreicht werden kann.

4.9.4 Anwendungsgebiete

Die Verfahren werden vor allem zur kontinuierlichen Zustandsüberwachung tragender Strukturen eingesetzt. Ein Beispiel ist die Gänstorbrücke in Ulm, an der Codawelleninterferometrie und Akustische Emission erfolgreich zur Bewertung der Resttragfähigkeit genutzt wurden. Auch am U-Bahnhof Scheidplatz in München wird die Deckenkonstruktion auf diese Weise überwacht. Grundsätzlich eignen sich die Verfahren für Bauwerke mit dynamischer Beanspruchung wie Brücken, Tunnel oder Windenergieanlagen und ermöglichen eine frühzeitige Erkennung sowohl schleichender Veränderungen als auch einzelner Schädigungsereignisse.

4.9.5 Einflussgrößen

Die Leistungsfähigkeit sowohl der Codawelleninterferometrie als auch der Akustischen Emission wird von einer Reihe umgebungs- und materialabhängiger Einflussgrößen bestimmt. Bei der Codawelleninterferometrie wirken sich insbesondere Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen aus, da diese die elastischen Materialparameter und damit die Laufzeit der Wellen beeinflussen. Für eine belastbare Auswertung ist daher eine Kompensation oder Referenzierung notwendig, um reversible Effekte klar von irreversiblen Schädigungsprozessen zu trennen. Darüber hinaus beeinflussen Koppelungsbedingungen, Sensorausrichtung und Veränderungen der Randbedingungen des Bauteils die Signalstabilität.

Bei der Akustischen Emission spielen externe Störquellen eine zentrale Rolle. Mechanische Anregungen aus dem Betrieb, Reibgeräusche oder elektrische Störungen können als AE-Ereignisse fehlinterpretiert werden und müssen über geeignete Filter- und Klassifikationsmethoden separiert werden. Ebenso wirkt sich die Spannungsrate im Bauteil auf die Ereignishäufigkeit aus: Schnell ansteigende Lasten erzeugen typischerweise eine höhere Zahl impulsartiger Signale als quasistatische Beanspruchungen. Materialheterogenitäten und die Anisotropie von Beton beeinflussen zudem die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung, was die Lokalisierungsgenauigkeit begrenzt.

4.9.6 Bewertungskriterien

Die Bewertung mikrostruktureller Schädigung erfolgt bei der Codawelleninterferometrie primär über die zeitliche Entwicklung der relativen Geschwindigkeitsänderung $\Delta v/v$. Eine kontinuierliche Abnahme von $\Delta v/v$ weist typischerweise auf fortschreitende strukturelle Veränderungen hin, etwa auf die Bildung und Ausbreitung von Mikrorissen. Zur weiteren Interpretation werden Korrelationskoeffizienten der Wellenformen herangezogen, um die Signalintegrität und die statistische Verlässlichkeit der Messung zu beurteilen.

Für die Akustische Emission stehen Häufigkeit und Energie der einzelnen Ereignisse im Vordergrund. Steigende Ereignisraten, zunehmende Amplituden oder eine Verschiebung der Energiedistribution sind Indikatoren für aktive Schädigungsprozesse. Ergänzend werden Lokalisierungskarten genutzt, die räumliche Clusterbildung sichtbar machen und Zonen erhöhter Aktivität identifizieren. Zur Bewertung im Zeitverlauf kommen darüber hinaus Kenngrößen wie der b-Wert oder Cumulative Signal Strength (CSS) zum Einsatz, die Aussagen über die Dominanz kleiner oder grosser Rissereignisse erlauben.

4.9.7 IoT-Kompatibilität

Die Anwendung von Akustischer Emission ist in anderen Technologiebereichen wie z.B. der Überwachung von Tanks etc. mittlerweile Standard, sodass hier auch IoT-kompatible Lösungsansätze existieren. Die Übertragung auf das Bauwesen ist aufgrund der Vielzahl der Einfluss- und Störfaktoren nicht trivial und es gibt bisher keine standardisierten IoT-Lösungen. Der Einsatz der Codawelleninterferometrie in der Baupraxis ist bisher nicht IoT-kompatibel.

Zusammenfassung Codawelleninterferometrie (CWI)

Verfahren	Aktives Ultraschallverfahren mit Vergleich mehrfach gestreuter Codawellen zu verschiedenen Zeitpunkten
Messgrösse	Relative Geschwindigkeitsänderung $\Delta v/v$ aus zeitlicher Verschiebung Δt ; gültig bei vergleichbarem Korrelationskoeffizienten der verglichenen Wellenformen
Sensor-komponenten	Ultraschallsender zur reproduzierbaren Anregung sowie hochempfindliche Empfänger mit stabiler Kopplung
Anwendungs-gebiete	Zustandsvergleiche und kontinuierliche Überwachung von Betonbauwerken auf mikrostrukturelle Veränderungen
Einflussgrössen	Temperatur, Feuchtigkeit, Kopplungsbedingungen, Sensorausrichtung, Randbedingungen des Bauteils
Bewertungs-kriterien	Zeitliche Entwicklung von $\Delta v/v$, Korrelationskoeffizienten der Wellenformen zur Beurteilung der Signalintegrität
Sensoranbieter	Aktive piezoelektrische Ultraschallsensoren (Sender-Empfänger-Systeme), ggf. eingebettet
IoT-kompatibel	derzeit noch nicht

Tabelle 10: Zusammenfassung Codawelleninterferometrie (CWI)

Zusammenfassung Akustische Emission (AE)

Verfahren	Passives Verfahren zur Detektion spontan entstehender elastischer Wellen infolge von Schädigungsereignissen
Messgrösse	Amplitude A [dB], Energie E [J], Ereignishäufigkeit, Anstiegszeit, Signaldauer; optional Ereignislokalisierung
Sensor-komponenten	Passive Sensoren mit hoher Dynamik und kurzen Anstiegszeiten; Vorverstärker zur Rauschminimierung
Anwendungs-gebiete	Detektion und Lokalisierung einzelner aktiver Schädigungsereignisse (z. B. Rissinitiierung und -wachstum)
Einflussgrössen	Externe Störquellen, Betriebsgeräusche, elektrische Störungen, Spannungsrate, Materialheterogenität
Bewertungs-kriterien	Ereignisrate, Amplituden- und Energieverteilung, Lokalisierungsmuster, b-Wert, Cumulative Signal Strength (CSS)
Sensoranbieter	Passive piezoelektrische AE-Sensoren
IoT-kompatibel	Im Bauwesen derzeit noch nicht

Tabelle 11: Zusammenfassung Akustische Emission (AE)

4.10 Verformungsmessungen

4.10.1 Verfahrensbeschreibung

Verformungsmessungen im Bauwesen dienen der quantitativen Erfassung von Längenänderungen, Verschiebungen, Durchbiegungen, Neigungen, Rissöffnungen und Rotationen an Tragwerken und Bauwerken. Neben den klassischen Anwendungen von sensorbasierten Verformungsmessungen im Bereich SHM, Gebrauchstauglichkeitsbeurteilung (z. B. Durchbiegungen, Rissbreiten) und frühzeitiges Erkennen von sicherheitsrelevanten Verformungen, Verschiebungen oder Neigungen, können diese auch für das Langzeitmonitoring von dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsprozessen verwendet werden, welche einen Einfluss auf die Bauwerksgeometrie oder -integrität haben.

Im Unterschied zu rein geodätischen oder bildbasierten Methoden liefern fest installierte Sensoren kontinuierliche Zeitreihen und erlauben die Kompensation von Lasteinwirkungen und Umweltbedingungen.

Im vorliegenden Kapitel wird nur auf elektrische Messverfahren eingegangen. Faser-optische Verformungsmessungen werden im Kap. 5.15.7 behandelt.

Sensorklassen

• Dehnungsmessung:

- **Dehnungsmessstreifen (DMS)** erlauben die Messung der Dehnung des Materials, an dem sie befestigt sind. DMS zeigen sich in Form einer Kunststoff-Folie mit Längen im 1-stelligen cm-Bereich, die aufgeklebt wird. Die gemessene Dehnung entspricht dem Mittelwert über die DMS-Länge. Alternativ kommen DMS auch als sensitives Element in längeren Sensoren mit Ankerpunkten zum Einsatz. Wichtig dabei ist eine konstante Steifigkeit des Sensorgestänges und eine gleichmässige Dehnung über die gesamte Sensorlänge, um den DMS-Messwert auf die Sensorlänge extrapolieren zu können.

- **«Vibrating Wire»-Sensoren** dienen für Dehnungsmessungen mit Messlängen im dm-Bereich. Im Gegensatz zu DMS haben VW-Sensoren Ankerpunkte an den beiden Enden des Sensorgestänges.
- **Geometrische/kinematische Sensorik:**
 - **Wegaufnehmer (LVDT, Potentiometer, Seilzuggeber):** Direkte Messung relativer Verschiebungen zwischen zwei Punkten, können auch für Langwegdehnungsmessungen eingesetzt werden. Weitere technische Details zu LVDT und potentiometrischen Wegaufnehmern finden sich in Kap. 5.12 und Kap. 5.13.
 - **Neigungssensoren/Inklinometer:** Bestimmung von Rotationen; aus Neigungsprofilen können Verschiebungen abgeleitet werden (z. B. Stützwände, Pfähle).
- **Kontaktlose Verfahren** (sensorisch im weiteren Sinn, weniger relevant für kontinuierliches Monitoring):
 - **Laser-Distanzsensoren/LiDAR (punktuell):** Distanz- bzw. Profilaufnahmen mit hoher Präzision, vorteilhaft bei schwer zugänglichen Messstellen.
 - **Radar/Interferometrie:** Insbesondere für grossräumige Setzungen oder Brückendurchbiegungen (stationär oder satellitengestützt).
 - **Kamera-/DIC-Systeme (Digital Image Correlation):** Vollfeldmessung von Dehnungen/Verschiebungen; sehr leistungsfähig, jedoch empfindlich gegenüber Sichtbedingungen, Beleuchtung und Referenzierung.

4.10.2 Messgrössen

Die für das Dauerhaftigkeitsmonitoring in Frage kommenden Messgrössen lassen sich in primäre (direkt gemessen) und abgeleitete Grössen (aus Modell/Geometrie berechnet) gliedern:

- **Primäre Messgrössen**
 - **Dehnung / Verformung:** z. B. AAR-Quellen (LVDT- /potentiometrische Extensometer)
 - **Neigung / Rotation:** z. B. Kippen von Stützmauern aufgrund von differentiellen Quellphänomenen (MEMS-Inklinometer)
 - **Rissöffnung:** direkt über Rissensoren (potentiometrisch, LVDT, DMS, vibrating wire) oder indirekt aus Dehnungsprofilen
 - **Beschleunigung:** Beeinflussung der dynamischen Antwort des Bauteils durch innere Schädigung (Risse, Abfall der mechanischen Materialeigenschaften), Basis für modale Kenngrössen
- **Abgeleitete Messgrössen**
 - **Durchbiegung/Verformungslinie:** aus Wegmesspunkten, Neigungsprofilen oder einer Kombination (Sensor fusion)
 - **Schädigungsindikatoren:** Eigenfrequenzverschiebung, modale Dämpfung

4.10.3 Sensorkomponenten

- **Weg-/Rissensoren (extensometrisch):** Messkörper, Lagerung/Führung (Spiel, Reibung), Temperaturerfassung.
- **DMS:** Messgitter, Trägerfolie, Klebstoffsystem, Schutzbeschichtung.
- **Vibrating Wire Sensoren:** Sensorgehäuse (Rohr) mit gespanntem Draht (Saite) und piezoelektrischen oder induktivem Erreger und Frequenzaufnehmer.
- **Inklinometer:** MEMS-Sensorelement, Gehäuse, Montageadapter; bei Tiefeninklinometern zusätzlich Führungsrohrsystem.

- **Beschleunigungssensoren:** MEMS oder piezoelektrisch, häufig mit triaxialer Messung und Temperaturerfassung.

Eine Auswahl an Messgeräten und Datenloggern für Sensoren mit Standard-Signalausgang (Spannung oder Strom), die im weiteren Sinn zum Sensorsystem gehören, sind in Kap. 6.3.6 aufgeführt.

4.10.4 Anwendungen

- **Quellphänomene (AAR):** AAR induziertes Quellen des Betons ist ein langsamer, irreversibler und dreidimensionaler Prozess der sich über ganze Bauteile oder Bauwerke erstrecken kann. Die Kinetik und Amplitude des Quellens hängt nebst der Betonalkaliaktivität vom Spannungszustand, Feuchtigkeit Temperatur und der AAR-Entwicklungsphase ab. Das AAR-Quellen ist kein lokal eingeschränkter Prozess, sondern findet auf Strukturebene statt. Geeignete Verformungssensoren sind Extensometer mit Messlängen von einigen Dezimetern bis zu mehreren Metern. Da die Verformung anisotropisch ist, ist ein dreidimensionales Sensornetzwerk sinnvoll. Speziell sind auch Tiefen- oder Bohrlochstensometer quer zur Bauteilebene sinnvoll. Diese ermöglichen es, an der Oberfläche nicht sichtbare Transversaldehnungen und interne Delaminationen zu messen, bzw. festzustellen.
- **Rissöffnung (Frost, AAR):** Zur Überwachung von Rissöffnungen eignen sich neben kinematische Rissensoren (LVDT, Potentiometer) auch elektrische Dehnungssensoren (DMS, Vibrating Wire Sensoren) oder, bei Verwendung von verteilter, faseroptischer Sensorik (DFOS, siehe Kap. 5.15.7), können Rissöffnungsänderung über Dehnungsprofile bestimmt werden. DFOS hat den Vorteil, dass damit auch neu entstehende Risse detektiert und deren Rissöffnungsentwicklung bestimmt werden kann.

4.10.5 Einflussgrößen

- **Temperatur**
Temperatur wirkt auf nahezu alle Sensortypen:
 - Thermische Längenänderung des Bauwerks überlagern oft massgeblich lastinduzierte Dehnungen oder interne Quellphänomene (AAR). Im Gegensatz zu dauerhaftigkeitsspezifischen Verformungen sind thermische Längenänderungen jedoch reversibel und können so nach einer anfänglichen Kalibrierphase relativ gut aus den Datenreihen herausgefiltert werden.
 - Sensor-Temperaturgang (z. B. DMS-Kennwert, thermische Längenänderung des Sensorgestänges von kinematischen Sensoren) erfordert Kompensation.
Gängige Strategien: Temperatursonden beim Extensometer, rechnerische Kompensation mittels Kalibrierkurven.
- **Feuchte, Alkali, Korrosion und Alterung**
Insbesondere im Beton- und Aussenbereich beeinflussen Feuchteaufnahme, Alkaliangriff (auf Klebstoffe/Schutzschichten), Korrosion (bei Stahloberflächen) und UV-Strahlung die Signalstabilität. Langzeitdrift kann durch Materialalterung, Mikroschlupf in der Sensoranbindung oder Kriechprozesse im Packaging entstehen.
- **Kriechen und Schwinden (Beton)**
Kriechen und Schwinden sind natürliche, zeitabhängige Verformungen des Betons und müssen bei der Interpretation klar vom zu überwachenden Verformungsphänomen (z.B. Quellen bei AAR) getrennt werden.

- **Montage-/Kopplungseinflüsse**

Die Dehnungstransferfunktion (wie gut die Strukturdehnung in den Sensor übertragen wird) hängt von Klebstoffdicke, Oberflächenvorbereitung, Einbettlage, Kabelzugentlastung und Schutzschichten ab. Fehlerquellen sind u. a. Exzentrizität, lokale Steifigkeitserhöhung durch Sensorpaket, unzureichende Aushärtung oder Delamination.

- **Elektromagnetische Einflüsse und Rauschen**

DMS- und MEMS-Systeme sind empfindlich gegenüber EMV, Erdschleifen, Kabellängen und Feuchte in Steckverbindungen. Faseroptische Systeme sind diesbezüglich oft robuster, haben jedoch Anforderungen an Biegeradien, Stecksauberkeit und optische Dämpfung.

4.10.6 Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien für Verformungsmessungen hängen massgeblich vom Bauwerk, resp. der Messstelle und dem überwachten Schädigungsprozess ab. Verformungen hängen oft von mehreren Faktoren ab, die bei der Datenauswertung auseinanderhalten werden müssen. Es ist nicht möglich, allgemein gültige Kriterien oder Grenzwerte zu definieren. Die Beurteilung von Verformungsdaten, speziell zu dauerhaftigkeitsspezifischen Schadensprozessen, soll auf jeden Fall Experten vorbehalten bleiben.

4.10.7 IoT-Kompatibilität

Verformungsmessungen mit elektrischen Sensoren sind IoT-kompatibel (geringer Stromverbrauch und kleine Datenrate). Da für Dauerhaftigkeitsmonitoring i.d.R. Messfrequenzen < 1 Messung/h ausreichend sind, sind die anfallenden Datenmengen sehr gering. Eine automatisierte Bewertung ist sowohl anhand von Schwellenwerten als auch von Zeitreihen möglich und stellt die Grundlage für eine detaillierte Bewertung durch einen Experten dar.

4.10.8 Fazit

Sensorbasierte Verformungsmessungen sind im Bauwesen ein Schlüsselwerkzeug für die Tragwerksüberwachung (SHM) wie auch für gewisse dauerhaftigkeitsrelevante Schädigungsprozesse (z.B. AAR-Quellen). Die Auswahl des Sensorprinzips hängt primär von der Zielgrösse (Dehnung vs. Weg vs. Neigung), dem räumlichen Erfassungsbedarf (punktuell vs. verteilt), den Umgebungsbedingungen sowie der geforderten Langzeitstabilität ab. In vielen Fällen liefert erst die Kombination aus mehreren Sensorklassen und einer expliziten Berücksichtigung von Temperatur- und Zeiteffekten belastbare Interpretationen.

Zusammenfassung Verformungsmessmethoden

Verfahren	LVDT	Potentiometer	Vibrating-Wire-(VW) / Crackmeter	MEMS-Tiltmeter / Inklinometer (accelerometer-basiert)
Messgrösse	Relativweg wird über induktive Kopplung	Relativweg über Schleifkontakt auf Widerstandsbahn	Schwingfrequenz eines gespannten Drahts ändert sich mit Dehnung (Prinzip der Saite)	Neigung (mrad/°), daraus Rotation abgeleitet
Sensor-komponenten	LVDT-Körper, Kern/Stössel, Befestigungen, Signalkonditionierungselektronik, Stromversorgung	Potentiometer-Sensor, Stromversorgung	VW-Sensorelement, Temperaturfühler, elektrischer Erreger und Schwingungsaufnehmer	MEMS-Sensor, Gehäuse, Temperaturfühler, Stromversorgung
Anwendungsgebiete	AAR-Quellen	Rissöffnung	Rissöffnung	AAR (Stützmauern)
Einflussgrössen	Temperaturdrift, Befestigungssteifigkeit/Spiel, Querkräfte, Feuchte/Schutzart, Kabellängen/EMV	Verschleiss/Alterung, Temperaturkoeffizient, Kontaktwiderstände, Hysterese, Schmutz/Feuchte	Temperatur-Einfluss (oft mit eingebautem Thermistor kompensiert), Verankerungsqualität	Temperaturdrift/Bias, Langzeitstabilität, Einbauausrichtung, mechanische Kopplung an Struktur/Boden, Feuchte/Vibration.
Bewertungskriterien	Zeitliche Entwicklung, dx/dt	Zeitliche Entwicklung, dx/dt	Zeitliche Entwicklung, dx/dt	Zeitliche Entwicklung, dx/dt
Sensoranbieter	diverse	diverse	diverse	diverse
IoT-kompatibel	ja	ja	eingeschränkt	ja

Tabelle 12: Zusammenfassung Verformungsmessmethoden

Die für diese Zusammenfassung ausgewählten Messverfahren wurden aufgrund ihre Eignung für Rissöffnungs- und AAR-Verformungsmessungen bestimmt.

5 Kommerzielle Sensorsysteme

5.1 Einleitung

In den folgenden drei Kapiteln werden auf dem Markt verfügbare Monitoringsysteme beschrieben. Die Kapitel sind in Sensorik (Kap. 5), Datenakquisitionsgeräte (Kap. 6) sowie Datenübertragungs- und Netzarchitekturen (Kap. 7) gegliedert. Die meisten Hersteller von Systemen bieten komplette Systeme an, mit aufeinander abgestimmten Sensoren, DAQ, Netzarchitekturen und Datenhostingplattformen. Vereinzelt gibt es jedoch auch DAQ und Datenhostingplattformen, welche nicht zwingend auf nur bestimmte Sensoren eines Herstellers beschränkt sind, sondern sich für eine Vielzahl von Sensoren von Drittanbietern eignen, was ihre Einsatzmöglichkeiten und Polyvalenz erweitert. In Abbildung 12 ist eine typische IoT-basierte Systemarchitektur dargestellt.

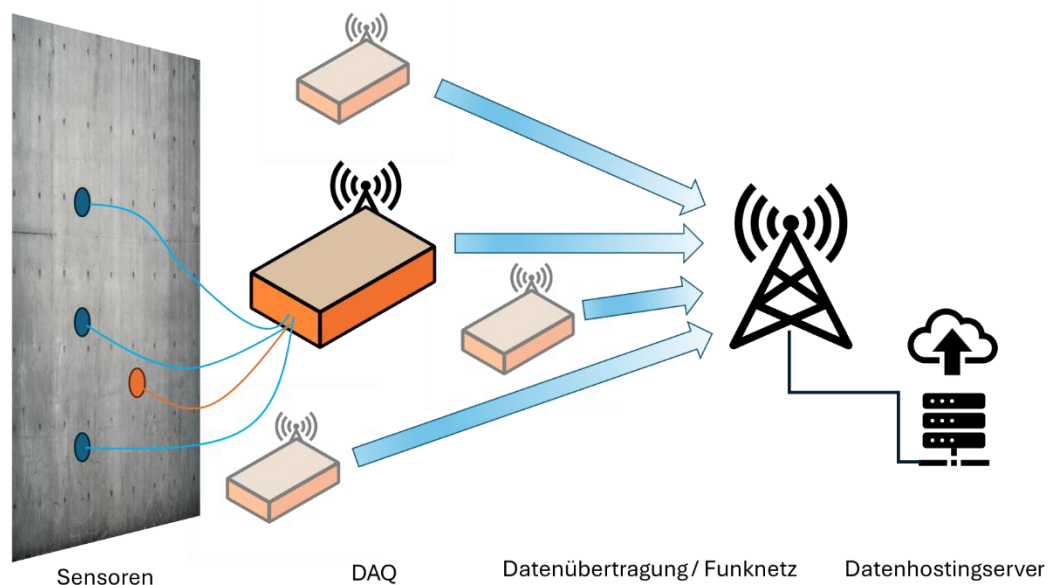


Abbildung 12: Schematische Illustration einer typischen IoT-Monitoring-Systemarchitektur

5.2 ECi-Sensoren von SMARTSTRUCTURES

Die kompakten Geräte ECi-1 und ECi-2 von SMARTSTRUCTURES bestehen aus einer Kombination von Sensoren für die Anwendung in neuen Betonbauten. Die Sensoren messen den Polarisationswiderstand (MnO_2 Referenzelektrode, NiRo-Stahl Gegenelektrode, Opferelektrode als Arbeitselektrode aus schwarzem Stahl: $220 \Omega \cdot \text{cm}^2 - 22 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}^2$) als indirektes Mass für die Korrosionsgeschwindigkeit, den Elektrolytwiderstand (4-Punkt-Messung, $1-100000 \Omega \cdot \text{cm}$), die Chloridkonzentration mittels einer

Ag/AgCl-ionenselektive Elektrode in Kombination mit einer Referenzelektrode und die Feststofftemperatur. Alle Signale gehen an den Digital-to-Analog (DAC) und den Analog-zu-Digital (ADC) Umwandler. Der Mikrocontroller führt gleichzeitig alle erforderlichen Berechnungen durch, um aus den Signalen die oben aufgeführten Kenngrößen zu erhalten.



Abbildung 13: Korrosionsmonitoring-System von SmartStructures. Links, ECI-2 und Rechts, ECI-1

5.3 CS-040 und CS-322 von TFB Diagnostic Systems

Die TFB Diagnostic Systems AG hat drei Sensortypen für den Einbau in Betonbauteilen im Angebot, zwei für Neubauten und ein Sensor für bestehende Bauwerke. Beim Sensor CS-040 handelt es sich um eine Reihe von Betonstahlsensoren für die Initiierung von Korrosionsprozessen und die Bestimmung des Korrosionsfortschritts (Abbildung 14). Dieser Sensor, der als Frühwarnsystem für Korrosion dient, misst den Fortschritt der Front über den kritischen Chloridgehalt, der zu Lochkorrosion führt.

Der Sensor besteht aus vier normalen Betonstahlstäben, die in einem bestimmten Abstand (variable Betonüberdeckung) vom Sensorstahl sitzen. Der Sensor mit den vier Bewehrungsstäben wird mittels einer speziellen, beweglichen Halterung an der bestehenden Bewehrung befestigt. Die ersten zwei bis drei Bewehrungsstahlsensoren befinden sich vor der ersten Bewehrungsebene. Gleichzeitig gewährleistet diese Halterung die Verbindung zur allgemeinen Bewehrung. Der Korrosionsstrom (Makroelementstrom) zwischen dem Bewehrungsstahlsensor und der umgebenden Bewehrung wird überwacht. Bei Aktivierung (Auslösung) der Korrosion steigt der Korrosionsstrom exponentiell an, was auf die Auslösung von Lochfrasskorrosion zurückzuführen ist. Da die Chloridfront die statische Bewehrung noch nicht erreicht hat, können Massnahmen ergriffen werden, um den weiteren Chlorideintrag zu verlangsamen oder zu stoppen. Anstelle des Korrosionsstroms kann auch das Potenzial des Bewehrungsstahls gemessen werden. Hierzu muss jedoch eine geeignete Referenzelektrode in den Beton eingebettet werden.



Abbildung 14: Betonstahlsensoren des Typs CS-040 der TFB Diagnostic Systems AG

Wenn Sensoren in bestehende Bauteile eingebaut werden, besteht das Problem, dass der Sensor in den meisten Fällen nicht mit dem Originalbeton in Kontakt ist, sondern von einer Zementsteinfüllung umgeben ist. Diese weist andere Eigenschaften als der Bauwerksbeton auf, was ein Risiko für nicht repräsentative Messergebnisse darstellt. Der Einfluss der Zementsteinumhüllung nimmt mit grösser werdenden Schichtdicke zu. Aus diesem Grund versucht man in der Praxis, die zementöse Umhüllung so dünn wie möglich herzustellen. Ein Beispiel eines solchen Sensors ist der CS-322 der TFB Diagnostic-Systems AG (Abbildung 15).



Abbildung 15: Kombiniertes Korrosionsstrom- und Widerstandssensor des Typs CS-322 der TFB Diagnostic Systems AG

Dieser Sensor für bestehende Bauwerke misst die wichtigsten Parameter zur Beurteilung des Korrosionsrisikos der Bewehrung. Er besteht aus einem segmentierten Edelstahlrohr zur Feuchtemessung, zwei Bewehrungsstahlsensoren zur Korrosionsstrommessung und zwei Pt1000-Temperaturfühlern. Der Sensor wird in eine Bohrung mit $\varnothing 22$ mm eingesetzt und der schmale Ringraum mit einem Spezialmörtel verpresst. Die dünne Mörtelschicht nimmt schnell die Umgebungsbedingungen des Betons auf (Erfahrungswert ca. zwei Wochen). Durch Messung des elektrischen Betonwiderstands (Impedanzmessung bei 1 kHz) zwischen dem Segment und der umgebenden Bewehrung kann unter Berücksichtigung der Zellkonstante der spezifische Betonwiderstand berechnet werden. Mit Hilfe der gemessenen Betontemperaturen kann eine Temperaturkompensation der Betonwiderstände durchgeführt werden. Der Korrosionsstrom

(Makroelementstrom) zur umgebenden passiven Bewehrung wird mit den beiden Betonstahlsensoren gemessen. Dieser Strom kann bei Annahme der anodischen Fläche, die der sichtbaren Oberfläche des Betonstahlsensors entspricht, mit Hilfe der Faraday-Gleichung (6) in einen Stahlabtrag umgerechnet werden.

$$G = \frac{M}{z \cdot F} \cdot I \cdot t \quad (6)$$

Die Metallauflösung G als umgesetzte Masse in Gramm berechnet sich aus der Atommasse von Eisen M in g/mol dividiert durch die Wertigkeit des Eisenions z ($= 2$) und der Faradaykonstante F ($= 96487$), multipliziert mit der gemessenen Stromstärke I (A) und der Zeit t in Sekunden. Als Beispiel löst ein Strom von 1 A während 1 Jahr einen Korrosionsverlust von rund 10 kg Eisen auf.

5.4 ERE 20 von FORCE Technology

Die ERE 20 von FORCE Technology (Abbildung 16) ist eine robuste Referenzelektrode, die häufig als Kontrollelement beim kathodischen Korrosionsschutz verwendet wird. Sie kann in den Überdeckungsbeton eingebaut werden, um die korrekte Funktion des Kathodenschutzes zu überwachen und den Korrosionszustand von Bewehrungsstahl zu kontrollieren. Die Referenzelektrode verwendet Mangandioxid (MnO_2) in einem stark alkalischen Elektrolyten (pH 13,5) und kann sowohl in neuen als auch in bestehenden Bauwerken installiert werden. Das Elektrodenmaterial ist in einem Edelstahlgehäuse untergebracht und verfügt über eine Ionenmembran aus Zementstein. Die ERE 20 kann an einen Datenlogger angeschlossen werden, um Messdaten zu kontinuierlich zu erfassen. Darüber hinaus können Messungen mit einem Handvoltmeter mit hoher Eingangsimpedanz ($>100 \text{ M}\Omega$) durchgeführt werden.



Abbildung 16: ERE 20 Referenzelektrode von FORCE Technology (Bild aus Datenblatt von FORCE)

5.5 CorroWatch von FORCE Technology

Von der gleichen Unternehmung kommt der CorroWatch Multi-Sensor, der hauptsächlich als Frühwarnsystem zur Vorhersage der Aktivierung von Korrosion in Betonkonstruktionen eingesetzt wird (Abbildung 17). Es wird in den Überdeckungsbeton von neuen Betonbauteilen einbetoniert.



Abbildung 17: CorroWatch multi-sensor von FORCE Technology (Bild aus Datenblatt von FORCE)

In der Standardausführung besteht der CorroWatch aus vier schwarzen Stabanoden und einer Edelmetallkathode. Die Anoden werden ringförmig in unterschiedlichen, aber definierten Abständen zur Betonoberfläche angebracht. Die Höhe der Anoden ist flexibel und kann entsprechend der Bewehrungsüberdeckung angepasst werden. Die Kathode, gegen die der Makroelementstrom von den Betonstahlsensoren gemessen wird, befindet sich am Rand des Rings. Ein Temperatursensor ist ebenfalls vorhanden. Durch die Messung des Elementstroms und des elektrochemischen Potenzials in verschiedenen Tiefen der Betonüberdeckung lässt sich vorhersagen, wann die Korrosion die Bewehrung erreichen dürfte, sodass die erforderlichen Instandhaltungsmassnahmen rechtzeitig vor dem Auftreten von Schäden getroffen werden können.

Um vorherzusagen, wann die Korrosion der Verstärkung beginnt, können verschiedene Messverfahren gewählt werden. In erster Linie kann dies durch elektrochemische Potenzialmessungen an einer stabilen Referenzelektrode erfolgen. Der Strom wird entweder mit einem Voltmeter oder einem speziell entwickelten Datenlogger gemessen. Wenn die Korrosion einsetzt, steigt der Strom deutlich an. Die CorroWatch-Sensoren ermöglichen beide Optionen zur Messung des Korrosionsstroms. Allerdings ist die Verwendung der Nullwiderstands-Amperemeter-Technik vorzuziehen. Zu Beginn, bevor Korrosion an der Anode auftritt, ist der gemessene Korrosionsstrom sehr gering. Wenn die Passivschicht durchbrochen ist und die Korrosion einsetzt, steigt der gemessene Strom rasch und deutlich an. Der CorroWatch kann mit der ERE 20 Referenzelektrode kombiniert werden, falls die Korrosionspotenziale der Betonstahlsensoren von Interesse sind. Weitere Informationen zu diesem Sensorsystem finden sich in [61].

5.6 Multisensoren von DuraMon

Ein neueres Monitoringsystem stammt von DURAMON, einem Spin-off der ETH Zürich. DuraMon ist ein im Beton eingebettetes Multiparameter-Sensorsystem, das an ausgewählten Stellen Messwerte zur Chloridkonzentration im Beton (freie Chloride), zum elektrischen Betonwiderstand und pH-Wert sowie zum Korrosionspotenzial der Bewehrung und dem Korrosionsstrom liefert (Abbildung 18). Zusammen mit dem Sensorsystem wird ein Datenlogger angeboten, der an die Sensoren angeschlossen wird und die Daten der Sensoren misst und überträgt. Die Auswertung der Daten erfolgt durch DURAMON.

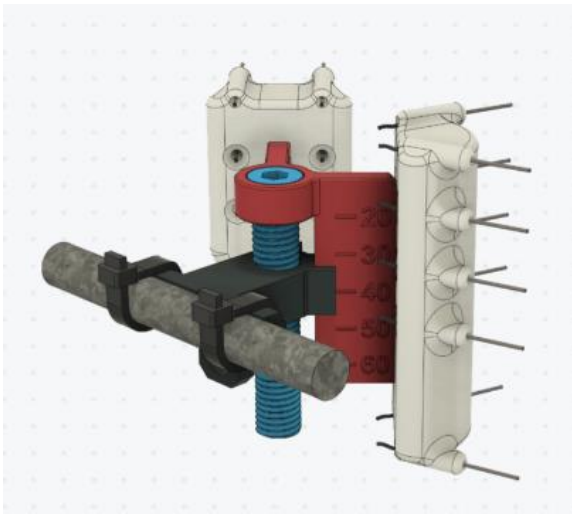


Abbildung 18: DuraMon Sensor-System für Neubauten, an Bewehrungsseisen fixiert (Bild von duramon.ch)

Nebst der beschriebenen Variante für den Neubau gibt es auch die Möglichkeit der instrumentierten Bohrkern für bestehende Bauwerke. Dabei wird ein Bohrkern aus einem Bauteil entnommen und im Labor mit den DurMon-Miniatursensoren instrumentiert. Anschliessend wird der präparierte Bohrkern wieder an den Originalstandort zurückgesetzt und im Bauteil vermörtelt. Diese feine, den Bohrkern umlaufende, unbelastete Mörtelschicht ist nicht in direktem Kontakt mit den Sensorelektroden und hat somit keinen störenden Einfluss auf die Messungen. Das mehradrige Messkabel, welches mit den Sensoren verdrahtet ist, wird mit dem Datenlogger verbunden.

Die genaue Funktionsweise der Sensorik ist in verschiedenen wissenschaftlichen Publikationen dokumentiert [62], [63], [6]. Die Chloridkonzentration wird mit Ag/AgCl Ionen-selektiven Elektroden gemessen. Dieses Verfahren ist seit längerem bekannt [64] und erlaubt die Bestimmung der freien Chloride im Porenwasser des Zementsteins. Einschränkend ist zu erwähnen, dass die Messung in Hüttensandzementen durch die darin enthaltenen Sulfide gestört wird. Die Stabilität und Dauerhaftigkeit der Silber-Chlorid-Elektroden in alkalischer Umgebung sind von verschiedenen Faktoren abhängig [65]. Bei niedrigen Chloridkonzentrationen kann sich auf der Elektrode Silberhydroxid ablagern, was zu einer Unterschätzung des Chloridgehalts führen kann. Aus Sicht der Praxis ist dies jedoch von geringerer Bedeutung, da der Effekt bei höheren Konzentrationen nicht mehr auftritt. Die Lebensdauer der Elektroden hängt von

der Dicke der AgCl-Schicht ab, da es im Laufe der Zeit zu Korrosion und Abblätterungen der Beschichtung kommt. Gesicherte Aussagen und Erfahrungen über die Nutzungsdauer der Ag/AgCl-Sensoren liegen aber noch nicht vor.

Für die pH-Messung im Beton werden thermisch-oxidierte Iridium Elektroden (IrOx) verwendet [63]. Mit diesen Sensoren kann die in der Regel langsam fortschreitende Karbonatisierung bzw. der pH-Abfall im Beton, der zur Depassivierung des Betonstahls führt, über die Zeit verfolgt werden. Bis heute liegen der Forschungsstelle keine Erfahrungsberichte aus baupraktischen Anwendungen vor. In der Praxis wird die Karbonatisierungstiefe im Beton üblicherweise mit pH-Wert Indikatoren wie z.B. Phenolphthalein gemessen. Dabei kommt es zu einem Farbumschlag, wenn der pH-Wert unter ca. 9 bis 10 fällt. Die verschiedenen Phasen der Karbonatisierung und der stufenweisen pH-Absenkungen (gepufferte Porenlösung) können mit diesem einfachen Verfahren nicht erfasst werden.

5.7 Concreteintel von Precision Structural Health Sensors

Sensorsysteme, die eine elektrochemische Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit mittels LPR-Messung (linear polarisation resistance) erlauben, werden z.B. von der Precision Structural Health Sensors (Oxford Design and Innovation Limited, Cheltenham, England) vertrieben. Als eine Art Vorläufer kann die DIAMOND Monitoring Probe erwähnt werden, über die einige Forschungsergebnisse vorliegen [66]. Es kann jedoch vermutet werden, dass dieser Sensor im Beton wegen der klassischen Kupfer/Kupfersulfat-Elektrode keine ausreichende Langzeitstabilität aufweist.

Für das Korrosionsmonitoring im Beton kommen bei Precision Structural Health Sensors zwei Sensortypen zum Einsatz, die mit concreteintel-P4 (eine Version mit 6 Elementen ist ebenfalls erhältlich) und -mini bezeichnet sind (Abbildung 19). Als Referenzelektrode wird eine Manganoxid-Elektrode (MnO_2) verwendet. Die Stahlsensoren weisen Länge von 200 (P4) bis 300 mm (P6) auf. Ein Pt1000 Temperatursensor ist ebenfalls Bestandteil des Systems. Gemessen werden kann das Korrosionspotenzial der Stahlelemente, der lineare Polarisationswiderstand und ein galvanischer Strom (Makroelementstrom). Mit dem DAUintel steht ein Datenerfassungsgerät zur Verfügung, der unabhängig oder über eine RS485-Schnittstelle betrieben werden kann. Der Forschungsstelle liegen aktuell keine Erfahrungsberichte zu diesen Systemen vor.

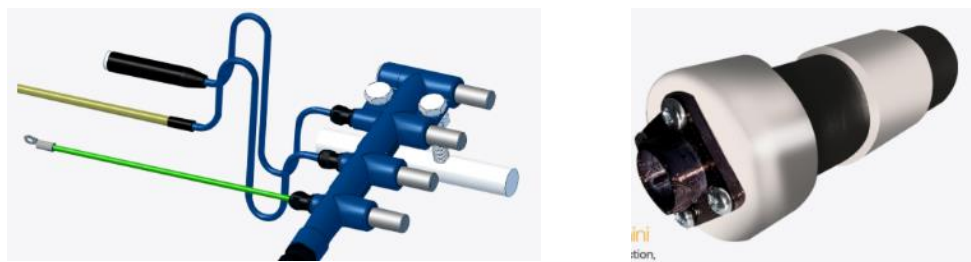


Abbildung 19: Links, concreteintel-P4. Rechts, concreteintel-mini (Bilder von precisionstructuralhealthsensors.com/concrete-corrosion-monitoring)

5.8 Anodenleiter der Sensortec GmbH

Bei der Anodenleiter der Fa. Sensortec handelt es sich um ein weiteres Sensorsystem, bei dem durch tiefengestaffelte Anordnung von Stellvertreteranoden innerhalb der Betondeckung das Eindringverhalten von Chloriden und der Karbonatisierungsfront überwacht werden, um somit den Bauherren in die Lage zu versetzen, präventiv ggf. erforderliche Interventionsmassnahmen zu ergreifen, bevor Bewehrungskorrosion eintritt.

Die Anodenleiter besitzt sechs Stellvertreteranoden aus geripptem Betonstahl BSt 500 mit einer freien Länge von jeweils 50 mm, die tiefengestaffelt in einem Edelstahlrahmen angeordnet sind. Der Sensor kann auf die äussere Bewehrungslage aufgesetzt und die Sensorneigung so angepasst werden, dass die äusserste Sensorsprosse eine Betondeckung von rund 10 mm aufweist und die innerste Sprosse annähernd auf Höhe der äusseren Bewehrungslage liegt. Im Sensorrahmen ist ein Pt1000-Temperatursensor zur Temperaturmessung integriert. Daneben umfasst der Sensor eine MnO₂-Bezugselektrode und einen TiMMO-Stab als Kathode. Über einen Bewehrungsanschluss können zusätzlich auch Messungen am Bewehrungskorb selbst durchgeführt werden. Zur Bewertung des Korrosionszustands der Sensorsprossen werden die folgenden Messungen durchgeführt:

- Messung des Potenzials der Sensorsprossen, des TiMMO-Stabs und der Bewehrung gegen die MnO₂-Bezugselektrode
- Messung des Elementstroms der Sensorsprossen im Kurzschluss mit dem TiMMO-Kathodenstab oder dem Bewehrungskorb zu einem definierten Zeitpunkt nach Herstellen des Kurzschlusses (instationäre Messung)
- Messung des Wechselstromwiderstands zwischen benachbarten Sensorsprossen
- Messung des linearen Polarisationswiderstands der sechs Sensorsprossen.



Abbildung 20: Korrosionssensor Anodenleiter nach Montage auf der oberen Bewehrungslage

Die zeitliche Entwicklung von Potenzial und Elementstrom als Hinweis auf Korrosionsinitiierung an der äussersten Sensorsprosse zeigt exemplarisch Abbildung 21. Die Anodenleiter ist aufgrund ihrer Geometrie nur für Neubauprojekte geeignet und wurde seit 1990 überwiegend für Infrastrukturprojekte weltweit eingesetzt.

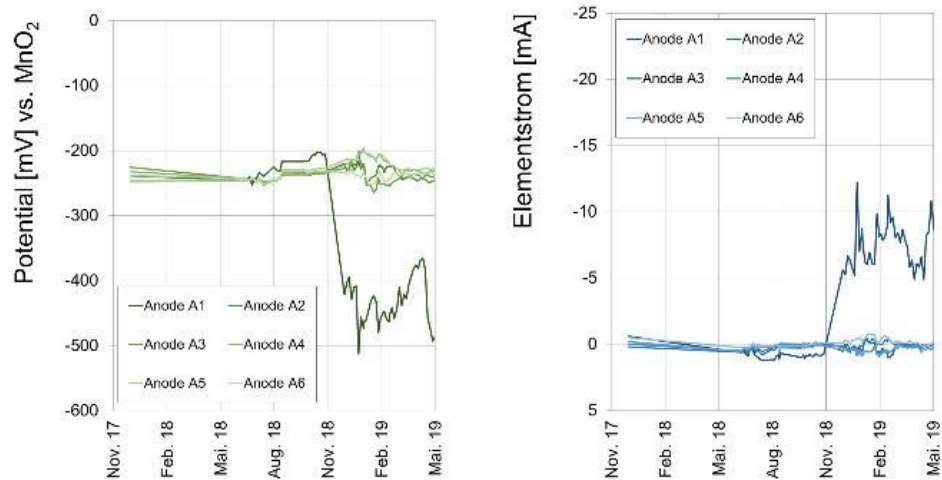


Abbildung 21: Potenzial- und Elementstromverlauf bei Korrosionsinitiierung an der ersten Sensorsprosse [67]

5.9 Spreizringanode der Sensortec GmbH

Bei der Spreizringanode handelt es sich um ebenfalls um einen tiefengestaffelten Korrosionssensor mit gleicher Funktionalität wie die Anodenleiter, der allerdings für den nachträglichen Einbau in bestehende Bauwerke entwickelt wurde.

Die Spreizringanode besteht aus sechs ringförmigen Einzelanoden aus BSt 500, die in einem zylinderförmigen Sensorkörper mit einem Achsabstand von 10 mm untereinander angeordnet sind, einem im Sensorkörper integrierten pT1000-Temperatursensor, einer externen Titanmischoxidkathode und einer externen MnO₂-Bezugselektrode. Die Spreizringanode wird bei bestehenden Bauwerken in eine Kernbohrung (d = rund 56 mm) eingesetzt und mit einem Haftzuggerät so gegen die Bohrlochwandung gespreizt, dass die Einzelanoden flächig an dem Bestandsbeton anliegen. Dichtungsringe zwischen den Einzelanoden und am oberen Sensorende verhindern Feuchtetransporte entlang der Bohrlochwand. Dadurch können mit der Spreizringanode Korrosionsmessungen im Bestandsbeton ohne Verwendung von Ankopplungsmörteln durchgeführt werden, die in der Regel zu einer weitreichenden Veränderung des Korrosionssystems führen. Das Messprinzip entspricht dem der Anodenleiter: Der Korrosionszustand der Einzelanode kann anhand von Messungen des Korrosionspotenzials gegen die Bezugselektrode, des Elementstroms gegen die TiMMO-Kathode, des linearen Polarisationswiderstands sowie des Wechselstromwiderstands zweier benachbarter Anoden bewertet werden.

Die Spreizringanode wird häufig bei Bestandsbauwerken eingesetzt, bei denen bereits Chloride bis in grössere Tiefenlagen eingedrungen sind, ohne bisher Korrosion hervorgerufen zu haben und/oder bei denen durch Aufbringen eines Oberflächenschutzsystems ein weiterer Chlorideintrag unterbunden werden soll.



Abbildung 22: Korrosionssensor "Spreizringanode" zur nachträglichen Sensorinstallation an Bestandsbauwerken

5.10 Betonwiderstandssensoren

Es existieren verschiedene Anbieter von Betonwiderstandssensoren. Am bekanntesten dürfte die **Multiringelektrode** der SENSORTEC GmbH sein, Abbildung 23.

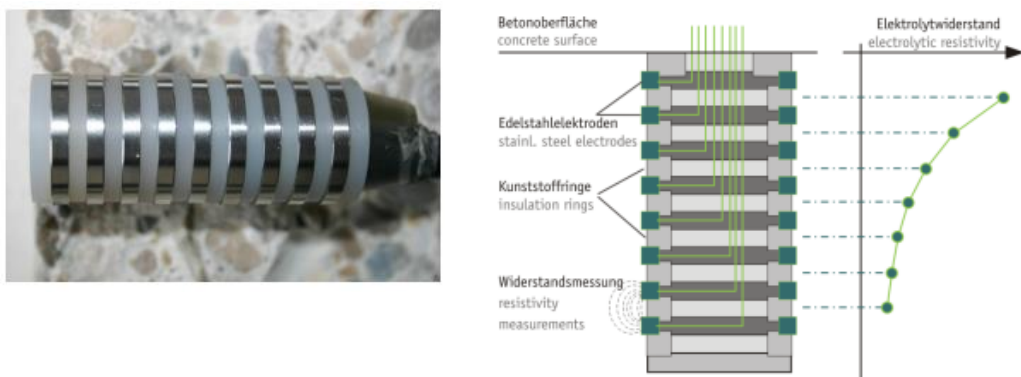


Abbildung 23: Sensortec Multiringelektrode. Links, MRE im Beton. Rechts, Aufbau der MRE, Messprinzip und Tiefenprofil der elektrischen Betonwiderstände (Bilder aus technischem Datenblatt von SENSORTEC)

Multiringelektroden werden zur Bestimmung der Feuchteverteilung im Überdeckungsbeton und zur Überwachung der Wirksamkeit von Abdichtungen und Beschichtungssystemen eingesetzt. Multiringelektroden können sowohl in Neubauten direkt in den Beton oder auch in Bestandsbauten mit einer dünnen Mörtelschicht in Bohrlöcher eingebettet werden. Die Multiringelektrode besteht aus acht voneinander isolierten Ringen aus nichtrostendem Stahl, die jeweils 5 mm Abstand haben. Zudem ist ein Temperatursensor (PT1000) im Sensor verbaut. Gemessen wird der Wechselstromwiderstand zwischen zwei benachbarten Ringen. Damit kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden. Die Zellkonstante k für diese Sensorkonfiguration beträgt 0,1 m. Dies erlaubt die Umrechnung der Messwerte auf spezifische Betonwiderstände. Mit Hilfe des Temperatursensors kann eine Temperaturkompensation der Widerstände durchgeführt werden.

Eine ebenfalls rotationssymmetrische Version eines Betonwiderstandssensors ist der **CorroDec2G** Feuchtigkeitssensor der infrasolute AG (Abbildung 24), der primär für den Einsatz in neuen Bauteilen konzipiert wurde. Der Durchmesser der Sensoreinheit beträgt 91 mm, die Gehäusehöhe 26 mm. Die sensitiven Elemente sind zwei umlaufende Bänder aus nichtrostendem Stahl plus ein Temperaturelement. Zwischen diesen Bändern wird der elektrische Betonwiderstand gemessen. Der Sensor kann mittels zwei Rördeldrähten an der Bewehrung befestigt werden. Der Zellfaktor geht aus den Unterlagen des Vertreibers nicht hervor. Eine besondere Eigenschaft des CorroDec Sensors ist das kabellose Auslesen der Daten über RFID-Technologie. Durch eine Systemerweiterung ist auch eine Fernabfrage der Messwerte möglich.



Abbildung 24: CorroDec2G Feuchtigkeitssensor der infrasolute AG, Zug

Eine nicht rotationssymmetrische, sondern leiterförmige Version eines Betonwiderstandssensors (CS-402 von der TFB Diagnostic-Systems AG) zeigt Abbildung 25. Dieser Sensor dient zur Überwachung des Feuchtegleichgewichts in Beton und kann beispielsweise zur Überwachung der Wirksamkeit eines Oberflächenschutzsystems (Hydrophobierung oder Beschichtung) eingesetzt werden.



Abbildung 25: Leiterförmiger Betonwiderstandssensor CS-402 der TFB Diagnostic Systems AG

Der Sensor besteht aus vier in regelmässigen Abstand angeordneten, dünnen Edelstahlstäben und zwei Pt1000-Temperaturmesspunkten. Er wird analog zum Sensor

CS-040 verwendet, der an der Bewehrung befestigt wird. Durch Messung des elektrischen Widerstands des Betons (Impedanzmessung bei 1 kHz) zwischen den Sensorstäben und der Bewehrung oder zwischen den einzelnen Drähten und unter Berücksichtigung der Zellenkonstante kann der spezifische Betonwiderstand in den jeweiligen Tiefenstufen bestimmt werden. Die gemessene Betontemperatur ermöglicht eine Temperaturkompensation der Impedanzwerte. Die Betonwiderstandsfähigkeit korreliert umgekehrt zum Feuchtigkeitsgehalt. Mit Hilfe einer geeigneten Kalibrierungskurve kann das Betonfeuchteprofil ermittelt werden.

5.11 CorroDec2G-Korrosionssensor von infrasolute AG

Nebst dem in Kap. 5.10 beschriebenen CorroDec2G-Feuchtigkeitssensor gibt es ein ähnlich aufgebauter Korrosionssensor von infrasolute. Dieser basiert auf dem Prinzip der Stellverteter-Korrosion an einer Reihe von übereinanderliegenden, umlaufenden Drahtschlaufen (tiefenaufgelöst). Der Sensor wird direkt am äussersten Bewehrungs-eisen befestigt und gibt über die Messung des Durchgangswiderstands an, welche Drähte noch intakt oder bereits durchkorrodiert sind, was eine Information über das Eindringen der Depassivierungsfront gibt.

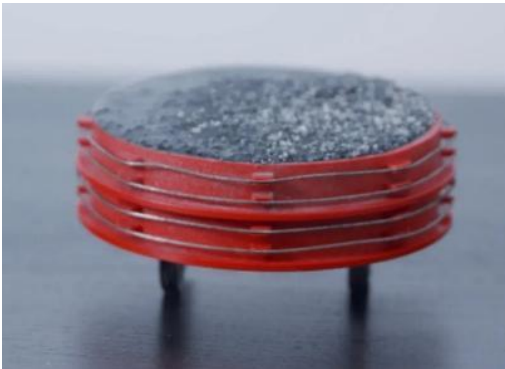


Abbildung 26: CorroDec2G Korrosions-Sensor (Bild von infrasolute)

Wie beim CorroDec2G-Feuchtigkeitssensor werden die Sensordaten kontaktlos entweder von Hand mit einem RFID- Lesegerät oder über ein in der Sensorumgebung installiertes spezielles Funkgateway regelmässig ausgelesen und in Echtzeit über eine Funkverbindung auf den infrasolute-Datenserver fernübertragen. Im Bedarfsfall kann die Auslesereichweite über eine im Beton eingebettete Antenne bis auf 25 m erweitert werden.

CorroDec2G-Sensoren können sowohl vor dem Betonieren als auch nachträglich mithilfe einer Kernbohrung in bestehenden Bauten eingebaut werden. Bei vorkontaminiertem Beton mit Einbau in Kernbohrungen muss der passivierende Einfluss des Einbettmörtels berücksichtigt werden.

5.12 LVDT-Wegaufnehmer

LVDT-Wegaufnehmer (Linear Variable Differential Transformer) sind induktive, berührungslos arbeitende Wegsensoren, die lineare Verschiebungen über eine Transformation in ein elektrisches Wechselspannungssignal erfassen.

Sie bestehen aus einem feststehenden Spulenkörper (Primärwicklung und zwei identische Sekundärwicklungen) sowie einem beweglichen, ferromagnetischen Kern, der mechanisch mit dem Messobjekt gekoppelt ist. Das Funktionsprinzip basiert auf einer differentiellen Transformatoranordnung: Die Primärwicklung wird mit einer sinusförmigen Wechselspannung (typisch im kHz-Bereich) erregt, wodurch ein magnetischer Fluss erzeugt wird, der abhängig von der Kernposition unterschiedlich stark in die beiden Sekundärwicklungen einkoppelt (Abbildung 27).

Für die Signalaufbereitung ist typischerweise eine Elektronik erforderlich, um ein analoges DC-Ausgangssignal (z. B. ± 10 V, 4–20 mA) oder ein digitales Signal zu erzeugen. In vielen industriellen LVDT-Systemen ist diese Konditionierung entweder im Sensor integriert oder als externes Messverstärker-/Transmittermodul ausgeführt. Die erreichbare Auflösung ist prinzipiell sehr hoch (durch Rausch- und Elektronikgrenzen bestimmt), während Genauigkeit und Linearität vom Sensordesign, dem nutzbaren Hubbereich und der Kalibrierung abhängen; ausserhalb des linearen Bereichs treten Nichtlinearitäten durch die Feldgeometrie und Sättigungseffekte stärker hervor.

Konstruktiv werden LVDTs als geführte Bauformen (mit Stössel/Schubstange, häufig federbelastet) oder als ungeführte Bauformen (freier Kern, Messgestänge extern geführt) ausgeführt. Für Bauwerksanwendungen sind robuste, abgedichtete Varianten (IP-Schutz), temperaturkompensierte Ausführungen und geeignete mechanische Ankopplungen entscheidend. Mit LVDT-Wegaufnehmern und entsprechenden Verlängerungsgestängen können auch längere Extensometer gebaut werden, z.B. für AAR-Dehnungsmessungen.

Für Langzeitmonitoring im Infrastrukturbereich ist die Systemintegration (Stromversorgung, Datenlogger, Kabelwege, EMV-Konzept) massgebend, da die Sensorik Teil eines übergeordneten Monitoringsystems ist.

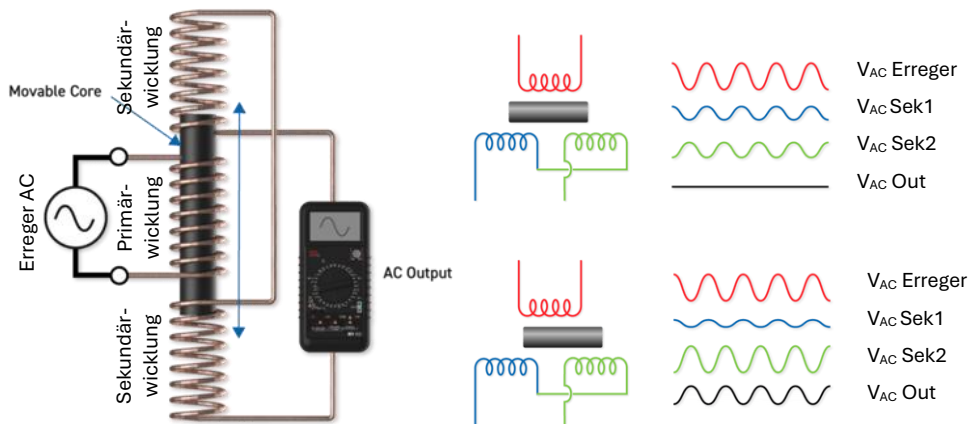


Abbildung 27: Aufbau und Funktionsweise eines LVDT-Wegaufnehmers (schematisch) (aus blog.pickeringtest.com)

Vorteile:

Ein LVDT misst berührungslos im Sensorelement (Kern bewegt sich ohne elektrischen Kontakt), daher gibt es praktisch keinen elektrischen Verschleiss wie bei Potentiometern. Er ist mechanisch robust, toleriert Vibrationen gut und eignet sich für raue Umgebungen. Durch das differentielle Messprinzip ist er vergleichsweise unempfindlich gegenüber Amplitudenschwankungen der Erregung und vielen Störanteilen (Gleichtaktunterdrückung). LVDTs erreichen sehr hohe Auflösung und gute Wiederholgenauigkeit; bei geeigneter Bauform sind auch sehr gute Langzeitstabilität und geringe Hysterese möglich. Ausserdem ist die Messung grundsätzlich absolut (Position relativ zum Nullpunkt), d. h. im Gegensatz zu Inkrementalgebern ist nach Spannungsunterbruch nicht zwingend eine Referenzfahrt nötig (abhängig von der Auswerteelektronik).

Nachteile:

Ein LVDT benötigt eine Wechselspannungs-Anregung und eine Demodulations-/Signalaufbereitung (extern oder integriert). Das erhöht Systemkomplexität, Energiebedarf und EMV-Anforderungen gegenüber „einfachen“ DC-Sensoren. Die Linearität ist nur innerhalb eines definierten Hubbereichs sehr gut; ausserhalb steigt die Nichtlinearität. Temperatur beeinflusst Wicklungen und Magnetkreis; hochwertige Sensoren kompensieren das, dennoch ist Temperatur ein relevanter Fehler- und Driftfaktor. Mechanisch erfordern LVDTs eine saubere Führung bzw. eine gute Kopplung des Kerns; Querkräfte, Verkipfung oder Reibung (bei geführten Stösselbauformen) können Messfehler und Verschleiss verursachen.

LVDT-Wegaufnehmer sind ein Industriestandardprodukt und werden von zahlreichen Anbietern kommerzialisiert. Wichtig bei der Modellwahl ist eine robuste, wasserdichte Bauweise, eine integrierte Konditionierelektronik und eine der erwarteten Verschiebung/Verformung angepasste Weglänge.

5.13 Linearpotentiometrische Wegaufnehmer

Linearpotentiometrische Wegaufnehmer (auch „Linear-Potentiometer“) sind kontaktierende, analoge Verdrängungsaufnehmer zur Messung von linearen Wegen bzw. Verschiebungen. Das Messprinzip basiert auf einem Potentiometer: Entlang einer defi-

nierten Messstrecke liegt eine Widerstandsbahn (z. B. Kunststoff- oder Drahtwicklung). Ein mechanisch geführter Schleifer (Wischer), der mit dem bewegten Messobjekt gekoppelt ist, tastet diese Widerstandsbahn ab und teilt den Gesamtwiderstand in zwei Teilwiderstände. Bei Speisung mit einer Referenzspannung entsteht am Schleifer eine zur Position proportionale Ausgangsspannung (Spannungsteilerprinzip).

Typische Bauformen sind Stab- oder Profilaufnehmer (Schubstange), seltener Seilzugaufnehmer mit nachgeschaltetem Potentiometer (Abbildung 28). Die Sensoren liefern meist ein ratiometrisches Analogsignal (z. B. 0...10 V oder als Teilspannung der Versorgung), sind einfach integrierbar und benötigen im Grundprinzip keine aktive Elektronik im Sensorkörper.



Abbildung 28: Rissaufnehmer mit linearpotentiometrischem Wegaufnehmer (Bild Ginger CEBTP)

Vorteile:

Linearpotentiometrische Wegaufnehmer sind konstruktiv einfach, kostengünstig und liefern ein direkt proportionales Analogsignal mit hoher Auflösung (prinzipiell kontinuierlich, begrenzt eher durch Auswertelektronik und Rauschen als durch den Sensor). Sie sind ohne komplexe Signalaufbereitung einsetzbar, gut für quasistatische bzw. langsam veränderliche Wege geeignet und in vielen Messbereichen (mm bis mehrere 100 mm) verfügbar. Durch das ratiometrische Spannungsteilerprinzip können sie bei passender Auswertung relativ unempfindlich gegenüber Versorgungsspannungsschwankungen sein.

Nachteile:

Das Messprinzip ist kontaktierend; Schleifer und Widerstandsbahn unterliegen Verschleiß, was die Langzeitstabilität begrenzt und Drift bzw. sprunghafte Signaländerungen verursachen kann. Die Messung ist empfindlich gegenüber Schmutz, Feuchte, Korrosion und Vibration (Kontaktprellen), weshalb Schutzart und Montagequalität entscheidend sind. Zusätzlich treten Nichtlinearitäten, Hysterese durch Mechanik, Temperaturabhängigkeit der Widerstandsbahn sowie begrenzte Dynamik bei schnellen Bewegungen auf. Für sehr lange Messstrecken, hochpräzise Langzeitmessungen oder stark belastete Umgebungen sind berührungslose Wegaufnehmer (z. B. LVDT, FOS) häufig besser geeignet.

Linearpotentiometer sind ein Industriestandardprodukt und werden von zahlreichen Anbietern kommerzialisiert. Wichtig bei der Modellwahl ist eine der erwarteten Verschiebung/Verformung korrespondierende Weglänge.

5.14 Piezoelektrische Sensoren (Frost)

Für Frost- und Frost/Tausalz-Monitoring sind noch keine praxistauglichen Systeme verfügbar. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass es sich bei Frost- und Frosttausalz-Angriffen um einen Schädigungsmechanismus handelt, der primär die Betonoberfläche beeinträchtigt (Abplatzungen, Absanden, Mikrorissbildung).

Es gibt jedoch Ansätze im Forschungsstadium. [10] kombiniert piezoelektrisch basierte, aktive Sensorik mit Deep Learning (DL). Die Beziehung zwischen der FT-Schadensentwicklung des Betons und der Veränderung des Spannungswellensignals wurde untersucht, indem die gesammelten Signale mittels kontinuierlicher Wavelet-Transformation (CWT) in Zeit-Frequenz-Karten umgewandelt wurden und so ein CWT-Bild-basierter Datensatz erstellt werden konnte. Ferner wurde ein DL-Modell (DSC-ACGRU) entwickelt, um automatisch schadensempfindliche Merkmale aus CWT-Bildern zu extrahieren und schliesslich den Grad der Beschädigung von Beton FT vorherzusagen. Abbildung 29 zeigt das Funktionsprinzip der piezoelektrischen Sensoren. Die Untersuchungen erfolgten an Proben unter Laborbedingungen.

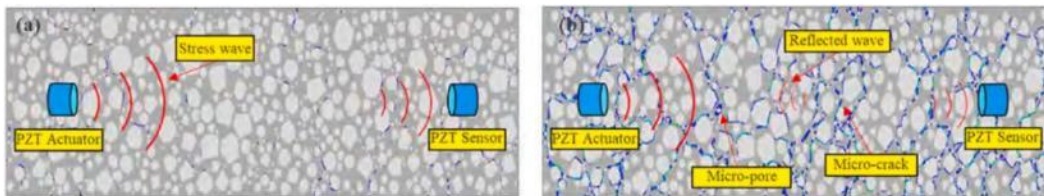


Abbildung 29: Piezoelektrische Sensoren zur Detektion von Frostschädigungen

[11] verwendet ebenfalls eingebettete piezoelektrische Ultraschallwandler (Coda-Wellen) zur Überwachung des Schädigungsfortschritts bei Frost-Tau wechseln. Dazu wurden Betonproben mit einbetonierten piezoelektrischen Messaufnehmern (ULB-BATr) versehen. Ferner wurden Thermoelemente in den Proben installiert. Das Ultraschallmesssystem besteht aus einer zweikanaligen Datenerfassungskarte, die einen Impuls von 100 V erzeugen kann. Die Datenerfassungskarte wurde an einen PC angeschlossen und über eine mit LabviewTM entwickelte Anwendung gesteuert. Für die vorliegende Studie wurde der Aktuator mit einem Impuls von 10 μ s Breite und 100 V Amplitude angeregt. Das Sensorsignal wurde mit einer Abtastfrequenz von 40 MHz abgetastet. Ultraschallsensoren wurden auch in der Arbeit von [12] angewendet.

[13] untersuchten das Frostverhalten des Erdreichs unterhalb einer ungebundenen Strasse. Dazu verwendeten sie eine Kombination aus Sensoren zur Überwachung von Bodentemperatur, Wasservolumen und Matrixpotenzial mittels Meter Environment (Decagon Devices) MPS-6 Sensor für Temperatur und Matrixpotenzial sowie GS1 Sensoren für den Volumetrischen Wassergehalt. Eine Anwendung im Beton erfordert,

aber genauere Kenntnisse, über das in der Veröffentlichung beschriebene hinaus, zu den Sensoren.

[14] wenden AE (Acoustic Emission) für die Überwachung von Frost-Tauwechseln an. Die AE – Sensoren waren an den gegenüberliegenden Seiten von Betonprobekörpern befestigt. Das Monitoring erfolgte über eine Multi-Kanal Einheit von DAKEL XEDO (ZD Rpety – Dakel, rpety, Czech Republic). Die Messfrequenz der akustischen Emission lag zwischen 10-2000kHz. Die Sensoren selbst waren thermisch durch eine IP68 Schutz vor Frost geschützt und könnten somit ggf. auch im Beton installiert werden.

5.15 Faseroptische Sensoren (FOS)

5.15.1 Einleitung

Neben in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen elektrischen Sensoren existieren auch faseroptische Sensoren, welche sich dank ihrer Vielfältigkeit ebenfalls für das Monitoring von dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsprozessen in Stahlbetonbauwerken eignen.

Abgesehen von marktreifen Systemen zur Erfassung von Verformungen, Temperatur und Feuchte befindet sich die faseroptische Sensortechnik für chemische Messgrößen (z. B. Chlorid, pH) sowie für die Korrosionsdetektion überwiegend noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Entsprechend ist kurzfristig nur von einer begrenzten Praxisrelevanz dieser Ansätze auszugehen. Demgegenüber können die bereits etablierten faseroptischen Systeme in geeigneten Anwendungsszenarien eine hohe Praxistauglichkeit aufweisen; insbesondere bei Monitoringaufgaben, in denen Verformungs-, Feuchte- und Temperaturmessungen gemeinsam zur Beurteilung dauerhaftigkeitsrelevanter Prozesse herangezogen werden (z. B. beim AAR-Monitoring), kann ein vollständig faseroptisch ausgelegtes Messsystem technisch und betrieblich sinnvoll sein.

Das vorliegende Kapitel verfolgt primär das Ziel, einen Ausblick auf die Potenziale faseroptischer Sensorik für dauerhaftigkeitsrelevante Prozesse zu geben. Aufgrund des grundlegend unterschiedlichen Messprinzips (optische statt elektrische Signalbildung) sowie der fasergebundenen Signalübertragung vom Sensor zur optischen Auswerteeinheit (und damit typischerweise nicht funk- bzw. IoT-orientiert) ist eine hybride Kombination faseroptischer Sensorik mit konventionellen elektrischen Sensoren in vielen Fällen nur eingeschränkt zweckmässig, insbesondere wenn dadurch Systemkomplexität, Schnittstellenaufwand und Inbetriebnahme-/Betriebsrisiken steigen, ohne einen entsprechenden funktionalen Mehrwert zu generieren.

FOS erfassen Änderungen optischer Parameter wie Wellenlänge, Intensität, Phase oder Polarisation des in Glas- oder Polymerfasern geführten Lichts. Diese Änderungen resultieren aus mechanischen Dehnungen, Temperaturänderungen oder strukturellen Verformungen oder Umgebung.

Vorteile von FOS sind ihre elektromagnetische Immunität, Nichtkorrosivität, Multipoint-Multiplexing-Fähigkeit (mehrere Messpunkte auf einer Faser, z.B. Fibre-Bragg-Grating basierte Sensoren), verteilte Messungen über die Faserlänge (z.B. Brillouin Optical Time Domain Reflectometry basierte Sensoren), geringe Abmessungen.

Zu den Nachteilen gehören die oft grosse thermische Querempfindlichkeit, höheren Kosten der Messgeräte (optische Interrogatoren), Beschädigungsrisiko der Faser beim

Einbau, aufwendigere Verkabelung im Vergleich zu funkverknüpften, elektrischen Sensoren und eine geringere Langzeiterfahrung.

5.15.2 Faseroptische Korrosionssensoren

Ziel dieses Sensortyps ist es, indirekt Korrosionsprozesse zu detektieren, indem mechanische Dehnungen und strukturelle Veränderungen im Beton erfasst werden, die durch das Wachstum von Korrosionsprodukten an der Stahl-Beton-Grenzfläche entstehen. 3 FOS-Technologien kommen dafür in Frage: Fibre Bragg Grating (FBG), Long Period Fibre Grating (LPFG) und Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA). Das zu Grunde liegende Prinzip ist, die aufgrund der Volumenexpansion von Korrosionsprodukten entstehenden lokalen Dehnungen im Beton mit FOS zu detektieren, und somit den Korrosionsfortschritt indirekt zu quantifizieren. Aufgrund ihrer chemischen Beständigkeit, Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischer Strahlung und hohen Messgenauigkeit gelten FOS als besonders geeignet für den Einsatz in alkalischen Betonumgebungen.

Fibre Bragg Grating (FBG)-Sensoren

FBG-Sensoren messen Dehnungen über Verschiebungen der reflektierten Bragg-Wellenlänge, die durch Änderungen der Gitterperiode im Faserkern verursacht werden. Studien belegen ihr Potenzial zur Erfassung von Dehnungen infolge der Akkumulation von Korrosionsprodukten sowie zur Detektion von Rissbildung. Der Forschungsfokus liegt dabei auf:

- der Entwicklung geeigneter Schutzbeschichtungen (z. B. Epoxidharze, Mehrschichtsysteme),
- der Optimierung der Sensoranordnung (parallel oder orthogonal zur Bewehrung),
- der Kopplung mit ergänzenden Messmethoden (z. B. akustische Emission).

Trotz vielversprechender Ergebnisse bestehen wesentliche Einschränkungen: In vielen Studien fehlen belastbare Kalibrierbeziehungen zwischen Wellenlängenverschiebung und tatsächlicher Dehnung bzw. Korrosionsgrad. Zudem reagieren FBG-Sensoren erst auf fortgeschrittene Korrosionsstadien, da eine messbare Dehnung erst nach signifikanter Akkumulation von Korrosionsprodukten auftritt. Die exakte Erkennung des Übergangs vom passiven Zustand zur Korrosionsinitiierung ist nicht möglich. Weitere Limitationen sind die begrenzte räumliche Reichweite, der hohe Sensorbedarf bei grossen Bauwerken sowie derzeit hohe Herstellungskosten.

Long Period Fibre Grating (LPFG)-Sensoren

LPFG-Sensoren beruhen auf der Kopplung von optischen Kern- und Mantelmoden infolge einer periodischen Modulation des Brechungsindex. Korrosionsprozesse beeinflussen die Resonanzwellenlängen, insbesondere wenn funktionelle Beschichtungen eingesetzt werden. Mehrere Studien nutzen nanostrukturierte Eisen- oder Fe-C-Schichten als Opferbeschichtungen, deren Abtrag mit der Korrosionsrate korreliert. Die Ergebnisse zeigen:

- eine prinzipielle quantitative Beziehung zwischen Resonanzverschiebung und Materialverlust,
- eine vergleichsweise hohe mechanische Stabilität der Sensoren.

Demgegenüber stehen gravierende Nachteile: Die nanomaterialbasierten Beschichtungen weisen eine sehr begrenzte Lebensdauer auf, insbesondere in wässrigen oder chloridhaltigen Umgebungen. Dadurch sind LPFG-Sensoren bislang nicht für die lang-

fristige Überwachung realer Stahlbetonstrukturen geeignet. Wie bei FBG-Sensoren erfolgt keine direkte Erfassung der Korrosionsinitiierung, sondern lediglich der Fortschritt bereits laufender Prozesse.

Brillouin Optical Time Domain (BOTDA)-Sensoren

BOTDA-Sensoren ermöglichen eine vollständig verteilte Messung von Dehnung und Temperatur entlang der gesamten Faserlänge anhand der ortsabhängigen Brillouin-Frequenzverschiebung. Mehrere Labor- und Feldstudien zeigen, dass diese Technologie besonders geeignet ist für:

- grossmassstäbliche Bauwerke,
- kontinuierliche Langzeitüberwachung,
- qualitative Schadensindizes vom frühen Korrosionsstadium bis zur Rissbildung.

Die hohe räumliche Auflösung (bis unter 1 mm) stellt einen wesentlichen Vorteil dar. Gleichzeitig bestehen jedoch praktische Herausforderungen: Die Sensorinstallation (z. B. spiralförmige Umwicklung der Bewehrung), die starke Temperaturempfindlichkeit sowie das Risiko mechanischer Beschädigung während Bauausführung oder Betonrissbildung schränken den breiten Einsatz ein.

Fazit

Faseroptische Sensoren stellen einen technologisch ausgereiften und physikalisch fundierten Ansatz zur Korrosionsüberwachung von Stahlbeton dar. Während FBG- und LPFG-Sensoren primär für lokale Anwendungen geeignet sind, besitzen BOTDA-Systeme ein hohes Potenzial für die verteilte Überwachung realer Bauwerke. Übergreifende Einschränkungen aller betrachteten Sensortypen sind:

- die fehlende zuverlässige Detektion der Korrosionsinitiierung,
- unzureichende Langzeitstabilität von Schutz- und Funktionsbeschichtungen,
- Installations- und Robustheitsprobleme im realen Baubetrieb,
- wirtschaftliche Einschränkungen durch hohe Kosten.

5.15.3 Faseroptische relative Feuchte-Sensoren

Für die Bestimmung der relativen Feuchte im Beton wurden bisher vor allem Fibre Bragg Grating (FBG)- und Long-Period Fibre Grating (LPFG)-basierte Sensoren verwendet.

Da **FBG-Sensoren** intrinsisch nicht feuchteempfindlich sind, erfolgt die RH-Messung indirekt über hygroskopische Beschichtungen (z. B. Agar, Polyimid oder hybride Polymersysteme), die bei Feuchteänderungen quellen oder schrumpfen und dadurch eine Dehnung im FBG erzeugen. Mehrere Studien zeigen, dass solche Sensoren erfolgreich in Beton eingebettet werden können und Messwerte liefern, die gut mit Laborreferenzen übereinstimmen. Allerdings bedürfen FBG-basierte RH-Sensoren wegen ihrer ausgeprägte Kreuzsensitivität gegenüber Temperatur und mechanischer Belastung einer sauberen Temperaturkompensation und mechanischen Entkoppelung.

LPFG-basierte Feuchtesensoren weisen demgegenüber deutlich höhere Sensitivitäten auf, da sie Änderungen des Brechungsindex ihrer Umgebung detektieren. Verschiedene hygroskopische Beschichtungen wie Polyvinylalkohol, Hydrogele, Gelatine oder Calciumchlorid wurden eingesetzt und erzielten teils sehr hohe Sensitivitäten bis in den Bereich mehrerer nm/%RH. Trotz dieses hohen Potenzials befinden sich LPFG-RH-Sensoren überwiegend noch im Laborstadium, da ihre Anwendung im realen Be-

ton durch aufwendige Transmissionsmessungen, Temperatureinflüsse und fehlende Langzeitstabilitätsnachweise limitiert ist.

5.15.4 Faseroptische Chlorid-Sensoren

FBG-Sensoren besitzen keine intrinsische Chloridsensitivität und sind daher für eine direkte Bestimmung der Chloridkonzentration ungeeignet. Ihr Einsatz beschränkt sich auf die indirekte Erfassung chloridinduzierter Korrosionsprozesse, beispielsweise durch die Messung von Dehnungen infolge der Volumenexpansion von Korrosionsprodukten oder durch den Einsatz korrosionsanfälliger Beschichtungen mit ähnlicher Zusammensetzung wie Bewehrungsstahl (siehe Kap. 5.15.2). FBG-Sensoren liefern somit keine Information über den Chloridgehalt im Betonporenwasser, sondern erlauben lediglich Rückschlüsse auf bereits fortgeschrittene Schädigungsprozesse. Ihre Rolle liegt daher primär in der Korrosionsüberwachung, nicht jedoch in der präventiven Chloriddiagnostik.

Deutlich weiterreichende Möglichkeiten bieten **Long-Period Fibre Grating (LPFG)-basierte Sensoren**, die empfindlich auf Änderungen des Brechungsindex (RI) ihrer Umgebung reagieren. Chloridionen beeinflussen sowohl den RI wässriger Lösungen als auch den RI funktioneller Sensorschichten, was zu messbaren Verschiebungen der Resonanzwellenlängen im Transmissionsspektrum führt. Im Stand der Forschung wurden verschiedene Sensorkonzepte untersucht, darunter unbeschichtete LPFGs sowie LPFGs mit Goldkolloiden, Hydrogelen oder Polyelektrolytschichten. Diese Sensoren zeigen sehr hohe Empfindlichkeiten und Nachweisgrenzen bis in den ppm-Bereich, was sie prinzipiell für eine quantitative Chloridüberwachung geeignet macht.

Trotz dieser vielversprechenden Ergebnisse befinden sich LPFG-basierte Chloridsensoren überwiegend auf Laborstadium. Die Untersuchungen wurden grösstenteils in wässrigen Elektrolytlösungen durchgeführt, während valide Langzeitmessungen in realem Beton bislang fehlen. Zentrale Herausforderungen sind die ausgeprägte Kreuzsensitivität gegenüber pH-Wert und Temperatur, die begrenzte Lebensdauer funktioneller Beschichtungen sowie der erhöhte Installations- und Auswerteaufwand aufgrund der erforderlichen Transmissionsmessung.

Einen alternativen optochemischen Ansatz beschrieben Laferrière et al. [68], die einen faseroptischen Chloridsensor auf Basis des fluoreszierenden Indikatorfarbstoffs Lucigenin entwickelten. Lucigenin ist ein blau-grün fluoreszierender, chloridsensitiver Farbstoff, dessen Fluoreszenzintensität selektiv durch Chloridionen beeinflusst wird. Mit diesem Sensorkonzept konnten Chloridkonzentrationen im Bereich von 0,030 bis 0,35 M zuverlässig detektiert werden, womit eine direkte und quantitative Chloridmessung prinzipiell möglich ist.

Trotz der hohen Selektivität und Sensitivität bestehen auch bei fluoreszenzbasierten Sensoren wesentliche Einschränkungen für den Einsatz in Beton. Dazu zählen insbesondere die Langzeitstabilität des Indikatorfarbstoffs im alkalischen Betonmilieu, mögliche Störeinflüsse durch konkurrierende Ionen sowie der vergleichsweise hohe apparative Aufwand für Fluoreszenzanregung und -detektion. Eine Validierung unter realen Betonbedingungen liegt bislang nicht vor.

5.15.5 Faseroptische pH-Sensoren

Faseroptische pH-Sensoren basieren überwiegend auf der optischen Detektion pH-sensitiver Materialien, deren spektrale Eigenschaften sich infolge pH-abhängiger Änderungen des Brechungsindex oder der Absorption verändern. In der Literatur werden insbesondere Sensoren auf Basis von Long-Period Faser Gittern (LPFG) beschrieben. Diese nutzen pH-sensitive Hydrogele oder Polyelektrolytschichten als funktionale Beschichtungen, wodurch sehr hohe Sensitivitäten von bis über 20 nm/pH sowie kurze Ansprechzeiten im Sekundenbereich erreicht werden. Die berichteten Messbereiche umfassen sowohl stark alkalische als auch saure Milieus und sind damit grundsätzlich geeignet, pH-Änderungen im Zusammenhang mit Karbonatisierungsprozessen abzubilden.

Neben LPFG-basierten Ansätzen wurden auch chromophorbasierte faseroptische Sensoren untersucht. Hierzu zählen Systeme mit Mesotetraarylporpholactonen, die einen nutzbaren pH-Bereich von etwa 11,5–13,2 abdecken, sowie Sol-Gel-basierte Sensoren unter Verwendung von Cresolrot mit Messbereichen von ungefähr pH 8–13. Diese Ansätze zielen insbesondere auf die Erfassung des Übergangs von hochalkalischem, passivierendem Beton zu karbonatisierten Zonen ab.

Trotz der vielversprechenden Sensitivitäten und Reaktionszeiten beschränken sich die bisherigen Untersuchungen faseroptischer pH-Sensoren überwiegend auf wässrige Lösungen oder stark vereinfachte Modellumgebungen. Zentrale Fragestellungen hinsichtlich der Langzeitstabilität der pH-sensitiven Beschichtungen der LPFG-Sensoren im hochalkalischen Betonmilieu, der Selektivität gegenüber konkurrierenden Ionen sowie der mechanischen Robustheit bei Einbettung in Beton sind bislang nicht ausreichend geklärt. Zudem wird für einige chromophorbasierte Systeme eine chemische Degradation der funktionalen Materialien unter stark alkalischen Bedingungen berichtet, was den praktisch nutzbaren pH-Bereich häufig auf Werte unterhalb von etwa pH 12 begrenzt.

Fazit FOS für chemische Parameter und relative Feuchte

Zusammenfassend zeigen faseroptische Sensoren ein erhebliches Potenzial für die Überwachung feuchte- und chemiebezogener Dauerhaftigkeitsparameter in Beton. FBG-basierte Sensoren sind derzeit am nächsten an der praktischen Anwendung, eignen sich jedoch primär für indirekte Messungen. LPFG-basierte Sensoren ermöglichen hochsensitive und direkte Erfassungen von RH, Chlorid und pH, befinden sich jedoch überwiegend auf einem experimentellen Entwicklungsstand. Zentrale Herausforderungen für alle Sensortypen sind die Langzeitstabilität im Betonmilieu, die Kompensation von Überempfindlichkeiten, die robuste Sensorverpackung sowie die Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf reale Bauwerke.

5.15.6 Faseroptische Temperatur-Sensoren

Folgende faseroptische Sensortechnologien dominieren in der Anwendung im Bauwerksmonitoring:

FBG-basierte Temperatursensoren (Punkt-/Multiplexsensorik)

- **Messprinzip:** Temperatur ändert den effektiven Brechungsindex und die Gitterperiode → Bragg-Wellenlänge verschiebt sich.

- **Typischer Einsatz:** Einzelpunkte oder Sensorketten (Multiplexing) in Bauteilen, Monitoring von Temperaturfeldern (z. B. Hydratationswärme), temperaturbasierte Kompensation von Dehnungsmessungen.
- **Merkmale:** Hohe Reproduzierbarkeit, robuste Auslese, grosser Erfahrung inkl. Temperaturkompensationstechniken.

LPFG (Long-Period Fiber Grating) und beschichtungsbasierte Konzepte

- Für Temperaturmessung prinzipiell geeignet (starke Kopplung an Umgebungsinde-
dex), aber im Betonmonitoring weniger verbreitet als FBG/DFOS, da LPFG häufig
stärker umgebungs- und einbettungsabhängig ist (Matrix-/Beschichtungsstabi-
lität).

Interferometrische Punkt-/Quasi-Punktsensoren (Fabry–Pérot u. a.)

- **Messprinzip:** Temperaturbedingte Längen-/Indexänderungen in einer Kavität →
Phasen-/Interferenzsignal.
- **Vorteil:** Sehr hohe Auflösung möglich, aber häufig anspruchsvollere Packaging-
und Referenzkonzepte; in der Praxis weniger dominant als FBG und DFOS.

Verteilte Temperaturmessung entlang der Faser (DFOS)

DFOS erlauben, Temperatur (und oft gleichzeitig Dehnung) über ganze Bauwerke zu erfassen.

- **Raman-DTS:** Temperatur aus Verhältnis Anti-Stokes/Stokes (Raman) → klassi-
scher Ansatz für reine verteilte Temperaturprofile, z. B. Tunnel, Kabeltrassen, Pipe-
lines, Dämme. Raman-DTS gilt als technisch „reif“ und breit angewandt.
- **Brillouin-basierte Systeme (BOTDA/BOTDR/BOFDA):** liefern Temperatur
und Dehnung (mit Entkopplungsstrategie) und eignen sich für längere Distanzen
und SHM in Infrastruktur.
- **Rayleigh-basierte Systeme (z. B. OFDR/ ϕ -OTDR-Varianten):** sehr hohe
räumliche Auflösung möglich (v. a. bei kürzeren Reichweiten), zunehmende Bedeu-
tung in DFOS-Implementierungen.

Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass faseroptische Temperatursensorik im Bauwerksmonitoring heute etabliert ist und durch FBG-Punkt-/Multipunktmessungen und verteilte DFOS/DTS-Systeme dominiert wird. FBG-Systeme sind besonders geeignet, wenn lokale Referenzpunkte oder Multiplex-Sensorketten benötigt werden, während Raman-DTS sowie Brillouin-/Rayleigh-basierte DFOS die räumlich kontinuierliche Erfassung von Temperaturfeldern entlang grosser Bauwerke ermöglichen. Die wesentlichen offenen Herausforderungen liegen weniger im physikalischen Sensoreffekt als in der Entkopplung ($T-\epsilon$), der Langzeitstabilität/Metrologie und standardisierten Einbau- und Bewertungsprozeduren.

5.15.7 Faseroptische Sensoren für Verformungsmessungen

Faseroptische Längenänderungssensoren lassen sich methodisch in punktförmige/quasi-punktförmige Sensoren (FBG-Sensoren, interferometrische Sensoren) und verteilte Sensorsysteme (DFOS, z.B. Brillouin- oder Rayleigh basierte Sensoren) einteilen. Punkt-/quasipunktförmige Sensoren haben Messbasen im cm- bis m-Bereich.

reich. Verteilte Systeme messen die Längenänderung kontinuierlich entlang der gesamten Faser (Meter bis Kilometer) und sind besonders relevant für grossskalige Bauwerke.

FBG-basierte Sensoren

- **Messprinzip:**

Bei einem Fiber-Bragg-Grating (FBG) führt eine Längenänderung des Gitters zu einer Verschiebung der Bragg-Wellenlänge. Die gemessene Wellenlängenänderung ist proportional zur axialen Dehnung der Faser.

- **Einsatz:**

- Messung lokaler Dehnungen in Beton, Stahl und Faserverbund
- Rissdetektion (lokal oder über Sensorketten)
- Langzeitmonitoring von Brücken, Tunneln und Gebäuden

FBG-Sensoren sind die am weitesten verbreiteten punktförmigen FOS-Dehnungssensoren im Bauwesen. Sie werden sowohl oberflächlich appliziert als auch direkt einbetoniert oder auf die Bewehrung geklebt.

- **Stärken:**

- Hohe Auflösung ($\mu\epsilon$ -Bereich)
- Multiplexing vieler Sensoren auf einer Faser
- Gute Reproduzierbarkeit

- **Limitierungen:**

- Querempfindlichkeit gegenüber Temperatur → erfordert Temperaturkompensation
- Lokale Messung → keine vollständige Strukturerrfassung ohne viele Sensoren

Interferometrische Sensoren (Fabry–Pérot, Michelson)

- **Messprinzip:**

Dehnungen verändern die optische Weglänge einer Interferometerkavität oder den optischen Weglängenunterschied zwischen einer freien und einer mit dem Bauteil verbundenen Faser, was zu einer Phasen- bzw. Interferenzsignaländerung führt.

- **Einsatz:**

- Hochauflösende Verschiebungs- und Dehnungsmessung
- Fabry-Pérot Sensoren eignen sich besonders für Messbasen im Dezimeterbereich (Alternative zu elektrischen Schwingsaitenaufnehmern)
- Die Doppelfaser Michelson-Konfiguration ist eine etablierte Sensortechnologie welche sich speziell für lange Messbasen im Meterbereich eignet.

- **Bewertung:**

Hohe Sensitivität, jedoch aufwendige Signalverarbeitung und Packaging. Die Doppelfaser Michelson-Konfiguration hat den Vorteil, dass sie keine Temperatur-Kreuzempfindlichkeit hat, was sie besonders für Umgebungen mit grossen Temperaturvariationen interessant macht.

Brillouin-basierte DFOS (BOTDA, BOTDR, BOFDA)

- **Messprinzip:**

Die Brillouin-Frequenzverschiebung hängt von Dehnung und Temperatur ab.

- **Einsatz:**

- Langstreckenmonitoring (100 m – mehrere km)
- Brücken, Tunnel, Dämme

- Globale Verformungs- und Setzungsmessung
- **Stärken:**
 - Grosse Messlängen
 - Geeignet für quasistatische Dehnungen
- **Limitierungen:**
 - Geringere räumliche Auflösung (typ. cm–m)
 - Temperatur–Dehnungs-Entkopplung erforderlich

Rayleigh-basierte DFOS (OFDR, ϕ -OTDR)

- **Messprinzip:**
Auswertung des kohärenten Rayleigh-Rückstreusignals entlang der Faser.
- **Einsatz:**
 - Hochauflösende Dehnungsprofile
 - Risslokalisierung und -entwicklung
 - Kurz- bis mittlere Messlängen
- **Stärken:**
 - Sehr hohe räumliche Auflösung (mm–cm)
 - Besonders geeignet für Betonrissmonitoring
- **Limitierungen:**
 - Begrenzte Messlänge
 - Hohe Anforderungen an Datenverarbeitung

Integration in Bauwerke

Ein zentraler Aspekt ist die mechanische Kopplung zwischen Faser und Bauwerk. Folgende Einbaukonzepte kommen zur Anwendung:

- **Vollständige Einbettung:** Gute Dehnungsübertragung, aber empfindlich gegenüber Mikrobiegungen und Bruch.
- **Oberflächenmontage:** Gute Zugänglichkeit, jedoch abhängig von Klebe- und Schutzsystemen.
- **Rohr- oder Kabelsysteme:** Schutz der Faser, aber reduzierte Dehnungsübertragung und Glättung lokaler Effekte.

Die Wahl des Einbaukonzepts beeinflusst massgeblich Messgenauigkeit, räumliche Auflösung und Langzeitstabilität.

5.15.8 Bewertung der Praxistauglichkeit von FOS

Praxistauglichkeit faseroptische Sensortechnologien

Messgrösse	Sensortechnologie					
	(qualitative Bewertungsskala Eignung / Marktreife: o, + oder ++)					
	FBG	LPFG	Interfero- meter (Fabry- Pérot, Mi- chelson)	Brillouin	Reyleigh	Fluoro- szenz, Lu- miniszenz
Korrosion	++ / o	+ / o	-	++ / o	-	-
Relative Feuchte	++ / +	++ / o	-	-	-	-
Chloridgehalt	-	++ / o	-	-	-	+ / o
pH-Wert	-	+ / o	-	-	-	++ / o
Temperatur	++ / ++	+ / o	-	++ / ++	++ / ++	-
Längenände- rung	++ / ++	-	++ / ++	++ / ++	++ / ++	-

Tabelle 13: Praxistauglichkeit faseroptische Sensortechnologien

6 Datenakquisitionsgeräte, Datenlogger

6.1 Einleitung

Neben der Sensorik ist die Messelektronik der Datenakquisitionsgeräte (DAQ) ein wesentlicher Bestandteil eines Monitoringsystems. Sie dient der sauberen und möglichst störungsfreien Erfassung von analogen elektrischen Signalen und deren Umwandlung in digitale Werte. Die z.T. sehr schwachen elektrochemischen Ströme und Potenziale (Spannungen) benötigen dabei spezielle und hochauflösende Mess- und Digitalisierungsschaltungen mit wenig Drift (siehe Kap.6.2). Handelsübliche Ammeter und Voltmeter genügen den Anforderungen nicht.

Wir werden im vorliegenden Kapitel nur auf die elektrischen DAQ eingehen, die faseroptischen Interrogatoren, welche für die Sensoren in Kap. 5.15 benötigt werden, würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

6.2 Anforderungen

Messtechnische Anforderungen

Die nachfolgenden messtechnischen Anforderungen wurden bei der Entwicklung eines Datenloggers der Forschungsstelle angewendet und können aufgrund der bisherigen Einsätze als sinnvoll erachtet werden.

- a. Korrosions-, Feuchte, und Temperaturmessungen:
 - Potenzial: hohe Eingangsimpedanz $>100\text{ M}\Omega$, Bereich $-1000\dots+1000\text{ mV}$, Auflösung 1 mV
 - Korrosionsstrom: Zero-Resistance-Ammeter (ZRA), Bereich $-100\dots+100\text{ }\mu\text{A}$, Auflösung $0.1\text{ }\mu\text{A}$
 - Impedanz: AC-Frequenz 1 kHz , Bereich $1\text{ }\Omega\dots1\text{ M}\Omega$, Auflösung $1\text{ }\Omega$
 - Temperatur: Bereich $-20\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, Auflösung $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- b. Dehnungsmessungen (LVDT, Potentiometer):
 - Spannung: Bereich $0\dots10\text{ VDC}$, Auflösung 1 mV (typische Werte, je nach Wegaufnehmer) oder
 - Strom: Bereich $4\dots20\text{ mA}$, Auflösung $1\text{ }\mu\text{A}$ (typische Werte, je nach Wegaufnehmer)
 - Temperatur: Bereich $-20\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, Auflösung $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Messgenauigkeit: $\pm(0.1\%$ vom Messbereich $+ 0.1\%$ vom Messwert)

A/D-Wandler-Auflösung: min. 16 bit, besser 24 bit

Wichtige Punkte bei korrosionstechnischen Messungen sind:

- Der Korrosionsstrom-Messkreislauf sollte permanent kurzgeschlossen sein, damit der Einschalt-Strompeak die Messung nicht verfälscht. Falls dies nicht möglich ist (instationäre Messung), muss die Messung mit einer gewissen Verzögerung nach dem Kurzschliessen durchgeführt werden.
- Korrosionsstrom (stationär) und -potenzial dürfen nicht mit derselben Messelektrode zum gleichen Zeitpunkt gemessen werden, damit die Polarisierung der (Strom-)messelektrode die Potenzialmessung nicht stört.
- Bei Messung gegen die Bewehrung müssen die Impedanz- und Strommesskreisläufe im DAQ galvanisch getrennt sein, sonst wird die Impedanzmessung durch die Impedanz des Strommesskreislaufts gestört.

Neben den messtechnischen Anforderungen müssen die Geräte solide für den Aussen-einsatz gebaut und wasserdicht sein, damit sie in der oft rauen Bauwerks-Umgebung auch über mehrere Jahre den Elementen widerstehen. Ein minimaler Eindringenschutz gemäss IP66 wird empfohlen (staubdicht, Schutz gegen starkes Strahlwasser).

Die Stromspeisung sollte netzunabhängig mit Batterien und/oder Solarzelle erfolgen, und einen mehrjährigen autonomen Betrieb ermöglichen. Als Messintervall eignet sich für die meisten Anwendungen ein Wert zwischen 1h und 24h.

6.3 Kommerziell erhältliche Geräte

6.3.1 DS-Log4.0 (TFB Diagnostic Systems AG)

Der Datenlogger DS-Log4.0 ist ein Universal-DAQ für Monitoring im Bauwesen. Seine 48 Eingangskanäle erlauben die kombinierte Messung folgender Messgrössen (8 Kanäle pro Messgrösse):

- 8 x Temperatur (Thermoelement Typ J/K/N, RTD)
- 8 x Potenzial
- 8 x Korrosionsstrom
- 8 x Impedanz @1kHz (Magnitude, Phasenwinkel)
- 8 x Spannung (universell)
- 8 x Strom (universell)



Abbildung 30: Datenlogger DS-Log4.0

Messspezifikationen DS-Log4.0

Messgrösse	Bereich	Auflösung	Eingangsimpedanz
Voltage (universal)	0 ... +45 V _{DC} 0 ... +6.5 V _{dc} (HiRes)	1 mV _{DC} 0.1 mV _{DC}	280 k Ω
Current (universal)	0 ... +100 mA	0.01 mA	1.7 Ω
Corrosion potential	-1000 ... +1000 mV _{DC}	0.1 mV _{DC}	100 M Ω
Corrosion current	-1000 ... +1000 μ A	0.1 μ A	$\approx$ 0 Ω (ZRA)
Temperature (TC, RTD)	RTD: -25 ... +80 °C TC: -25 ... +250 °C	0.01 K 0.01 K	--
Impedance (@ 1 kHz)	1 Ω ... 1 M Ω	0.5 Ω	--

Tabelle 14: Messspezifikationen DS-Log4.0

Nebst den Korrosions- und Feuchtesensor spezifischen Eingängen (Korrosionsstrom, Potenziale, Impedanz, Temperatur) können am Gerät dank den universellen Spannungs- und Stromeingängen eine Vielzahl von elektrischen Sensoren mit spannungs- oder strommoduliertem Signal angeschlossen werden. Dies ermöglicht, den DS-Log4.0 Datenlogger auch für Dehnungs- und Rissensoren zu verwenden. Für aktive Sensoren mit integrierter Signalwandlungselektronik, die eine Stromspeisung benötigen (z.B. LVDT-Wegaufnehmer), kann der 3,3 bis 25 V_{dc}-Ausgang als Spannungsversorgung benutzt werden.

Das Gerät erfasst die Sensorwerte in einem frei festgelegten Intervall zwischen 1 und 9999 min und überträgt sie verschlüsselt und in Echtzeit über das LoRaWAN-Funknetz an einen Zeitreihen-Datenbank-basierten Datenserver in der Cloud, wo sie auf interaktiven, webbasierten Dashboards grafisch dargestellt werden. Die Messdaten können auf dem Server in Rohform oder aufbereitet dargestellt werden. Zudem können Warn- und Alarmkriterien definiert werden, welche bei Auslösen automatisch E-Mails an den für die Überwachung zuständigen Spezialisten sendet.

Zur Sicherstellung der Datenintegrität werden die Daten zusätzlich auf einer Logger-internen SD-Karte gespeichert, welche bei Bedarf vor Ort ausgelesen werden kann.

Der Betriebstemperaturbereich liegt bei -20 bis +80 °C, und das Gehäuse ist wasserdicht (IP67). Die Stromspeisung erfolgt über Batterien und erlaubt einen mehrjährigen autonomen Betrieb.

Eine neue Generation des DS-Log4.0 Datenloggers ist aktuell in Entwicklung. Folgende Verbesserungen sind vorgesehen:

- Modulare, physische Aufteilung des Datenloggers in mehrere funktionale Einheiten mit individuellen und sensorspezifischen Mess- und Digitalisiermodulen gleich neben den Sensoren (1 Messknoten pro Sensor) und einem Batterie-, Funk- und Kontrollmodul (Host) an einer möglichst gut zugänglichen Stelle im näheren Umfeld der Sensoren. Die Messmodule können beliebig kombiniert werden.
- Hybride Netzarchitektur: Die lokale Kurzstrecken-Verbindung zwischen Messknoten und Host erfolgt kabelgebunden (RS-485/Modbus), während für die Fernübertragung ab Host weiterhin das funkbasierte LoRaWAN verwendet wird. Am RS-485 Bus können mittels Daisy-Chain mehrere Messknoten angeschlossen werden. Die

Messknoten werden über das RS-485 Kabel mit Strom ab der Hostbatterie versorgt. Die hybride Architektur hat den Vorteil, dass die einzelnen Einheiten an der jeweils optimalen Stelle platziert werden können: die unterhaltsfreien Messknoten beim Sensor, die Hostknoten mit Batterie und LoRa-Antenne an einer zugänglichen Stelle mit guten Funkbedingungen. Die analogen Sensorsignale werden so quasi auf dem Sensor digitalisiert und sind damit weniger störanfällig.

- Diese neue modulare und hybride Netzarchitektur erlaubt eine optimierte und äußerst flexible Netzplanung, die besser an die baulichen Gegebenheiten und Sensorpositionen angepasst werden kann.

6.3.2 DuraMon Datenlogger (DuraMon AG)

Der Duramon Datenlogger ist ein speziell für die Duramon Multisensoren (siehe Kap. 5.6) entwickeltes DAQ-Gerät und ermöglicht die kombinierte Messung der korrosionstechnischen Messgrößen Potenzialwert, Korrosionsstrom und Impedanz:

- 16 x Potenzial (Eingangsimpedanz > 1 GΩ)
- 8 x Korrosionsstrom
- 4 x Impedanz

Der Duramon Datenlogger sendet die Messdaten in Echtzeit über ein LoRaWAN Funknetz an den Duramon-Datenserver zur weiteren Auswertung und Visualisierung.

Zur Sicherstellung der Datenintegrität werden die Daten zusätzlich auf einer Logger-internen SD-Karte gespeichert, welche bei Bedarf vor Ort ausgelesen werden kann.

Der Betriebstemperaturbereich liegt bei –20 bis +80 °C, und das Gehäuse ist wasserdicht (IP66/67). Die Stromspeisung erfolgt über Lithium-Batterien und erlaubt einen mehrjährigen autonomen Betrieb (rund 5 Jahre bei 4 Messungen pro Tag).

6.3.3 Camur III-System (Protector KKS GmbH)

Das Camur III System ist eine spezialisierte Plattform für das permanente, automatisierte Korrosionsmonitoring sowie für die Fernsteuerung von KKS-Anlagen. Die Systemarchitektur basiert auf einer flexiblen Knoten-Struktur, die aus einem zentralen Controller, verschiedenen Sensorknoten zur Digitalisierung analoger Messwerte und weiteren Funktionsknoten besteht. Während der Controller die gesammelten Daten der Sensorknoten verwaltet und an den Cloud-Service weiterleitet, ermöglichen spezialisierte Module wie die FixVolt-Knoten den Betrieb von KKS-Anlagen mit Fremdstrom. Innerhalb des Camur III-Systems existieren derzeit Funktionsknoten für die folgenden Messungen/Sensorsysteme:

- für Potenzial- und Temperaturmessungen an bis zu vier Bezugselektroden
- für lin. Polarisationswiderstandsmessungen
- für Elementstrommessungen (ZRA)
- für den Feuchtesensor «Multiring-Elektroden» der Fa. Sortec (tiefengestaffelte AC-Widerstandsmessungen an bis zu sieben Messstellen + Temperaturmessung)
- für die Korrosionssensoren «Anodenleiter» und «Spreizringanode» der Fa. Sortec (tiefengestaffelte Potenzial-, Elementstrom-, lin. Polarisationswiderstands- und AC-Widerstandsmessung an bis zu sieben Messstellen, Temperaturmessung)
- für den Korrosionssensor «CorroWatch» der Fa. Force (tiefengestaffelte Potenzial-, Elementstrom-, lin. Polarisationswiderstands- und AC-Widerstandsmessung an bis zu sechs Messstellen, Temperaturmessung).

Die Datenübertragung und Stromversorgung innerhalb des Systems erfolgen über einen CAN-Bus-Standard. Ein hybrides Bus-Kabel übernimmt dabei sowohl die Signalübertragung als auch die 24V-Gleichstromversorgung der einzelnen Knoten. Das System ist skalierbar: Ein Standard-Segment unterstützt bis zu 100 Knoten und eine Länge von 1000 Metern, kann jedoch durch Repeater für verzweigte Architekturen oder durch WLink-Module für drahtlose Verbindungen zwischen Gebäudeteilen flexibel erweitert werden.

Die Verwaltung und Visualisierung der Messdaten erfolgt über den Camur Workspace (Cloud-Service), der einen vollständig browserbasierten Zugriff ohne lokale Softwareinstallation ermöglicht. Diese Benutzeroberfläche dient der zentralen Konfiguration aller Sensoren, der langfristigen Speicherung von Messwerten sowie der grafischen Präsentation der Ergebnisse. Zudem bietet das System eine Echtzeit-Überwachung von Alarmereignissen, um die Dauerhaftigkeit der überwachten Infrastrukturbawerke sicherzustellen.

6.3.4 CAB|ONE-System (CORR-NOLOGY GmbH)

Das CAB|ONE-System ist eine modulare Plattform zur permanenten Überwachung, Steuerung und Analyse von kathodischen Korrosionsschutzanlagen (KKS) sowie zur Integration elektrochemischer Sensorik in Bauwerksmonitoring-Systeme. Die Systemarchitektur basiert auf einer dezentralen Feldgeräte-Struktur, bei der sowohl Mess- als auch Einspeiseeinheiten direkt im Feld installiert werden. Dadurch können Schutzströme lokal eingespeist, Messungen unmittelbar an der Struktur durchgeführt und Leitungsverluste minimiert werden.

Im Zentrum jeder Anlage steht die Central Control Unit (CCU), welche die Kommunikation zwischen den Feldgeräten steuert, Messdaten verarbeitet und die Anlagenregelung übernimmt. Ergänzt wird sie durch die Bus Isolation Unit (BIU), die eine galvanische Trennung von Gebäudeteilen oder getrennten Erdungssystemen ermöglicht. Die Kommunikation und Energieversorgung aller Feldgeräte erfolgt über eine Hybridleitung, die sowohl Datenübertragung als auch Stromversorgung übernimmt.

Das System umfasst derzeit die folgenden Messgeräte:

- PMU – Potential Measurement Unit, Potenzialmessgeräte mit Eingangswiderständen $>2\text{ G}\Omega$
- PMU₃ – Potential Measurement Unit 3 Kanal, Potenzialmessgeräte mit 3 Mess-Peripherien mit Eingangswiderständen $>2\text{ G}\Omega$
- RMU – Resistivity Measurement Unit, Wechselstrom-Widerstandsmessgeräte für Feuchte- und Widerstandsanalysen inkl. Temperatursensor
- CMU – Current Measurement Unit, ZRA-Messknoten für Elementstrommessungen und Makroelementanalysen
- MMU – Multi Resistivity Measurement Unit, 7 Kanal-Widerstandsmessgeräte, z.B. für Multiring-Elektroden der Fa. Sortec oder frei programmierbare Sensorsysteme

Die Steuerung und Datenerfassung erfolgt über die lokale Software CAB|CONTROL, die direkt auf der CCU betrieben wird. Alle Messdaten werden primär lokal gespeichert, wodurch die Anlage vollständig autonom und unabhängig von Internetverbindungen oder Cloud-Infrastrukturen betrieben werden kann. Für zusätzliche Datensicherheit können die Daten regelmässig auf einen ortsunabhängigen Offline-Server repliziert werden.

Für den optionalen Fernzugriff steht der Online-Dienst CAB|CONNECT zur Verfügung. Dieser fungiert ausschliesslich als sicherer Verbindungspunkt zwischen Anlage und Nutzer und speichert selbst keine Messdaten. Dadurch verbleiben sämtliche Anlagendaten vollständig unter der Kontrolle des Anlagenbetreibers.

Die gesamte Kommunikation – sowohl zwischen den Feldgeräten als auch beim Datentransfer zwischen CCU, Server und Nutzer – erfolgt über verschlüsselte Datenverbindungen.

6.3.5 CorroDec Auslesegerät (infrasolute AG)

Das CorroDec Auslesegerät/Funkgateway gehört zum infrasolute CorroDec2G-System (siehe Kap. 5.11) und ermöglicht die drahtlose (RFID) Energiespeisung der Sensoren und gleichzeitige Abfrage der Sensordaten sowie deren Weiterleitung an den infrasolute-Datenserver über ein öffentliches LPWAN-Funknetz (NB-IoT).

6.3.6 Universal-Datenlogger

Nebst den speziell für das Korrosionsmonitoring entwickelten Geräten gibt es zahlreiche Universal-Datenlogger für die Messung von Temperatur, Spannung und Strom. Diese verfügen über kabelgebundene oder Funkschnittstellen zur Datenübertragung und sind üblicherweise batteriebetrieben. Bei Geräten mit (Bluetooth- oder Wi-Fi-) Funkschnittstelle dient diese jedoch meistens nur dem zeitweisen Auslesen vor Ort der aufgezeichneten Daten und nicht der kontinuierlichen Echtzeit-Datenübertragung auf einen Datenserver. In letzter Zeit kommen jedoch vermehrt Geräte mit LPWAN-Funkschnittstelle (z.B. LoRaWAN) auf den Markt, welche eine Datenfernübertragung in Echtzeit ermöglichen.

Aufgrund der grossen Auswahl und raschen Marktentwicklung verzichten wir hier auf eine individuelle Auflistung von Geräten.

6.3.7 Schallemissionsanalyse und Codawellen-Interferometer

Sowohl die Schallemissionsanalyse (AE) als auch die Codawellen-Interferometrie (CWI) basieren grundsätzlich auf der Erfassung elastischer Wellen in Betonbauteilen und nutzen hierfür vergleichbare Sensorik, insbesondere piezoelektrische Wandler mit geeigneten Frequenzbereichen. Beide Verfahren zeichnen vollständige oder teilprozessierte Signale auf, um Veränderungen im Materialzustand abzuleiten. Während die Schallemissionsanalyse auf passiv detektierten, transienten Ereignissen beruht, benötigt die Codawellen-Interferometrie zusätzlich aktive Anregungseinheiten, i.d.R. in Form von Ultraschall-Pulsen, die definierte Impulse in das Bauteil einleiten. Für die Realisierung mehrerer Sender-Empfänger-Konfigurationen ist darüber hinaus ein zeitlicher Ablauf bzw. eine Triggersteuerung erforderlich, um die Abfolge der Aussendungen und die Synchronisation aller Kanäle sicherzustellen. CWI-basierte Systeme müssen somit nicht nur empfangen, sondern auch aktiv aussenden können und erfordern zudem stabile, wiederholbare Messabläufe, um die hochsensiblen Vergleiche zwischen sukzessiven Wellenformen zu ermöglichen.

Aufgrund der für beide Verfahren erforderlichen, sehr hohen Abtastraten – typischerweise im oberen kHz- bis in den MHz-Bereich – sowie der strengen Anforderungen an eine kanalgenaue Synchronisation ist derzeit ein direkter, analoger Anschluss sämtlicher Sensoren an eine zentrale Datenerfassungseinheit (DAQ) notwendig. Nur über eine solche zentralisierte Architektur können die Signale mit der geforderten zeitlichen Präzision erfasst, zwischengespeichert und gegebenenfalls vorverarbeitet werden, be-

vor sie zur weiteren Analyse übertragen werden. Eine verteilte, digitalisierte Sensor-Topologie ist aufgrund der notwendigen Taktsynchronität, der hohen Datenraten und der begrenzten Toleranzen bei Latenz- und Jittereffekten aktuell noch nicht realisierbar. Daraus folgt, dass über das Bauwerk verteilte Messungen mit mehreren Messgeräten nicht möglich sind.

Kommerziell erhältliche Geräte, Schallemissionsanalyse (AE)

Für die akustische Überwachung von Betonstrukturen haben sich spezialisierte Mehrkanal-Systeme etabliert, die sowohl ereignisbasiert (d.h. Schwellwert-getriggert) AE-Parameter (z.B. Zeitpunkt, Maximal-Amplitude, etc) erfassen als auch komplette Wellenformen aufzeichnen können. Im Bereich des Dauermonitorings im Bauwesen haben sich als kommerziell verfügbare Geräte Komplettsysteme der Hersteller Vallen Systeme und MISTRAS/Physical Acoustics aktuell am Markt etabliert.

Die Plattform „Vallen AMSY“ ist ein Mehrkanal-AE-System, das für synchronisierte, mehrkanalige Strukturüberwachung vorgesehen ist. Es unterstützt bis zu 248 Kanäle und kombiniert analoge Frontends mit digitalen Signalprozessoren zur Echtzeit-Extraktion typischer AE-Parameter wie Ankunftszeit, Dauer, Energie oder Amplitude. Zusätzlich können vollständige Wellenformen aufgezeichnet und parametrierbare Eingangssignale (z. B. Temperatur, Dehnung, Last) synchron eingebunden werden. Das System ist für den Dauereinsatz konzipiert und ermöglicht über geeignete Sensoren die Detektion und Lokalisierung von Rissereignissen in Beton sowie deren zeitliche Aktivität. Die Plattform wird seit vielen Jahren in Infrastrukturbauwerken eingesetzt und ist explizit für SHM-Anwendungen geeignet.

Auch Physical Acoustics (MISTRAS Group) bietet AE-Systeme für die Langzeitüberwachung an, z.B. „MicroSHM“ „Sensor-Highway III“ oder individuell konfigurierbare Systeme. Damit sind ebenfalls mehrere synchronisierte AE-Kanäle (bis zu 256), die Möglichkeit zur Integration zusätzlicher Sensorsignale und vielfältige Kommunikationsschnittstellen (PoE, WLAN, Mobilfunk) realisierbar. Das System ermöglicht ebenfalls eine kontinuierliche Zustandsüberwachung mit Ereignisdetektion in Echtzeit.

Kommerziell erhältliche Geräte, Codawellen-Interferometrie (CWI)

Die Codawellen Interferometrie ist eine ultraschallbasierte Messtechnologie und benötigt Ultraschall-Transducer («Sensoren») und ein entsprechendes Datenregistriergerät. Nach unserem Wissen gibt es zurzeit keine kommerziellen, vollständigen Messsysteme. Bisherige Codawellen-Messungen im Rahmen des BAST-Forschungsprojekts «Ultraschallmonitoring mit Codawelleninterferometrie - Praktische Implementation, Integration und Demonstration» [69] wurden mit einer eigens entwickelten Messelektronik («W-Box») durchgeführt.

7 Datenübertragung und IoT

7.1 Einleitung: Rolle der Datenkommunikation im Bauwerksmonitoring

Die Erkenntnisse und Erfahrungen zur Datenübertragung aus dem klassischen Structural Health Monitoring (SHM), welches sich mit dem Tragwerksverhalten befasst, können analog auf das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Bauwerken übertragen werden. Im Gegensatz zu SHM werden im Dauerhaftigkeitsmonitoring jedoch nur quasi-statische Prozesse überwacht, was die Anforderungen an die Datenübertragung reduziert (kleine Datenraten, Toleranz gegenüber verlorener Datenpakete, keine Zeit-Synchronisations-Probleme, ...).

Monitoringsysteme am Bauwerk bestehen nicht nur aus Sensoren und Auswertung, sondern wesentlich aus einer zuverlässigen Datenübertragungskette:

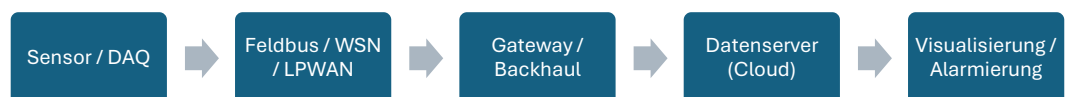


Abbildung 31: Datenübertragungskette

In der Praxis entscheidet die Kommunikationsarchitektur oft über Verfügbarkeit, Wartungsaufwand und Lebenszykluskosten. Wiederkehrende Herausforderungen sind Energiebedarf, Robustheit, Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit im rauen Umfeld. Parallel dazu wächst die Konvergenz Richtung Industrial IoT (IIoT), bei dem klassische, serielle Feldbusse (z. B. RS-485/Modbus) und Industrial-Ethernet/IoT-Protokolle (z.B. LoRaWAN, MQTT) über Gateways gekoppelt und vernetzt werden.

7.2 Anforderungen

Kommunikationslösungen für ein Bauwerks-Dauerhaftigkeitsmonitoring sollten folgende Anforderungen erfüllen:

- **Datenrate vs. Samplingfrequenz:** Quasi-statische Sensoren (z. B. Temperatur, Korrosionsstrom, Potenziale, Rissweite, etc.) benötigen aufgrund ihrer geringen Messhäufigkeit und wenig umfangreichen Datensätzen nur geringe Datenraten.
- **Verfügbarkeit/Robustheit:** Bauwerke sind z.T. EMV-belastet, mechanisch anspruchsvoll und oft schwer zugänglich.
- **Unterhaltsfähigkeit:** Da Dauerhaftigkeits-Monitoring oft eine Langzeit-Anwendung ist, sollten die elektronischen Komponenten des Systems einfach zugänglich sein damit sie bei Bedarf ohne grössere Umstände (Strassensperrungen, Hebebühne, etc.) unterhalten werden können (Batteriewechsel, Firmware-Updates, Ersatz von defekten Geräten).

- **Energiehaushalt:** Bei Funknetzen ist die Energieversorgung der Sensorknoten ein wichtiger Faktor (Batterieautonomie, Energy Harvesting). Bei bestehenden Bauwerken gibt es oft kein über das Bauwerk verteiltes 230V-Stromnetz.
- **Sicherheit:** Protokollwahl und Implementierung beeinflussen die Angriffsfläche (z. B. Authentisierung, Verschlüsselung).

7.3 Kabelgebundene Übertragung: Architekturen, Protokolle und Bewertung

7.3.1 Serielle Feldbusse (RS-232/RS-485/Modbus)

RS-485 ist im Feld sehr verbreitet, weil es kostengünstig, robust über verdrehte Adern und für längere Strecken geeignet ist; häufig wird darauf Modbus als Anwendungsprotokoll betrieben (Modbus RTU über RS-485). Modbus über RS-485 gilt in kabelgebundenen industriellen Monitoring- und Automationssystemen trotz seines Alters nach wie vor als wichtiger Standard.

Stärken: hohe Störfestigkeit, einfache Topologien (Daisy-Chain Bus), günstige Komponenten, gut für langsamere Sensorik/Telemetry.

Schwächen: begrenzte Bandbreite, Skalierung/Adressierung, galvanische Fragen und Erdschleifen.

7.3.2 Industrial Ethernet (Ethernet/IP, PROFINET, Modbus TCP)

Industrial-Ethernet bietet höhere Bandbreiten und gute Integration in IT-Infrastrukturen. Modbus existiert auch als Modbus über TCP (Kapselung in TCP/IP) welches in industriellen Netzwerken zum Einsatz kommt. Zusätzlich können Ethernet-Netze auch für die Stromversorgung der angeschlossenen Messgeräte verwendet werden (Power-over-Ethernet).

Stärken: hohe Datenraten (für hochfrequente Sensorik/Edge-Streaming), Switch-basierte Topologien, Remote-Zugriff, Standardwerkzeuge.

Schwächen: EMV/Überspannung, Blitzschutz/Trennung, Verkabelungsaufwand, potenzielle Single-Point-of-Failure ohne Redundanzkonzept.

7.4 Funkbasierte Übertragung: Architekturen, Protokolle und Bewertung

7.4.1 Wireless Sensor Networks (z.B. ZigBee)

Wireless Sensor Networks (WSN) wie ZigBee sind Funkübertragungsprotokolle für kurze Distanzen (ca. 10 m) und dienen häufig als Basis für lokale Sensorknoten-Netze (niedrige Datenrate, Mesh-fähig, energieoptimiert).

Eignung: gut für verteilte, batteriegestützte Low-Rate-Sensorik.

Einschränkungen: für hochfrequente Messungen stoßen Funknetze oft an Grenzen (Datenrate/Energie); hier werden in der Praxis Edge-Kompression, Triggering oder lokale Speicherung genutzt. Diese Einschränkung spielt für Dauerhaftigkeitsmonitoring-Anwendungen jedoch kaum eine Rolle.

Nachteile: Abhängigkeit vom Netzbetreiber, Funkabschattung durch Stahlbeton, laufende Kosten, ggf. Latenz/Verfügbarkeit.

Vergleichstabelle Kabel vs. Funkübertragung		
Kriterium	Kabelgebunden (RS-485/Modbus, Ethernet)	Funk (ZigBee, Wi-Fi, BLE, LoRa-WAN, LTE-M/NB-IoT)
Zuverlässigkeit	Sehr hoch bei guter Installation	variabel; abhängig von Funkkanal, Topologie, Interferenzen
Datenrate	RS-485 eher niedrig; Ethernet hoch	ZigBee, BLE : niedrig Wi-Fi : hoch LoRaWAN: niedrig LTE-M, NB-IoT : mittel
Energiebedarf	Sensor kann über Signal-Leitung versorgt werden	ZigBee, BLE : sehr gering Wi-Fi : hoch LoRaWAN : gering LTE-M, NB-IoT : gering
Übertragungsdis-tanz (ohne Repeater)	RS-485 : 1'200 m (bei geringer Datenrate) Ethernet : 100 m	ZigBee, BLE : 10 m WiFi : 300 m LoRaWAN : Städtisch : 0.5 - 2 km Suburban : 2 – 5 km Ländlich, freie Sicht : 5 - 15 km LTE-M, NB-IoT : abhängig von LTE-Zelle
Eignung für Stahl-beton-Bauten (Funk-Durchdringung)	-	ZigBee (2.4 GHz), BLE, WiFi : schlecht ZigBee (sub-GHz), LoRaWAN: gut LTE-M, NB-IoT: mittel
Installationsauf-wand	hoch (Trassen, Schutz, Blitz/EMV)	niedrig bis mittel; aber Funkplanung/Standorte
Skalierbarkeit	Ethernet gut; RS-485 begrenzt	gut bei geeigneter Topologie (Mesh/Star/LPWAN), aber Managementaufwand
Sicherheit	kontrollierbar (physisch + Netzsegmentierung), aber OT-Risiken	abhängig von Funkstandard/Implementierung

Tabelle 15: Vergleichstabelle Kabel vs. Funkübertragung

7.5 Typische Systemarchitektur für Dauerhaftigkeitsmonitoring (Best-Practice)

7.5.1 Reine Funk-Architektur

Eine reine Funkübertragung (über Mobilfunk LTE-M, NB-IoT) bildet die einfachste Netzarchitektur, in der jeder Sensorknoten die Daten ohne Gateway direkt ins Internet sendet. Nachteile sind die Abhängigkeit von öffentlichen Netzbetreibern und die höheren Funkkosten.

7.5.2 Alternative: Hybride Kabel-/Funk-Architektur: Feldbus + LPWAN

Eine aufkommende Netzarchitektur ist die lokale Aggregation zuerst per Kabel (z.B. RS-485/Modbus), dann funkbasiert (z.B. LoRaWAN) an ein Gateway und schliesslich über IP-basierte Backhauls (Ethernet, Mobilfunk) in die Cloud. Die Vorteile solcher hybriden “Edge-to-Cloud”-Konzepte werden in IIoT/IoT-Architekturquellen wiederholt hervorgehoben.

7.6 Fazit

Für Dauerhaftigkeitsmonitoring mit kleinen Datenraten bilden LPWAN-basierte Funknetze die Netzarchitektur der Wahl. Ihre hohe Energieeffizienz mit mehrjähriger Batterieautonomie der Sensorknoten, weiten Übertragungsdistanzen sowie die nötige Flexibilität und Skalierbarkeit sind ausschlaggebenden Vorteile.

In gewissen Fällen können auch hybride Architekturen mit einer Kombination von Feldbustechnik und LPWAN zur Verbesserung der Wartbarkeit eine nützliche Option bilden.

8 Bewertung von Monitoring-systemen und Sensoren

Für eine Bewertung von Monitoringsystemen und Sensoren können aufgrund von Erfahrungen oder Erkenntnissen aus der Literatur, z.B. [70], verschiedene Kriterien (qualitativ oder messbar) betrachtet werden. Diese können in vier Gruppen eingeteilt werden:

Fachliche bzw. Messtechnische Kriterien

- Eignung zur Erfassung des Schadenbilds: Erfasst der Sensor die physikalischen/chemischen Faktoren, die für die Dauerhaftigkeit des Bauteils relevant sind.
- Messgenauigkeit und Auflösung: Verhältnis der notwendigen Genauigkeit für das Bauteil (Grenzwerte) im Verhältnis zur erreichbaren Messgenauigkeit; Allfällige Berücksichtigung oder Entfernung von Rauschen und Drift der Sensoren
- Langzeitstabilität und Validierbarkeit: Stabilität der Messungen über Jahre, Möglichkeit zur Validierung bzw. Plausibilitätskontrolle und Kompensation von Temperatureinflüssen
- Robustheit und Umweltbeständigkeit: Widerstand gegen Feuchte, Temperatur, chemische Angriffe, UV-Strahlung; IP-Schutz von Datenlogger-Gehäusen
- Installationsmöglichkeiten und Einbauorte: Aufwand und Risiken der Montage (bohren, kleben, einbetten), Zugänglichkeit, Möglichkeit zerstörungsfreier Befestigung, Kabelwege
- Messintervalle und Messmodus: Kontinuierliche Messung, notwendige zeitliche Auflösung für Schädigungsmechanismen

Kommunikation und IT-bezogene Kriterien

- Datenübertragung: Zuverlässigkeit der Kommunikation (Kabel, Funk, Glasfaser), Reichweite, Störanfälligkeit, Fernzugriff
- Ausfall- und Redundanz: Fehlertoleranz, Alarmierung bei Systemausfall, redundante Sensoren oder Datenwege
- Datenmanagement und –auswertung: Fähigkeit, grosse Datenmengen automatisch zu erfassen, zu speichern, zu visualisieren und auszuwerten (Zeitreihen, Trendanalysen, Statistik, Zustandsindikatoren)
- Alarm- und Grenzwertkonzept: Konfigurierbare Grenzwerte, Eskalationsstufen, automatische Benachrichtigung (SMS, E-Mail, Leitstelle) bei Überschreitungen
- Integration in bestehende Systeme: Anbindung an Brücken- oder Tunnelleitzentralen, digitale Zwillinge
- IT-Sicherheit und Datenintegrität: Zugriffsschutz, Rechtekonzepte, Sicherung der Daten gegen Verlust und Manipulation.

Wirtschaftliche Kriterien

- Datenübertragung: Zuverlässigkeit der Kommunikation (Kabel, Funk, Glasfaser), Reichweite, Störanfälligkeit, Fernzugriff

- Investitionskosten: Hardware (Sensoren, Logger, Kommunikation), Einbau, Planung und Inbetriebnahme
- Betriebs- und Wartungskosten: Energieversorgung, Kalibrierung, Austausch defekter Sensoren, Kommunikationsgebühren, Softwarelizenzen
- Verhältnis Nutzen zu Aufwand: Beitrag des Systems zur Risikoreduktion, Verlängerung der Restnutzungsdauer, Verringerung von Inspektionsaufwand und Sperrzeiten
- Skalierbarkeit und Modularität: Möglichkeit, das System später zu erweitern (upgrade) oder anzupassen (weitere Sensoren, zusätzliche Bauwerke)

Organisatorische und normative Kriterien

- Übereinstimmung mit Normen/Leitfäden: Beachtung vorhandener Regelwerke
- Klar definierte Zielsetzung: Konkrete Monitoringziele (z.B. Zustandsbewertung, Zustandsentwicklung, Frühwarnung), darauf abgestimmtes Messkonzept
- Verantwortlichkeiten und Prozesse: Zuständigkeiten für Betrieb, Interpretation, Wartung und Entscheidungsfindung auf Basis der Messdaten
- Dokumentation und Nachvollziehbarkeit: Vollständige Dokumentation von Messkonzept, Sensorpositionen, Validierungen und Auswertelgorithmen

Die folgende Tabelle 16 enthält eine vergleichende Beurteilung von bekannten, kommerziellen Sensoren und Sensorsystem gemäss Kapitel 5. Dabei wurden ausgewählte Kriterien aus den oben beschriebenen Gruppen berücksichtigt.

Vergleichende Beurteilung kommerzieller Sensorsysteme

Sensortyp	Temperatur- Querempfindlichkeit	Stromverbrauch	IoT-Fähigkeit, funktauglich	Robustheit beim Ein- bau	Flexibilität Messintervall	Unterhaltskosten	Dauerhaftigkeit Sensor und Langzeitstabilität	Einfache Installation	Nachrüstbar
Korrosion der Bewehrung, Feuchte, Temperatur									
Referenzelektrode ERE-20, FORCE	+	++	++	+	++	++	+	+	X
Temperatur z.B. Pt1000, div. Herst.	N/A	++	++	++	++	++	+	++	X
ISE Chloridsensor Ag/AgCl, div. Herst.	+	++	++	+	++	++	+	-	X
pH-Elektrode (IrOx), DuraMon AG	+	++	++	+	++	++	+	-	X
Betonstahl-Korrosions- sensor CS-040, TFB Diag- nostic Systems AG	++	++	++	++	++	++	++	+	O
Betonfeuchtesensor CS- 402, TFB Diagnostic Sys- tems AG	+	++	++	++	++	++	++	+	O
Korrosions- und Feuchte- Kombisensor CS-322, TFB Diagnostic Systems AG	+	++	++	+	++	++	++	+	X
Multiring-Electrode, Sen- sortec GmbH	+	++	++	++	++	++	++	+	X
Anodenleiter, Sortec GmbH	++	++	++	++	++	++	++	+	O
Verformung / Dehnung									
LVDT	+	+	++	+	++	+	+	-	X
Linearpotentiometer	+	++	++	+	++	+	-	+	X
DMS	+	++	++	++	++	+	+	++	X
Michelson Interferometer (FOS)	++	-	-	++	++	+	++	+	X
FBG (FOS)	-	-	-	++	++	+	++	+	X

Legende:

-: ungünstig, +: eher günstig, ++: günstig

X: Sensoren können in Bestandsbauten nachträglich eingebaut werden (mittels Bohrlöcher / Bohrkern)

Tabelle 16: Vergleichende Beurteilung kommerzieller Sensorsysteme

9 Modularer Werkzeugkoffer

9.1 Einleitung

Dieses Kapitel zeigt einen Weg auf, wie für ein konkretes Bauwerk ein geeignetes und zielgerichtetes Dauerhaftigkeits-Monitoringkonzept erstellt werden kann. Es werden dabei die Fälle von präventivem Monitoring, welches bereits beim Neubau installiert wird, und des nachträglich bei Bestandsbauten aufgrund von aktiven Schädigungsprozessen installierten Monitorings unterschieden.

Beim präventiven Monitoring am neuen Bauwerk können projektspezifische Unsicherheiten bezüglich Dauerhaftigkeit (z.B. neue Betonrezepturen / Zemente mit reduzierten Dauerhaftigkeitseigenschaften, reduzierte Bewehrungsüberdeckung, Weglassen einer Abdichtung) Auslöser für eine Instrumentierung sein.

Beim nachträglich installierten Monitoring können Hinweise auf bereits laufende oder aufgrund von labormässigen Zustandsuntersuchungen und Inspektionen in Kürze zu erwartenden Schädigungsprozesse Auslöser sein. Auch nach erfolgten Instandsetzungsmassnahmen kann ein Monitoring zu Qualitätskontrollzwecken sinnvoll sein.

In beiden Fällen ist der Bedarf des Bauherrn für eine faktenbasierte, optimierte Unterhaltsstrategie eine wesentliche Motivation für ein Monitoring.

Dauerhaftigkeitsschädigungsprozesse sind komplexe, multifaktorielle Prozesse, welche von zahlreichen umweltbezogenen, chemischen und physikalischen Parametern abhängen. Diese Komplexität macht es unumgänglich, verschiedene Messgrössen kombiniert zu erfassen zu interpretieren, um den Schädigungsprozess und -verlauf genügend zuverlässig beurteilen zu können. Bei der Beurteilung anhand einer einzelnen Messgrösse ist das Risiko gross, dass es zu Falschinterpretationen kommt.

Aufgrund der Heterogenität der Schädigungsprozesse muss ein Monitoringsystem auch genügend redundant sein damit fehlerhafte Messungen/Sensoren ausgeklammert werden können und nicht zu Falschinterpretationen führen.

9.2 Neubauten

9.2.1 Auswahl der geeigneten Sensorik

Das Vorgehen zur Auswahl der geeigneten Sensorik basiert auf einem mehrstufigen Prozess, der von folgenden Kriterien abhängt:

1. Bauwerkstyp
2. Bauteiltyp
3. intakte vs. keine oder defekte Beschichtung/Abdichtung

Als Ausgabe erhält man die möglichen Schädigungsarten (Feuchteintrag, Korrosion aufgrund Karbonatisierung, chloridinduzierte Korrosion, AAR, Frost) sowie eine qualitative Einschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit (Schädigungsrisikograd).

Der Prozess zur Bestimmung der Schädigungsrisikos ist im Entscheidungsbaum (Abbildung 33 bis Abbildung 37) abgebildet. Für die Wahl einer geeigneten Sensorik werden wurden Schädigungsrisikoklassen mit jeweils 4 Risikostufen definiert:

- H2O_o...+++: Wassereintrag
- XC_o...+++: karbonatisierungsinduzierte Korrosion
- XD_o...+++: chloridinduzierte Korrosion
- XF_o...+++: Frost/Frosttausalz-Schädigung
- AAR_o...+++: AAR-Schädigung

N.B. Für die Korrosions- und Frostrisiken lehnt sich die Klassenbezeichnung an den bekannten Expositionsklassen der SIA 262 an, hat jedoch keinen direkten Zusammenhang.

Aus den resultierenden Schädigungsrisikoklassen kann mit Tabelle 17 die sinnvollen Messgrössen bestimmt und mit Tabelle 18 die dafür geeignete Sensorik ausgewählt werden. Bei den Expositionsklassen XC und XD, die die Gefahr einer Bewehrungskorrosion beschreiben, müssen die für die verschiedenen Schädigungsrisikoklassen aufgeführten sinnvollen Messgrössen nicht zwingend alle zusammen sensormässig abgedeckt werden. Mit einer gezielten Auswahl erhält man in vielen Fällen bereits gut auswertbare Daten. Beim Szenario «intakte Beschichtung/Abdichtung» ist die mögliche Schädigung ein Wassereintrag, d.h. es geht ausschliesslich um die Überwachung des Zustands der Beschichtung/Abdichtung und nicht des Betons. Je nach geplanter Unterhaltsstrategie können die Szenarien intakte Beschichtung und defekte Beschichtung bei der Auswahl der geeigneten Sensorik kombiniert werden. Damit erhält man ein 2-phasiges Monitoring, welches zuerst eine defekte Beschichtung anzeigt und dann in einer zweiten Phase (für den Fall, dass die Beschichtung nicht instandgesetzt wird) das Eindringen von korrosionsfördernden Stoffen (Chloride, CO₂, Wasser) bzw. der Depassivierungsfront in den Beton.

Ausser bei der XF-Schädigungsrisikoklasse wird die Temperaturmessung in der Tabelle 17 nicht erwähnt, da es sich um eine Sekundärmessgrösse handelt. Sie wird jedoch zu Temperaturkompensationszwecken benötigt (R_c , E_{ps_lang}).

Die Tabelle 17 enthält auch eine Empfehlung für die Anzahl Messpunkte (Sensorichte), abhängig von der Fläche des zu überwachenden Bauteils. Die empfohlenen Werte orientieren sich ansatzweise am analytischen Model zur Korrosions-Detektionswahrscheinlichkeit aus Kap. 9.2.2.

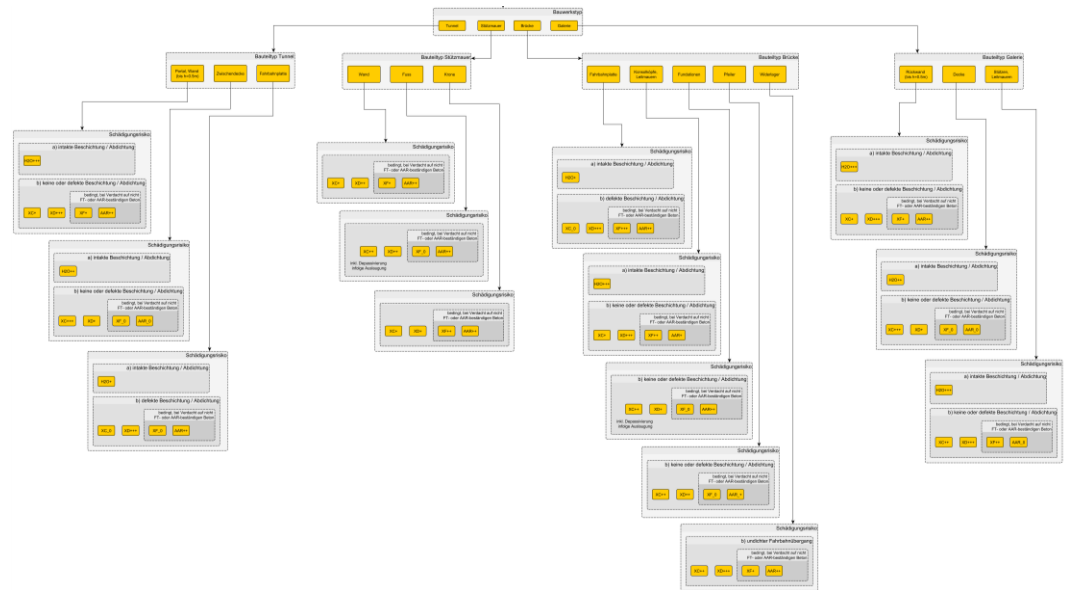


Abbildung 33: Entscheidungsbaum (Gesamtansicht) für die Bestimmung der relevanten Schädigungsrisikoklassen bei Neubauten. An oberster Stelle steht die Auswahl des Bauwerkstyps (Tunnel, Stützmauer, Brücke, Galerie). Darunter kommen die 4 bauwerkspezifischen Äste, welche in Abbildung 34 bis Abbildung 37 in lesbarer Grösse dargestellt sind.

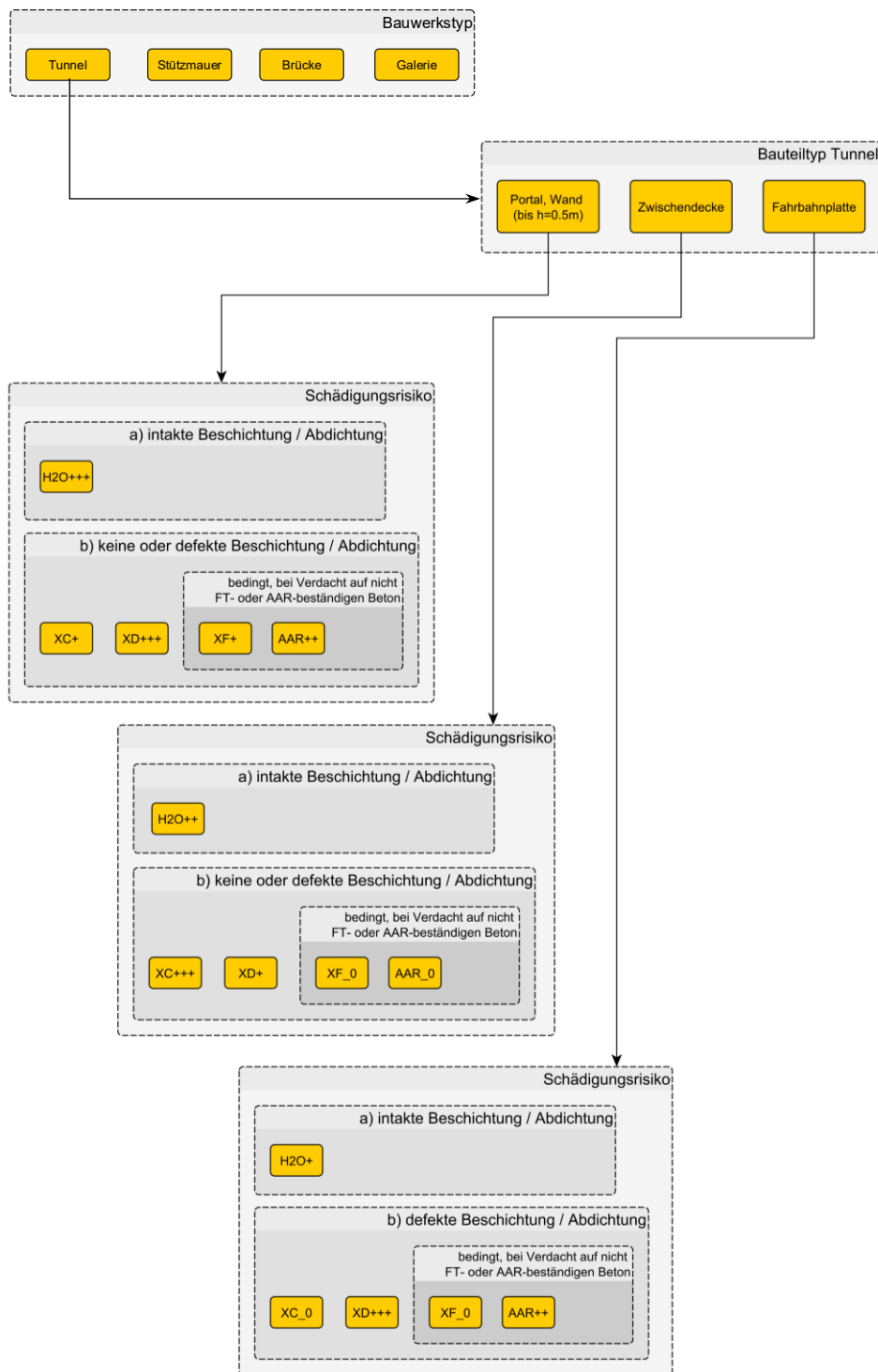


Abbildung 34: Ast «Tunnel»

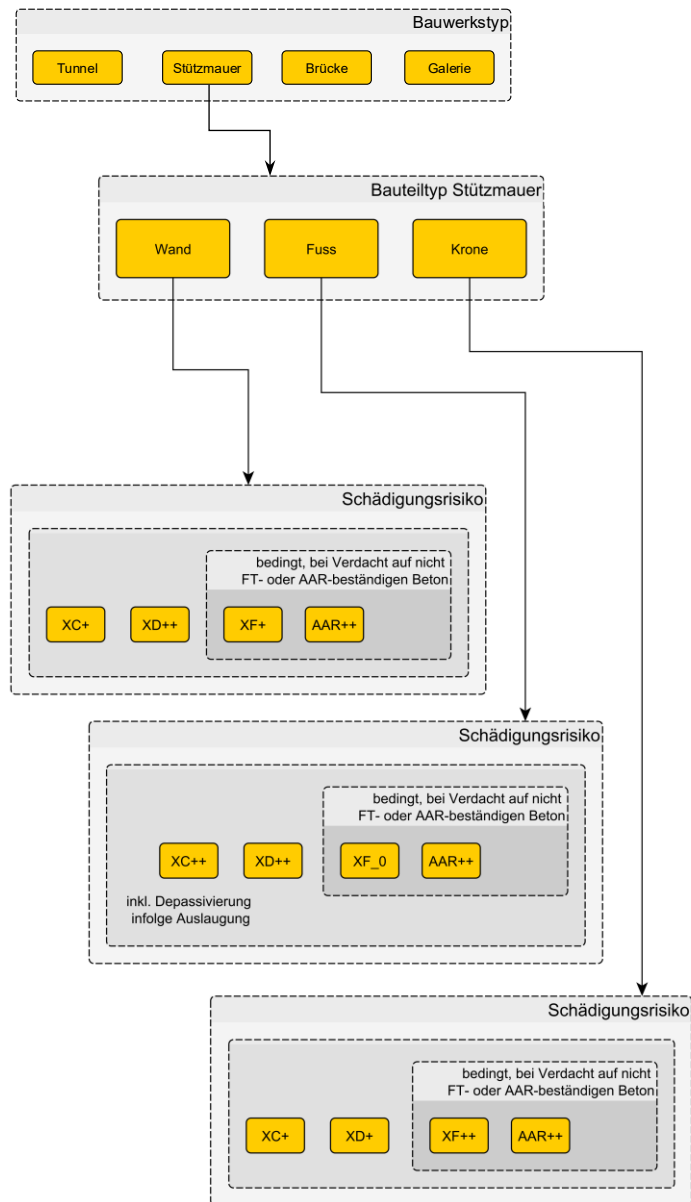


Abbildung 35: Ast «Stützmauer»

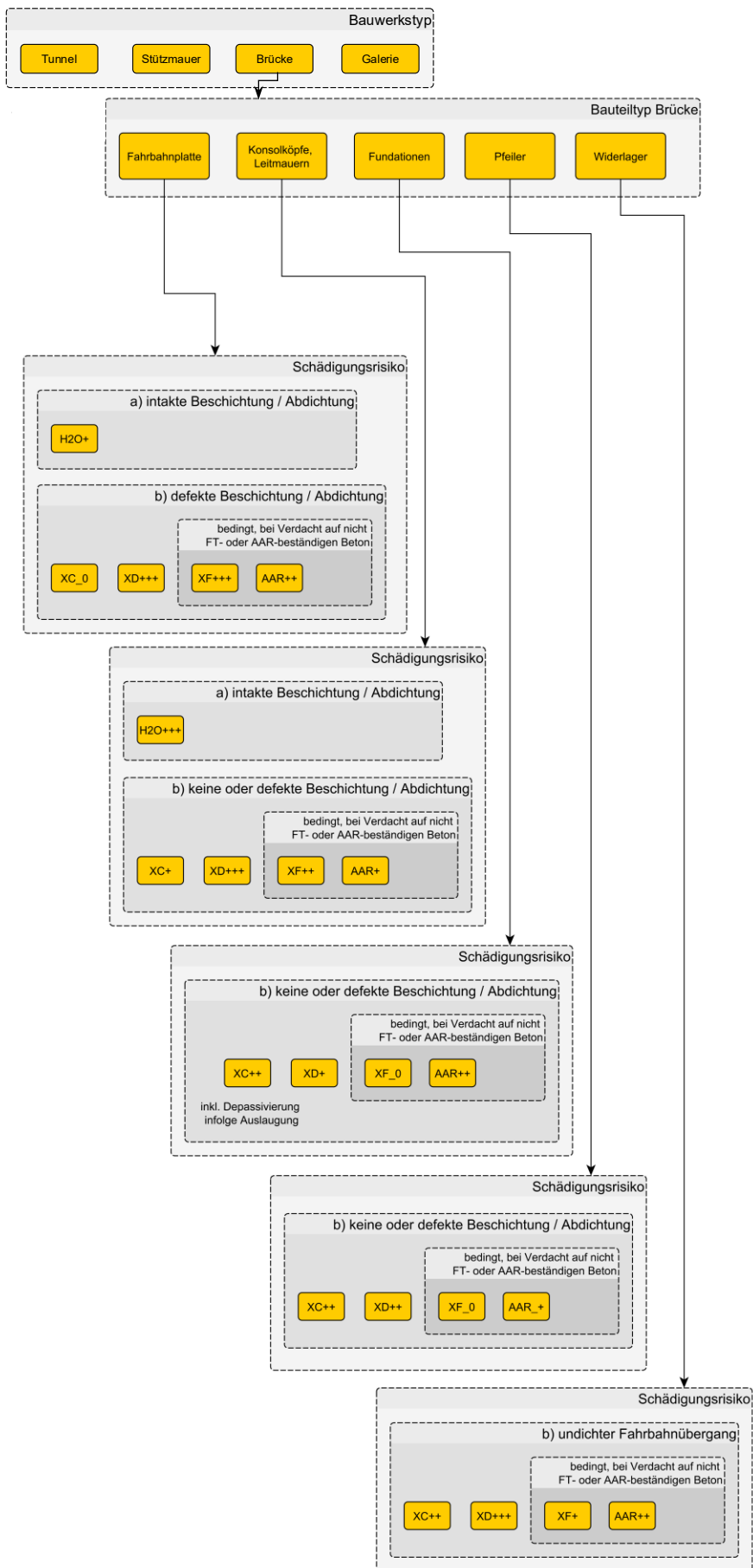


Abbildung 36: Ast «Brücke»

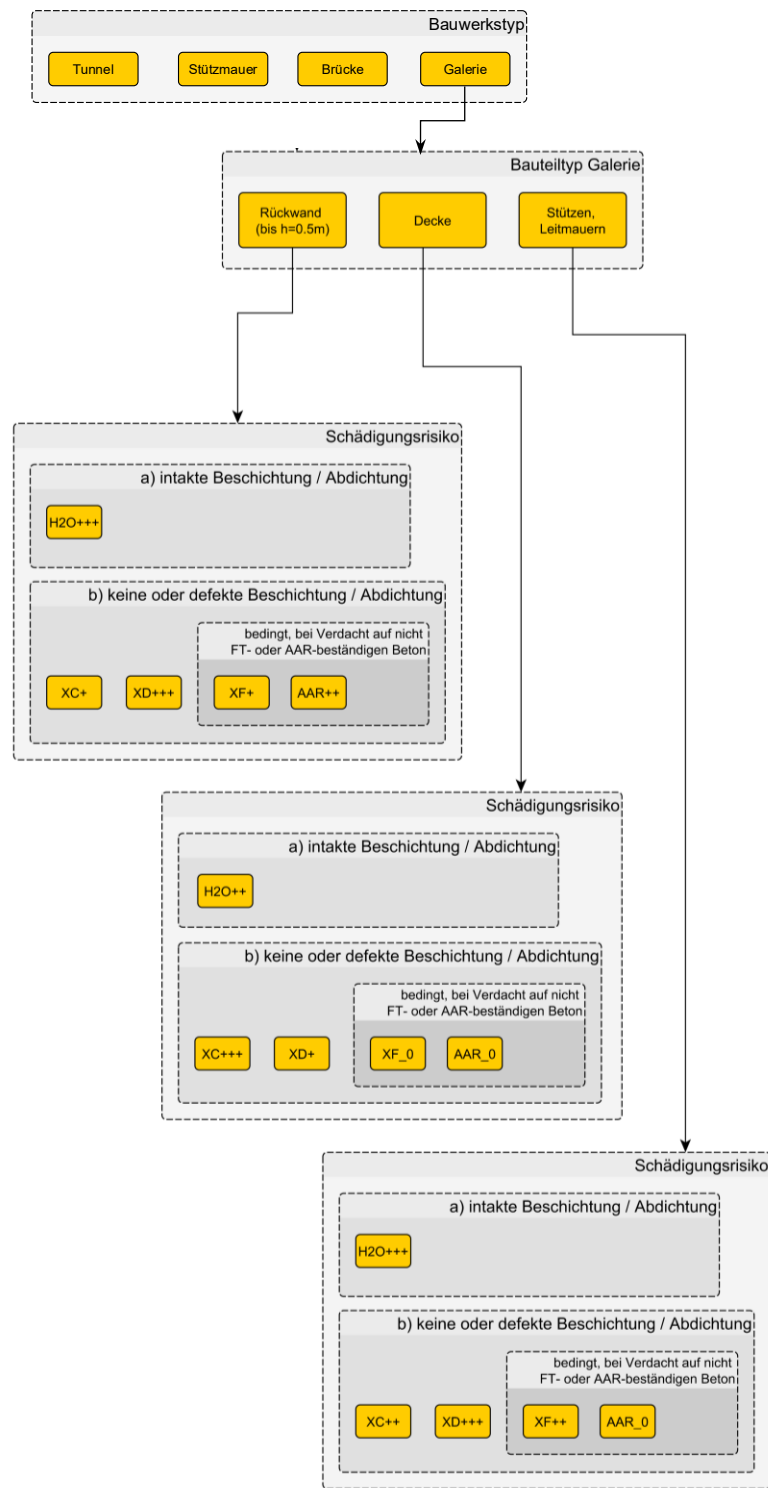


Abbildung 37: Ast «Galerie»

9.2.2 Wahl der Anzahl Sensoren für ein Korrosionsmonitoring

Es gibt keine allgemein gültigen Regelungen oder Verfahren, die Anzahl Sensoren in einem Bauteil festzulegen. Grund sind eine Vielzahl von Kriterien, die ein Planer oder Experte bei der Wahl der Sensorstandorte und der Anzahl Sensoren zu berücksichtigen hat. Solche Kriterien sind beispielsweise:

- Bauteiltyp (Brückenplatte und -träger, Hohlkasten, Konsolköpfe, Leitermauern, Widerlager, Stützen etc.)
- Exposition (Spritzwasser, Sprühnebel, Wasserläufe, Beregnung, Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Schadstoffe wie CO₂ oder Chloride)
- Kritische Bereiche des Tragwerks (Zug- oder Druckzonen, Schubbereiche, Querschnittsänderungen, schlanke Bauteile)
- Mögliche Schwachstellen der Abdichtung (Fugen, Rissbildungen, Fahrbahnübergänge, Gerbergelenke, Randborde)
- Entwässerungspunkte, Schächte, Entlüftungsröhrchen)
- stellen, Drainage-Pipetten
- Erfahrung mit ähnlichen Bauwerken, welche Schäden aufwiesen
- Repräsentativität für das zu überwachende Bauteil

Generell kann gesagt werden, dass für eine bestimmte Situation mindestens 3 Messstellen mit Sensoren instrumentiert werden sollten.

In [71] und [72] wird in Zusammenhang mit einer Kosten-/Nutzen-Betrachtung von Online-Monitoring ein statistisches Verfahren zur Bestimmung der Sensoranzahl vorgestellt. Die optimale Anzahl Sensoren eines Online-Monitorings kann nur ermittelt werden, wenn man ein Mass für die Genauigkeit der Messungen definiert (Detektionswahrscheinlichkeit). Betrachtet wird eine durchschnittliche Strassenbrücke des ASTRA mit einer Länge von 117 m und einer Breite von 25 m, was einer Fläche von rund 2'900 m² entspricht. Als Gefährdungsbild wird Chlorideintrag bei defekter Abdichtung und Auslösung von Lochkorrosion (Kritischer Chloridgehalt hat die Bewehrung erreicht) angenommen. Als Sensorsystem drängt sich eine leiterförmige Konstruktion auf (z.B. Anodenleiter), bei der die Initiierung in Abhängigkeit der Tiefe festgestellt werden kann. Mindestens zwei Sensorelemente aus Betonstahl müssen oberhalb der Bewehrung liegen, so dass diese Elemente ihre Aktivierung anzeigen, bevor die Chloridfront auf Höhe der Bewehrung angekommen ist (Frühwarnsystem). In diesem Fall können kostengünstige Massnahmen ergriffen werden (z.B. die Erneuerung der Abdichtung), bevor es zu grossflächigen Schäden kommt. Anschliessend wird die Brückenplatte in Quadrate aufgeteilt, wobei jedes Quadrat (z.B. 10 m²) die minimale korrodierende Fläche definiert.

Die nachfolgende Gleichung (7) aus [71] erlaubt die Berechnung der Detektionswahrscheinlichkeit $d(\eta)$ für eine variable Anzahl Sensoren (S), bei einem mit Monitoring zu detektierenden Schadenausmass von 5% der Fläche (25% bei rein visueller Inspektion).

$$d(\eta) = \left[\frac{(A - S)! \cdot (A - A \cdot \eta_{corr})!}{(A - S - A \cdot \eta_{corr})! \cdot A!} \right] \quad (7)$$

A ist die Anzahl der Quadrate auf der Brückenplatte und η_{corr} ist die korrodierende Fläche in %. Ein Nachteil bei der Verwendung von Gleichung (7) besteht darin, dass mit Fakultäten gerechnet wird, was rasch sehr grosse Zahlen zur Folge haben kann, die mit üblicher Software (z.B. Excel) nicht mehr handhabbar sind.

Abbildung 38 zeigt die Detektionswahrscheinlichkeit als Funktion der Anzahl Sensoren. Daraus ist ersichtlich, dass bei einem akzeptierten Schadenausmass von 5% (150 m²) und dem Einbau von 36 Sensoren eine Detektionswahrscheinlichkeit von 90% erreicht wird.

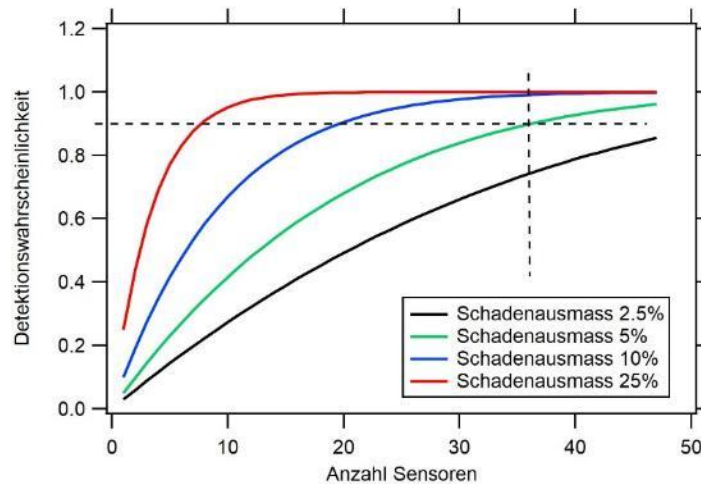


Abbildung 38: Detektionswahrscheinlichkeit für unterschiedliche Niveau der Schadenerkennung

Als weiteres Hilfsmittel bei der Sensorwahl dient die nachfolgende Tabelle 17. Dabei werden für jede Schädigungsrisikoklasse sinnvolle Messgrössen empfohlen, wobei häufig bzw. üblich verwendete Messgrössen **fett** hervorgehoben sind. In der dritten Spalte ist schliesslich ein Hinweis zu der empfohlenen Sensordichte (Anzahl Messstellen pro m²) angegeben.

Sinnvolle Messgrößen bei Neubauten (präventives Monitoring)

Schädigungs- risikoklasse	sinnvolle Messgrößen (fett: etablierte Messgrößen)	Empfehlung Sensordichte / Anzahl Messstellen
XC_o	-	
XC+	-	
XC++	U_{corr}, pH, R_c, f(d)	1 / 2000 m ²
XC+++	U_{corr}, pH, R_c, f(d), R_p	1 / 1000 m ²
XD_o	-	
XD+	R_c, f(d)	1 / 400 m ²
XD++	U_{corr}/I_{corr}, Cl⁻, R_c, f(d), R_p	1 / 200 m ²
XD+++	U_{corr}/I_{corr}, Cl⁻, R_c, f(d), R_p	1 / 100 m ²
XF_o	-	
XF+	-	
XF++	R_c, T, f(d)	1 / 2000 m ²
XF+++	R_c, T, f(d), μ-Riss	1 / 1000 m ²
AAR_o	-	
AAR+	-	
AAR++	H₂O f(d), E_{ps_lang}	3 / Bauwerk
AAR+++	H₂O f(d), E_{ps_lang}	3 / Bauwerk
H₂O_o	-	
H₂O+	H₂O (R_c), f(d)	1 / 200 m ²
H₂O++	H₂O (R_c), f(d)	1 / 100 m ²
H₂O+++	H₂O (R_c), f(d)	1 / 50 m ²

Legende:

Messgrößen

f(d): Profilmessung (tiefenaufgelöst)	R _c : elektrischer AC-Widerstand (Impedanz)
H ₂ O: Betonfeuchte	U _{corr} : Korrosionspotenzial
I _{corr} : Korrosionsstrom	Cl ⁻ : Chloridgehalt
pH: pH-Wert	R _p : Polarisationswiderstand
T: Temperatur	E _{ps_lang} : Verformung
μ-Riss: Mikrorisse	

Schädigungsrisikoklassen

XC: karbonatisierungsinduzierte Korrosion	AAR: AAR-Schädigung
XD: chloridinduzierte Korrosion	H ₂ O: Feuchteintrag (bei Beschichtungen/Abdichtungen)
XF: Frost/Frosttausalzangriff	

Tabelle 17: Sinnvolle Messgrößen bei Neubauten, abhängig von der Schädigungsrisikoklasse (präventives Monitoring). Die Schädigungsrisikoklassen stammen vom Entscheidungsbaum.

9.3 Bestandsbauten

Bei bestehenden Bauten basiert das Monitoringkonzept auf aktuellen Zustandsdaten des Bauwerks, die mit visuellen Inspektionen und klassischen, labormässigen Zustandsuntersuchungen erhoben wurden. Die Sensoren werden gezielt an kritischen, für die Schädigung am Bauwerk repräsentativen Stellen eingesetzt.

9.3.1 Korrosion

Das Vorgehen zur Auswahl der geeigneten Sensorik bei diagnostizierter Korrosionsschädigung an Bestandsbauten hängt von zahlreichen Parametern ab, was das Erstellen eines systematischen und für alle möglichen Fälle anwendbarer Auswahlprozess zu komplex gestaltet. Als Ersatz haben wir uns zur beispielhaften Illustration des Vorgehens auf 5 typische Schadensszenarien beschränkt. Die Szenarien charakterisieren sich durch die Exposition und die Resultate der labormässigen Zustandsuntersuchung und der visuellen Inspektion.

Die Bestimmung der zu überwachenden Korrosions-Messgrößen sollte in jedem Fall den spezifischen Gegebenheiten des Bauteils angepasst und kann nicht verallgemeinert werden. Die Wahl der richtigen Kombination aussagekräftiger und für den konkreten Fall relevanter Messgrößen bedarf einer guten Kenntnis von Korrosionsprozessen und einer korrekten Interpretation der vorliegenden Labordaten. Wir empfehlen, dafür Korrosions-Fachspezialisten hinzuzuziehen, um später nicht mit irrelevanten Monitoringdaten konfrontiert zu sein.

Schadensszenarien für Korrosion:

- A. Spritzwasserzone (Exposition XC4-XD3)
 - Chloridkontaminierter Überdeckungsbeton, C_{crit} hat die Bewehrungstiefe noch nicht erreicht
 - Karbonatisierungstiefe $\ll$ Überdeckungsdicke
 - keine Anzeichen von Korrosion (ohne Rostflecken oder Abplatzungen, Potentialfeldmessung -> vorwiegend passiver Zustand)
- B. Beschichtete Spritzwasserzone (Exposition XC4-XD3)
 - mit Beschichtung (OS9) oder Abdichtung, mit lokalen, alterungsbedingten Schwachstellen (Risse, Ablösungen)
 - keine wesentliche Chloridkontamination
 - Karbonatisierungstiefe $\ll$ Überdeckungsdicke
 - keine Anzeichen von Korrosion (ohne Rostflecken oder Abplatzungen, Potentialfeldmessung -> passiver Zustand)
- C. Sprühnebelzone, aussen (Exposition XC4-XD1)
 - Leicht chloridkontaminierter Überdeckungsbeton, noch keine erhöhten Chloridgehalte auf Bewehrungstiefe
 - Karbonatisierungstiefe $\ll$ Überdeckungsdicke
 - keine Anzeichen von Korrosion (ohne Rostflecken oder Abplatzungen, Potentialfeldmessung -> passiver Zustand)
- D. Wettergeschützte Exposition mit Sprühnebel (XC3-XD1)
 - Leicht chloridkontaminierter Überdeckungsbeton, noch keine erhöhten Chloridgehalte auf Bewehrungstiefe
 - Karbonatisierungstiefe $<$ Überdeckungsdicke
 - lokale Anzeichen aktiver Korrosion an Stellen mit geringer Bewehrungsüberdeckung (Abplatzungen, korrodierte Eisen)

E. Wettergeschützte Exposition (XC3)

- Bis hinter die Bewehrung reichende, grossflächige Chloridkontamination aufgrund eines längerfristigen Kontakts mit chloridhaltigem Wasser (z.B. Wassereinbruch in Brückenhohlkasten)
- Karbonatisierungstiefe < Überdeckungsdicke (keine Betonabplatzungen)
- Instandsetzungsmassnahme durchgeführt (Beseitigung des Wassereinbruchs, Ersatz des Überdeckungsbetons mit Mörtel, aber mit Restkontamination hinter der Bewehrung, Austrocknungsphase)

Der Prozess zur Bestimmung der für die verschiedenen Szenarien sinnvollen Messgrössen ist in Abbildung 39 dargestellt. Mit Tabelle 18 kann danach die dafür geeignete Sensorik ausgewählt werden.

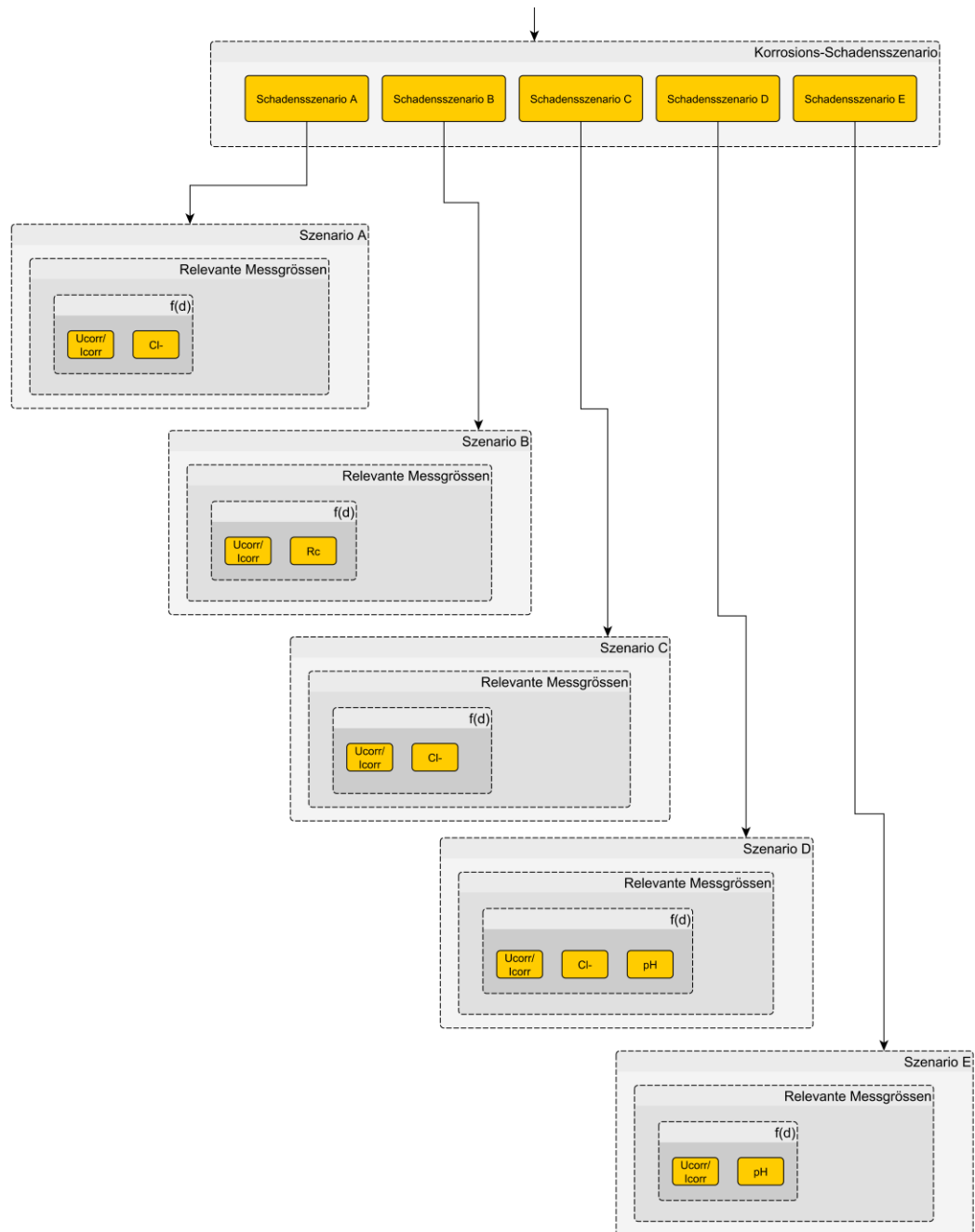


Abbildung 39: Relevante Messgrößen für eine Auswahl an typischen Korrosions-Schadensszenarien (Bestandsbauten)

9.3.2 Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR)

Bei AAR-geschädigten Bauten, bzw. Bauteilen eignet sich eine Kombination von einfluss- und auswirkungsrelevanten Messgrößen für ein Monitoring. Als massgebende Einflüsse gelten die Betonfeuchtigkeit und die Temperatur, während das Quellen und die Rissbildung des Betons die hauptsächlichen Auswirkungen sind.

Im Gegensatz zu Korrosionsmonitoring sollten im Fall von AAR für die Feuchtigkeitsmessungen lange Sensoren verwendet werden, die bis in den Kernbeton hineinreichen, dies weil die Feuchtigkeitsverteilung des ganzen Bauteil-Querschnitts für die AAR-Ki-

netik relevant ist. Die Feuchteverteilung im Überdeckungsbeton ist bei AAR-Monitoring von untergeordnetem Interesse.

Bei den Dehnungsmessungen sollten aufgrund des anisotropen Quellverhaltens die Verformungen des Bauteils in mehrere Richtungen gemessen werden (2D oder 3D), wobei die Dehnungen in die am wenigsten eingespannten Bauteilrichtungen von prioritärem Interesse sind. Die Messlängen sollten so lang wie möglich sein (gesamte Bauteilhöhe, -breite oder -dicke). Wichtig ist auch, die Extensometer möglichst im Kernbeton zu verankern, um oberflächige Störeinflüsse (Risse, umweltbedingte Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen) zu reduzieren.

Bei Verwendung von Faseroptik sind verteilte Sensorsysteme (DFOS) von besonderem Interesse, da mit ihnen zusätzlich zur Gesamtdehnung mögliche, über die Sensorlänge verteilte Dehnungsvariationen und Rissbildungen detektiert werden können.

Die nötige Anzahl an Sensoren hängt vom Bauteiltyp, der Geometrie sowie der Exposition ab. Grundsätzlich sollten zur Sicherstellung der Messredundanz mindestens 3 Bereiche pro Bauteil überwacht werden.

9.3.3 Frost und Frost/Tausalz

Wie in Kapitel 5.14 bereits erwähnt wurde, gibt es aktuell keine geeignete Sensortechnik zur Überwachung von Frostschäden. Die elektrische Betonwiderstandsmessung erlaubt zwar die Anzahl Frostzyklen zu bestimmen, ob die Messwerte mit der Zeit einen Frostschaden erkennen lassen, ist hingegen fraglich.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Beurteilung von Frostschäden eher um eine Aufgabe für die visuelle Inspektion (Frostschäden sind an der Betonoberfläche als solche erkennbar) oder eine ZfP-Prüfaufgabe. Es gibt beispielsweise Laser-Scanning-Verfahren, mit denen eine Betonoberfläche in kurzer Zeit abgescannt werden kann. Dabei können Messleistungen bis 500'000 Messpunkte pro Sekunde erreicht werden. Ein besonderes Potenzial dieser Methode besteht darin, dass zukünftig eine automatisierte Schadenserkenkung mit Hilfe von KI möglich sein sollte. Dazu muss die KI mittels Photogrammetrie trainiert werden (Abbildung 40). Solche Anwendungen können zukünftig den Ingenieuren eine Datenbank und eine Toolbox zur korrekten Interpretation der automatisierten Schadenserkenkung durch Oberflächen-Scanning liefern.

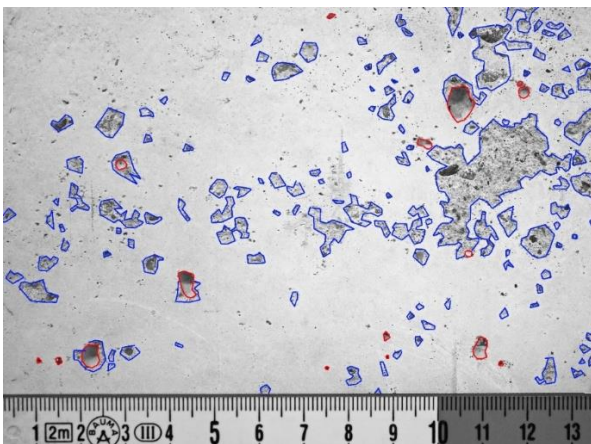


Abbildung 40: Optische Oberflächenanalyse zur automatischen Erfassung und Quantifizierung von Frost-/Frosttausalzschäden

9.4 Geeignete Sensoren

Die Tabelle 18 gibt einen Überblick über die kommerziellen Sensoren sowie ihrer Eignung, die für Dauerhaftigkeitsschädigungsprozesse relevanten Messgrößen zu erfassen.

Messgrösse – Sensormodell Eignungsmatrix

Sensormodell	H ₂ O (Rc)	[Cl ⁻]	Depassivierung (U _{corr})	Korrosionsrate (I _{corr})	Karbonatisierung (pH)	Temperatur	Mikroriss-Bildung	Verformung	Rissöffnung
ERE 20, Fa. Force			X						
CS-xxx, Fa. TFB Diagnostic Systems	Xp		Xp	Xp		X			
Multiring-Electrode, Fa. Sensor-tec	Xp					X			
ECI-2, Fa. Smart Structures	X	X	X	X		X			
CorroWatch, Fa. Force	Xp		Xp	Xp					
DuraMon Multisensor-System, Fa. DuraMon	Xp	Xp	Xp	Xp	Xp				
Concreteintel-P4, Fa. Prec. Struct. Health Sensors			Xp	Xp		X			
Anodenleiter, Fa. Sensor-tec	Xp		Xp	Xp		X			
Spreizringelektrode, Fa. Sensor-tec	Xp		Xp	Xp		X			
CorroDec2G, Fa. infrasolute	X		(Xp)			X			
Chloridsensor, Fa. TFB Diagnostic Systems		Xp							
Codawellen-Interferometrie							X		
LVDT-Extensometer								X	X
Linearpotentiometer								X	X

Legende: X = geeignet, Xp = geeignet, mit Möglichkeit, tiefenauflöst zu messen (Profilmessung)

Tabelle 18: Messgrösse – Sensormodell Eignungsmatrix

10.2.2 Zielsetzung

In dem Tunnel wurde im Wandsockelbereich bis in eine Höhe von rund 2,50 m ein Oberflächenschutzsystem appliziert, das den Chlorideintrag in den hochbelasteten Sockelbereichen unterbinden und eine Aufhellung des Tunnelquerschnitts bedingen soll. Infolge der hohen Beaufschlagung aus dem Verkehr in Verbindung mit der mechanischen Beanspruchung bei der zyklischen Tunnelreinigung kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bereits nach vergleichsweise kurzer Nutzungsdauer zu einem teilweisen Funktionsverlust des Oberflächenschutzsystems kommt, infolgedessen Chloride in den Beton eindringen und mittelfristig Bewehrungskorrosion hervorrufen können. Daher soll durch ein geeignetes Korrosionsmonitoring-System im Wandbereich einen möglichen Chlorideintrag frühzeitig festgestellt werden, um im Bedarfsfall geeignete Interventionsmassnahmen (z.B. Erneuerung des Oberflächenschutzsystems) ergreifen zu können.

10.2.3 Monitoring-Layout

Da neben einem möglichen Feuchteintrag bei Funktionsverlust des Oberflächenschutzsystems auch ein zukünftiger Chlorideintrag überwacht werden soll, wurden im vorliegenden Fall Korrosionssensoren des Typs „Anodenleiter“ angewandt. Bei Tunnelbauwerken ist – im Gegensatz zu z.B. Brückenbauwerken – kein gesondertes Augenmerk auf Detailausbildungen z.B. an Entwässerungseinrichtungen oder Widerlagern/Übergangskonstruktionen zu legen, weshalb hier grundsätzlich mit einer vergleichsweise geringen Sensoranzahl eine ausreichend repräsentative Bauwerksüberwachung möglich ist.

Aufgrund der Ausführung und der Monitoring-Zielsetzung sind die Tunnelwände gemäss dem in Kap. 9.2 entwickelten Entscheidungsbaum der Schädigungsrisikoklasse «XD+++» zuzuordnen. Für diese wird in Tabelle 17 die Installation von rd. 1 Sensor je 100 m² Bauteiloberfläche empfohlen. Wird als Oberfläche mit erhöhter Korrosionsgefährdung im vorliegenden Fall der Wandbereich bis in eine Höhe von 1 m über OK Fahrbahn betrachtet, ergibt sich die Bauteiloberfläche mit erhöhter Korrosionsgefährdung zu rd. 1200 m² und die empfohlene Sensoranzahl dementsprechend zu 12. Eine Übersicht über geeignete Sensorsysteme enthält Tabelle 18.

Im vorliegenden Fall wurden in Übereinstimmung mit Tabelle 18 insgesamt zwölf Korrosionssensoren eingebaut. Erfahrungsgemäss liegt die höchste Beaufschlagung mit Chloriden im Bereich des Einfahrtsportals sowie im Tiefpunktbereich vor. Allerdings zeigen aktuelle Untersuchungen an Autobahntunneln z.T. kaum Unterschiede in der Chloridbelastung in Tunnellängsrichtung. Über die Wandhöhe liegen die höchsten Chloridgehalte i.d.R. im Wandfussbereich oberhalb der Schrammborde vor. Infolge der Quergefälleausbildung wird im vorliegenden Fall an beiden Portalen das Oberflächenwasser jeweils zu der Aussenwand abgeleitet, die an die Einfahrtsspur angrenzt. Vor diesem Hintergrund wurde die Sensorpositionierung wie folgt gewählt:

- In beide Fahrtrichtungen wurde jeweils ein Sensor im Bereich der offenen Bauweise in einem Abstand von rund 10 m vom Einfahrtsportal installiert.
- In beide Fahrtrichtungen wurden im Bereich der bergmännischen Bauweise drei Sensoren in einem Abstand von rund 5 m, 25 m und 50 m vom Übergang zur offenen Bauweise installiert.

- In beide Fahrtrichtungen wurde je ein Sensor am Ausfahrtportal im bergmännischen Bereich in einem Abstand von rund 5 m zum Übergang zur offenen Bauweise installiert.
- In beide Fahrtrichtungen wurde ein zusätzlicher Korrosionssensor im Krümmungsscheitel in Tunnelmitte installiert.
- Alle Sensoren wurden im Wandfussbereich rund 30 cm oberhalb der Schrammbordoberkante (bezogen auf die Sensorlängsachse) installiert.

Die Sensoren wurden auf Bauherrenwunsch für eine manuelle Auslesung ausgelegt, bei der zum Messzeitpunkt ein Messgerät angeschlossen wird und die Werte aufgenommen werden. Das Messintervall wurde zu zwei Messungen pro Jahr festgelegt. Diese Vorgehensweise wurde im vorliegenden Fall gewählt, da bei den hier zu überwachenden, langsamen Transportprozessen nicht damit gerechnet werden muss, dass im ungerissenen Beton innerhalb eines Messintervalls ein Chlorideintrag um mehr als einen Sensorsprossenabstand stattfindet, so dass durch die vergleichsweise langen Messabstände dennoch keine signifikante Zustandsänderung übersehen wird.

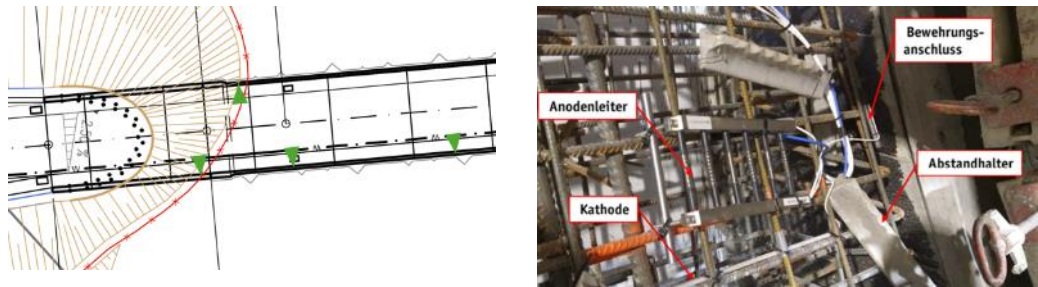


Abbildung 42: links: Sensoranordnung im Portalbereich; rechts: montierter Korrosionssensor vor Schliessen der Schalung

10.2.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Kosten für die Installation beliefen sich auf rund 30.000,- €. Für die jährliche Sensorauslesung und Bewertung der Sensorergebnisse ist mit jährlichen Kosten in Höhe von rund 2.000,- € zu rechnen. Über eine planmäßige Laufdauer des Monitorings von 50 Jahren entspricht dies – unter Vernachlässigung von Inflationseinflüssen – Gesamtkosten für das Tunnelmonitoring von rund 130.000,- €.

Die Kosten für den Bau des Tunnels beliefen sich auf rund 52,5 Mio. €. Damit beträgt der Anteil der Erstinstallation an den Tunnelkosten rund 0,06% bzw. der Anteil der Gesamtkosten für das Monitoring über einen Zeitraum von 50 Jahren rund 0,25% der Tunnelbaukosten. Diese Kenngrößen allein erlauben keine Wirtschaftlichkeitsbewertung, geben aber bereits einen ersten Eindruck über die untergeordnete Bedeutung des Monitorings für die Projektkosten.

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit müssen die Kosten für Installation und Betrieb des Monitoringsystems dem möglichen Nutzen gegenübergestellt werden. Dabei sind z.B. die folgenden Szenarien denkbar:

Szenario 1 - Kompensation Monitoring durch vertiefte Bauwerksuntersuchungen

Soll auf ein Bauwerksmonitoring verzichtet und dennoch ein annähernd gleicher Informationsgrad über den aktuellen Bauwerkszustand erreicht werden, ist dies nur

durch vertiefte Bauwerksuntersuchungen, im vorliegenden Fall in erster Linie Chloridgehaltsbestimmungen möglich. Wird unterstellt, dass aufgrund der geringeren räumlichen Aussagefähigkeit zur Kompensation von zwölf Korrosionssensoren rund 30 Chloridprofile à drei Tiefenlagen erforderlich sind, betragen die Kosten für die Entnahme und chemische Analyse von rund 90 Chloridproben und die gutachterliche Bewertung rund 9.000,- €. Grundsätzlich ist hier eine Aufweitung der Entnahmeintervalle auf z.B. drei Jahre denkbar. In diesem Fall betragen die Gesamtkosten für Bauwerksuntersuchungen über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren rund 144.000,- € und liegen damit geringfügig über den Monitoringkosten. Dabei bleiben allerdings zusätzliche Kosten z.B. aus der Verkehrsbeeinträchtigung während der Untersuchungen unberücksichtigt. Zudem liefern Chloridgehaltsbestimmungen in den hier vorgeschlagenen Tiefenstaffelungen und Messintervallen wesentlich weniger Informationen über das tatsächliche Chlorideindringverhalten und lassen zudem keine Rückschlüsse auf den kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalt zu, sodass diese Daten nur bedingt für eine Prognose der Zustandsentwicklung geeignet sind.

Szenario 1 - Wirtschaftlichkeit

Kosten Bauwerksmonitoring [K]			130.000,- €
Sensorinstallation	30.000,- €		30.000,- €
Sensorauslesung + -bewertung	2.000,- €/a	50a	100.000,- €
Kosten Bauwerksuntersuchungen [N]			150.000,- €
Bohrmehlentnahme + -bewertung	9.000,- €/3a	50a	150.000,- €
Wirtschaftlichkeit [N/K]			1,15

Tabelle 19: Kostenvergleich für Monitoring und vertiefte Bauwerksuntersuchungen (Szenario 1)

Szenario 2 - präventiver Bauwerkserhalt

Wird seitens des Bauwerksbetreibers eine präventive Instandhaltungsstrategie gewählt, bei der das Oberflächenschutzsystem zeitnah erneuert wird, bevor ein kritischer Chlorideintrag stattgefunden hat, erlaubt das Korrosionsmonitoringsystem eine wesentlich genauere Festlegung des optimalen Instandsetzungszeitpunkts und damit eine Verlängerung der Erneuerungsintervalle bei gleichem bzw. höherem Zuverlässigkeitsniveau. Wird unterstellt, dass dadurch über die Nutzungsdauer eine Beschichtungs-generation eingespart werden kann, entspricht das bei einer Beschichtungsfläche von rund 3.000 m² und Kosten von rund 90,- €/m² Gesamtkosten von rund 270.000,- € für die Erneuerung des Oberflächenschutzsystems inkl. Untergrundvorbereitung, aber ohne Kosten für Verkehrsführung, Verkehrsbeeinträchtigungen, Baustelleneinrichtung etc. Die Wirtschaftlichkeit als Quotient aus wirtschaftlichem Nutzen und Monitoringkosten beläuft sich in diesem Fall auf rund 270.000,- €/130.000,- € = 2,1.

Szenario 2 - Wirtschaftlichkeit

Kosten Bauwerksmonitoring [K]			130.000,- €
Sensorinstallation	30.000,- €		30.000,- €
Sensorauslesung + -bewertung	2.000,- €/a	50a	100.000,- €
Kosten Erneuerung Oberflächenschutzsystem [N]			270.000,- €
Untergrundvorb. + Applikation	90,- €/m ²	3.000 m ²	270.000,- €
Wirtschaftlichkeit [N/K]			2,1

Tabelle 20: Kostenvergleich für Monitoring und präventiven Bauwerkserhalt (Szenario 2)

Szenario 3 – reaktiver Bauwerkserhalt

Wird auf das Korrosionsmonitorings sowie Bauwerksuntersuchungen verzichtet und das Oberflächenschutzsystem nicht erneuert, besteht innerhalb der planmässigen Nutzungsdauer von 50 Jahren eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass eine umfassende Betoninstandsetzung an den Wandsockeln bis in eine Höhe von rund 2,0 m über OK Notgehweg erforderlich wird. Die Gesamtfläche der Tunnelwände bis in eine Höhe von rund 2,0 m beträgt rund 2.400 m², allerdings wird angenommen, dass in beide Fahrtrichtungen jeweils nur an der vorderen Tunnelhälfte Instandsetzungsbedarf besteht, also $A_{\text{Inst}} = \text{rund } 1.200 \text{ m}^2$. Die Eintretenswahrscheinlichkeit für dieses Schadensszenario wird anhand vergleichbarer Tunnelbauwerke zu rund $p_{\text{Inst}} = 60\%$ angenommen. Die Detektionswahrscheinlichkeit kann bei dem gewählten Monitoringsystem und der Sensoranordnung zu $p_D = 95\%$ angenommen werden. Die Kosten für den Betonabtrag und das Reprofilieren – ohne Berücksichtigung von Verkehrsbeeinträchtigungen, ggf. erforderlicher Umleitungen etc. – werden zu rund 900,- €/m² abgeschätzt. Damit ergibt sich der wirtschaftliche Nutzen N der Monitoringmassnahme für dieses Schadensszenario zu:

$$N = A_{\text{Inst}} \times K_{\text{Inst}} \times p_{\text{Inst}} \times p_D = 1.200 \text{ m}^2 \times 900,- \text{ €/m}^2 \times 0,6 \times 0,95 = 615.600 \text{ €}$$

Die Wirtschaftlichkeit der Monitoringmassnahme als Quotient aus wirtschaftlichem Nutzen N und Monitoringkosten über die Nutzungsdauer beträgt in diesem Fall rund 615.600,- €/130.000,- € = 4,74.

Szenario 3 - Wirtschaftlichkeit			
Kosten Bauwerksmonitoring [K]			130.000,- €
Sensorinstallation	30.000,- €		30.000,- €
Sensorauslesung + -bewertung	2.000,- €/a	50a	100.000,- €
Kosten Betoninstandsetzung [N]			615.600,- €
Kosten Betonabtrag + Reprofilieren	900,- €/m ²	2.400 m ²	2.160.000,- €
betroffener Flächenanteil	50%		
Eintretenswahrscheinlichkeit p_{Inst}	60%		
Detektionswahrscheinlichkeit	95%		
Wirtschaftlichkeit [N/K]			4,74

Tabelle 21: Kostenvergleich für Monitoring und reaktiven Bauwerkserhalt (Szenario 3)

10.3 Praxisbeispiel bestehende Brücke

10.3.1 Bauwerksbeschreibung

Das hier betrachtete, vierspurige innerstädtische Brückenbauwerk wurde 1967 – 1969 fertiggestellt. Die Brücke besteht aus zehn Feldern mit Spannweiten von 29,30 m in den Randfeldern bzw. 35,40 m in Brückenmitte. Mit den Rampenbauwerken besitzt die Brücke eine Gesamtlänge von rund 750 m. Die Gesamtbreite des Brückenüberbaus beträgt 19,50 m.

Aufgrund von Unterläufigkeiten der vorhandenen Abdichtung wurde 2005 – 2007 eine umfassende Instandsetzung des Brückenbauwerks durchgeführt, bei der die vorhandene Abdichtung sowie die Brückenkappen entfernt und eine umfassende Betoninstandsetzung an Bereichen mit erhöhter Chloridbelastung (Widerlager, Brückentafel) durchgeführt wurde. Die Brücke wurde anschliessend mit der ursprünglichen Bauwerksgeometrie wiederhergestellt.

10.3.2 Zielsetzung

Um eine mögliche erneute Unterläufigkeit der Brückenabdichtung, die visuell nicht erkennbar ist, dennoch frühzeitig feststellen zu können, wurde beschlossen, unterhalb der Abdichtung ein Monitoringsystem zu installieren. Dieses sollte insbesondere in Bereichen mit erhöhter Gefahr von Unterläufigkeiten (Widerlager, Übergangskonstruktionen, Entwässerungseinrichtungen) ein dauerhaftes Monitoring der Wirksamkeit der Brückenabdichtung ermöglichen.

10.3.3 Monitoring-Layout

Im vorliegenden Fall sollte die Wirksamkeit der Abdichtung durch ein Feuchtemonitoring überwacht werden, das Änderungen im oberflächennahen Feuchtegehalt des Konstruktionsbetons anzeigt.

Da es sich um eine weitreichende Instandsetzungsmassnahme handelte, bei der der chloridbelastete Beton der Fahrbahnplatte abgetragen wurde, wird für die Festlegung des Schädigungsrisikos der Entscheidungsbaum für Neubauprojekte zugrunde gelegt, Kap. 9.2. Angesichts der Applikation einer hochwertigen Brückenabdichtung mit Bitumenschweissbahn ist eine Einordnung in die Schädigungsrisikoklasse H_2O+ ausreichend (1 Sensor je 200 m² Brückenfläche).

Als Sensorsystem wurden für diese Zielsetzung Feuchtesensoren des Typs „Multiring-Elektrode“ der Fa. Sortotec in Anlehnung an Tabelle 18 gewählt. Für eine Brückenfläche von rd. 1.500 m² ergibt sich die empfohlene Sensoranzahl zu rd. 8 Sensoren. Angesichts der vorgefundenen Schädigung des Bauwerks wurde die Anzahl der Sensoren auf zwölf Stück erhöht. Da Unterläufigkeiten bei Brückenbauwerken bevorzugt im Bereich von Übergangskonstruktion und Entwässerungseinrichtungen auftreten, wurden die Sensoren wie folgt positioniert:

- 3 MREs wurden am Widerlager Ost in einem Abstand von rund 20 cm von der Übergangskonstruktion installiert,
- 3 MREs wurden am Widerlager West in einem Abstand von rund 20 cm von der Übergangskonstruktion installiert,
- 4 MREs wurden in den beiden Fahrtrichtungen jeweils in einem Abstand von rund 40 cm neben Brückenabläufen im Tiefpunkt des Quergefälles angeordnet,
- 2 MREs wurden als Referenzen in einem Abstand von rund 15 m vom Widerlager Ost mittig im Fahrspurbereich angeordnet.

Da es sich um eine Installation in einer Bestandsbrücke handelt, wurden die Sensoren nach Abschluss der Betoninstandsetzungen in Bohrlöcher (d = 25 mm) eingesetzt, die mit einem Injektionsmörtel verfüllt wurden. Die Sensoren wurden oberflächenbündig eingesetzt. Die Sensorkabel wurden durch Bohrungen in das Hohlkasteninnere und dort zu den Widerlagern verzogen. An den Widerlagern wurden zwei Datenlogger installiert, die vier Mal pro Tag die MRE-Messdaten aufzeichnen. Die Logger werden mehrmals jährlich im Rahmen von turnusmässigen Bauwerksbegehungen ausgelesen und die Daten zur Analyse übergeben.

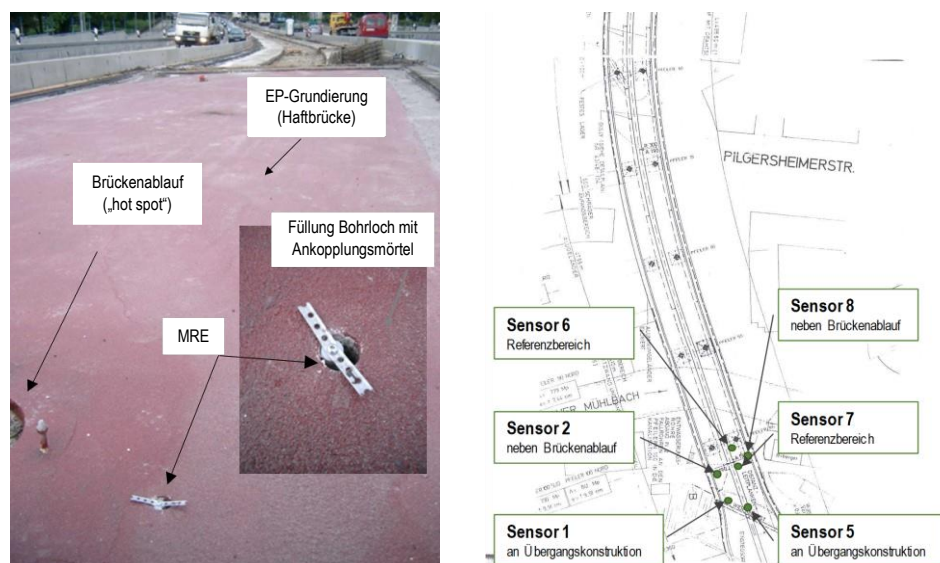


Abbildung 43: links: Feuchtesensor MRE in der vorbereiteten Brückentafel; rechts: Sensorpositionen am Widerlager Ost [73]

10.3.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Kosten für die Sensoren und die zugehörige Messelektronik sowie die Sensorinstallation selbst beliefen sich 2007 auf rund 7.500,- €. Für die jährliche Sensorauslesung und Bewertung der Sensorergebnisse ist mit jährlichen Kosten in Höhe von rund 1.000,- € zu rechnen. Zusätzlich werden jährliche Kosten von rund 150,- € für den Austausch und die Erneuerung der Messelektronik angenommen. Über eine planmäßige Laufdauer des Monitorings von 50 Jahren entspricht dies – unter Vernachlässigung von Inflationseinflüssen – Gesamtkosten für das Brückenmonitoring von rund 65.000,- €.

Die Kosten für die Instandsetzung der Brückentafel sowie der Erneuerung der brückenkappen und der Abdichtung beliefen sich 2007 auf rund 6,2 Mio €. Damit beträgt der Anteil der Erstinstallation an den Instandsetzungskosten rund 0,12% bzw. der Anteil der Gesamtkosten für das Monitoring über einen Zeitraum von 50 Jahren rund 1,0% der Instandsetzungskosten.

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurden bei dem Tunnelneubauprojekt in Kap. 10.2.4 sowohl ein Szenario betrachtet, bei denen das Monitoring durch vertiefte Bauwerksuntersuchungen kompensiert werden soll, als auch Szenarien, bei denen durch das Monitoring unterschiedlich aufwendige Instandsetzungsmassnahmen vermieden werden können. Diese Systematik soll auch für diesen Anwendungsfall angewandt werden, allerdings lassen sich diese Szenarien auf den vorliegenden Anwendungsfall nur bedingt übertragen.

Szenario 1 - Kompensation Monitoring durch vertiefte Bauwerksuntersuchungen

Eine Kompensation des Monitorings durch vertiefte Bauwerksuntersuchungen ist im vorliegenden Fall nicht sinnvoll möglich. Bauwerksuntersuchungen zum Auffinden möglicher Unterläufigkeiten setzen grundsätzlich voraus, dass der Asphaltbelag und die darunter liegende Abdichtung lokal entfernt werden, um die Betonoberfläche untersuchen zu können. Neben den damit einhergehenden Verkehrsbehinderungen und erforderlichen Fahrspursperrungen wird bei jeder dieser Untersuchungen die vorhandene Abdichtung lokal zerstört und bei Erneuerung der Abdichtung eine potenzielle Schwachstelle geschaffen, die ihrerseits eine vertiefte Überwachung erfordert. Soll im vorliegenden Anwendungsfall auf ein Monitoring verzichtet werden, muss dementsprechend ein sehr viel schlechterer Informationsgrad über den aktuellen Bauwerkszustand akzeptiert werden.

Szenario 2 – reaktiver Bauwerkserhalt

Wird auf das Feuchtemonitoring verzichtet, besteht innerhalb der planmässigen Nutzungsdauer von 50 Jahren eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass eine erneute Betoninstandsetzung an der Brückentafel erforderlich wird

Die Gesamtfläche der Brückentafel beträgt rund 7.500 m². Da im Hochpunktbereich nur eine geringe Gefahr von Unterläufigkeiten besteht, wird angenommen, dass von möglichen Unterläufigkeiten bis zu 40% der Brückenfläche betroffen sein können, also $A_{\text{Inst}} = \text{rund } 3.000 \text{ m}^2$. Die Eintretenswahrscheinlichkeit für diese Schadensszenario innerhalb der geplanten, weiteren Nutzungsdauer von 50 Jahren wird zu rund $p_{\text{Inst}} =$

40% angenommen. Die Detektionswahrscheinlichkeit wird bei dem gewählten Monitoringsystem und der Sensoranordnung zu $p_D = 75\%$ abgeschätzt. Die Kosten für den Betonabtrag, das Reprofilieren und Erneuern des Brückenbelags – ohne Berücksichtigung von Verkehrsbeeinträchtigungen, ggf. erforderlicher Umleitungen etc. – werden zu rund 750,- €/m² abgeschätzt. Damit ergibt sich der wirtschaftliche Nutzen N der Monitoringmassnahme für dieses Schadensszenario zu:

$$N = A_{inst} \times K_{inst} \times p_{inst} \times p_d$$

$$= 3.000 \text{ m}^2 \times 750 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} \times 0,4 \times 0,75 = 675.000 \text{ €}$$

Die Wirtschaftlichkeit der Monitoringmassnahme als Quotient aus wirtschaftlichem Nutzen N und Monitoringkosten über die Nutzungsdauer beträgt in diesem Fall rund 675.600,- €/65.000,- € = 10,4.

Szenario 3 - Wirtschaftlichkeit

Kosten Bauwerksmonitoring [K]			65.000,- €
Sensorinstallation	7.500,- €		7.500,- €
Sensorauslesung + -bewertung	1.150,- €/a	50a	57.500,- €
Kosten Betoninstandsetzung [N]			675.000,- €
Kosten Betonabtrag + Reprofilieren, Abdichtung	750,- €/m ²	7.500 m ²	5.625.000,- €
betroffener Flächenanteil	40%		
Eintretenswahrscheinlichkeit p_{inst}	40%		
Detektionswahrscheinlichkeit	75%		
Wirtschaftlichkeit [N/K]			10,4

Tabelle 22: Kostenvergleich Monitoring und reaktiver Bauwerkserhalt

10.4 Praxisbeispiel Brückenbauwerk – Dichtigkeit der Brückenplatte nach der Instandsetzung

Im Rahmen des Erhaltungsprojekts Küssnacht-Brunnen wurde auf der Zwillingsbrücke «Bolli» UHFB als Verstärkung der Fahrbahnplatten und als Abdichtung eingebaut, d.h. ohne zusätzliche PBD-Abdichtung. Das ASTRA entschied sich, zur langfristigen Überwachung der Dichtigkeit der UHFB-Schicht ein Monitoring zu installieren. Geplant war ein System, um ein eventuell fortschreitendes Eindringen von Feuchtigkeit in den bestehenden Beton zu verfolgen.

Gewählt wurden zwei Typen von Betonfeuchtigkeitssensoren, die Multiring Elektrode MRE der Sensortec GmbH und der leiterförmige Sensortyp CS-402 der TFB Diagnostic Systems AG. Mit der Multiring Elektrode lässt sich der elektrische Betonwiderstand als Mass für den Wassergehalt im Beton zwischen jeweils zwei Edelstahlringen (Werkstoff-Nr. 1.4571) messen. Mit dem CS-402 Sensor (nachfolgend kurz CS genannt) lässt

sich der Elektrolytwiderstand zwischen zwei benachbarten Einzelstäben (Werkstoff-Nr. 1.4301) messen. In die Multiringelektrode ist ein Temperatursensor (Pt1000), in den CS sind zwei Temperatursensoren (Pt100) integriert. Der Betonwiderstand wird mit Wechselstrom bei einer Messfrequenz von 1 kHz gemessen. Die Sensoren wurden mit dem Mörtel MASTER PROTECT 815CP von BASF eingebettet. Der Mörtel hat einen dem Altbeton vergleichbaren elektrischen Widerstand.

Abbildung 44 zeigt die Lage der Sensoren in Bezug auf die Fugenausbildung (Längsfuge, Querfuge, Rand/Feldbereich). Die Sensorkabel wurden durch die Fahrbahnplatte an die Brückenunterseite geführt und an vier Datenlogger DS-Log4.0 der TFB Diagnostic Systems AG angeschlossen. Die Logger befinden sich an den äusseren Längsträgern, damit sie von einem Brückenuntersichtsgerät aus zugänglich sind.

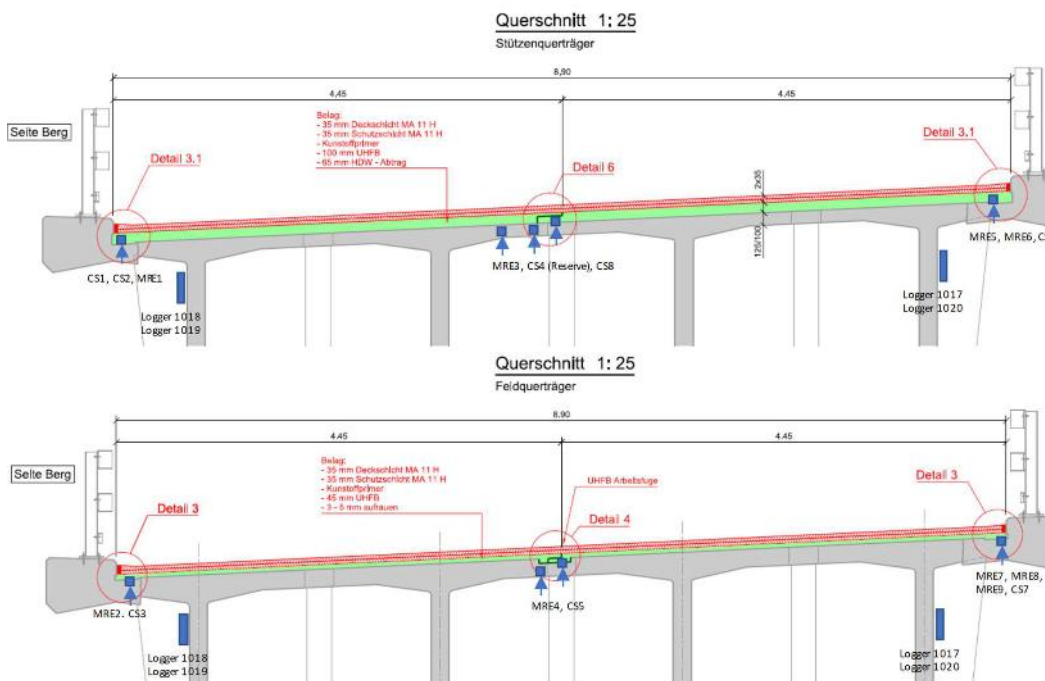


Abbildung 44: Lage der Sensoren im Querschnitt der Bolli Viadukte

Abbildung 45 (a) bis (d) zeigt MRE- und CS-Sensoren vor und nach dem Einbau in den Altbeton. Die Sensoren wurden so verlegt, dass der Sensor bündig mit der Oberkante des noch vorhandenen Altbeton (a, b) oder dem vormals vorhandenen Altbeton (c, d) abschliesst.

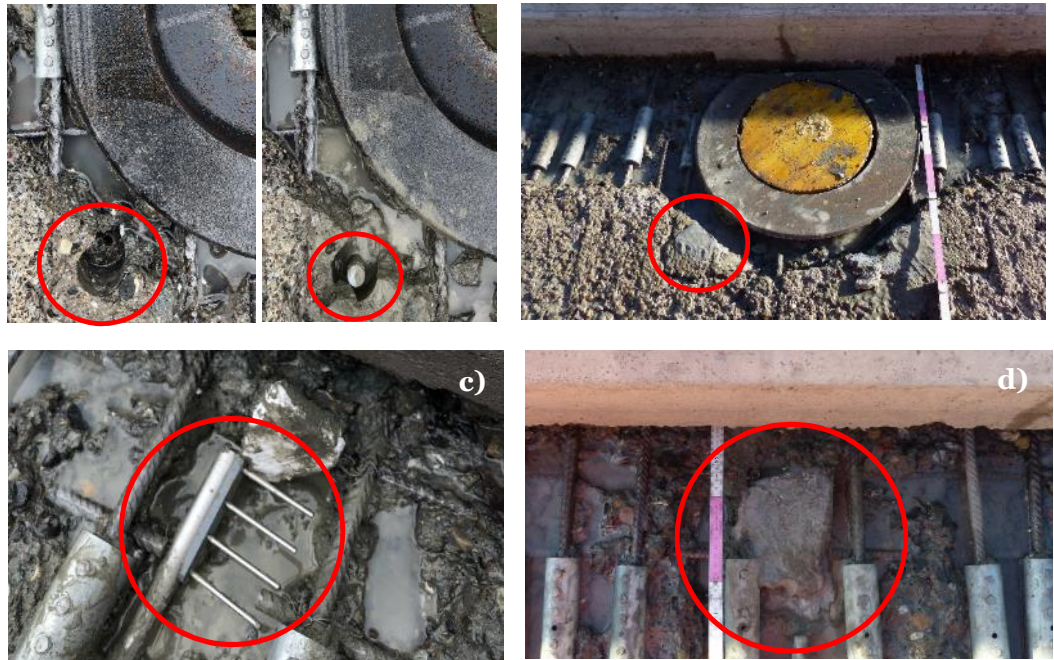


Abbildung 45: (a) MRE Sensor (b) MRE Sensor im Mörtel eingebettet, (c) CS-402 Sensor (d) CS-402 im Mörtel eingebettet

Die gemessenen elektrischen Betonwiderstände können unter Berücksichtigung der Zellkonstante (Geometriefaktor) in spezifische Widerstände umgerechnet werden. Die experimentell bestimmten Zellkonstanten liegen im Bereich von 0,08 bis 0,1 m. Da bei dieser Untersuchung nicht die Absolutwerte, sondern die zeitlichen Veränderungen der Betonwiderstände von Interesse sind, wurde auf eine Umrechnung verzichtet.

Datenübertragung

Die Wechselstromwiderstände und Temperaturen, die im Datenloggersystem DS-Log4.0 gespeichert sind, werden nach jedem Messdurchlauf über einen automatisierten, drahtlosen Datentransfer via LoRa-Funksignal in die IoT-Cloud übertragen (Prinzip IoT Internet of things). Die Visualisierung der Daten erfolgt über ein Web-Portal (powered by decentlab). In der Analyse enthalten ist auch ein Alarmwert, der derzeit anspringt, wenn der Elektrolytwiderstand 200Ω unterschreitet.

Beispiele von Messergebnissen

Abbildung 46 zeigt beispielhaft den Verlauf der Luft- und Betontemperatur von April 2019 bis Februar 2021. Generell ist erkennbar, dass die Temperaturschwankungen im Beton unterhalb des UHFB deutlich ausgeprägter sind als an der Brückenunterseite, was mit der direkten Sonneneinstrahlung auf die Fahrbahn mit Erwärmung und Abkühlung des Asphaltbelags erklärt wird. Es ist deutlich, dass die Temperaturdifferenz bis zu 8°C betragen kann. In der kalten Jahreszeit sind die Unterschiede hingegen gering. Das beschriebene Temperaturverhalten gilt auch für die anderen Messstellen des Monitoringsystems.

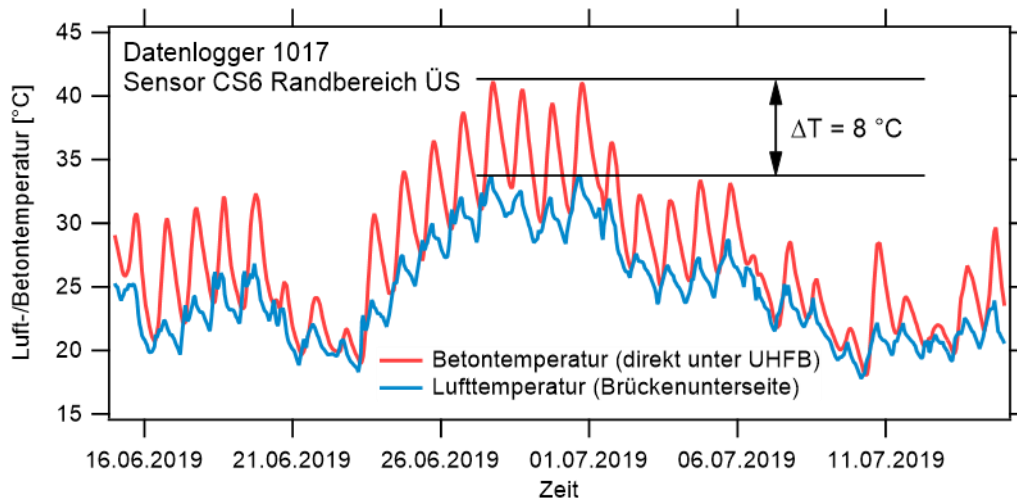


Abbildung 46: Verlauf der Luft- und Betontemperatur

In der folgenden Grafik (Abbildung 47) sind für zwei verschiedene Messstellen (Rand- und Mittelfuge) und ein Sensortyp (Widerstandsleiter) über mehrere Jahre die temperaturkompensierten Betonwiderstände und die zugehörige Betontemperatur dargestellt. Die anfänglich kurzen sehr Messintervalle wurden nach rund zwei Jahren vergrößert, um die Datenmenge zu reduzieren. Generell gelingt es mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung recht gut, den markanten Einfluss der Temperatur (insbesondere Tagesschwankungen) zu kompensieren. Ein gewisse Restwelligkeit der Kurven hängt mit der Wahl des b-Wertes (abhängig von der Betonfeuchtigkeit) zusammen. Gewisse Optimierungen wären noch möglich, sind jedoch mit einem größeren Aufwand verbunden.

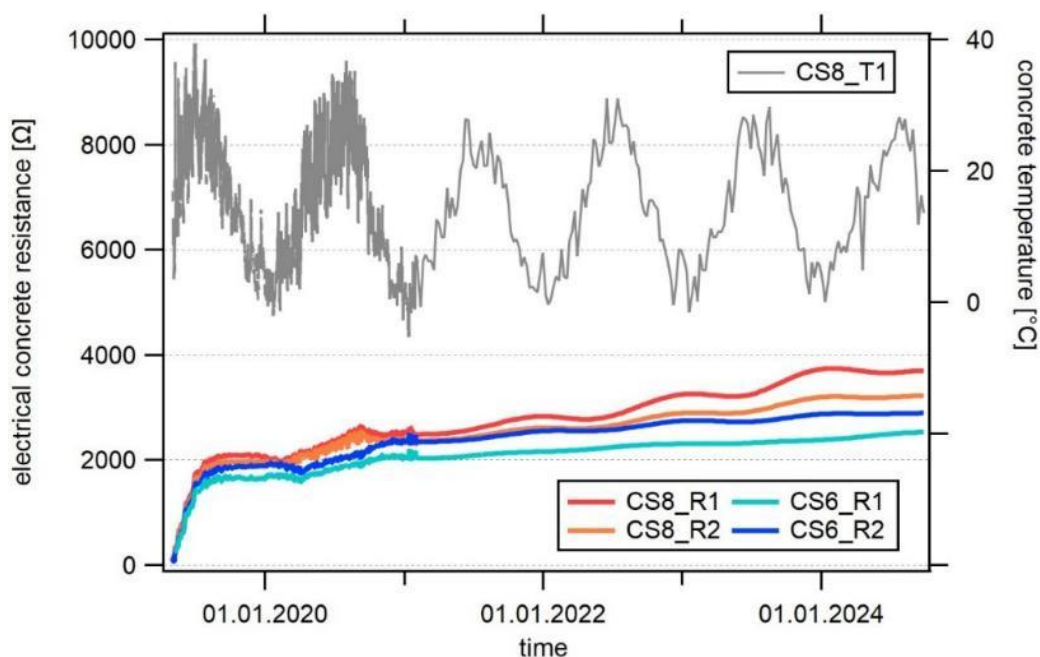


Abbildung 47: Verlauf der Betontemperatur und der elektrischen Betonwiderstände für die Widerstandsleitern CS6 (Positionierung bei Randfuge ÜS / Stützenbereich und CS8 (Positionierung bei Mittelfuge ÜS / Stützenbereich)

Nach der Installation der Sensoren und der Instandsetzung der Brückenplatte erfolgte kurzzeitig ein starker Anstieg der elektrischen Betonwiderstände, der auf Hydratation und Austrocknung des Betons zurückzuführen ist. Ab 2020 bis heute steigen die Widerstände nach wie vor leicht an, was auf die langsame Austrocknung des Betons hinweist. Da die Austrocknung nach oben stark behindert ist (UHFB, Abdichtung, Belag), erfolgt diese primär über die offene Unterseite der Brücke. Wegen der vorhandenen Plattendicke verläuft dieser Prozess jedoch so langsam, so dass die Ausgleichsfeuchte noch nicht erreicht ist.

Zu keinem Zeitpunkt ist es zu markanten Absenkungen des Betonwiderstandes gekommen, was darauf schliessen lässt, dass die UHFB-Schicht an den überwachten Stellen dicht ist und keine Wasserinfiltrationen zulässt. Diese gilt auch für die Sensoren, die nicht in den nachfolgenden Grafiken erfasst sind.

10.1 Praxisbeispiel AAR-geschädigte Stützmauer – Einfluss von Instandsetzungsmassnahmen auf die AAR-Entwicklung

In der Planungsphase des ASTRA-Instandsetzungs-Projektes «Amsteg Göschenen» der Gotthard-Autobahn A2 kamen bei der AAR-geschädigten Stützmauer «Wassen» Zweifel auf, welche Instandsetzungsmethode sich am besten eignet, den AAR-Schädigungsprozess zu verlangsamen. Da diese Stützmauer ein charakteristisches Beispiel ist für zahlreiche AAR-geschädigte Stützbauwerke in den schweizer Alpen, entschied sich das ASTRA, 4 Mauersegmente mit verschiedenen Methoden testweise instandzusetzen und über einen Zeitraum von rund 10 Jahren zu überwachen. Das Ziel ist, unter Realbedingungen den Einfluss einer Auswahl an Instandsetzungsmassnahmen auf die AAR-Entwicklung zu untersuchen um daraus Empfehlungen für die zahlreichen, anstehenden Instandsetzungsprojekte abzuleiten.

Folgende Instandsetzungsmethoden wurden auf der talseitigen Maueroberfläche angewendet (Abbildung 48):

- a. Oberflächenhydrophobierung
- b. 40mm dicke Mörtelschicht, massenhydrophobiert
- c. 80mm dicke Spritzbetonschicht mit Polymerfasern
- d. Vorbetonieren einer 80mm dicken SVB-Schicht

Bergeseitig wurde nichts gemacht.

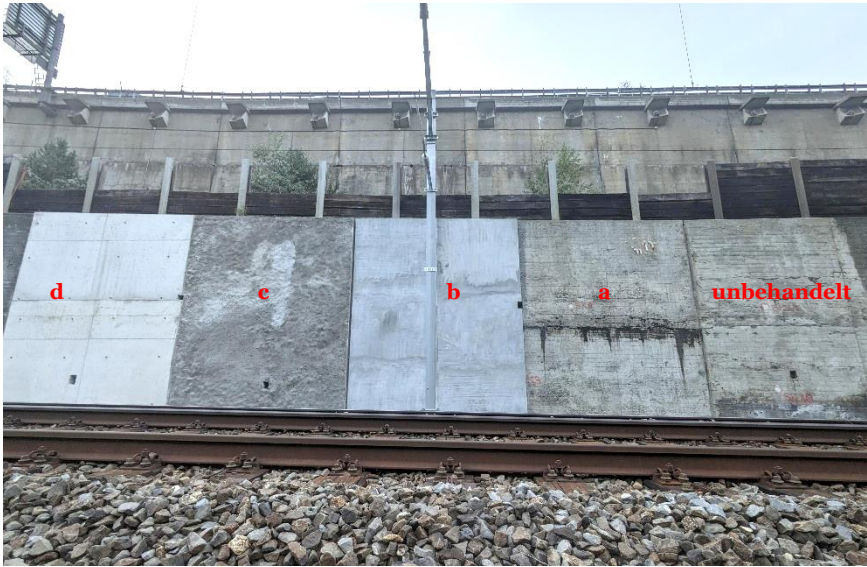


Abbildung 48: Test- und Referenzflächen an der Stützmauer Wassen

Die instandgesetzten Etappen und eine unbehandelte Referenzetappe wurden im Anschluss an die Bauarbeiten mit einem Monitoringsystem zur Messung der AAR-Dehnung und des Feuchtehaushalts des Betons ausgerüstet. Das System umfasst folgende Sensorik (Anzahl pro Etappe):

- 1 vertikaler, im Kernbeton verankerter Extensometer, zur Messung der vertikalen Dehnung der Mauer
- 2 horizontale Bohrloch-Extensometer (oben und unten) zur Messung der horizontalen Dehnung (quer zur Mauerebene)
- 2 tiefe aufgelöste, extralange Feuchtigkeits- und Temperatursensoren des Typs CS-302 (oben und unten, mit 3 Tiefenstufen pro Sensor) zur Messung des Feuchteprofils durch den Mauerquerschnitt.

Die Extensometer basieren auf LVDT-Wegaufnehmern mit einem Verlängerungsgestänge. Ihre Längen wurden so gewählt, dass sie eine möglichst grosse Messdistanz abdecken (vertikal: 430 cm, horizontal/quer: 45 bis 59 cm).

Die Feuchtigkeitssensoren gehen ebenfalls durch den gesamten Mauerquerschnitt. Die Lage der Sensoren ist in Abbildung 49 illustriert. Jede Etappe wurde auf die gleiche Art mit Sensorik ausgerüstet. Für die Datenerfassung werden 5 DS-Log4.0-Datenlogger verwendet. Die Sensoren werden im Stundentakt gemessen und die Daten per Swisscom LPN (LoRaWAN Netz) an einen cloudbasierten Datenserver zur weiteren Bearbeitung und Visualisierung gesendet.

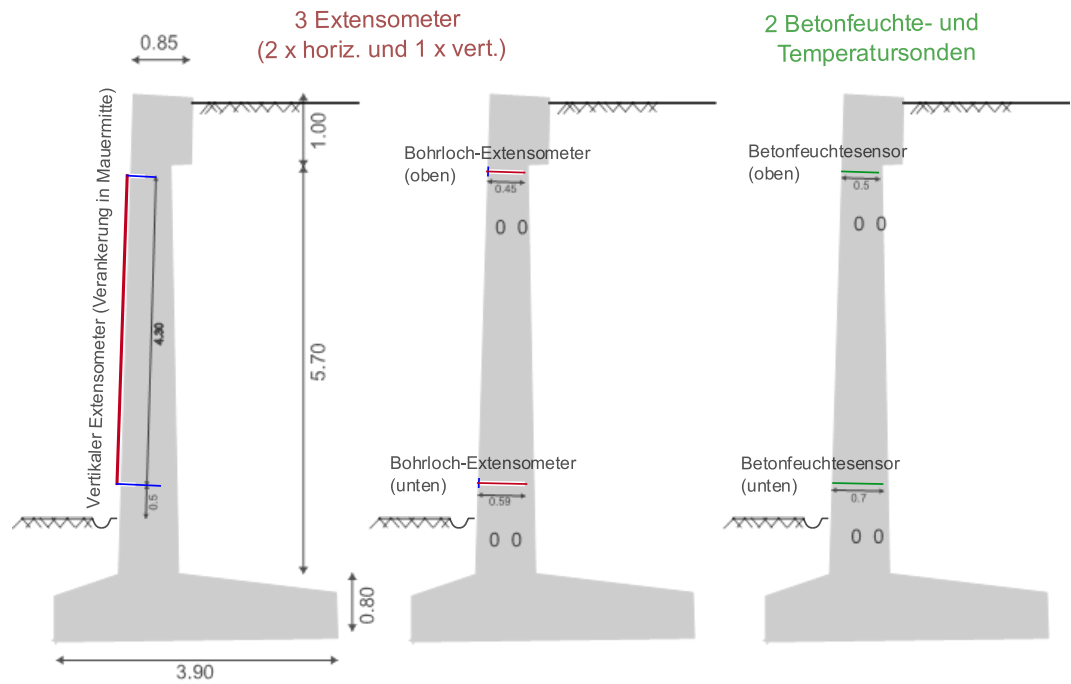


Abbildung 49: Instrumentierung der Stützmauer (Längenmasse in m)



Abbildung 50: Fertiggestellte Instrumentierung

Nach einer ersten, 2-jährigen Messperiode zeigen die Extensometerdaten nebst der thermischen Verformung der Mauer bereits recht deutlich das fortschreitende, AAR-bedingte Quellen des Betons an. Abbildung 51 zeigt die gemessene Gesamtdehnung

und Abbildung 52 die Restdehnung des Betons gemessen an 3 Messstellen, nach empirischer Subtraktion des thermischen Anteils. Die thermisch bereinigten Dehnungswerte zeigen deutlich unterschiedliche Quellraten des Betons, je nach Messstelle. Die Elektrolytwiderstandsdaten haben ebenfalls eine leicht ansteigende Tendenz, was auf ein langsames Austrocknen des Betons hinweist (Abbildung 53).

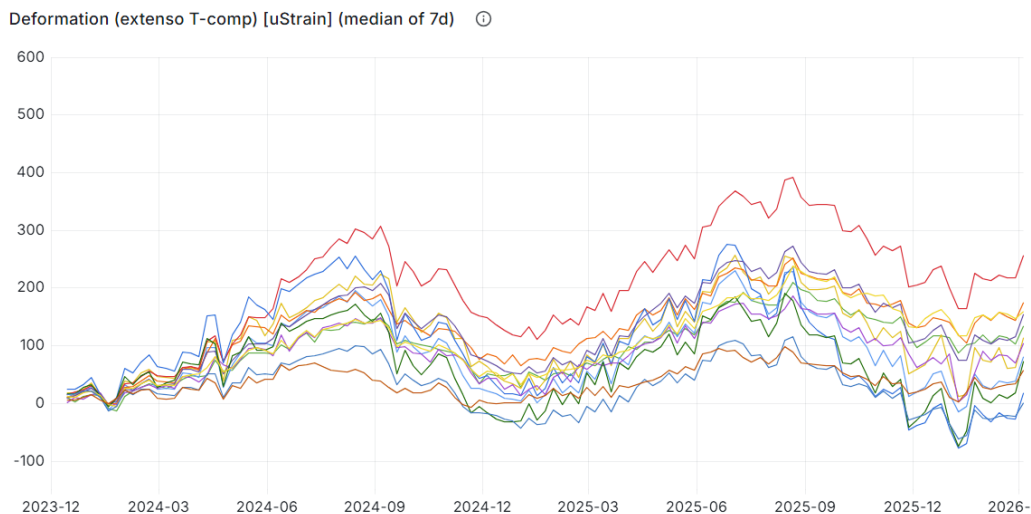


Abbildung 51: Entwicklung der Betondehnung (gesamt)

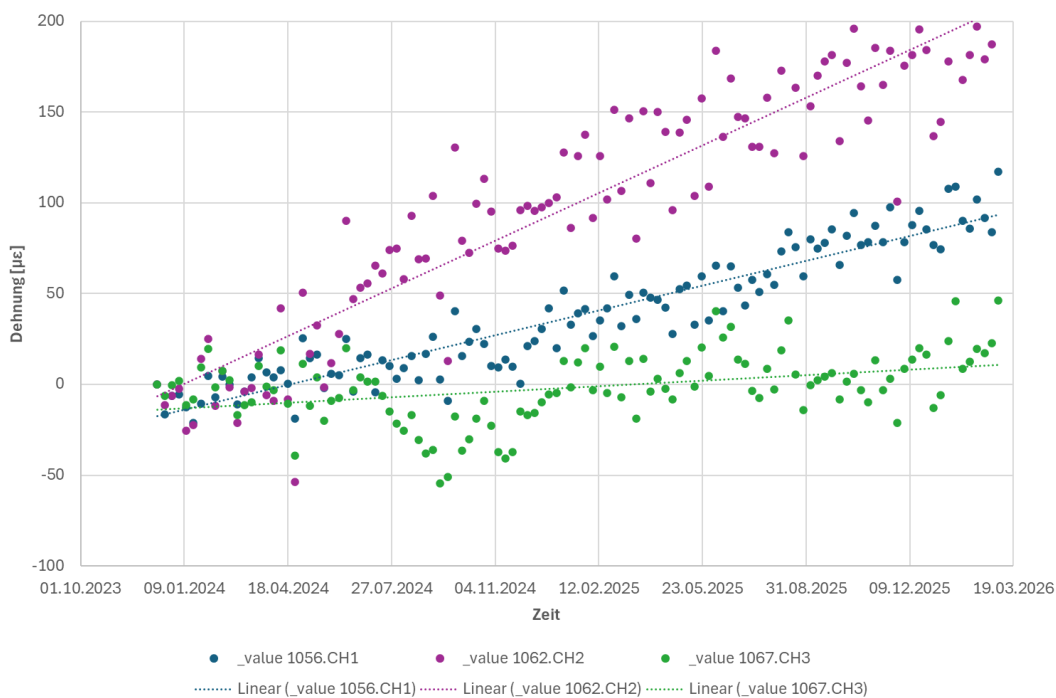


Abbildung 52: Entwicklung der Betondehnung an 3 Messstellen (thermischer Anteil kompensiert)

Resist. T-comp. [Ω] (median of 7d)

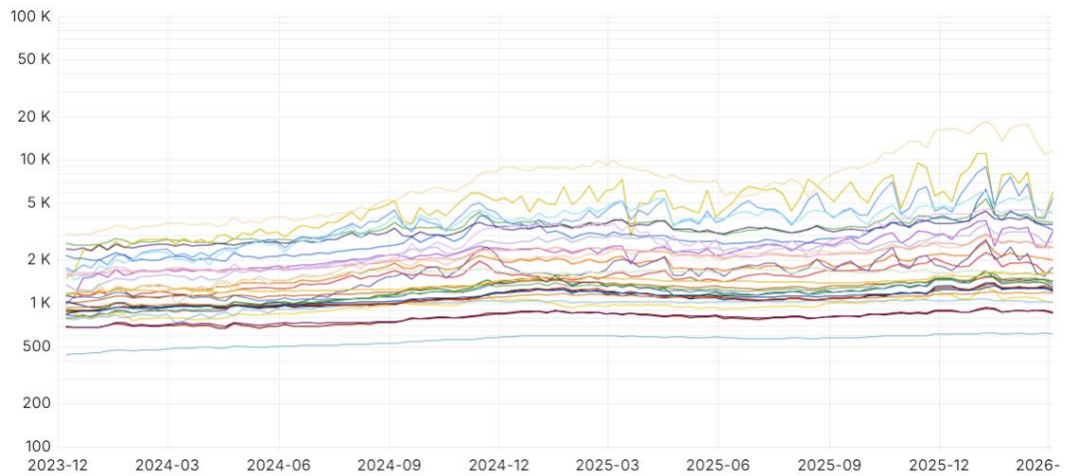


Abbildung 53: Entwicklung des Elektrolytwiderstands (Betonfeuchtigkeit)

Obwohl eine detaillierte Analyse noch aussteht, zeigen die bisherigen Messdaten des Monitoringbeispiels Stützmauer Wassen bereits gut das Potenzial einer kontinuierlichen, messtechnischen Überwachung von sich langsam aber stetig entwickelnden Schädigungsprozessen wie z.B. AAR auf. Die zeitliche Datenkontinuität ermöglicht es, thermische Einflüsse aus den Daten herauszufiltern und die zeitliche Entwicklung sowie die Änderungsrate der gesuchten Messgrösse zu bestimmen (Beschleunigung, Verlangsamung, Umkehr). Diese Informationen sind besonders bei Prognosen der zukünftigen Schadensentwicklung von grossem Wert.

11 Weiteres Vorgehen

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit empfiehlt die Forschungsstelle die in der vorliegenden Arbeit erstellten Konzepte und Anwendungsempfehlungen an Pilotprojekten in der Praxis umzusetzen. Dies würde helfen, das Kosten-/Nutzen-Verhältnis von Monitoring über einen längeren Zeitraum zu prüfen und mit der bestehenden Erhaltungs-Praxis zu vergleichen.

Ein mehrjähriges Pilotprojekt würde zudem die möglichen technischen Schwachstellen von Sensorsystemen und der entsprechenden Datenerfassungs- und Übertragungselektronik bei Langzeitbetrieb unter Realbedingungen offenlegen. Damit hätten die Anbieter speziell von innovativen neuen Lösungen die Gelegenheit, ihre Systeme technisch ausreifen zu lassen damit sie im Langzeitbetrieb möglichst zuverlässig und unterhaltsarm funktionieren.

Ausserdem sollte in Betracht gezogen werden, dass Projekt NTech mit einem Teil «Monitoring der Dauerhaftigkeit» zu ergänzen.

Literaturverzeichnis

- [1] U. Yilmaz und U. Angst, «Korrosionsbedingte Kosten an Ingenieurbauwerken im Schweizer Strassennetz,» *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 115, Nr. 6, pp. 448-458, 2020.
- [2] S. Taheri, «A review on five key sensors for monitoring of concrete structures,» *Construction and Building Materials*, Bd. 204, pp. 492-509, 2019.
- [3] *Merkblatt B12 "Korrosionsmonitoring bei Stahl- und Spannbetonbauwerken"*, Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreies Prüfen DGZfP, 2018.
- [4] Y. Schiegg und H. Böhni, «Online-Monitoring der Korrosion an Stahlbetonbauwerken,» *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 95, Nr. 2, pp. 92-103, 2000.
- [5] Y. Schiegg et al., «Massnahmen zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit Fortsetzung des Feldversuchs Naxbergtunnel,» VSS Bericht Nr. 683, 2017.
- [6] Y. Seguí Femenias, U. Angst, F. Caruso und B. Elsener, «Ag/AgCl ion-selective electrodes in neutral and alkaline environments containing interfering ions,» *Materials and Structures*; DOI 10.1617/s11527-015-0673-8, 2015.
- [7] f. B. N. 34, «Model Code for Service Life Design,» ISBN 978-2-88394-074-1, Lausanne, 2006.
- [8] F. Wedel, S. Pitters, F. Hille, R. Herrmann, R. Schneider, I. Hindersmann und L. Puttkamer, «Arbeitshilfe zum Einsatz von Monitoring - Zusammenstellung der Ergebnisse des Projekts „Leitfaden – strategischer Einsatz von Monitoring bei Ingenieurbauwerken“,» BAST, Bergisch Gladbach, 2025.
- [9] B. Novák, F. Stein, A. Farouk, L. Thomas, J. Reinhard, T. Zeller und G. Koster, «Erfahrungssammlung Monitoring für Brückenbauwerke - Dokumentation 2021,» BAST, Bergisch Gladbach, 2024.
- [10] F. Wedel, S. Pitters, F. Hille, R. Herrmann und R. Schneider, «Leitfaden – Strategischer Einsatz von Monitoring für Ingenieurbauwerke, BAST-Bericht B 210,» BAST, Bergisch Gladbach, 2025.
- [11] E. Kempkens, «Messtechnische Bauwerksdiagnostik – Intelligente Brücke – Digitaler Zwilling,» BAST, Bergisch Gladbach, 2023.
- [12] M. Schnellenbach-Held, B. Karczewski und O. Kühn, «Intelligente Brücke - Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke,» BAST, Bergisch Gladbach, 2014.
- [13] E. Kempkens, «Qualitätssicherungskonzept Intelligente Brücke – Betriebssicherheit des ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Bauwerksmonitorings,» BAST, Bergisch Gladbach, 2022.
- [14] G. (. Shen, L. (. Gelman, B. (. Hu und J. (. Zhang, *Advances in Condition Monitoring and Structural Health Monitoring*, Vol. 1, 3 and 4, Select Proceedings of WCCM 2024: Springer ENSpringer, Singapur, 2026.

- [15] F. Hunkeler, P. Kronenberg und U. Püschner, «Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken,» VSS Bericht Nr. 651, 2013.
- [16] H. Martin-Sanz et al., «Monitoring of Chillon viaduct after Strengthening with UHPFRC,» in *9th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS)*, Melbourne Australia, 2018.
- [17] N. Buenfeld et al., «Intelligent monitoring of concrete structures,» CIRIA C661, 2008.
- [18] J. Bien et al., «Strategies and tools for the monitoring of concrete bridges,» *Structural Concrete*, Bd. 21, Nr. 4, 2020.
- [19] A. Abdelgawad, «Internet of things (IoT) platform for structural health monitoring,» in *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017.
- [20] W. Taffese et al., «Internet of Things based Durability Monitoring Assessment of Reinforced Concrete Structures,» in *FIT Workshop*, 2019.
- [21] S. Kessler et al., «General aspects on the assessment of reliability of corrosion monitoring systems,» in *SMAR Conference*, Potsdam, 2019.
- [22] S. Amad, «Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - a review,» *Cement and Concrete Composites*, Bd. 25, Nr. 4-5, pp. 459-471, 2003.
- [23] I. e. a. Laory et al., «Combined Model-Free Data-Interpretation Methodologies for Damage Detection during Continuous Monitoring of Structures,» *J. Comput. Civ. Eng.*, Bd. 27, Nr. 6, 2013.
- [24] Bundesamt für Strassen (ASTRA), «Technologien zur Überwachung der Infrastruktur, Teilberichte Kunstbauten, Tunnel, Trasse und Synthesebericht,» Bern, 2025.
- [25] T. C. Powers, «Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete,» *ACI Proc.*, Bd. 41, pp. 245-272, 1945.
- [26] J. Kaufmann, «Experimental identification of damage mechanisms in cementitious porous materials on phase transition of pore solution under frost deicing salt attack,» Empa Berichte Vol. 248, Empa Dübendorf, 2000.
- [27] M. Setzer, «Micro-ice-lens formation in porous solid,» *J. Coll. Interface Sci.*, Bd. 243, pp. 193-201, 2001.
- [28] *Wegleitung SIA 4018: Planung, Durchführung und Interpretation der Potenzialmessung an Stahlbetonbauten*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, 2023.
- [29] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli und R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2003.
- [30] U. V. Ø. Angst, «Detecting critical chloride content in concrete using embedded ion selective electrodes - effect of liquid junction and membrane potentials,» *Materials and Corrosion*, Bd. 60, pp. 638-643, 2009.
- [31] *EN 12390-19 Prüfung von Festbeton - Teil 19: Bestimmung des elektrischen Widerstands*, 2023.

- [32] R. Medeiros-Junior und M. G. Lima, «Electrical resistivity of unsaturated concrete using different types of cement,» *Construction and Building Materials*, Bd. 107, pp. 11-16, 2016.
- [33] H. Ungricht, Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung, ETH Zürich: Diss. ETH Nr. 15758, 2004.
- [34] H. Layssi, P. Ghods, A. R. Alizadeh und M. Salehi, «Electrical Resistivity of Concrete,» *ACI Concrete International*, Bd. 37, Nr. 5, pp. 41-46, 2015.
- [35] D. Büchler, Der elektrische Widerstand von zementösen Werkstoffen, Zürich: Diss. ETH Nr. 11876, 1996.
- [36] F. Hunkeler, «Elektrischer Widerstand von Mörteln und Beton,» *SI+A*, pp. 767-772, 1993.
- [37] H. Zhang, J. Li und F. Kang, «Real-time monitoring of humidity inside concrete structures utilizing embedded smart aggregates,» *Construction and Building Materials*, Bd. 331:127317, 2022.
- [38] Y. Liu und F. J. Presuel-Moreno, «Normalization of Temperature Effect on Concrete Resistivity by Method Using Arrhenius Law,» *ACI Materials Journal*, Nr. August, pp. 433-442, 2014.
- [39] R. Polder, «Test methods for on site measurement of resistivity of concrete - a RILEM TC-154 technical recommendation,» *Construction and Building Materials*, Bd. 15, pp. 125-131, 2001.
- [40] W. McCarter, T. Chrisp, G. Starrs und J. Blewett, «Characterisation and monitoring of cement-based systems using intrinsic electrical property measurements,» *Cement and Concrete Research*, Bd. 33, pp. 197-206, 2003.
- [41] R. Polder und M. Ketelaars, «Electrical resistance of blast furnace slag cement and ordinary portland cement concretes,» in *Blended cements in construction*, London, Ed. R.N. Swamy, Elsevier Applied Science, 1991, pp. 401-415.
- [42] W. Elkey und E. J. Sellevold, «Electrical Resistivity of Concrete,» Norwegian Public Road Administration, 1995.
- [43] Y. A. Villagrán Zaccardi, J. F. García, P. Huélamo und Á. A. Di Maio, «Influence of Temperature and Humidity on Portland Cement Mortar Resistivity Monitored with Inner Sensors,» *Materials and Corrosion*, Bd. 60, pp. 294-299, 2009.
- [44] Y. Schiegg, Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten, Zürich: Diss. ETH Nr. 14583, 2002.
- [45] Y. Schiegg und P. Kronenberg, «U 213604 EP Küssnacht - Brunnen, Monitoring UHFB,» TFB AG, Wildegg, 2021.
- [46] D. Tomlinson, F. Moradi, H. Hajiloo, P. Ghods und A. Alizadeh, «Early age electrical resistivity behaviour of various concrete mixtures subject to low temperature cycling,» *Cement and Concrete Composites*, Bd. 83, pp. 323-334, 2017.
- [47] Y. Seguí Femenias, U. Angst, F. Caruso und B. Elsener, "Ag/AgCl ion-selective electrodes in neutral and alkaline environments containing interfering ions," *Materials and Structures*, vol. 49, pp. 2637-2650, 2015.

- [48] Y. Femenias Segui, U. Angst and B. Elsener, "Monitoring chloride concentrations in concrete by means of Ag/AgCl ion-selective electrodes," in *ICCRRR - International Conference on Concrete repair, Rehabilitation and Retrofitting*, Potsdam, 2015.
- [49] Y. Femenias Segui, U. Angst and B. Elsener, "Monitoring pH in corrosion engineering by means of thermally-produced iridium oxide electrodes," *Materials and Corrosion*, pp. 1-13, 1 2017.
- [50] Y. S. Femenias, U. Angst und B. Elsener, «pH-monitoring in mortar with thermally-oxidized iridium electrodes,» *RILEM Technical Letters*, 2017.
- [51] C. Andrade und C. Alonso, «Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site,» *Construction and Building Materials*, Bd. 10, pp. 315-328, 1996.
- [52] U. Angst und M. Büchler, «On the applicability of the Stern-Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion,» *Materials and Corrosion*, Bd. 66, pp. 1017-1028, 2015.
- [53] T. F. Mayer, Zur Korrosion von Stahlschalungen in Betonfertigteilwerken, Berlin: Heft 580 der Schriftenreihe des deutschen Ausschusses für Stahlbeton , 2009.
- [54] R. Snieder, A. Grêt, H. Douma und J. Scales, «Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity,» *Science*, Bd. 295, pp. 2253-2255, 2002.
- [55] R. Snieder, «The theory of coda wave interferometry,» *Pure and Applied Geophysics*, Bd. 163, pp. 455-473, 2006.
- [56] T. Planès, E. Larose, L. Margerin, V. Rossetto und C. Sens-Schönfelder, «Decorrelation and phase-shift of coda waves induced by local changes: multiple scattering approach and numerical validation,» *Waves in Random and Complex Media*, Bd. 24, pp. 99-125, 2014.
- [57] T. Planès, E. Larose, V. Rossetto und L. Margerin, «Locadiff: Locating a weak change with diffuse ultrasound,» in *AIP Conference Proceedings*, 2013.
- [58] C. U. Grosse, M. Ohtsu, D. G. Aggelis und T. Shiotani, *Acoustic Emission Testing*, Springer Verlag, 2022.
- [59] M. Ohtsu, *Acoustic Emission and Related Non-Destructive Evaluation Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete*, Woodhead Publishing, 2021.
- [60] S. Fricker, «Schallemissionsanalyse zur Erfassung von Spanndrahtbrüchen bei Stahlbetonbrücken,» Dissertation, ETH Zürich, 2009.
- [61] L. Fan und X. Shi, «Techniques of corrosion monitoring of steel rebar in reinforced concrete structures: A review,» *Structural Health Monitoring*, Bd. 21, Nr. 4, pp. 1879-1905, 2021.
- [62] Y. Seguí Femenias, U. Angst, F. Moro und B. Elsener, «Development of a Novel Methodology to Assess the Corrosion Threshold in Concrete Based on Simultaneous Monitoring of pH and Free Chloride Concentration,» *Sensors*, 18, 3101; doi:10.3390/s18093101, 2018.
- [63] Y. Seguí Femenias, U. Angst und B. Elsener, *pH-monitoring in mortar with thermally-oxidized iridium electrodes*, *RILEM Technical Letters* 2: 59-66, 2017.

- [64] B. Elsener, L. Zimmermann und H. Böhni, «Non destructive determination of the free chloride content in cement based materials,» *Materials and Corrosion*, Bd. 54, pp. 440-446, 2003.
- [65] Y. Tian, D. Lei, P. Wang, J. Bao, Y. Wang und T. Zhao, «Research Progress on the Stability and Durability of Ag/AgCl Prepared by Anodic Chlorination Method for Chloride Ion Sensors in Cement-Based Materials,» *Buildings*, Bde. 1 von 215(13), 2290; <https://doi.org/10.3390/buildings15132290>, Nr. 13, 2025.
- [66] G. Samson, F. Deby, J.-L. Garciaz und J.-L. Perrin, «Monitoring DIAMOND device for corrosion state evaluation of reinforced concrete structures,» in *MATEC Web of Conferences 199, 04007, ICCRRR*, 2018.
- [67] T. Mayer, «Korrosionsmonitoring von Verkehrsbauwerken - Anwendungsbeispiele und Langzeiterfahrungen,» in *Kolloquium Parkbauten, Technische Akademie Esslingen*, Esslingen, 2026.
- [68] F. Laferrière, D. Inaudi und C. Smith, «A new system for early chloride detection in concrete,» *Smart Materials and Structures*, Bd. 17, Nr. 4, 2008.
- [69] E. Niederleithinger, N. Epple und D. Barroso, Ultraschallmonitoring mit Codawelleninterferometrie - Praktische Implementation, Integration und Demonstration, BAST, 2024.
- [70] DGzFP Prüfung, «Dauerüberwachung von Ingenieurbauwerken,» Fachausschuss ZfPBau, Unterausschuss DvB, Berlin, 2022.
- [71] Y. Schiegg und L. Steiner, «Cost effectiveness and application of online monitoring in reinforced concrete structures,» *Materials and Corrosion*, Bd. 61, Nr. 6, pp. 490-493, 2010.
- [72] R. Carmona, R. Jäggin, F. Länzlinger, M. Schwager und P. Seidenglanz, «Innovation im Betonschutz: Reduktion von Lebenszykluskosten und Emissionen durch innovative Monitoringmethoden,» Zertifikatsarbeit CAS Schutz und Instandsetzung, Fachhochschule Nordwestschweiz, 2024.
- [73] C. Sodeikat, «Feuchtesensoren in der Bauwerksüberwachung,» *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 105, Nr. 12, pp. 770-777, 12 2010.
- [74] P. Azarsa und R. Gupta, «Electrical Resistivity of Concrete for Durability Evaluation: A Review,» *Advances in Materials Science and Engineering*, Bd. 2017, pp. 1-30, 2017.
- [75] E. Every und A. Deyhim, «Embedded sensors for life-time monitoring of concrete,» in *4th international Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure*, Zürich, 2009.
- [76] J. Zhu, H. Sun, C. Malone, L. Ai, M. Bayat, P. Ziehl, T. Shin, Y. Zhang und E. Giannini, «Online monitoring system for concrete structures affected by alkali-silica-reaction,» NEUP Project 16-10214, Final report No. N2NU-16-NE-UNL-030207-21, 2021.
- [77] S. Tayfur, C. Yüksel, N. Alver, O. Akar und Ö. Andic-Cakir, «Evaluation of Alkali-Silica reaction damage in concrete by using acoustic emission signal features and damage rating index: damage monitoring on concrete prisms,» *Materials and Structures*, Bd. 54, Nr. 146, 2021.

- [78] V. Soltangharai, R. Anay, L. Ai, E. Giannini, J. Zhu und P. Ziehl, «Temporal Evaluation of ASR Cracking in Concrete Specimens Using Acoustic Emission,» *Journal of Materials in Civil Engineering*, Bd. 32, Nr. 10, 2021.
- [79] F. Weise, K. Volland, S. Pirskawetz und D. Meinel, «Innovative measurement techniques for characterising internal damage processes in concrete due to ASR,» in *14th ICAAR – International conference on alkali aggregate reaction*, Austin (Texas), 2012.
- [80] K. Silva, F. Nogueira Silva und T. Mahfoud, *On the Use of Embedded Fiber Optic Sensors for Measuring Early-Age Strains in Concrete*, Sensors 21(12), 2021.
- [81] G. Macioski, L. Sanchez, X. Bao und M. Medeiros, «Monitoring alkali-aggregate reaction (AAR) induced expansion through the use of fiber Bragg grating sensors,» in *16th International Conference on Alkali-Aggregate-Reaction in Concrete*, Lisboa Portugal, 2022.
- [82] C. Zoilo, H. Bernardes, F. Salles und S. Kuperman, «Monitoring of displacements due to AAR,» 2012.
- [83] «Multi-Sensor Data fusion System for enhanced analysis of deterioration in concrete structures,» in *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Suzhou China, 2011.
- [84] X. Liao, Q. Yan, L. Su, Y. Qiu, J. Ren und C. Zhang, «Automatic assessment of freeze-Thaw damage in concrete structures using piezo-electric-based active sensing approach and deep learning technique,» *Engineering Structures*, Bd. 302:117453, 2024.
- [85] A. Narayanan, A. Ali, B. Delsaute und C. a. A. Deraemaeker, «Automated and continuous monitoring of freeze-Thaw damage in concrete using em-bedded piezo-electric transducers,» in *In: Rizzo, P., Milazzo, A. (eds), European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2022.
- [86] D. Genc, J. Ashlock, B. Cetin, H. Ceylan und R. Horton, «Comprehensive in-situ freeze-thaw monitoring under a granular-surfaced road system,» *Transportation Geotechnics*, Bd. 34:100758, 2022.
- [87] L. Topolar, D. Kocab, L. Pazdera und T. Vymazal, «Analysis of Acoustic Emission Signals Recorded during Freeze-Thaw Cycling of Concrete,» *Materials*, Bd. 14:1230, 2021.
- [88] Y. Ding, Y. Huang, Z. Yulin und J. Aguiar, «Self-monitoring of freeze–thaw damage using triphasic electric conductive concrete,» *Construction and Building Materials*, Bd. 101, pp. 440-446, 2015.
- [89] J. Ranz, S. Aparicion, H. Romero, M. Casati, M. Molero und M. Gonzales, *Monitoring of Freeze-Thaw Cycles in Concrete Using Embedded Sensors and Ultra-sonic Imaging*, Sensors 14:2280-2304, 2014.

Datenverwendung

Die in diesem Bericht verwendeten Messdaten stammen von eigenen Monitoring-Projekten der Forschungsstelle. Die Messergebnisse wurden mit kommerziell erhältlichen Softwarelösungen bearbeitet.

Die Messdaten sind nicht öffentlich zugänglich, können aber bei Bedarf bei der Forschungsstelle schriftlich beantragt werden (z.B. für die Nutzung bei weiteren Forschungsarbeiten). Für den Zugang zu den Bauwerksakten muss das ASTRA oder der VSV kontaktiert werden.

Die Forschungsstelle bestätigt, dass bei allen Abbildungen und Grafiken, die nicht selbst erstellt wurden, die Quellen korrekt angegeben wurden.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 21.05.2026

Grunddaten

Projekt-Nr.: BGT_20_08A_02
Projekttitel: Monitoring der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken: Bedürfnisse der Praxis und Chancen neuer Entwicklungen
Enddatum: Mai 2026

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Der Bericht dokumentiert die Ausgangslage, die Bedürfnisse der Praxis zum Dauerhaftigkeitsmonitoring sowie den Stand der Technik des Dauerhaftigkeitsmonitorings für Stahlbetonbauwerke. Besonderes Augenmerk haben, um die Bedürfnisse der Praxis zu bedienen dabei die wesentlichen dauerhaftigkeitsrelevanten Schädigungsmechanismen Bewehrungskorrosion infolge Chlorideintrag oder Karbonatisierung, Alkali Aggregat Reaktion sowie Frost- und Frosttausalzangriff. Für diese Schädigungsmechanismen und deren strukturellen Konsequenzen werden die relevante Messgrößen und Verfahren wie Temperaturmessung, Potenzialmessung, elektrischer Betonwiderstand, Chlorid- und pH Messung, Elementstrommessung, lineare Polarisationswiderstandsmessung, Dehnungs- und Verformungsmessungen sowie Verfahren zur Erfassung mikrostruktureller Schädigungen dargestellt.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Bewertung kommerziell verfügbarer Sensorsysteme, Datenlogger, Datenübertragungstechnologien und IoT Lösungen. Diese werden hinsichtlich Praxistauglichkeit, Robustheit, Langzeitfähigkeit und Anwendbarkeit für Neu- und Bestandsbauten beurteilt. Damit schafft der Bericht eine strukturierte Grundlage für die Auswahl geeigneter Monitoringlösungen in Abhängigkeit von Bauwerkstyp, Bauteil, Exposition, Schädigungsmechanismus und Zielsetzung.

Zentrales Ergebnis ist ein praxisorientierter modularer Werkzeugkoffer für die Planung von Monitoringmassnahmen. Für Neubauten wird ein präventiver Ansatz beschrieben, bei dem Sensorik bereits während der Bauausführung integriert werden kann. Für Bestandsbauten wird eine Vorgehensweise aufgezeigt, die sich an vorhandenen Schädigungsbildern, Instandsetzungszielen und der technischen Nachrüstbarkeit orientiert.

Die Anwendung der entwickelten Systematik wird anhand von Praxisbeispielen aus Tunnelbau, Brückeninstandsetzung und AAR geschädigten Stützmauern erläutert. Der Bericht bildet damit eine fachliche Grundlage für künftige Pilotprojekte, für ASTRA interne Arbeitshilfen sowie für die Weiterentwicklung von Vorgaben zu Sensorik, Datenmanagement, IoT Anbindung und Qualitätssicherung.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Projektziele wurden erreicht. Bestehende und absehbare Monitoringtechnologien wurden systematisch gesichtet, beschrieben und hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit bewertet. Dabei wurden sowohl etablierte Verfahren wie Potenzialmessung, elektrischer Betonwiderstand, Elementstrommessung und Dehnungsmessung als auch neuere Entwicklungen wie faseroptische Sensoren, ionenselektive Elektroden und IoT-basierte Datenübertragung berücksichtigt.

Die Bedürfnisse der Praxis wurden im Rahmen eines Workshops mit Fachpersonen aus der Schweiz und Deutschland erhoben. Auf dieser Grundlage wurden geeignete Monitoringkonzepte für Neu- und Bestandsbauten vorgeschlagen. Zudem wurde ein Prozess für die Auswahl und Instrumentierung von Pilotprojekten erarbeitet. Damit stellt der Bericht eine belastbare Grundlage für künftige Pilotanwendungen und für die Weiterentwicklung von ASTRA-internen Vorgaben oder Arbeitshilfen dar.

Folgerungen und Empfehlungen:

Das Projekt zeigt, dass das Dauerhaftigkeitsmonitoring von Stahlbetonbauwerken inzwischen einen hohen technischen Reifegrad erreicht hat. Für Bewehrungskorrosion und AAR stehen marktreife Sensorsysteme, geeignete Datenlogger und IoT Lösungen zur Verfügung. Besonders der elektrische Betonwiderstand hat sich als zentrale Messgrösse etabliert, da er Aussagen zum Feuchtehaushalt erlaubt und damit für verschiedene Schädigungsmechanismen eine wichtige Leit- oder Hilfsgrösse darstellt.

Gleichzeitig bestehen weiterhin offene Fragen. Dazu gehören insbesondere die Langzeitstabilität dauerhaft eingebetteter Referenzelektroden und ionenselektiver Elektroden sowie die Praxistauglichkeit von Monitoringverfahren für Frost- und Frosttausalzangriff. Die Forschungsstelle empfiehlt deshalb, die entwickelten Konzepte in mehrjährigen Pilotprojekten unter realen Einsatzbedingungen zu validieren. Dadurch können technische Schwachstellen identifiziert, Kosten/Nutzen Verhältnisse belastbar bewertet und die Grundlagen für eine breitere Anwendung im Erhaltungsmanagement geschaffen werden.

Publikationen:

Forschungsbericht:

Monitoring der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken: Bedürfnisse der Praxis und Chancen neuer Entwicklungen, Forschungsprojekt BGT_20_08A_02 auf Antrag des ASTRA, April 2026.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Kronenberg

Vorname: Pascal

Amt, Firma, Institut: TFB Romandie AG

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Digitally signed by
Pascal Kronenberg
Location: Paldoux
Date: 2026.05.22
13:22:49+02'00'



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das Projekt wird als fachlich fundierte und praxisnahe Grundlage für die Weiterentwicklung des Dauerhaftigkeitsmonitorings im Bereich der Nationalstrassen beurteilt. Besonders positiv ist, dass der Bericht nicht nur eine technologische Übersicht liefert, sondern die Erkenntnisse in eine anwendungsorientierte Systematik überführt. Der entwickelte Werkzeugkoffer unterstützt Bauherren, Planende und Fachstellen bei der Auswahl geeigneter Monitoringkonzepte.

Die Ergebnisse sind für das ASTRA relevant, weil sie eine bessere Verknüpfung von Zustandsdaten, Dauerhaftigkeitsbewertung und Erhaltungsplanung ermöglichen. Damit kann Monitoring künftig gezielter eingesetzt werden, insbesondere dort, wo klassische Inspektionen oder periodische Einzelmessungen an Grenzen stossen.

Umsetzung:

Die Umsetzung sollte in einem nächsten Schritt über gezielte Pilotprojekte an realen Bauwerken erfolgen. Geeignet sind insbesondere Tunnel, Brücken, Galerien und Stützmauern mit erhöhtem Risiko für Bewehrungskorrosion, AAR oder Feuchteprobleme. Bei Neubauten kann Monitoring präventiv eingeplant und bereits während der Bauausführung integriert werden. Bei Bestandsbauten eignet es sich vor allem zur Überwachung bekannter Schädigungsprozesse oder zur Erfolgskontrolle nach Instandsetzungen.

Die Projektergebnisse können zudem in Ausschreibungen, Projektierungsgrundlagen und ASTRA interne Arbeitshilfen einfließen. Besonders wichtig sind dabei Anforderungen an Sensorwahl, Sensordichte, Datenlogger, Datenübertragung, Datenqualität, Langzeitbetrieb und Auswertung.

weitergehender Forschungsbedarf:

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere bei der Langzeitstabilität eingebetteter Referenzelektroden und ionenselektiver Elektroden, bei der Validierung von Frost/Frosttausalz Monitoringverfahren sowie bei der Bewertung grosser Monitoring Datenmengen mittels KI gestützter Methoden. Auch das Kosten/Nutzen Verhältnis sollte in mehrjährigen Pilotprojekten weiter quantifiziert werden.

Einfluss auf Normenwerk:

Mittelfristig können die Projektergebnisse als Grundlage für Richtlinien, Merkblätter oder ASTRA interne Arbeitshilfen zum Dauerhaftigkeitsmonitoring dienen, insbesondere bezüglich Sensorauswahl, Mindestanforderungen an Datenlogger, IoT Anbindung, Auswertung und Qualitätssicherung.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Angst

Vorname: Ueli

Am, Firma, Institut: IFB Institute for Building Materials, ETH Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: