



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA

DOKUMENTATION

TECHNOLOGIEN ZUR ÜBERWACHUNG DER INFRASTRUKTUR

TEILBERICHT KUNSTBAUTEN

*Ausgabe 2024 V1.00
ASTRA 84011*

Impressum

Autoren / Arbeitsgruppe

Christian Gammeter	ASTRA N-SSI, Vorsitz
Dimitrios Papastergiou	ASTRA N-SSI, Teilprojektleiter
Walter Waldis	ASTRA N-SSI
Susanne Rust	ASTRA N-SSI
Eleni Chatzi	IBK, ETH Zürich
Yves Reuland	IBK, ETH Zürich
Panagiotis Martakis	IBK, ETH Zürich
Paul Sieber	IBK, ETH Zürich
Cyprien Hoelzl	IBK, ETH Zürich
Sergio Nicoli	IBK, ETH Zürich
Vasileios Ntertimanis	IBK, ETH Zürich
Eugen Brühwiler	EPFL
Numa Bertola	EPFL
Glauco Feltrin	Empa
Johannes Hugenschmidt	OST
Ernst Niederleithinger	BAM Deutschland
Matteo Breveglieri	Empa
Hans-Heini Utelli	IMPULS AG
Rade Hajdin	IMC GmbH
Frank Schiffmann	IMC GmbH

Sounding Board

Daia Zwicky	HTA-FR
Dirk Proske	BFH
Erich Pimentel	IGT ETH Zürich
Fabrizio Moro	VersuchsStollen Hagerbach AG
Felix Lau	BMDV Deutschland
Giovanni Putignano	Google Cloud - Public Sector Switzerland
Martin Käser	ASTRA I-Ost FU F4/F5
Robert Braber	infralab SA
Sara Montani	Emch+Berger AG
Thomas Moser	ASFINAG Österreich
Tobias Kellenberger	swisstopo

Originalsprache

Deutsch

Diese Dokumentation ist Teil eines Gesamtdokuments, welches in folgenden Berichten veröffentlicht wird.

Teil Syn	ASTRA 84010 Synthesebericht Technologien zur Überwachung
Teil K	ASTRA 84011 Teilbericht Kunstbauten
Teil TU	ASTRA 84012 Teilbericht Tunnel
Teil TR	ASTRA 84013 Teilbericht Trasse

Herausgeber

Bundesamt für Strassen ASTRA
Abteilung Strassennetze N
Standards und Sicherheit der Infrastruktur SSI
3003 Bern

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.astra.admin.ch heruntergeladen werden.

© ASTRA 2024

Abdruck - ausser für kommerzielle Nutzung - unter Angabe der Quelle gestattet.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	2
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung.....	15
1.1 Zweck der Dokumentation	15
1.2 Geltungsbereich	15
1.3 Adressaten.....	15
1.4 Inkrafttreten und Änderungen	15
2 Ausgangslage	16
2.1 Relevante Infrastrukturobjekttypen im Fachgebiet Kunstbauten	17
2.1.1 Klassifizierung und Gliederung von Kunstbauten	18
2.1.2 Bauart und Baumaterialien.....	20
2.1.3 Schnittstellen mit Naturgefahren	21
2.1.4 Schnittstellen mit Umwelt	22
2.1.5 Schnittstellen mit den Teilsystemen Tunnel und Trasse	22
2.2 Kontext der Überwachung während Projektierung, Realisierung und Betrieb ...	22
2.3 Überwachungsaufgaben betr. Kunstbauten des ASTRA (inkl. Naturgefahren, Umwelt)	23
2.3.1 Überwachungsaufgaben vor der Bauphase.....	23
2.3.2 Überwachungsaufgaben während der Bauphase.....	23
2.3.3 Überwachungsaufgaben während der Betriebsphase	24
2.4 Abgrenzungen	24
2.5 Auftrag.....	24
3 Anforderungen	26
3.1 Gesetzliche Grundlagen, relevante Normen und Standards	26
3.2 Rahmenbedingungen	28
4 Grundlagen.....	29
4.1 Forschungsberichte.....	30
4.2 Bestehende Monitoring-Anwendungen	31
4.2.1 Allgemeine.....	31
4.2.2 Wichtigste Anwendungen im Kontext des Projektes.....	31
5 Methodisches Vorgehen	33
5.1 Grundsatz.....	33
5.2 Grundlage der Technologiebeschreibung.....	35
5.3 Überblick über die Bewertungsmethodik	35
5.4 Verallgemeinerung durch Klassifizierung	36
5.4.1 Kritikalität eines Bauwerks oder eines seiner Bauwerksteile	36
5.4.2 Objektbezogener Nutzen	37
5.4.3 Objektbezogene Kosten.....	38
5.5 Evaluation von Technologien	38
5.5.1 Einfache qualitative Technologiebewertung	39
5.5.2 Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt.....	39
5.6 Literaturverzeichnis	40
6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick	42
6.1 Übersichtstabellen – Legende	42
6.2 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf Bauteile	48
7 Bewährte Technologien	50

7.1	Meteorologische Naturgefahren.....	52
7.2	Gravitative Naturgefahren.....	52
7.3	Hochwasser.....	52
7.4	Brückenkolkbildung	53
7.5	Erdbeben.....	53
7.6	Literaturverzeichnis.....	54
7.7	Temperatur	55
7.7.1	Beschrieb der Technologie	55
7.7.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten.....	58
7.7.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	59
7.7.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	60
7.7.5	Ausschreibungsanforderungen	60
7.7.6	Literaturverzeichnis	60
7.8	Feuchtigkeitsmessung	62
7.8.1	Beschreibung der Technologie	62
7.8.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	64
7.8.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	64
7.8.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	65
7.8.5	Ausschreibungsanforderungen	65
7.8.6	Literaturverzeichnis	65
7.9	Wetterstation	66
7.9.1	Beschrieb der Technologie	66
7.9.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	66
7.9.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	66
7.9.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	67
7.9.5	Ausschreibungsanforderungen	67
7.10	Wind – Anemometer	68
7.10.1	Beschrieb der Technologie	68
7.10.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	69
7.10.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	69
7.10.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	70
7.10.5	Ausschreibungsanforderungen	70
7.10.6	Literaturverzeichnis	70
7.11	Weigh-in-Motion.....	71
7.11.1	Beschrieb der Technologie	71
7.11.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	73
7.11.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	74
7.11.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	74
7.11.5	Ausschreibungsanforderungen	74
7.11.6	Literaturverzeichnis	74
7.12	Wiegesysteme	75
7.12.1	Beschrieb der Technologie	75
7.12.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	75
7.12.3	Datenerfassung, Messgrößen und – Genauigkeiten.....	75
7.12.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	76
7.12.5	Ausschreibungsanforderungen	76
7.12.6	Literaturverzeichnis	76
7.13	Kraftmessdosen.....	77
7.13.1	Beschrieb der Technologie	77
7.13.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	78
7.13.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	79
7.13.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	79
7.13.5	Ausschreibungsanforderungen	80
7.14	Kapazitive Drucksensoren.....	81
7.14.1	Beschrieb der Technologie	81
7.14.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	82
7.14.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	82
7.14.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	82
7.14.5	Ausschreibungsanforderungen	83
7.15	Piezoelektrische Drucksensoren	84
7.15.1	Beschrieb der Technologie	84

7.15.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	84
7.15.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	84
7.15.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	85
7.15.5	Ausschreibungsanforderungen	86
7.15.6	Literaturverzeichnis	86
7.16	Faseroptische Drucksensoren.....	87
7.16.1	Beschrieb der Technologie	87
7.16.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	87
7.16.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	88
7.16.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	88
7.16.5	Ausschreibungsanforderungen	88
7.16.6	Literaturverzeichnis	89
7.17	Flächige Deformation – Satellitengestützte Radarinterferometrie	91
7.17.1	Beschrieb der Technologie	91
7.17.1	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	94
7.17.2	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	95
7.17.3	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	95
7.17.4	Ausschreibungsanforderungen	96
7.17.5	Literaturverzeichnis	96
7.18	Geodätische Techniken – Tachymeter	97
7.18.1	Beschrieb der Technologie	97
7.18.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	97
7.18.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	98
7.18.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	98
7.18.5	Ausschreibungsanforderungen	99
7.18.6	Literaturverzeichnis	99
7.19	Geodätische Techniken – Nivellement	100
7.19.1	Beschrieb der Technologie	100
7.19.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	100
7.19.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	101
7.19.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	101
7.19.5	Ausschreibungsanforderungen	101
7.19.6	Literaturverzeichnis	101
7.20	Schlauchwaage	102
7.20.1	Beschrieb der Technologie	102
7.20.2	Fragestellungen in den Fachbereichen.....	102
7.20.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit	103
7.20.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	103
7.20.5	Ergänzende Ausschreibungsanforderungen.....	103
7.20.6	Literaturverzeichnis	104
7.21	Laserbasierte Sensoren	105
7.21.1	Beschreibung der Technologie	105
7.21.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	107
7.21.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	108
7.21.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	108
7.21.5	Ausschreibungsanforderungen	109
7.21.6	Literaturverzeichnis	109
7.22	Terrestrische Radarinterferometrie	110
7.22.1	Beschreibung der Technologie	110
7.22.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	110
7.22.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	111
7.22.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	112
7.22.5	Ausschreibungsanforderungen	112
7.22.6	Literaturverzeichnis	112
7.23	GNSS Sensoren.....	114
7.23.1	Beschreibung der Technologie	114
7.23.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	115
7.23.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	115
7.23.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	116
7.23.5	Ausschreibungsanforderungen	117
7.23.6	Literaturverzeichnis	117

7.24	Lineare Stelltransformatoren (LVDTs)	119
7.24.1	Beschreibung der Technologie	119
7.24.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	119
7.24.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	119
7.24.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	120
7.24.5	Ausschreibungsanforderungen	121
7.24.6	Literaturverzeichnis	121
7.25	Extensometer	123
7.25.1	Beschrieb der Technologie	123
7.25.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	123
7.25.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	124
7.25.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	125
7.25.5	Ausschreibungsanforderungen	125
7.25.6	Literaturverzeichnis	126
7.26	Winkelverschiebung / Neigungssensoren	127
7.26.1	Beschreibung der Technologie	127
7.26.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	128
7.26.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	128
7.26.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	129
7.26.5	Ausschreibungsanforderungen	129
7.26.6	Literaturverzeichnis	129
7.27	Fugen- und Rissmessgeräte	131
7.27.1	Beschreibung der Technologie	131
7.27.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	132
7.27.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	132
7.27.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	133
7.27.5	Ausschreibungsanforderungen	133
7.27.6	Literaturverzeichnis	133
7.28	Dehnungsmessstreifen	134
7.28.1	Beschreibung der Technologie	134
7.28.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	135
7.28.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	136
7.28.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	136
7.28.5	Ausschreibungsanforderungen	137
7.28.6	Literaturverzeichnis	138
7.29	Faseroptische Sensoren (FOS)	139
7.29.1	Beschreibung der Technologie	139
7.29.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	141
7.29.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	142
7.29.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	143
7.29.5	Ausschreibungsanforderungen	145
7.29.6	Literaturverzeichnis	145
7.30	Laserbasierte Sensoren	147
7.30.1	Beschreibung der Technologie	148
7.30.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	149
7.30.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	150
7.30.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	150
7.30.5	Ausschreibungsanforderungen	150
7.30.6	Literaturverzeichnis	150
7.31	Radarbasierte Sensoren	150
7.32	Geophon/ Seismometer	153
7.32.1	Beschrieb der Technologie	153
7.32.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	153
7.32.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –Genauigkeit	154
7.32.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	154
7.32.5	Ausschreibungsanforderungen	154
7.32.6	Literaturverzeichnis	154
7.33	Gyroskope (Kreisel)	155
7.33.1	Beschreibung der Technologie	155
7.33.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	155
7.33.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	155

7.33.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	156
7.33.5	Ausschreibungsanforderungen	157
7.33.6	Literaturverzeichnis	157
7.34	Kraftausgeglichener Beschleunigungsmesser.....	162
7.34.1	Beschrieb der Technologie	162
7.34.2	Einsatzzweck(e) in Kunstbauten	162
7.34.3	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	163
7.34.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	163
7.34.5	Ausschreibungsanforderungen	163
7.35	Piezoelektrische Beschleunigungsmesser	164
7.35.1	Beschrieb der Technologie	164
7.35.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	164
7.35.3	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	164
7.35.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	165
7.35.5	Ausschreibungsanforderungen	165
7.36	Kapazitive MEMS Beschleunigungssensoren	166
7.36.1	Beschrieb der Technologie	166
7.36.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	166
7.36.3	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	166
7.36.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	167
7.36.5	Ausschreibungsanforderungen	167
7.36.6	Literaturverzeichnis	167
7.37	Endoskopie	169
7.37.1	Beschrieb der Technologie	169
7.37.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	170
7.37.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	170
7.37.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	171
7.37.5	Ausschreibungsanforderungen	172
7.37.6	Literaturverzeichnis	172
7.38	Mikroskopie	173
7.38.1	Beschreibung der Technologie	173
7.38.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	173
7.38.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	174
7.38.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	174
7.38.5	Ausschreibungsanforderungen	175
7.38.6	Literaturverzeichnis	175
7.39	Digitale Bildkorrelation (DBK).....	176
7.39.1	Beschrieb der Technologie	176
7.39.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	176
7.39.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	178
7.39.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	178
7.39.5	Ausschreibungsanforderungen	179
7.39.6	Literaturverzeichnis	179
7.40	Akustische Emission	180
7.40.1	Beschrieb der Technologie	180
7.40.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	181
7.40.3	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	182
7.40.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	182
7.40.5	Ausschreibungsanforderungen	182
7.40.6	Literaturverzeichnis	183
7.41	Impulsantwort.....	184
7.41.1	Beschrieb der Technologie	184
7.41.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	184
7.41.3	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	184
7.41.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	185
7.41.5	Ausschreibungsanforderungen	185
7.41.6	Literaturverzeichnis	185
7.42	Impakt-Echo	187
7.42.1	Beschrieb der Technologie	187
7.42.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	187
7.42.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	187

7.42.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	188
7.42.5	Ausschreibungsanforderungen	188
7.42.6	Literaturverzeichnis	188
7.43	Ultraschalltechniken	189
7.43.1	Beschrieb der Technologie	189
7.43.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	189
7.43.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	191
7.43.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	192
7.43.5	Ausschreibungsanforderungen	192
7.43.6	Literaturverzeichnis	192
7.44	Radiografie / Gammagrafie	195
7.44.1	Beschrieb der Technologie	195
7.44.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	196
7.44.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	197
7.44.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	197
7.44.5	Ausschreibungsanforderungen	197
7.44.6	Literaturverzeichnis	198
7.45	Computertomographie	199
7.45.1	Beschrieb der Technologie	199
7.45.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	199
7.45.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	200
7.45.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	201
7.45.5	Ausschreibungsanforderungen	202
7.45.6	Literaturverzeichnis	202
7.46	Georadar (Ground-Penetrating-Radar)	203
7.46.1	Beschrieb der Technologie	203
7.46.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	203
7.46.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	206
7.46.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	207
7.46.5	Ausschreibungsanforderungen	207
7.46.6	Literaturverzeichnis	207
7.47	Wirbelstromprüfung - Eddy Current Testing	208
7.47.1	Beschrieb der Technologie	208
7.47.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	208
7.47.1	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	209
7.47.2	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	209
7.47.3	Ausschreibungsanforderungen	209
7.47.4	Literaturverzeichnis	210
7.48	Magnetische Streufeldmethode	211
7.48.1	Beschrieb der Technologie	211
7.48.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	211
7.48.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	211
7.48.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	212
7.48.5	Ausschreibungsanforderungen	212
7.48.6	Literaturverzeichnis	213
7.49	Widerstandsmessverfahren	214
7.49.1	Beschrieb der Technologie	214
7.49.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	215
7.49.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	215
7.49.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	215
7.49.5	Ausschreibungsanforderungen	215
7.49.6	Literaturverzeichnis	216
7.50	Potentialfeldmessung	217
7.50.1	Beschreibung der Technologie	217
7.50.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	217
7.50.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	218
7.50.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	218
7.50.5	Ausschreibungsanforderungen	218
7.50.6	Literaturverzeichnis	219
7.51	Thermografie	220
7.51.1	Beschrieb der Technologie	220

7.51.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	221
7.51.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	221
7.51.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	221
7.51.5	Ausschreibungsanforderungen	222
7.51.6	Literaturverzeichnis	222
7.52	Sklerometrie/Rückprallhammer	223
7.52.1	Beschrieb der Technologie	223
7.52.2	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	224
7.52.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit	224
7.52.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	225
7.52.5	Ausschreibungsanforderungen	225
7.52.6	Literaturverzeichnis	225
7.53	Chloridgehaltsmessungen	227
7.53.1	Beschreibung der Technologie	227
7.53.2	Fragestellung in den Fachbereichen	227
7.53.3	Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit	227
7.53.4	Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten	228
7.53.5	Ausschreibungsanforderungen	228
7.53.6	Literaturverzeichnis	228
8	Aufstrebende Technologien	229
8.1	(interferometrische) Synthetische Apertur-Radar	229
8.1.1	Beschreibung der Technologie	229
8.1.2	Aktueller Stand der Forschung, Potenzial und Grenzen	229
8.1.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	231
8.1.4	Datenerfassung, Messgrößen und Präzision	231
8.1.5	Anwendungsbeispiele	232
8.1.6	Literaturverzeichnis	233
8.2	Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV)	234
8.2.1	Beschreibung der Technologie	234
8.2.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	235
8.2.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	235
8.2.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	235
8.2.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	236
8.2.6	Literaturverzeichnis	236
8.3	On-Board Monitoring	237
8.3.1	Beschreibung der Technologie	237
8.3.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	237
8.3.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	240
8.3.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	240
8.3.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	241
8.3.6	Literaturverzeichnis	243
8.4	Vision-based Motion Amplification	244
8.4.1	Beschreibung der Technologie	244
8.4.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	244
8.4.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	245
8.4.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	245
8.4.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	246
8.4.6	Literaturverzeichnis	247
8.5	Kamera-basierte Schadenserkenkung	248
8.5.1	Beschreibung der Technologie	248
8.5.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	249
8.5.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	250
8.5.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	250
8.5.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	250
8.5.6	Literaturverzeichnis	251
8.6	Drahtlose Sensornetze	252
8.6.1	Beschrieb der Technologie	252
8.6.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	254
8.6.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	256
8.6.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	257

8.6.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	257
8.6.6	Literaturverzeichnis	258
8.7	Brücken - Weigh In Motion (B-WIM)	259
8.7.1	Beschreibung der Technologie	259
8.7.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	259
8.7.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	261
8.7.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	262
8.7.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	263
8.7.6	Literaturverzeichnis	264
8.8	Verteilte faseroptische Sensoren für Vorspannsysteme	265
8.8.1	Beschreibung der Technologie	265
8.8.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	266
8.8.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	266
8.8.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	267
8.8.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	267
8.8.6	Literaturverzeichnis	268
8.9	Computer Vision basierte Schadensdetektion	269
8.9.1	Beschreibung der Technologie	269
8.9.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	269
8.9.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	270
8.9.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	271
8.9.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	271
8.9.6	Literaturverzeichnis	272
8.10	Verteilte faseroptische Sensoren	274
8.10.1	Beschreibung der Technologie	275
8.10.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	275
8.10.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	276
8.10.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	276
8.10.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	277
8.10.6	Literaturverzeichnis	277
8.11	Neutronenradiographie	279
8.11.1	Beschreibung der Technologie	279
8.11.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	279
8.11.3	Einsatzzweck und Fragestellungen im Bereich Kunstbauten	280
8.11.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit	280
8.11.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	281
8.11.6	Literaturverzeichnis	281
8.12	Myonentomographie	282
8.12.1	Beschreibung der Technologie	282
8.12.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	283
8.12.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	283
8.12.4	Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten	284
8.12.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	284
8.12.6	Literaturverzeichnis	284
8.13	Korrosionsüberwachung	285
8.13.1	Beschreibung der Technologie	285
8.13.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	286
8.13.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	286
8.13.4	Datenerfassung, Messgrößen und Präzision	287
8.13.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	287
8.13.6	Literaturverzeichnis	287
8.14	Intelligente Betonaggregate	289
8.14.1	Beschreibung der Technologie	289
8.14.2	Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen	289
8.14.3	Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten	290
8.14.4	Datenerfassung, Messgrößen und Präzision	290
8.14.5	Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen	290
8.14.6	Literaturverzeichnis	291
9	Technologiebewertung	292

9.1	Relevante Gefährdungen im Teilsystem.....	292
9.2	Bewertung von einzelnen Technologien	294
9.2.1	Aussergewöhnliche Einwirkungen	297
9.2.2	Langsam fortschreitende Schäden	298
9.2.3	Beeinträchtigung der Funktionalität	304
9.2.4	Literaturverzeichnis	306
9.3	Erstellen und Bewertung von Überwachungskonzepten	306
9.3.1	Erstellung eines Überwachungskonzepts	306
9.3.2	Bewertung von Überwachungskonzepten	308
9.3.3	Literaturverzeichnis	311
	Glossar	313
	Auflistung der Änderungen.....	315

1 Einleitung

1.1 Zweck der Dokumentation

Dieser erste Teil der Dokumentation fasst für die Überwachung der Kunstbauten im Nationalstrassennetz vorhandene Technologien zusammen. Er ist die Basis für die zu erarbeitenden Grundlagen neuer – noch nicht am Markt verfügbarer - Technologien. Die Dokumentation bietet nach Vorliegen aller Teile die Möglichkeit des direkten Vergleichs von zurzeit noch sehr wenig bekannten, mit den verschiedenen bisher bereits verfügbaren Überwachungsmöglichkeiten.

1.2 Geltungsbereich

Der Geltungsbereich umfasst alle in Bezug auf den Bau, den Betrieb und Erhalt der Kunstbauten im schweizerischen Nationalstrassennetz anwendbaren Technologien und Methoden.

1.3 Adressaten

Adressaten sind die Verantwortlichen für Überwachung und Erhaltung der Infrastruktur im ASTRA sowie deren Auftragnehmer.

1.4 Inkrafttreten und Änderungen

Dieses Dokument tritt am 24.05.2024 in Kraft. Die "Auflistung der Änderungen" ist auf Seite 315 dokumentiert.

2 Ausgangslage

Mit zunehmender Alterung der Strasseninfrastruktur steigt der Bedarf an zuverlässigen Überwachungsmethoden, deren Ergebnisse eine belastbare Entscheidungsfindung in Bezug auf die Erhaltung sicherstellen. Darüber hinaus ist die Strasseninfrastruktur immer öfter Beanspruchungen ausgesetzt, die über das ursprünglich vorgesehene Mass hinausgehen (extremere Witterungsbedingungen, zunehmender (Schwer-)Verkehr, übergewichtige Sondertransporte usw.).

In einigen mit konkreten Fragestellungen behafteten Infrastrukturen der Nationalstrasse, insbesondere bei Kunstbauten und Tunneln, weniger beim Trasse, sind bereits Überwachungssysteme integriert, die (zum Teil bei Bedarf) Messdaten liefern und vereinzelt an Alarmierungssysteme gekoppelt sind. Einsatz und Funktionsweise sind in den Überwachungsplänen geregelt. Die erhobenen Messdaten werden jedoch nicht zentral aufgezeichnet und analysiert.

Die derzeitige Praxis mit periodischen Inspektionen bzw. Zustandserfassungen (für Kunstbauten und Tunnel meist in einem 5-Jahres-Zyklus, für das Trasse in einem 4-Jahres-Zyklus) sowie Überprüfungen auf Veranlassung hat sich zur Gewährleistung der Sicherheit und einer effizienten Erhaltungsplanung bisher bewährt. Sie erlaubt aber keine Echtzeit-Diagnose über den Zustand und das Bauwerksverhalten. Eine häufigere oder gar permanente Überwachung wichtiger Objekte der Strasseninfrastruktur gewinnt bei erhöhten Risiken an Bedeutung. Darunter fallen beispielsweise Infrastrukturen, die kritische und nicht direkt inspizierbare Bauwerksteile aufweisen, wie die tragende erdseitige Bewehrung in der Arbeitsfuge einer Winkelstützmauer. Zudem bieten die Digitalisierung, die Verfügbarkeit von immer mehr Daten und die rasch voranschreitenden technologischen Entwicklungen ganz neue Möglichkeiten für eine ganzheitliche und permanente Überwachung der Strasseninfrastruktur.

In Frage kommen dafür neue Systeme, die benötigte Informationen zum Zustand und zur Beanspruchung von Bauwerken in Echtzeit bereitstellen und für ein modernes Erhaltungsmanagement geeignet sind. Es handelt sich dabei um Überwachungssysteme, die verschiedene Arten von Sensoren für eine temporäre, periodische oder permanente Überwachung verwenden. Im Weiteren ist zu prüfen, ob neue Technologien zielführende Möglichkeiten für die Überwachung der Strasseninfrastrukturen und die Planung ihrer Erhaltung bieten können. Und schliesslich stellt sich die Frage, ob weitere verfügbare Daten wie Witterungsdaten oder Fahrzeugdaten für die umfassendere Überwachung der Strasseninfrastruktur genutzt werden können.

Die Dokumentation liefert eine Sichtung und Wertung der bestehenden und künftig absehbar nutzbaren Technologien zur Überwachung der Infrastruktur, zeigt die mögliche Anwendung bereits bestehender Technologien im ASTRA auf und definiert die nötigen Strukturen sowie Prozesse für das frühzeitige Erkennen und Nutzbarmachen neuer technologischer Möglichkeiten zur Überwachung der Strasseninfrastruktur unter Berücksichtigung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses.

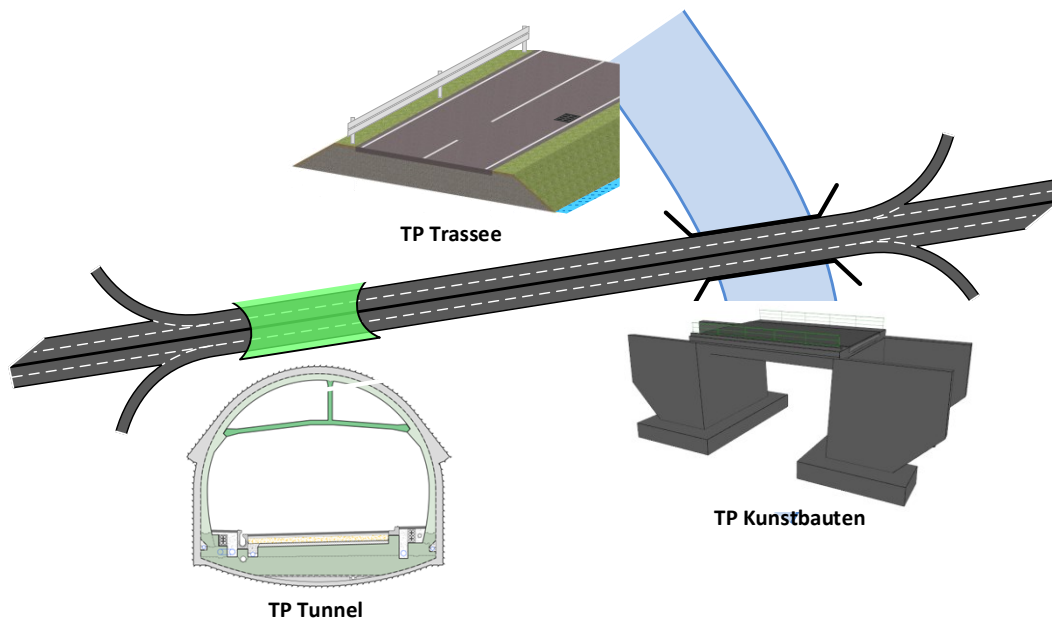


Abb. 2.1 Fokus im Gesamt-Projekt NTech

Die vorliegende Dokumentation wurde im Rahmen des Teilprojekts Kunstbauten erstellt und im Verlauf des Projekts NTech ergänzt und vervollständigt. Der Begriff Kunstbauten wird hier insbesondere für Brücken sowie für verwandte Bauwerkstypen und ihre Bauwerksteile (einschliesslich Stützmauern aber mit Ausnahme der Tunnel) verwendet. Gegebenenfalls werden die Schnittstellen mit den in den Bereichen Tunnel und Trassee angewandten Überwachungstechnologien, die in separaten Berichten behandelt werden, näher erläutert.

Die Dokumentation hat zum Ziel, den beteiligten Stellen einen Überblick über die derzeit verfügbaren Technologien im Zusammenhang mit der Überwachung von Kunstbauten zu geben. Die Zusammenfassung deckt sowohl die eher standardmässig angewandten als auch die weniger häufig genutzten Technologien ab, die jedoch ausgereift genug sind, um übernommen zu werden. Sie soll die Grundlagen für die Identifizierung vielversprechender neuer Technologien und die Einführung von Richtlinien und Standards für die Überwachung der Strasseninfrastruktur schaffen.

2.1 Relevante Infrastrukturobjekttypen im Fachgebiet Kunstbauten

Als "Kunstbauten" im Sinne der Richtlinie ASTRA 12001 gelten u.a.:

Brücken (inkl. Unter- und Überführungen), Galerien, Tagbautunnel, Überdeckungen, Durchlässe, Stützbauwerke, Schutzbauwerke, Tunnel (bergmännisch erstellt), Lärmschutzbauwerke. Dieser Bericht legt einen stärkeren Fokus auf Brücken als primäre Instanz kritischer Infrastrukturen und umfasst keine Elemente, die mit Tunnelinfrastrukturen in Verbindung stehen, die in einem separaten Bericht behandelt werden.

Aus der grossen Vielfalt von Kunstbauten folgen entsprechend unterschiedliche Anforderungen an deren Überwachung. Es ist deshalb zielführend, sich bei der Bestimmung der Überwachungsgegenstände an die übliche Gliederung von Kunstbauten anzulehnen.

In dieser Dokumentation werden Kunstbauten zunächst aufgrund ihres Typs, ihrer Bauart/Baumaterialien klassifiziert und in Bauwerksteile gegliedert. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der verfügbaren Überwachungstechnologien.

2.1.1 Klassifizierung und Gliederung von Kunstbauten

Für die Klassifizierung und Gliederung von Kunstbauten wird die für die Fachapplikation KUBA für Kunstbauten und Tunnel entwickelte Taxonomie der Bauwerksteile und Bauarten im Wesentlichen übernommen. Dabei wird in der Regel eine flache Hierarchie von generalisierten Bauwerksteilen (sogenannten kostenbestimmenden Infrastrukturobjekten, welche Objekte auf Bauwerksteilebene sind) gewählt. Die generalisierten Bauwerksteiltypen werden in Tab. 2.1 beispielhaft dargestellt.

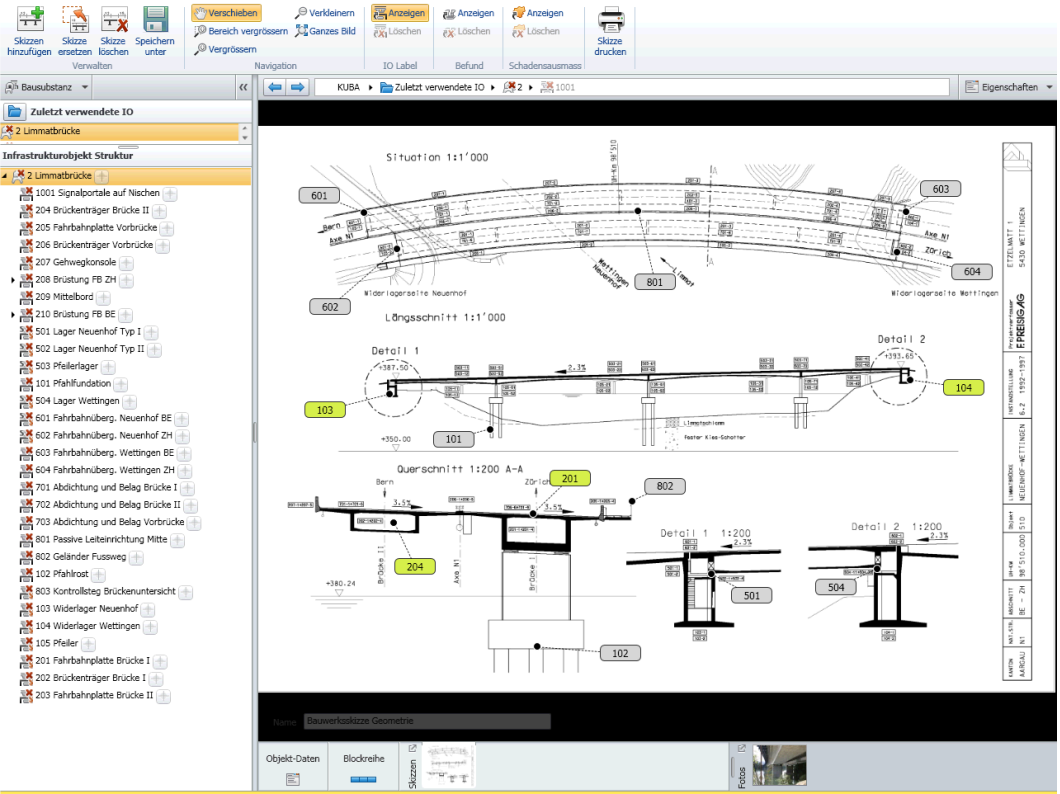


Abb. 2.2 Illustration von kostenrelevanten Infrastrukturobjekten auf Bauwerksteilebene in der Fachapplikation KUBA (vgl. ASTRA 62014)

In diesem Bericht werden nur generalisierte Bauwerksteiltypen behandelt, jedoch sind der Vollständigkeit halber auch die zugehörigen Bauwerksteiltypen in der Tab. 2.1 aufgeführt.

Tab. 2.1 Bauwerksteiltypen KUBA

Generalisierter Bauwerksteiltyp		Bauwerksteiltyp	
HCode	Text	HCode	Text
5	Widerlager	31	Widerlager
		3101	Widerlager mit Kontrollgang
		3102	Widerlager ohne Kontrollgang
		375	Lagerbank
		3805	Widerlagermauer
		3807	Widerlagerrückwand
7	Stützmauer, Flügelmauer	1244	Stützkonstruktion
		3806	Flügelmauer
		3008	Massive Mauer
		3809	Mauer mit Rippen
		3810	Konsolmauer
		3811	Verankerte Mauer
		3812	Verkleidungsmauer

Tab. 2.1 Bauwerksteiltypen KUBA

Generalisierter Bauwerksteiltyp		Bauwerksteiltyp	
HCode	Text	HCode	Text
9	Stützen, Pfeiler, Pylone, Stützscheiben	32	Stütze, Pfeiler, Pylon
		321	Stütze, Strebe
		3211	Einzelstütze
		3212	Stützenreihe
		3213	Stützenreihe mit Joch
		3215	Strebe
		3216	Strebenreihe
		3217	Ständer
		3218	Stiel
		322	Pfeiler
		3221	Einzelpfeiler
		3222	Pfeiler mit Hammerkopf
		3223	Doppelpfeiler
		3224	Doppelpfeiler mit Joch
		323	Pylon
		3231	Einzelpylon
		3232	Doppelpylon
		3233	A-förmiger Pylon
		3234	H-förmiger Pylon
10	Wand, Scheibe	3801	Wand/Scheibe
		3804	Mauer
		3814	Steg
		3815	Untere Platte
		3816	Querträger
11	Vollwandträger	33	Träger
		3303	Vollwandträger
		3304	Plattenbalken
		3305	Mehrfacher Plattenbalken
		3307	Vierendeelträger
		3308	Abgespannter Träger
		3309	Unterspannter Träger
		3310	Versteifungsträger
		3311	Riegel
12	Kastenträger	3817	Windverband
13	Kastenträger	3301	Kastenträger
		3302	Mehrzellige Kastenträger
14	Fachwerkträger	3306	Fachwerkträger
15	Fahrbahnplatte	371	Platte
		373	Fahrbahnplatte
		374	Kragplatte
16	Decke	377	Trägerrost
18	Randborde, Brüstung	3813	Randborde
		660	Leitmauer
		661	Leitmauer mit Leitholm
		662	Brüstung
18	Lager, Gelenke	391	Lager
		3911	Verformungslager
		3912	Punktkipplager

Tab. 2.1 Bauwerksteiltypen KUBA

Generalisierter Bauwerksteiltyp		Bauwerksteiltyp	
HCode	Text	HCode	Text
		3913	Linienkipplager
		3914	Topflager
		3915	Kalottenlager
		3916	Blattlager
		3917	Blattlager mit Pendelstab
		3918	Horizontalkraftlager
		3919	Rollenlager
		395	Gelenk
		3951	Punktgelenk
		3952	Liniengelenk
		3953	Gerbergelenk
19	Fahrbahnübergang	40	Fahrbahnübergang
		401	Verformbare Fuge
		402	Fahrbahnübergang mit Membrane
		403	Schleppblechübergang
		404	Fahrbahnübergang mit Dehnprofil
		405	Fahrbahnübergang mit Rollverschluss
		406	Fahrbahnübergang mit Fingerverschluss
20	Rahmen	342	Rahmen
22	Bogen, Gewölbe	34	Bogen, Rahmen
		341	Bogen
		343	Gewölbe
		378	Schale
23	Abdichtung	54	Abdichtung
		540	Allgemeine Abdichtung
		5403	Fahrbahnabdichtung
24	Belag	61	Fahrbahn
		62	Strassenbelag
		631	Deckschicht
		633	Tragschicht
		635	Fundationsschicht
25	Leitschranke, Geländer	663	Leitschranke
		664	Geländer
28	Rohr, Bachdurchlass	3013	Bodenplatte
		344	Rohr

2.1.2 Bauart und Baumaterialien

Gemäss AGB1998/101 (86/98) wird auf die folgende Tabelle zur Definition der wichtigsten Materialien verwiesen, die in Kunstbauten verwendet werden.

Tab. 2.2 Bezeichnung der Bauart gemäss KUBA

Bezeichnung Bauart KUBA
Mauerwerkskonstruktionen
Betonkonstruktionen
Stahlbetonkonstruktion
Spannbetonkonstruktion
Metallkonstruktionen

Tab. 2.2 Bezeichnung der Bauart gemäss KUBA

Stahlkonstruktion
Verbundkonstruktion
Verbundkonstruktion mit Vorspannung
Holzkonstruktionen

Hier wird die in der obigen Tabelle dargestellte KUBA-Kategorisierung weiter verallgemeinert, um als Beispiel die Fahrbahnplatte nach ihrer Bauart und Baumaterialien zu kategorisieren. Obwohl nicht in der vorherigen aufgeführt, wird bei der Verwendung von neuartiger Baumaterialien, wie UHPFRC, oftmals eine Tragwerksüberwachung angewandt, um das Verständnis für das Verhalten dieser Materialien unter erhöhten und zyklischen Belastungen sowie unter langfristiger Beanspruchung durch Verkehrs- und Umweltbelastungen zu verbessern.

Tab. 2.3 Bezeichnung des Baustoffs nach der Bauart von KUBA

Fahrbahnplatte			
Betonkonstr.	Stahlkonstr.	Verbundkonstr.	Mauerwerk

2.1.3 Schnittstellen mit Naturgefahren

Diese Schnittstellen werden im Teil A beschrieben, der in erster Linie die Umwelt- und Lasteinwirkungen beschreibt, einschliesslich der wichtigsten Naturgefahren, die für Kunstbauten relevant sind.

- Meteorologische Naturgefahren (Hagelstürme, Hurrikane, Blitze, Tornados) - Kapitel 7.1**
 Diese Klasse von Naturgefahren bezieht sich auf extreme Wetterereignisse im Zusammenhang mit starken Winden, welche sich offensichtlich auf die betroffenen Kunstbauten nachteilig auswirken.
- Gravitative Naturgefahren (Rutschung / Stein-/Blockschlag , Fels- und Bergstürze / Lawinen) – Kapitel 7.2**
 Diese Gefahrenklasse fällt in die umfassendere Kategorie der Massenbewegungen von Schnee, Fels, Eis und Lockergestein, die Infrastrukturobjekte in dem betroffenen Gebiet beeinträchtigen können. Hochwassergefahren gehören gemäss allg. Definition auch zu den gravitativen Naturgefahren, werden aber unter den nachfolgenden Punkten behandelt.
- Hochwassergefahren (Überschwemmung / Übersarung / Murgang / Erosion) – Kapitel 7.3**
 Als Hochwasser gilt der Austritt von Wasser aus einem natürlichen oder künstlichen Gerinnebett bzw. eine Ausuferung von stehenden Gewässern. Überschwemmungen werden dann gefährlich, wenn im Überflutungsbereich grössere Wassertiefen oder starke Strömungen auftreten. Dabei können mehr oder weniger grobe Feststoffe mitgeführt und abgelagert werden, die durch ihre Bewegungsenergie ganze Bauwerke zerstören können.
- Kolkbildung durch Hochwasser – Kapitel 7.4**
 Die Kolkbildung stellt eine besondere Kategorie der Erosion dar und hat schädliche Auswirkungen auf kritische strukturelle Komponenten von Kunstbauten (z. B. Unterkolkung Flussfundation), was den Einsatz spezieller Überwachungssysteme erfordert.
- Erdbeben – Kapitel 7.5**
 Hierbei handelt es sich um eine spezifische Kategorie geologischer Gefahren, die hier jedoch getrennt von den gravitativen Naturgefahren aufgeführt werden, da seismische Auswirkungen mit bestimmten Arten von Versagen bei kritischen Brückenkomponenten verbunden sind und den Einsatz spezieller Überwachungssysteme erfordern.

Verweise auf Schnittstellen mit Naturgefahren sind gegebenenfalls in den entsprechenden Abschnitten von Kapitel 7 enthalten, die sich auf einzelne Überwachungstechnologien beziehen.

2.1.4 Schnittstellen mit Umwelt

Diese Schnittstellen in den folgenden Kapiteln beschrieben:

- Temperatur – Kapitel 7.7
- Feuchtemessung – Kapitel 7.8
- Wind – Kapitel 7.10
- Verkehrsbelastung – Kapitel A 3

Schädigungseffekte, die durch Umwelteinflüsse hervorgerufen werden, sind ebenfalls in dieser Kategorie enthalten. Dazu gehören Effekte, die sich auf

- Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) und
- Korrosive Umgebungen

beziehen.

2.1.5 Schnittstellen mit den Teilsystemen Tunnel und Trasse

Die Technologien, die bei der Überwachung von Kunstbauten eingesetzt werden, sind oft identisch mit den Überwachungstechnologien, die in den weiteren Teilsystemen Tunnel und Trasse eingesetzt werden. Um Verwirrung zu vermeiden, wird, wenn solche Technologien gemeinsam eingesetzt werden, eine ähnliche Beschreibung in den verschiedenen Teilen des Berichts (Kunstbauten, Tunnel und Trasse) verwendet. In solchen Fällen, in denen Material wiederverwendet wird, wird ein spezieller Vermerk hinzugefügt, um den Quellbericht zu definieren.

Es wird ausserdem ausdrücklich erwähnt, dass die Fahrbahn auf oder in Kunstbauten Teil des Trassees ist und hier nicht behandelt wird. Die Technologien für die Inspektion von Entwässerungseinrichtungen, welche für Kunstbauten, Trasse und Tunnel ein übergreifender Themenbereich ist, werden im Bericht Tunnel in Kapitel 7.72 beschrieben. Die wichtigsten Grundsätze, die die Funktion und den Einsatz von Technologien zur kontinuierlichen Überwachung (SHM) und zerstörungsfreier Prüfung (ZfP) bestimmen, gelten auch für die Teilsysteme Tunnel und Trasse. Die Art der Anwendung kann unterschiedlich sein, insbesondere in Bezug auf die Montage von Sensoren. Der lokale Einsatz von zerstörungsfreien oder zerstörungsfreien Prüfmethoden dagegen wird unabhängig vom Teilsystem ähnlich angewendet.

2.2 Kontext der Überwachung während Projektierung, Realisierung und Betrieb

Im vorliegenden Bericht ist der Einsatz der vorgestellten Überwachungstechnologien an potenzielle Fragestellungen gekoppelt, welche in den verschiedenen Phasen ab Projektierung über Bau und insbesondere während des Betriebs auftreten können. Der Einsatz der einzelnen Technologien spiegelt unterschiedliche Ziele wider und kann sich auf i) die Sicherstellung der Tragsicherheit beziehen, was mit der Überwachung der potenziellen Mechanismen verbunden ist, die ein strukturelles Versagen auslösen können, oder ii) auf die Beeinträchtigung des Verhaltens und der Verfügbarkeit (Gebrauchstauglichkeit) einer Kunstbaute.

Bei der Wahl der geeigneten Messtechnologie sind folgende Aspekte gemäss dem objektspezifischen Messkonzept zu berücksichtigen:

- Installation und Inbetriebnahme: Erreichbarkeit (Lage, Zu- und Wegfahrten, Platzverhältnisse, etc.), Zugänglichkeit zu Bauwerksteil, Einschränkungen aus Kunstbautenbetrieb sowie erforderliche Versorgung (Strom, Wasser, etc.); ergänzende bauliche Vorbereitungen (z.B. Bohrungen, Schneidarbeiten, etc.);

- Messdauer (Monate, Jahre, Jahrzehnt)
- Messrhythmus (kontinuierlich, monatlich, jährlich) mit entsprechend rascher Verfügbarkeit der Resultate, Sicherstellung der Kontinuität der Datenmessreihen mit entsprechendem Mess- und Datenmanagement;
- Messgenauigkeit;
- Definition der Alarmierung (Aufmerksamkeits-, Alarm- und Grenzwerte) je nach Zweck der Zustandsbeurteilung
- Datenmanagement; Speicherung digital lokal vor Ort oder cloudbasierte Speicherlösung; Datenübertragung (falls erwünscht)
- Auswertung mit Vorgabe zur Darstellung (Einzelmessung, Folgemessungen) und Abgabe bzw. Umgang mit Rohdaten (Aufbereitung, Speicherung, Verteilung).

Im Bereich der Naturgefahren, ähnlich dem, was im Teilbereich - Tunnel erklärt wird, ist ebenfalls ein objektspezifisches Messkonzept zu erstellen, wobei bei zeitlich sich schnell aufbauenden Gefahrensituationen (z. B. Lawinen, Murgang, Steinschlag) aufgrund der unmittelbaren Gefährdung von Strasseninfrastruktur und Verkehrsteilnehmern folgende Aspekte besonders wichtig sind:

- Ausreichendes Verständnis über die relevanten auslösenden Faktoren und mögliche Ereignisabläufe;
- Robustheit und Redundanz der Systeme und deren automatische Kontrolle (Datenerfassung, Energieversorgung, Datenübertragung, Datenauswertung und Alarmierung);
- Kontinuierliche und rasche Verfügbarkeit der Daten und deren Auswertung;
- Klar definierte Aufmerksamkeits- und Alarmgrenzwerte;
- Klar definierte Notfallplanung im Falle einer Alarmierung mit vorbehaltenen Entscheiden und Einsatzplanung.

2.3 Überwachungsaufgaben betr. Kunstbauten des ASTRA (inkl. Naturgefahren, Umwelt)

Kunstbauten, insbesondere Brücken, sind hohen Betriebslasten und aggressiven Umgebungsbedingungen ausgesetzt und müssen dabei ein garantiertes Mass an Sicherheit, Verfügbarkeit und Betriebsfähigkeit aufweisen. Der Zustand von Bauwerken und deren Funktionstüchtigkeit werden durch regelmässige Inspektionen beurteilt, bei denen verschiedene Bauwerksteile und Einrichtungen untersucht werden. Die visuelle Inspektion ist die gebräuchlichste Untersuchungsmethode, die jedoch den offensichtlichen Nachteil hat, dass sich nur das feststellen lässt, was mit blossen Auge sichtbar ist. Darüber hinaus ist die Bewertung stark subjektiv und nur bedingt reproduzierbar, denn sie hängt nicht nur von der Erfahrung des Inspektors ab, sondern auch von seiner individuellen Risikobereitschaft bzw. Risikoaversion. Es steht bereits eine grosse Zahl an Überwachungstechnologien zu Verfügung, welche die standardmässigen Inspektionsdaten durch objektive Messdaten ergänzen können.

2.3.1 Überwachungsaufgaben vor der Bauphase

Bei Kunstbauten ist die Überwachung vor dem Bau eher standardisiert und stützt sich auf Vermessungsmethoden, die in erster Linie darauf abzielen, eine genaue Erfassung der Topographie der künftigen Kunstbaute zu erfassen, die für den Entwurf verwendet werden soll. Wenn es sich um Projekte von grossem Ausmass handelt, ist es möglich, dass eine besondere Gestaltung der Topographie erforderlich ist, die vor der Planung und Errichtung des Bauwerks definiert wird. Die Überwachungsmethoden, die sich auf diese Aufgabe beziehen, sind jedoch in erster Linie geotechnische Überwachungsmethoden, die hauptsächlich in dem Bericht zu Tunnelbauwerken behandelt werden.

2.3.2 Überwachungsaufgaben während der Bauphase

Die Überwachung des Bauwerks sowie der Bauhilfsmassnahmen wie Baugrubenabschlüsse während der Bauphase kann von entscheidender Bedeutung sein,

vor allem bei der Errichtung von Brücken, bei denen es darauf ankommt, die Stabilität und Robustheit des Systems während der Errichtung zu gewährleisten.

In Tab. 6. sind die Technologien, die für die Überwachung während des Baus nützlich sein können, ausdrücklich gekennzeichnet.

2.3.3 Überwachungsaufgaben während der Betriebsphase

In der Betriebsphase zielt die Überwachung darauf ab, Informationen über den aktuellen Zustand eines Bauwerks oder seiner Komponenten, seine Betriebsumgebung und die allgemeinen Umstände zu sammeln, um eine Diagnose der aktuellen und eine Prognose der zukünftigen Leistungsfähigkeit zu ermöglichen. Dies geschieht in der Regel im Zusammenhang mit Grenzzuständen, d. h. je nachdem, ob die Gebrauchstauglichkeit oder Tragfähigkeit von Interesse sind, sowie im Hinblick auf die Arten von Schäden, welche erwartet oder als kritisch angesehen werden können.

Solche typischen Schadensmechanismen im Kontext von Kunstbauten sind

- Korrosion
- Betonausdehnung aufgrund von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen
- Ermüdung
- Frost-Tau-Zyklen
- Kolkbildung
- Naturgefahren
- Setzungen

In den Kapiteln 7 und 8 des Berichts werden Technologien aufgelistet, ohne dass ihr Nutzen für die Vorhersage und Diagnose spezifischer Grenzzustände besonders hervorgehoben wird. In Kapitel 9 werden die aufgeführten Technologien dann auf einer solchen Grundlage bewertet.

2.4 Abgrenzungen

Im vorliegenden Dokument werden ausschliesslich der Fachbereich Kunstbauten sowie damit verknüpfte Themen aus den Bereichen Naturgefahren und Umwelt behandelt. Die Überwachungstechnologien im Zusammenhang mit den Fachbereichen Tunnel und Trasse sind Teil der weiteren Dokumentationen (vgl. Kapitel 3.2). Monitoring für das Verkehrsmanagement sowie die gesamte BSA sind ebenfalls nicht Teil dieses Projekts. Im Einzelnen nicht Bestandteil des Projekts sind daher:

- Die technologischen Möglichkeiten für die Überwachung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung (BSA). Für sie existieren bereits spezifische Überwachungslösungen, die standardmässig eingesetzt werden.
- Die langfristige Umsetzung insbesondere einer zentralen Datenbewirtschaftung sowie eines zentralen Echtzeit-Überwachungssystems für die Infrastruktur.
- Die Konzeption und die Durchführung von Pilotanwendungen.

2.5 Auftrag

Mit diesem Gesamt-Projekt NTech wird im ersten Schritt in den drei Fachbereichen Trasse, Kunstbauten und Tunnel eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Überwachungstechnologien erstellt. Das Resultat sind drei Teilberichte 1-A (TR, K und TU).

In einem zweiten Schritt werden erfolgversprechende Ansätze zu neuen, noch nicht für die Überwachung der Infrastruktur genutzten oder noch nicht marktreifen Technologien dokumentiert. Das Resultat sind drei Teilberichte 1-B, welche in die Teilberichte 1-A integriert werden.

Diese beiden ersten Ergebnisse werden in einem dritten Schritt analysiert und bewertet hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Überwachung der Infrastruktur in den genannten Fachbereichen. Das Resultat sind drei Teilberichte 2 mit den Ergebnissen der Analyse- und Bewertung der Technologien.

Das ASTRA stellt in einem dritten Schritt Strukturen und Vorgaben für die Durchführung von Pilotprojekten zusammen.

Im vierten Schritt wird die Synthese der vorangehenden Arbeiten pro Fachbereich erstellt und daraus werden Empfehlungen für mögliche Pilotprojekte, für Forschungsthemen und für erforderliche ASTRA-Standards abgeleitet. Die Resultate sind ein übergreifender Synthesebericht über alle Teilberichte und Berichte mit Empfehlungen pro Fachbereich zur Lancierung von Pilotprojekten, dem vorhandenen Forschungsbedarf und zur Formulierung von Standards.

3 Anforderungen

Die vorliegende Dokumentation basiert auf den im ASTRA definierten hierarchischen gegliederten Grundlagen (vgl. Abb. 3.3). Diese sind im vorliegenden Kapitel fokussiert auf die relevanten gesetzlichen Grundlagen, Normen und Standards im Bereich Kunstbauten aufgeführt. Zusätzlich werden die Rahmenbedingungen aufgeführt, unter welchen dieser Dokumentation erarbeitet wurde. Weitere Grundlagen für die vorliegende Dokumentation liefern Forschungs- und Monitoring-Projekte (vgl. Kapitel 4).

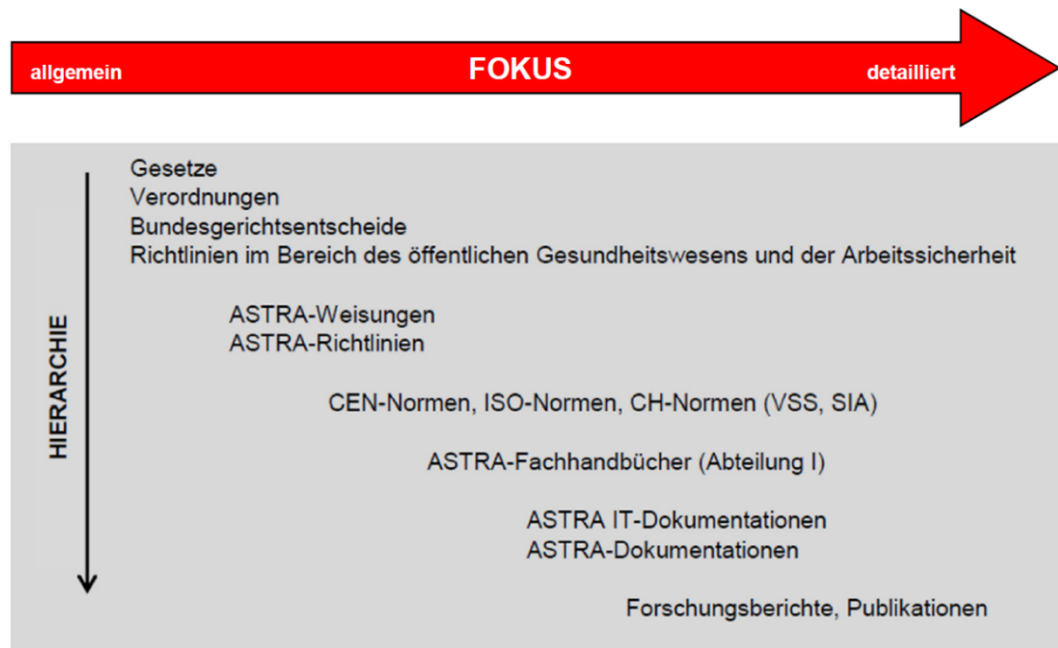


Abb. 3.3 Definition der Hierarchie von Veröffentlichungen im Geltungsbereich des Bundesamts für Strassen ASTRA

3.1 Gesetzliche Grundlagen, relevante Normen und Standards

Gesetze und Verordnungen

Grundlage für die Überwachung der Nationalstrassen-Infrastruktur sind das NSG mit Artikel 49 und die NSV mit Artikel 46. In diesem Zusammenhang gelten die folgenden Gesetze und Verordnungen auch als Vorgehensvorschriften.

- SR 725.11 Bundesgesetz über die Nationalstrassen (NSG) vom 8. März 1960 (Stand am 1. Januar 2018)
- SR 725.111 Nationalstrassenverordnung (NSV) vom 7. November 2007 (Stand am 1. Januar 2020)
- SR 725.13 Bundesgesetz über den Fonds für die Nationalstrassen und den Agglomerationsverkehr (NAFG) vom 30. September 2016 (Stand am 1. Januar 2018)
- SR 235.1 Bundesgesetz über den Datenschutz (DSG) vom 19. Juni 1992 (Stand am 1. März 2019)
- SR 235.11 Verordnung zum Bundesgesetz über den Datenschutz (VD SG) vom 14. Juni 1993 (Stand am 16. Oktober 2012)
- SR 741.01 Strassenverkehrsgesetz (SVVG) vom 19. Dezember 1958 (Stand am 1. Januar 2020)
- SR 741.11 Verkehrsregelverordnung (VRV) vom 13. November 1962 (Stand am 1. Februar 2019)

Normen

Die folgenden Normen dienen als Grundlagen im Bereich der zur Überwachung der Infrastruktur anwendbaren Technologien:

- DIN 1076: Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten
- EN ISO 18674 (1 10): Normen für die geotechnische Überwachung und Instrumentierung
- SIA 118-198: Allgemeine Bedingungen für Untertagebau
- SIA 197: Projektierung Tunnel - Grundlagen
- SIA 197/2: Projektierung Tunnel - Strassentunnel
- SIA 198: Untertagebau - Ausführung
- SIA 267: Geotechnik
- SIA 269: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken
- SIA 269/1: Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen

Internationale Richtlinien

- VDI 6200: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmässige Überprüfung
- Linee Guida Per La Classificazione E Gestione Del Rischio, La Valutazione Della Sicurezza Ed Il Monitoraggio Dei Ponti Esistenti, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Avril 2020.
- UNI/TR 11634, Linee guida per il monitoraggio strutturale, Avril 2016
- Guideline for Bridge Safety Management, Transport Canada, October 2018
- Merkblatt über die automatisierte Dauerüberwachung im Ingenieurbau, DGZfP Fachausschuss ZfPBau, Oktober 2020
- DBV-Merkblatt Brückenmonitoring: 2018-08, Bridge Monitoring - Design, Tender and Implementation
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 23 CFR Part 650, [FHWA Docket No. FHWA–2017–0047], RIN 2125–AF55, National Bridge Inspection Standards
- U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Structural Health Monitoring of Bridge Substructures, Publication No. FHWA-HRT-09-040
- Caltrans Division of Research & Innovation, Long-Term Structural Performance Monitoring of Bridges, Phase II: Development of Baseline Model and Methodology for Health Monitoring and Damage Assessment, Final Report

Standards des ASTRA:

Weisungen, Richtlinien, Fachhandbücher und Dokumentationen

Das ASTRA hat für die Überwachungsaufgaben im Zusammenhang mit der Erhaltung der Infrastruktur im Fachbereich Kunstbauten die folgenden Standards entwickelt und in Kraft gesetzt, auf welche in diesem Bericht bei den Angaben zur aktuellen Anwendung von Überwachungstechnologien auch Bezug genommen werden kann:

Weisungen

- ASTRA 75001 Daten für das Verkehrsmanagement Schweiz

Richtlinien

- ASTRA 12001 Projektierung und Ausführung von Kunstbauten der Nationalstrassen (2005; 20.12.2006)
- ASTRA 12002 Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen (2005; 19.12.2006)
- ASTRA 12004 Konstruktive Einzelheiten von Brücken
- ASTRA 12005 Boden- und Felsanker (2007 V3.12; 16.08.2019)
- ASTRA 12010 Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in Kunstbauten (2007 V2.00, 15.11.2007)

IT-Dokumentationen

- ASTRA 62011-62014 KUBA 5.0 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel (verschiedene Handbücher)
- ASTRA 62015 Fachapplikation Kunstbauten und Tunnel - Release Notes V5.1.2000.0

- ASTRA 62016 KUBA 5.1 Leitfaden für Inspektoren von Kunstbauten

Dokumentationen

- ASTRA 84002 Gefahrguttransport in Strassentunneln - Analyse und Beurteilung der Personenrisiken (2011 V1.02) (ZIP, 16 MB, 10.06.2021)
- ASTRA 82001 Überprüfung bestehender Strassenbrücken (2006) (PDF, 1 MB, 20.12.2006)
- ASTRA 82013 Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) (2007 V1.01) (PDF, 6 MB, 16.07.2007)
- ASTRA 82015 Schrägseile und externe Spannglieder für den Brückenbau (2011 V1.00) (PDF, 46 MB, 07.10.2011)
- ASTRA 82017 Erdbebensicherheit von Erd- und Stützbauwerken - Bemessung und Überprüfung (2019 V1.00) (PDF, 5 MB, 02.05.2019)
- ASTRA 82018 Erdbebensicherheit von Erd- und Stützbauwerken - Fallbeispiele (2019 V1.00) (PDF, 12 MB, 02.05.2019)

Fachhandbücher

- ASTRA 22001 Fachhandbuch Kunstbauten
- ASTRA 2B010 Handbuch Erhaltungsplanung

3.2 Rahmenbedingungen

In der vorliegenden Dokumentation werden alle Technologien und weitere Möglichkeiten zur Überwachung der Nationalstrassen-Infrastruktur im Bereich Kunstbauten betrachtet (vgl. Kapitel 6 - 9). Parallel dazu existieren 2 weitere Dokumentationen der Bereiche Trasse und Tunnel. Eine Synthese ist diesen 3 Dokumentationen vorangestellt. Zur Erarbeitung wurde ein Projekt «NTech - Nutzung neuer Technologien zur Überwachung der Infrastruktur» lanciert. Die Grundlagen zur Beschreibung und Bewertung der Technologien werden einführend erläutert (vgl. Kapitel 4 - 5).

Der Umfang der genannten Dokumentationen erstreckt bis zur Bereitstellung einer bewerteten Technologieübersicht mit Erstellung von Empfehlungen an die zuständigen Fachbereiche. Betrachtet wird der aktuelle Wissenstand weltweit betreffend diese Technologien. Die Ableitungen von Handlungsempfehlungen und notwendigen Forschungsarbeiten und Pilotanwendungen erfolgen konkret auf den Bedarf für Betrieb und Erhaltung des Nationalstrassennetzes. Bereits vorhandene Grundlagen hierzu finden sich in Kapitel 4. Die Erkenntnisse aus den laufenden Pilotanwendungen im ASTRA wurden berücksichtigt. Die grundlegende Methodik zur Bewertung der Technologien ist in Kapitel 5 beschrieben.

4 Grundlagen

Die Grundlagen für den in Kapitel 2 definierten Auftrag bilden der aktuelle Stand der Technik zum Einsatz bewährter und neuer Überwachungstechnologien sowohl in der schweizerischen als auch in der internationalen Praxis und Forschung im Bereich der Verkehrsinfrastruktur. Hierbei liegt der Fokus auf den einzelnen Teilsystemen Kunstbauten, Tunnel und Trasse sowie auf den Querschnittsthemen Umwelt, Naturgefahren und Geotechnik. Die im vorliegenden Bericht behandelten Überwachungstechnologien basieren damit auf Forschungen in den Bereichen der Sensormessung in direktem Kontakt und der berührungsfreien Messung (z.B. Laser- oder Radarmessung im Nahfeld bzw. Fernerkundungen).

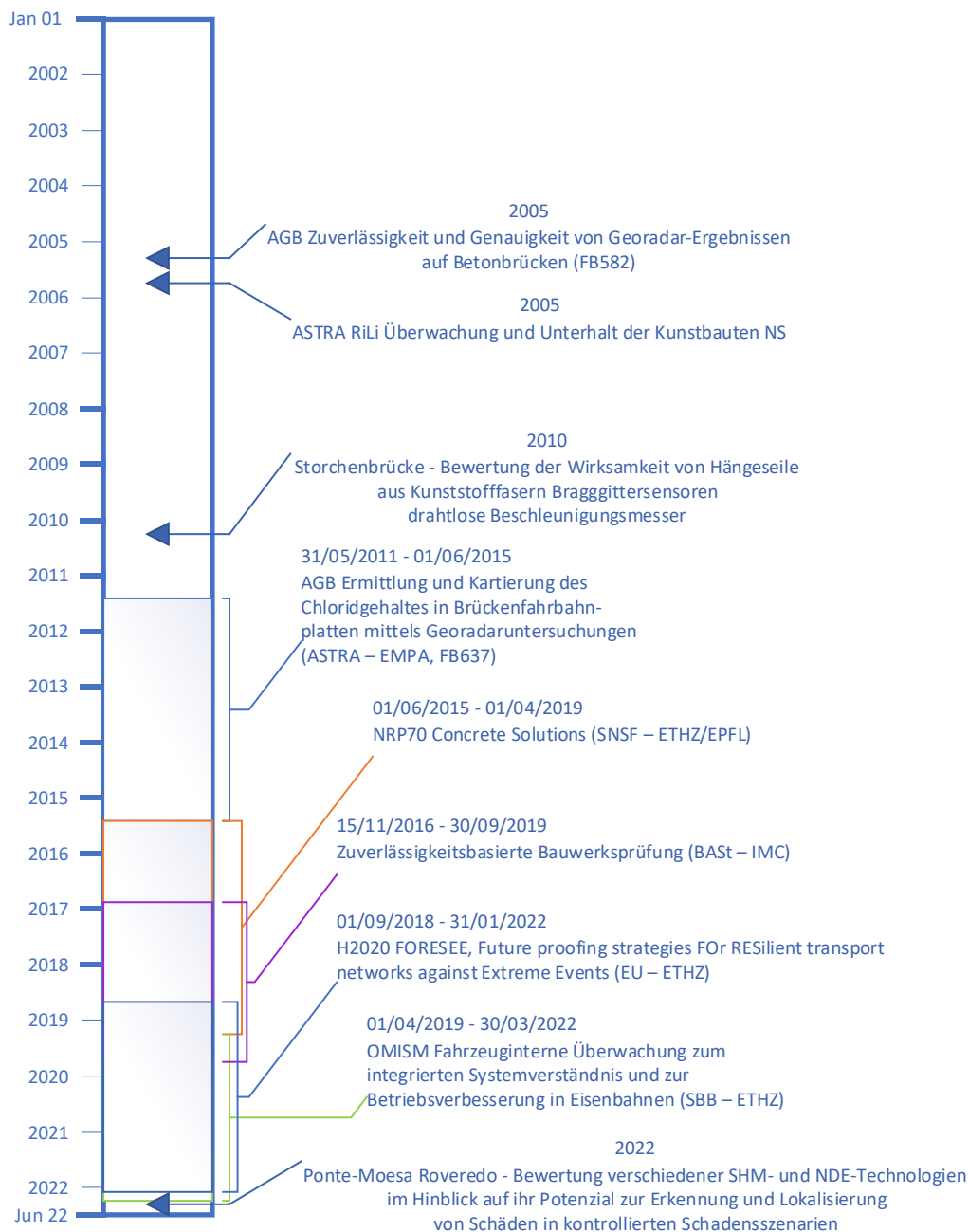


Abb. 4.4 Zeitliche Einordnung relevanter Forschungs- und Monitoring-Projekte TP Kunstbauten

Abb. 4.4 zeigt die zeitliche Einordnung von relevanten Forschungs- und Monitoring-Projekten für den vorliegenden Bericht im Fachbereich Kunstbauten. Auf wichtige Ergänzungen hierzu weisen die Kapitel 4.1 und 4.2 hin. Eine umfassende Übersicht für Kunstbauten bietet das Literaturverzeichnis, welches am Ende dieses Berichts zu finden ist. Zusätzlich sind relevante sonstige Literatur bzw. Forschungsberichte am Ende der jeweiligen Technologiekapitel zu finden.

4.1 Forschungsberichte

Eine Reihe bestehender Projekte im Rahmen des ASTRA haben sich mit dem Nutzen von Überwachungstechnologien für die Bewertung von Kunstbauten befasst. Unter diesen Verfahren sind die folgenden besonders erwähnenswert.

In [AGB2005/009] wird das Potential des Bodenradars (GPR oder Georadar) untersucht. Diese Überwachungstechnologie ist in der Lage, Informationen über Betonelemente (Bewehrung, Vorspannung, Rohre) und Strassenelemente (Hohlräume, Rohre, Belagsdicke) zu erfassen und auf diese Weise den Aufbau und die Tragfähigkeit von einzelnen Strukturkomponenten zu ermitteln. Darüber hinaus kann es zur Erkennung von Zonen mit erhöhtem Chloridgehalt und Feuchtigkeit eingesetzt werden und so eine Warnung vor einer Verschlechterung durch Korrosion liefern.

Noch im Kontext der kontaktlosen Methoden, wurde in AGB2000/553 die Genauigkeit von Radartechniken zur Erkennung von Bewehrungs- und Beschichtungskomponenten untersucht, während [VSS2006/514_OBF] die Wirksamkeit von thermografischen Methoden zur Schadenserkennung erörtert. Die Schallemissionsanalyse ist eine weitere vielversprechende Methode der zerstörungsfreien Prüfung zur Beobachtung von zerstörerischen Prozessen, die im Inneren einer Struktur beginnen und fortschreiten [AGB2002/009], [AGB2005/014]. Ähnlich wie die Schallemissionsanalyse wurde auch die magnetische Streufeldmethode zur Erkennung von Schäden an Bauwerksteilen eingesetzt.

Jüngste Forschungsarbeiten [AGB2009/006] befassen sich mit der Frage, ob Brüche von Bewehrungsstäben erkannt und lokalisiert werden können. Die oben genannten Verfahren stellen eine aktuelle Zusammenstellung von ZfP-Methoden dar, die sich jedoch eher auf eine lokale Beurteilung konzentrieren.

Eine geringere Anzahl von früheren ASTRA Projekten haben sich dennoch mit der Bewertung des globalen Zustands des Tragwerks mittels Langzeitüberwachung befasst [AGB2003/017], [ASTRA2005/008], [AGB2010/006]. Darüber hinaus wurden in Bericht AGB2012/015 effiziente Messtechniken und Methoden zur Bewertung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit untersucht.

Tab. 4.4 Wichtigste ASTRA Forschungsberichte im Kontext von NTech	
AGB2000/553	Zuverlässigkeit und Genauigkeit von Georadar-Ergebnissen auf Betonbrücken (FB582)
AGB2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du géoradar (FB637)
VSS2006/514_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP4: Zerstörungsfreie Prüfungen, Beurteilung von Verbund und Oberflächen (FB1521)
AGB2002/009	Feldversuche mit dem akustischen Überwachungssystem Soundprint (FB609)
AGB2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch (FB643)
AGB2009/006	Experimentelle Untersuchungen zur Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode (FB652, FB681)
AGB2003/017	Evaluation des systèmes existants pour le suivi à long terme des déformations des ponts (FB607)
AGB2004/010	Quality control and monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges (FB647)
ASTRA2005/008	Low Power Wireless Sensor Network for Monitoring Civil Infrastructure (FB1232)
AGB2005/014	Condition assessment of the Ponte Moesa during demolition (FB643)

AGB2007/004	Fatigue life assessment of road bridges with actual traffic loads (FB655)
AGB2009/001	Experiences with long integral bridges (FB679)
AGB2010/006	Einfluss des Asphaltbelages auf die Dynamik von Fussgängerbrücken aus Beton und Stahl (FB674)
AGB2011/003	Updated braking forces for the assessment of road bridges (FB 682)
AGB2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges (FB666)
AGB2012/016	Non-destructive Testing (NDT): Requirements of Practical Application and State of the Art - State of the Art Report (FB688)
AGB2016-002	Nichtverankerte Stützmauern, messtechnische Überwachung
AGB2018/006	Zerstörungsfreie Detektion von Kiesnestern in Stahlbetonbauteilen (FB705)

4.2 Bestehende Monitoring-Anwendungen

4.2.1 Allgemeine

Durch Messungen kann ein ungewöhnliches Verhalten eines Bauwerkes oder das Überschreiten von festgelegten Grenzwerten frühzeitig erfasst werden. Die Art und der Umfang dieser Messungen werden fallweise bestimmt und im Überwachungsplan festgehalten. Dazu sind die notwendigen Einrichtungen vorzusehen.

Folgenden Kontrollmessungen werden schon heute standardmässig durchgeführt:

- Nivellement der Brücken (Widerlager und Überbauten für Verformungskontrolle)
- Verschiebungsmessungen von beweglichen Lagern
- Kraftmessungen von Kontrollankern
- Elektrische Widerstandsmessungen an Vorspannkabeln und mit umfassendem Korrosionsschutz ausgerüsteten vorgespannten Ankern, welche isoliert eingebaut werden
- Vertikale und horizontale Verschiebungsmessungen von bestehenden Stützbauwerken und Brücken
- Wassermenge bei Drainage zur Hangstabilisierung

In Kapitel 7 dieses Berichts werden bewährte Technologien vorgestellt, die es ermöglichen, bei Bedarf eingehendere Inspektionen durchzuführen.

4.2.2 Wichtigste Anwendungen im Kontext des Projektes

Die folgende Tab. 4.5 enthält vorherigen Anwendungen von Messtechniken an Schweizer Brücken.

Tab. 4.5 Anwendungsfälle im Kontext dieses Projektes innerhalb der Schweiz

Fallstudie	Ziel	Überwachungs-Technologien	Ref.
Ponte-Moesa Roveredo (2010)	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	SoundPrint (Akustische Emissionsmessung)	AGB2005 /014
Ponte-Moesa Roveredo (2020)	Bewertung verschiedener SHM- und NDE-Technologien im Hinblick auf ihr Potenzial zur Erkennung und Lokalisierung von Schäden mit Hilfe von kontrollierten Schadensszenarien.	Beschleunigungsmesser, Dehnungsmessstreifen, Verteilte optische Sensoren und ZfP Methoden	[226]
Storchenbrücke	Bewertung der Wirksamkeit von Schrägseilen aus Kunststofffasern	Braggittersensoren, drahtlose Beschleunigungsmesser	[184] [225]
Chillon-Viadukt	Beurteilung der Wirksamkeit der Brückensanierung mittels UHPFRC und der langfristigen Leistungsfähigkeit.	Beschleunigungsmesser, Dehnungsmessstreifen, Feuchtigkeitssensoren	[217]

Tab. 4.5 Anwendungsfälle im Kontext dieses Projektes innerhalb der Schweiz			
Crêt De l'Anneau Viadukt	Analyse der Ermüdungszuverlässigkeit	Elektrische Dehnungsmessstreifen an Bewehrungsstäben	[172] [173]
Birskopfsteig	Vorbeugung von korrosionsbedingten Schrägseilausfällen	Hochauflösender Extensometer	[150]

5 Methodisches Vorgehen

5.1 Grundsatz

Mit der Erhaltung der Nationalstrassen-Infrastruktur erfüllt das Bundesamt für Strassen ASTRA seine hoheitliche Aufgabe, die Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Nachhaltigkeit und einen entsprechenden Fahrkomfort auf dem Strassennetz für die Nutzer bzw. den strassengebundenen Personen- und Güterverkehr sicherzustellen. Die Grundlagen für die dafür notwendige transparente Entscheidungsfindung erarbeitet das Erhaltungsmanagement.

Die Überwachung sowie weitergehende Untersuchungen an der Strasseninfrastruktur bilden eine gute Grundlage für das Erhaltungsmanagement. Hierfür hat das ASTRA diverse Richtlinien und Handbücher ausgearbeitet, welche eine systematische Überwachung und Zustandsbewertung unterstützen. Im Weiteren werden bei Bedarf die Informationen zum aktuellen Zustand der Strasseninfrastruktur stufenweise gewonnen. Dies bedeutet, falls keine zuverlässige Aussage zu aktuellem Zustand der Infrastrukturobjekte mit einfachen (und günstigen) Mitteln möglich ist, auf aufwendigere (und kostspielige) Untersuchungen zurückgegriffen wird.

Diese Herangehensweise hat sich durchaus bewährt und dies beweist auch der Zustand der Nationalstrassen, welcher im internationalen Vergleich die Spitzenposition einnimmt (vgl. [1]). Dennoch beobachten die Infrastrukturbetreiber die Entwicklungen im Bereich der Überwachung, in welchem bedeutende Fortschritte erzielt wurden. Gewisse neuartige Methoden können u. U. im Rahmen von regelmässigen (d. h. kostengünstigen) Inspektionen eingesetzt werden, während die anderen nur im Rahmen der tiefgreifenden (d. h. kostspieligen) Untersuchungen verwendet werden sollten.

Es ist zu erwarten, dass aufgrund des steigenden Alters der Bauwerke tiefgreifende Untersuchungen häufiger eingesetzt werden müssen, da gewisse Schadensprozesse mit einfachen Inspektionen nicht offengelegt werden können. Neue Technologien können hierfür nutzbringend eingesetzt werden. Für einen effizienten und effektiven Einsatz ist es notwendig, zunächst Technologien zu bewerten, dies einmal in Bezug auf deren Potentiale bei der Gewinnung von Informationen, aber auch auf deren Nutzen durch die mögliche Aussagekraft und Verwendung der Informationen im Entscheidungsprozess.

Die vorliegende Dokumentation hält einen Werkzeugkoffer bereit, mit welchem der Informationsgehalt neuer Überwachungsmethoden und deren Kosten und Nutzen in einer ersten Näherung bestimmt werden können, ohne bereits einen Hinweis auf ein betroffenes Bauwerk sowie die örtlichen Randbedingungen und Gefährdungen zu berücksichtigen. Die Methodik geht vom Ansatz des Werts einer Information aus, welche eine Technologie im Rahmen der Überwachung liefern kann. Als Überwachungskonzept wird in diesem Kontext der Einsatz einer bzw. mehrerer Technologien zur Abdeckung eines Informationsbedürfnisses an einem Infrastrukturobjekt bezeichnet.

Die Grundlage hierfür bildet die Wissenspyramide nach [2]. Obwohl die Technologien mit der Erhebung von Überwachungsdaten grundsätzlich Kosten für z.B. Einrichtung und Durchführung von Messungen neben anderen verursachen, stellen diese in einem Kontext als strukturierte Daten bereits Informationen mit einem definierten Wert dar. Sie entfalten ihren realen Nutzen – und damit den realen Wert der Information – aber erst durch ein Rückschliessen, die Entscheidungsfindung und das daraus abgeleitete effektive Handeln (vgl. Abb. 5.5).

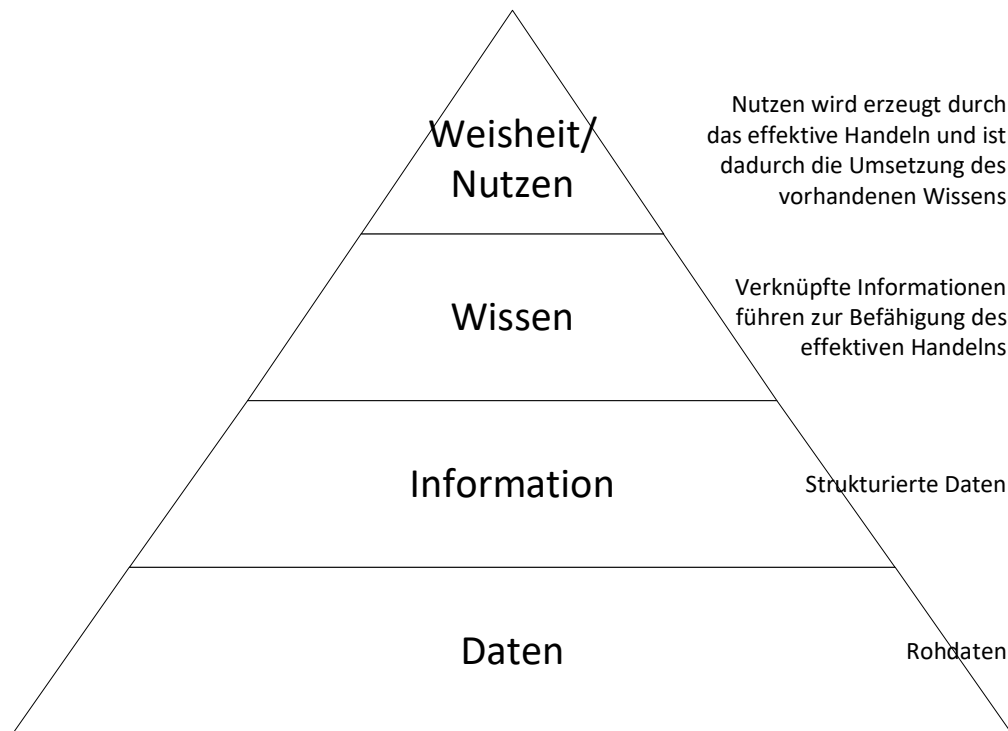


Abb. 5.5 Wissenspyramide (vgl. [2])

Um den Wert einer Information ermitteln zu können, sind Handlungsszenarien zu bilden. Ein Handlungsszenario im Infrastrukturmanagement stellt eine langfristige Massnahmenstrategie über einen definierten Betrachtungszeitraum dar. Da sich ein absoluter Nutzen für solche Szenarien nicht erfassen lässt (vgl. [3], [4] und [5]), wird stattdessen ein relativer Nutzen ermittelt.

$$\text{Rel. Nutzen} = \text{Szenario NTech} - \text{Szenario Ref}$$

mit

- | | | |
|-----------------------|---|--|
| <i>Rel. Nutzen</i> | – | relativer Nutzen als Differenz aus beiden Szenarien |
| <i>Szenario NTech</i> | – | Szenario unter der zusätzlichen Verwendung der Informationen neuer Technologien neben den bestehenden Inspektionsdaten |
| <i>Szenario Ref</i> | – | Szenario unter Verwendung der bestehenden Inspektionsdaten |

Der Wert der Information wird somit als ein relativer Nutzen aus der Differenz der langfristigen Kosten zweier Handlungsszenarios, d.h. eines mit Vorhandensein und eines ohne diese Information, definiert. Die langfristigen Kosten stellen dabei die gesamtwirtschaftlich erwarteten Kosten inklusive monetarisierter Risiken für alle Anspruchsgruppen, d.h. Betreiber, Nutzer, Dritte und die Umwelt, dar. Dies umfasst alle Massnahmen, welche im Rahmen des jeweiligen Szenarios langfristig über einen definierten Zeitraum stattfinden.

Als Definition des Nutzens können neben einer Kosten-Nutzen-Analyse auch Alternativen Verwendung finden. Hierfür werden im Kontext des Verkehrswesens oft auch Kosten-Wirksamkeitsanalysen eingesetzt (vgl. [6]). Dabei wird der Nutzen als eine relative Differenz der Veränderungen einer definierten Kenngrösse (z.B. Veränderung des Risikos / der Performance / des Zustands usw.) zwischen zwei Szenarios über einen definierten Zeitraum definiert.

Die spezifischen Gefährdungen an Infrastrukturobjekten stehen mit den örtlichen Randbedingungen der vorhandenen Umgebung in einem Zusammenhang. Die Bewertung einer Technologie ist somit nur unter Einbezug der unterschiedlichen objektspezifischen Randbedingungen sinnvoll. Die Methodik wird im Folgenden dargestellt und erläutert.

5.2 Grundlage der Technologiebeschreibung

Im Rahmen dieser Dokumentation erfolgt eine Auslegeordnung vorhandener Technologien, mit welcher zuerst die relevanten Technologien zusammengetragen und deren Potential beschrieben werden. Zusätzlich werden relevante artfremde Technologien sowie Datenquellen analysiert. Hierbei liegt der Fokus auf der Beschreibung sowie der Bewertung des Nutzungspotentials dieser Technologien für die Integration in das Erhaltungsmanagements des ASTRA.

Grundsätzlich wird oft bei der Überwachung der Strasseninfrastruktur zwischen der zerstörungsfreien bzw. -armen Prüfung (ZfP) und Structural Health Monitoring (SHM) differenziert. Obwohl es keine formale Abgrenzung gibt, versteht man unter ZfP einmalige oder in grösseren Zeitabständen durchgeführten Aktivitäten, bei welchen Geräte genutzt werden, die nicht zum Infrastrukturobjekt gehören. Demgegenüber versteht man unter SHM mehr oder weniger kontinuierliche Messungen mit den Geräten, welche am Infrastrukturobjekt montiert sind. Weitere Klassifikationen umfassen den Einsatzzweck, die Zuverlässigkeit, das TRL (Technology Readiness Level) und die langfristigen Kosten.

5.3 Überblick über die Bewertungsmethodik

Ausgangspunkt der Bewertung sind Kosten und Nutzen der Technologie bzw. Technologien innerhalb eines Überwachungskonzepts und der damit resultierenden Überwachungsinformation. Dies ist in Abb. 5.6 dargestellt.

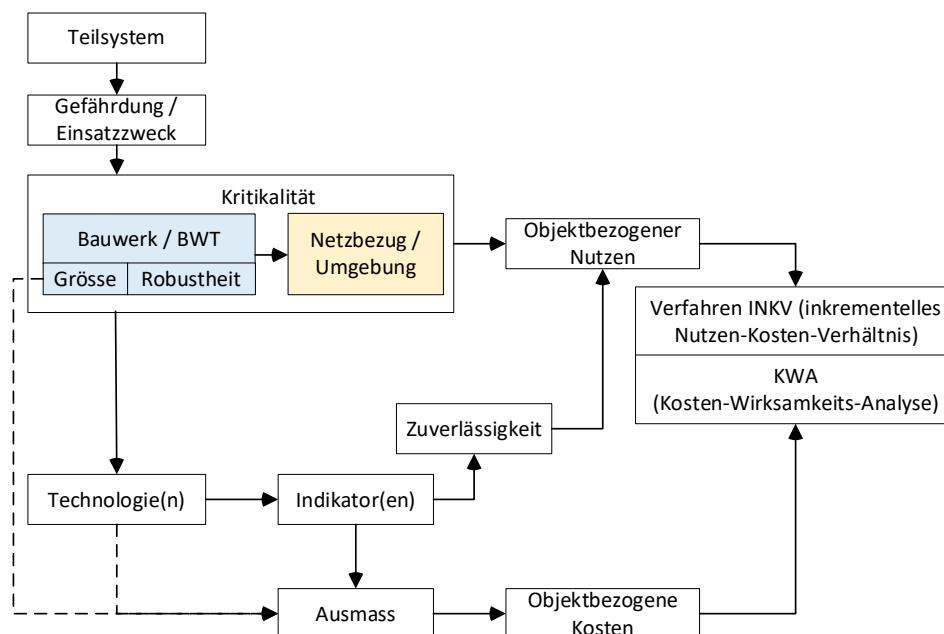


Abb. 5.6 Konzept der Bewertung der Technologien am Wert der Information

Dabei wird auf die in Kapitel 6 aufgezeigte Struktur der Technologiedaten abgestützt. Die Technologien werden in den einzelnen Teilsystemen einerseits in Bezug auf die vorhandenen Gefährdungen und daraus abgeleiteten Einsatzzweck unterteilt. Andererseits sind die Technologien relevanten Bauwerksteilen zugeordnet (vgl. Kapitel 6). Die bestimmten Kosten und Nutzen dienen dann zur Auswahl der jeweiligen Technologie.

Die Methodik der Technologiebewertung soll Nutzern der vorliegenden Dokumentation ein Werkzeug für die Entscheidungsfindung bei der Planung der Überwachungstätigkeiten zur Verfügung stellen. Die Methodik dient ebenfalls einer Bewertung der einzelnen Technologien im Kontext der Teilsysteme (vgl. Kapitel 9). Dabei soll die Bewertung sowohl in beiden Bewertungsebenen, der Technologiebewertung und der Bewertung zur Entscheidungsfindung am Einzelobjekt, als auch in allen drei Teilsystemen, mit Kunstbauten, Tunnel und Trasse, stringent Anwendung finden.

5.4 Verallgemeinerung durch Klassifizierung

Grundsätzlich ist der Wert der Information an einem Infrastrukturobjekt nicht unabhängig von den Gefährdungen und deren Konsequenzen (vgl. Kapitel 9) ermittelbar. Am Einzelobjekt sollten alle relevanten Aspekte des Bauwerks, der Umgebung und der örtlich vorhandenen Gefährdungen sowie deren Konsequenzen direkt in die Bewertung mit einfließen. Stehen jedoch keine ausreichenden Informationen der örtlichen Randbedingungen zur Verfügung, müssen hierfür Annahmen getroffen werden. Dies wird in der Technologiebewertung für jedes Teilsystem durch eine grobe Klassifizierung relevanter Aspekte berücksichtigt. Im vorliegenden Kapitel wird dies grob generisch aufgezeigt. Die konkrete Klassifizierung im Teilsystem ist dem Kapitel 9 zu entnehmen.

5.4.1 Kritikalität eines Bauwerks oder eines seiner Bauwerksteile

Die Kritikalität eines Bauwerks bzw. eines seiner Bauwerksteile (BWT) wird durch das Bauwerk an sich und seine Umgebung bzw. seine Einbindung in das Strassennetz definiert. Sie hat Auswirkungen auf die Auswahl der Technologien und deren Kosten als auch einen Einfluss auf den Nutzen durch den Netzbezug. Dabei ist gerade für die Bewertung am Einzelobjekt der Einsatz von Computern (z.B. [7]) für die Simulation von Szenarien, z.B. zur Wahrscheinlichkeit des Versagens oder der resultierenden Konsequenzen, sinnvoll. Zum Teil ist dies die einzige Möglichkeit, konkrete Aussagen für das Einzelobjekt machen zu können.

Bauwerksgrösse

Die Bauwerksgrösse hat je nach Technologieauswahl einen kostenbestimmenden Einfluss. Dies ist jedoch nicht zwingend. Bei einem punktuellen Einsatz der Technologien ist die Bauwerksgrösse eher nicht von Bedeutung. Für die überschlägige Technologiebewertung ist bei Bedarf eine einfache qualitative Klassifizierung je nach Teilsystem zu wählen.

Robustheit

Die Robustheit eines Bauwerks gibt Aufschluss über die Wahrscheinlichkeit eines Versagens des Bauwerks oder eines seiner BWT. Hierbei sind einerseits der Bauwerkstyp sowie andererseits dessen Gefährdungen relevant. Am konkreten Bauwerk, dessen Gefährdungen und den vorhandenen örtlichen Randbedingungen können Tragwerksmodelle durch Szenarienbildung Aufschlüsse über das Versagen geben. Ohne einen konkreten Bezug auf ein existierendes Bauwerk mit seinen Randbedingungen hilft eine Klassifizierung, um diese in eine überschlägige Bewertung einzubeziehen. Eine einfache qualitative Klassifizierung zeigt Abb. 5.7 auf.

Bauwerk		Teilsystem
Robustheit	Kategorie	Bauwerkstyp (Konstruktion)
	3	gering
	2	mittel
	1	gross

Abb. 5.7 Einfache qualitative Klassifizierung der Robustheit

Netzbezug

Der Netzbezug ermöglicht es, die Konsequenzen eines Versagens von Bauwerken zu bestimmen. Dabei werden die zu erwartenden Konsequenzen addiert. Ein wesentlicher Teil von Konsequenzen eines Versagens bei Bauwerken der Strasseninfrastruktur kann aus der existierenden Verkehrsbelastung auf dem Bauwerk selbst und dem umgebenden Strassennetz abgeleitet werden. Hierbei helfen Szenariensimulationen am Verkehrsmodell. Für eine überschlägige Bewertung ohne konkrete Ansätze müssen analog zur Robustheit relevante Klassen gebildet werden. Eine einfache qualitative Klassifizierung zeigt Abb. 5.8 auf.

Netzbezug		Konsequenzen aus
Konsequenz	Kategorie	Netzbelastung / Umgebung
	1	gering
	2	mittel
	3	gross

Abb. 5.8 Einfache qualitative Klassifizierung des Netzbezugs

Durch die Kombination der Klassen von Robustheit und Netzbezug in einer groben Risikomatrix bietet die Kritikalität bei der überschläglichen Technologiebewertung auch die Möglichkeit einer Reduktion von Kombinationen (vgl. Abb. 5.9). In der Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sollte für die Bestimmung des Nutzens in diesem Rahmen eine quantitative Risikobewertung durchgeführt werden. Wie schon aufgezeigt, bieten Verkehrsmodelle hierbei die Möglichkeit einer quantitativen Risikobewertung.

Robustheit	Kritikalität				Kategorie
gering					1
mittel					2
gross					3
	gering	mittel	gross		
	Konsequenzen des Versagens				

Abb. 5.9 Klassifizierung der Kritikalität zur Verwendung bei der einfachen qualitativen Technologiebewertung

5.4.2 Objektbezogener Nutzen

Für die Quantifizierung des Nutzens werden langfristige Handlungsszenarien gebildet, für welche die gesamtwirtschaftlichen Kosten aller Anspruchsgruppen, d.h. Betreiber-, Nutzerkosten und Kosten Dritter, erfasst werden (vgl. Kapitel 5.1). Bei der Quantifizierung sollten im Rahmen eines Überwachungskonzepts auch Kombinationen von Technologieanwendungen berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 9.3), um durch zusätzliche Informationen die Aussagekraft bzw. die Zuverlässigkeit in Bezug auf relevante Gefährdungen für die Entscheidungsfindung zu erhöhen.

Der objektbezogene Nutzen wird im Rahmen der qualitativen Bewertung der Technologien gebildet aus der Kritikalität und der Zuverlässigkeit von Überwachungstechnologien. Dabei bezieht sich die Zuverlässigkeit einerseits auf die Technologie selbst und andererseits auf die Aussagekraft der daraus zugehörigen Indikatoren.

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit kann zum Beispiel in einer ersten groben Klassifizierung dadurch gekennzeichnet sein, dass man bei neuen Technologien zuerst noch Erfahrungen mit den gemessenen Indikatoren und mit Rückschlüssen auf die Entscheidungsfindung sammeln muss (vgl. Abb. 5.10). Dies steht in Verbindung mit Pilot- oder Forschungsprojekten, welche sich unter anderem beim ASTRA in Durchführung befinden oder eventuell lanciert werden sollten.

Zuverlässigkeit		
ZV1	Kategorie	Technologieakzeptanz
	1	Forschung notwendig
	2	Pilotprojekt notwendig
	3	im Einsatz

Abb. 5.10 Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug zur Akzeptanz der Technologie

Ein weiterer Aspekt ist die Aussagekraft der resultierenden Indikatoren aus den Technologien. Die Indikatoren können eine grosse Aussagekraft in Bezug auf die Gefährdung haben oder eben weniger. Dies kann mit einer weiteren einfachen Klassifizierung grob überschlagen werden (vgl. Abb. 5.11).

Zuverlässigkeit		
ZV2	Kategorie	Aussagekraft Indikator für Gefährdung
	1	klein
	2	mittel
	3	gross

Abb. 5.11 Klassifizierung der Zuverlässigkeit in Bezug zur Aussagekraft der Indikatoren auf eine spezifische Gefährdung

Zusätzlicher Nutzen in Abhängigkeit des Ausmasses

Für eine einfache qualitative Technologiebewertung ist im Gegensatz zur Nutzenbestimmung am konkreten Bauwerk mit dessen Randbedingungen nicht eindeutig bestimmbar, welches Ausmass der Technologieinstallation am Bauwerk relevant ist. Hierfür müssen Annahmen in Form einer Bandbreite mit oberer und unterer Grenze gebildet werden. Diese Skalierung hilft, den Nutzen in einer Bandbreite zwischen z.B. wenigen, punktuelle Messungen und ausgedehnten Messbereichen durch einen zusätzlichen Nutzen analog der aufgeführten Klassifizierung in Abb. 5.12 aufzuzeigen (vgl. auch Bandbreite Kosten). Den Hintergrund hierfür bildet der Wert einer Information an einem Bauwerk. Einzelinformationen, z.B. ein erfasster Wert einer einzelnen Messstelle, lassen zum Teil nur wenige Rückschlüsse in Bezug auf eine vorhandene Gefährdung zu. Mehrere Messstellen in einem grösseren Perimeter bzw. viele Messungen über ein grösseres Ausmass erzeugen höhere Kosten, resultieren aber durch ihre umfassendere Aussagekraft im Gefährdungskontext auch in einem höheren Nutzen.

Ausmass		
zN	Kategorie	zusätzlicher Nutzen bei grossem Ausmass
	1	gering
	2	klein
	3	mittel
	4	gross
	5	sehr gross

Abb. 5.12 Klassifizierung des zusätzlichen Nutzens bei grossem Ausmass

Darstellung eines Mehrfachnutzens

Zusätzlich haben Technologien, welche mehrere Gefährdungen abdecken, einen Mehrfachnutzen, welcher in die Bewertung mit einfließen sollte. Für die einfache qualitative Technologiebewertung sollte der Mehrfachnutzen trotz fehlender konkreter Bauwerksdefinition zumindest dargestellt werden. In der Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt muss dies mit Kosten und quantifizierten Nutzen in der Szenariensimulation (vgl. Kapitel 5.1) Berücksichtigung finden.

5.4.3 Objektbezogene Kosten

Die objektbezogenen Kosten ergeben sich aus der Wahl der Technologie und des Indikators oder eines Überwachungskonzepts mit mehreren Technologien. Hierbei wirkt sich das Ausmass der Installation am Bauwerk aus. Im Einzelfall kann dies bereits durch die Klassifizierung der Grösse des Bauwerks für die grobe Technologiebewertung abgeschätzt werden. Je nach Fragestellung und verfügbarer Technologie kann das Ausmass aber auch unabhängig vom Bauwerk sein.

Für die Ermittlung der objektbezogenen Kosten am konkreten Fall ist eine Bestimmung der Kosten über das konkrete Ausmass in Abhängigkeit zur Gefährdung und des Bauwerks mit seinen Randbedingungen möglich. Für eine grobe Technologiebewertung sollte sich auf die Angaben im Bericht gestützt werden. Zusätzlich müssen in Bezug zum Ausmass analog zum Nutzen Annahmen in Form einer Bandbreite mit oberer und unterer Grenze erfolgen.

5.5 Evaluation von Technologien

Für die Evaluation von Technologien in einem Überwachungskonzept lassen sich mit dem jeweiligen objektspezifischen Nutzen und dafür anfallenden Kosten im Rahmen eines

Auswahlverfahrens die besten Varianten finden. Zusätzlich lassen sich die Technologien grob untereinander vergleichend bewerten.

5.5.1 Einfache qualitative Technologiebewertung

Im Rahmen der groben Technologiebewertung kann vereinfacht das Nutzen-Kosten-Verhältnis qualitativ aufgezeigt werden. Durch eine leichte Anpassung im Vorgehen (vgl. Abb. 5.13), können die Technologien direkt ohne den Bezug zu einem Einzelbauwerk und seiner Umgebung bewertet werden. Hierfür werden die Nutzen- und Kostenkenngrössen qualitativ bestimmt. Für die grobe Bewertung sollten dafür sinnvolle überschlägige Klassifizierungen gebildet werden, um unterschiedliche relevante örtliche Randbedingungen grob zu unterscheiden. Dies wurde im Kapitel 5.4 für die jeweiligen Aspekte beispielhaft aufgezeigt und muss für jedes Teilsystem separat betrachtet und sinnvoll definiert werden.

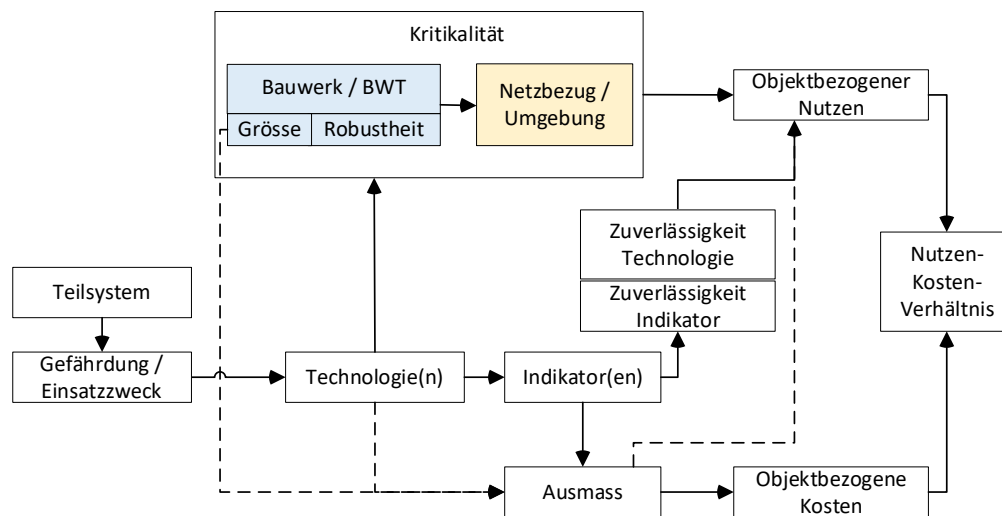


Abb. 5.13 Ablauf zur einfachen qualitativen Bewertung ausgehend von den im Teilsystem vorhandenen Technologien

Qualitative Ermittlung des objektbezogenen Nutzens

Für die Ermittlung des objektbezogenen Nutzens im Rahmen der einfachen qualitativen Technologiebewertung sind notwendige Angaben zum Bauwerk und zum vorhandenen Netzbezug nicht vorhanden. Hierfür wurden in Kapitel 5.4.1 drei Kategorien der Kritikalität *Krit* eingeführt. Diese bilden eine Bandbreite von gering kritischen Bauwerken (Kategorie 1 – untere Grenze) bis zu hoch kritischen Bauwerken (Kategorie 3 – obere Grenze) ab.

Für die gewählten Technologie mit einem spezifischen Indikator lässt sich qualitativ die Zuverlässigkeit aus ZV1 und ZV2 ermitteln. Zusätzlich existiert ein zusätzlicher Nutzen zN , wenn die Aussagekraft im Gefährdungskontext durch ein grösseres Ausmass erhöht wird (vgl. Kapitel 5.4.2). Damit wird der objektbezogene Gesamtnutzen GN wie folgt ermittelt:

$$GN = ZV1 \cdot ZV2 \cdot Krit + zN$$

Die Berechnung und vergleichende Darstellung zwischen den unterschiedlichen Technologien für die Gefährdung bzw. Einsatzzwecke an unterschiedlichen relevanten Bauwerksteilen wird für das jeweilige Teilsystem in Kapitel 9 konkret aufgezeigt.

5.5.2 Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt

Für die Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sind die spezifischen örtlichen Randbedingungen über eine Risikobetrachtung konkret zu analysieren. Dabei können Computermodelle helfen, die Wahrscheinlichkeit eines Versagens (z.B. Tragwerksmodelle linear, flächenbezogen oder FEM) oder dessen Konsequenzen (z.B. Verkehrssimulationen mit [7]) zu quantifizieren.

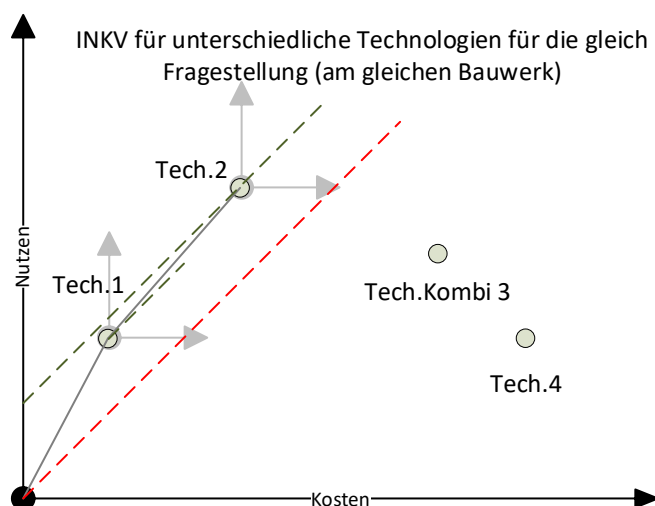


Abb. 5.14 Verfahren des Inkrementellen Nutzen-Kosten-Verhältnisses (INKV)

Für die Evaluation können anhand der quantifizierten Nutzen- und Kostenkenngrößen mit Hilfe von Optimierungsverfahren optimale Technologie-Varianten gefunden werden. Vorgeschlagen wird hierfür das klassische Verfahren des Inkrementellen Nutzen-Kosten-Verhältnisses (INKV). Dabei wird das Überwachungskonzept bzw. die Technologie mit dem grössten Nettonutzen durch die Einhüllende gewählt (vgl. Abb. 5.14, [4] und [8]).

Hintergrund der Bewertung ist der Wert der Information (vgl. Kapitel 5.1). Diesen Nutzen erhält man durch die Differenz zum Referenzszenario. Das Referenzszenario stellt die Massnahmenplanung am Objekt über einen definierten Betrachtungszeitraum (z.B. 20 oder 50 Jahre) unter der Verwendung der klassischen Überwachungstätigkeit, d.h. bei der Durchführung der im jeweiligen Jahresrhythmus (je nach Teilsystem 4-5 Jahre) durchgeführten Inspektionen bzw. Zustandserfassung, dar. Kommen durch die Verwendung neuer Technologien oder eines Monitorings einerseits zusätzliche Informationen hinzu oder wird andererseits eventuell auch der Rhythmus der Inspektionen bzw. Zustandserfassung in der Zukunft dadurch beeinflusst, ändern sich die Werte von Kosten und Nutzen im jeweiligen betrachteten Planungsszenario der Überwachung (resp. NTech-Szenario Xi). Damit können der Wert der Information und auch der Nutzen des Überwachungskonzept an einem Bauwerk mit den örtlichen Randbedingungen und vorhandenen Gefährdungen für einen Vergleich mit anderen Varianten ermittelt werden.

5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [1] Schiffmann, Frank; Büchel, Beda; Botzen, Matthias; Hajdin, Rade und Weninger-Vycudil (2017) Gutachten zum internationalen Vergleich des Zustands von Strassen. unveröffentlichtes Gutachten, Bundesanstalt für Strassen BAST, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI, Bonn.
- [2] Ackoff, R. L. (1989): From Data to Wisdom. In Journal of Applied Systems Analysis 16 (16), pp. 3–9.
- [3] Lükling, Jost; Herrmann, Thomas; Schindele, Nadine; Adey, Bryan Tyrone; Hajdin, Rade (2008): Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen. Schlussbericht VSS 2004/714. Strassen, Bundesamt für. Bern (Schriftenreihe, 1244).
- [4] van Linn, Andreas; Welte, Urs; Hajdin, Rade; Adey, Bryan (2009): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten; Effektivität und Effizienz von Massnahmen. AGB 2005/104. Bundesamt für Strassen AST-RA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB620).
- [5] Adey, Bryan; Hajdin, Rade; van Linn, Andreas; Welte, Urs (2009): Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten; Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten. AGB 2005/109. Bundesamt für Strassen ASTRA (Schriftenreihe Brückenforschung, FB625).
- [6] SN 641 820 (2019): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm. Swiss Code. Zürich: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) (SN 640 820).
- [7] ARE (2020) Nationales Personenverkehrsmodell NPVM 2017. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bern 2020.

-
- [8] Rafi, Ali; Hajdin, Rade; Welte, Urs (2005): Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE). Edited by Ve. Bern (Schriftenreihe, 1109).
-

6 Evaluierte Technologien und Datenquellen für die Überwachung im Überblick

6.1 Übersichtstabellen – Legende

Die evaluierten Technologien werden im Folgenden in einer Tabelle je nach möglichem Einsatz-/Verwendungszweck zusammengefasst dargestellt. Einzelne Technologien können auch an unterschiedlichen Orten mehrfach genannt werden, wenn sie für unterschiedliche Messziele einsetzbar sind.

Im Anschluss folgt in Kapitel 7 die jeweils detailliertere Tabellendarstellung der einzelnen Technologien mit einer ersten Übersichtseinstufung nach Nutzungen während der verschiedenen Life-Cycle-Phasen, in denen sie eingesetzt/eingebaut werden. Unabhängig davon soll der Fokus in allen Fällen auf die Phase Betrieb/Unterhalt gesetzt werden.

Die gelb hinterlegten Zellen erläutern im Sinn einer Datenlegende die jeweiligen Symbole oder erwarteten Feldinhalte.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Einstufung auf der Grundlage des Anwendungspotenzials jeder Technologie erfolgt und nicht auf der Grundlage des Ausmasses, in dem diese bereits eingesetzt wird. Dies entspricht dem Zweck dieses Dokuments, dessen Ziel es ist, den Ingenieur mit dem Potenzial der verfügbaren Überwachungstechnologien vertraut zu machen und ihre Anwendung zu fördern.

Tab. 6.6 Legende

Übergeordnete Gruppe	M - Umgebung/Lasten	Funktion	
Fragestellung	Kraft / Vibration	Einsatzzweck	
Basis der Technologie	Hyd / El.	Mess-Prinzip	
Gängige Bezeichnung der Technologien	Name	Technologie	
ID: 3 Buchstaben ohne Nummerierung	"ID"	Typ der Prüfung	
SHM / ZfP / ZaP	SHM	Kunstbauten	
Einsatz fachbezogen	SHM	Naturgefahren	
	SHM	Umwelt/Belastung	
	SHM	<--- bauwerks-bezogen	
	SHM	<--- bauwerks-bezogen	
Einsatz bauwerksbezogen	SHM	z.B. Abdichtung	Oberfläche
	SHM	Stahlkonst.	Oberbau
	SHM	Betonkonst.	
	SHM	Hohlkonst.	
	SHM	Verbundkon.	
	SHM	Mauerwerk	
	SHM	Vorspannung	Unterbau
	SHM	Kabel	
	SHM	Stütze/Pfeiler/Pylon	
	SHM	Verankerungen	
	SHM	Widerlager/Wand	Bauwerksnähe
	SHM	Fahrbahnübergänge	
Anwendung normal oder häufig in der angegebenen Phasen	SHM	Auflager	
	SHM	Stütz-/Leitmauer	Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt
	SHM	Vor Bauphase (V)	
	SHM	Während Bauph. (W)	
Verweis Detailbeschreibung	SHM	Gebrauchst.	nach Bauphase (N)
	SHM	Tragfähigk.	
Link zu den Detailbeschreibungen der einzelnen Technologien	SHM	Detaildaten (Links zu) Seite(n)	weitere Erläuterungen (Links zu) Quellenverzeichnis
	SHM	Detaildaten (Links zu) Seite(n)	

Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Auszug aus der Übersicht der evaluierten Technologien, worin im Sinne einer Lesehilfe ein konkretes Beispiel für die Anwendung dargestellt ist:

1. Relevantes Bauwerk / Bauwerksteil → z.B. Fahrbahnplatte in Beton
2. Spezifische Fragestellung → z.B. Durchbiegung der Fahrbahnplatte
3. Evaluierte Messtechnologien inkl. Bewertung für relevantes Bauwerksteil.
4. Weitere Informationen (Art der Prüfung, Lokalisation Messresultat, Anwendungen in anderen Fachbereichen, sinnvoller Einsatzzeitpunkt) zu jeder Technologie.

Tab. 6.7 Lesehilfe zur Übersicht der evaluierten Technologien

Zerstörungs- freie/arme Prüfmethoden		SHM - Antwortgrößen		SHM - Antwortgrößen		SHM - Umgebung/Lasten		Funktion	
Korrosion / Dicke / Hohlräume / Delaminationen	Rissbildung / Delamination / Materialeigenschaften	Schwingung	Dehnung	Riss	Verschiebung / Verformung / Durchbiegung	Kraft / Spannung	Verkehr	Umwelt	Einsatzzweck
Sonst.	Radio / Elektromagnetische	Akustische Methoden	Optische Method.	Beschleunigung	Geschwin.	Dyn. Verh.	FO	Wind	Mess-Prinzip
Chloridgehaltmessungen	Eddy Current Testing	Ultraschall	Digital Image Correlation	Force Balance Accelerometer	Strain gauges	Dynamic Analysis	Hyd. El.	Temperature	Technologie
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Mess-Prinzip
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	
CH ₂	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	RFID	Einsatz
CH _{2</}									

Tab. 6.8 Übersicht der evaluierten Technologien nach Einsatzzweck für Kunstbauten

Funktion		SHM - Umgebung/Lasten	
Einsatzzweck		Feuchtigkeit	
Mess-Prinzip		Wind	
Technologie		Verkehr	
Einsatz in Fachgebiet		Kraft / Spannung	
Querschnitts- themen		Hyd / El.	
		FO	
		Name	
		"ID"	
		SHM / ZIP / ZaP	
		Kunstbauten	
		Naturgefahren	
		Umwelt/Belastung	
		<--- bauwerks-bezogen	
Oberfläche		z.B. Abdichtungen	
Oberbau		Stahlkonst.	
		Beton	
		Holzkonst.	
		Verbundkon.	
		Mauerwerk	
Vorspannung			
Kabel			
Stütze/Pfeiler/Pylon			
Verankerungen			
Widerlager/Wand			
Fahrbahnübergänge			
Auflager			
Stütz-/Leitmauer			
Vor Bauphase (V)			
Während Bauph. (W)			
Gebrauchst.			
nach Bauphase (N)			
Detaildaten (Links zu) Seite(n)			

Tab. 6.8 Übersicht der evaluierten Technologien nach Einsatzzweck für Kunstbauten

Funktion					
Einsatzzweck					
Mess-Prinzip					
Technologie					
Name					
ID					
SHM / ZIP / Zap					
Kunstbauten					
Naturgefahren					
Umwelt/Belastung					
<--- bauwerks-bezogen					
z.B. Abdichtungen					
Stahlkonst.					
Beton					
Hohlzkonst.					
Verbundkon.					
Mauerwerk					
Vorspannung					
Kabel					
Stütze/Pfeiler/Pylon					
Verankerungen					
Widerlager/Wand					
Fahrbahnübergänge					
Auflager					
Stütz-/Leitmauer					
Vor Bauphase (V)					
Während Bauph. (W)					
Gebrauchst.					
nach Bauhpase (N)					
Tragfähigk.					
Detaildaten (Links zu) Seite(n)					

Tab. 6.8 Übersicht der evaluierten Technologien nach Einsatzzweck für Kunstbauten

Funktion		Zerstörungs- freie/arme Prüfmethoden	
Einsatzzweck		Korrosion / Dicke / Hohlräume / Delaminationen	
Mess-Prinzip		Rissbildung / Delamination / Materialeigenschaften	
Technologie		Radio / Elektromagnetische	
Einsatz in Fachgebiet		Sonst.	
Querschnitts- themen		Akustische Methoden	
		Optische Method.	
Oberfläche		Name	
Oberbau		"ID"	
Unterbau		SHM / ZfP / ZaP	
Bauwerksnähe		Kunstbauten	
Einsatz-/Durch- führungs-Zeitpunkt		Naturgefahren	
		Umwelt/Belastung	
		<--- bauwerks-bezogen	
		z.B. Abdichtungen	
		Stahlkonst.	
		Beton	
		Hohlzkonst.	
		Verbundkon.	
		Mauerwerk	
		Vorspannung	
		Kabel	
		Stütze/Pfeiler/Pylon	
		Verankerungen	
		Widerlager/Wand	
		Fahrbahnübergänge	
		Auflager	
		Stütz-/Leitmauer	
		Vor Bauphase (V)	
		Während Bauph. (W)	
		Gebrauchst.	
		nach Bauhpase (N)	
		Tragfähig.	
		Detaildaten (Links zu) Seite(n)	

6.2 Evaluierte Technologien – Übersicht in Bezug auf Bauteile

Die folgenden Grafiken zeigen die Spinnendiagramme für ausgewählte SHM- (siehe Abb. 6.15) bzw. ZfP-Methoden (Abb. 6.16).

Das Potenzial der SHM-Methoden liegt in erster Linie in ihrer Fähigkeit, während der gesamten Dauer ihrer Installation kontinuierlich Informationen zum Tragwerkszustand zu liefern. Die Informationen, die sie liefern, definieren in der Regel den globalen Zustand des Bauwerks. Zum Beispiel bieten Schwingungssensoren wertvolle Informationen über die globalen (verteilten) Steifigkeitseigenschaften und deren Veränderung über die Zeit und/oder unter wechselnden Lasten.

Andererseits bieten ZfP-Methoden eine detailliertere Bewertung auf lokaler Ebene und sind nützlich, um bestimmte Schadensbereiche (z. B. Delamination, Bewehrungskorrosion, Hohlräume, Abplatzungen, Feuchtigkeit) oder bestimmte Komponenten (z. B. Bewehrung, Baustahl, Kabel) zu untersuchen. Messungen der Dehnung (z. B. durch Dehnungsmessstreifen oder faseroptische Dehnungssensoren) können sowohl lokale als auch globale Zustands-Informationen liefern (z. B. dynamische Dehnungsmessungen). Der Vergleich bestehender Methoden wird in Kapitel 9 eingehender analysiert.

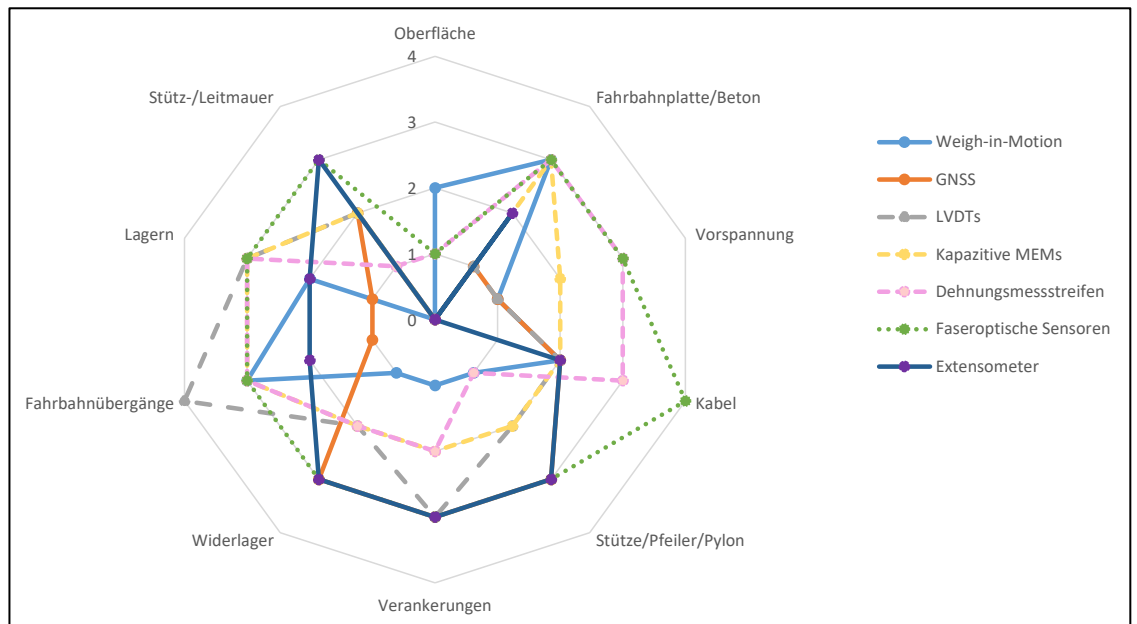


Abb. 6.15 Anwendung von ausgewählten SHM Technologien

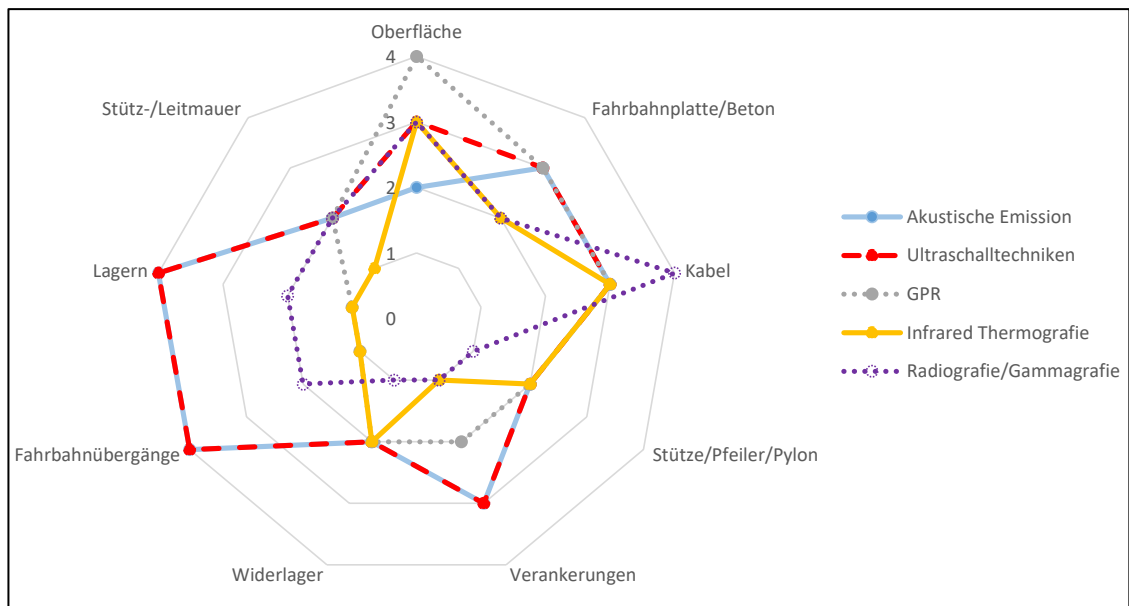


Abb. 6.16 Anwendung von ausgewählten ZfP Technologien

7 Bewährte Technologien

Die Beschreibung der verfügbaren Technologien auf dem Gebiet der Kunstbauten gliedert sich in drei Ebenen (Tab. 7.).

- Die erste Ebene ist die Funktionsweise und unterscheidet Methoden des Structural Health Monitoring (SHM) oder um zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP) handelt. Der Hauptunterschied zwischen ZfP- und SHM-Verfahren liegt in der Grössenordnung der übermittelten Informationen in Bezug auf den Zustand der Bauwerke. Die zerstörungsfreie Prüfung kann eine gezieltere Offenlegung lokaler Schadensphänomene bieten, während sich die SHM-Informationen in der Regel auf globale Grössen beziehen, insbesondere wenn es sich um schwingungsbasierte SHM handelt. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zwischen SHM- und ZfP-Methoden ist die Häufigkeit der Datenerfassung, die bei ZfP-Verfahren periodisch - oder bei Bedarf - erfolgt, während sie bei SHM längerfristig und kontinuierlich durchgeführt wird.
- Die zweite Ebene der Kategorisierung der aufgelisteten Technologien bezieht sich auf ihren Zweck, d. h. die Messgrösse. An dieser Stelle wird auch zwischen Methoden unterschieden, die auf Belastungen, Umwelteinflüsse, verschiedene strukturelle Eigenschaften sowie Defekte unterschiedlicher Art abzielen.
- Die dritte Ebene der Kategorisierung bezieht sich auf das Mess-Prinzip (z. B. Radar/Laser oder schwingungsbasiert), welches die verschiedenen Instrumente definiert.

Der Inhalt ist daher in die folgenden Hauptkategorien gegliedert.

Tab. 7.9 Kategorisierung von Überwachungstechnologien für Kunstbauten

A SHM - Umgebung/Lasten	A1 Naturgefahren
	A2 Umgebungsauswirkungen
	A3 Verkehrsbelastung
	A4 Kraft / Spannung
B SHM – Antwortgrössen	B1 Verschiebung / Verformung / Durchbiegung
	B2 Rissmonitore
	B3 Dehnungen
	B4 Schwingung – Dynamische Verschiebung
	B5 Schwingung – Geschwindigkeit
	B6 Schwingung – Beschleunigung
C Zerstörungsfreie/ Zerstörungsarme Prüfmethoden	C1 Optische Methoden
	C2 Akustische Methoden
	C3 Radar / Elektromagnetische Methoden
	C4 Sonstige

Tab. 7.10 Kategorisierung der Überwachungstechnologien nach ihrer Funktion, Einsatzzweck und dem Messprinzip.

Funktion	Einsatzzweck	Mess-Prinzip	Technologie		
			Name	"ID"	SHM / ZfP / ZaP
SHM - Umgebung/Lasten	Umgebung		Temperatur	<i>TMP_</i>	SHM
			Feuchtigkeit	<i>FHT_</i>	SHM
	Wind		Wetterstation	<i>WTS_</i>	SHM
			Anemometer	<i>ANM_</i>	SHM
	Verkehr		Weigh-in-Motion	<i>WIM_</i>	SHM
			Wiegesysteme	<i>WGS_</i>	SHM
	Kraft / Spannung	Hyd / El.	Kraftmessdosen	<i>KMS_</i>	SHM
			Kapazitive Drucksensoren	<i>DSK_</i>	SHM
			Piezoelektrische Drucksensoren	<i>DSP_</i>	SHM
		FO	Faseroptische Drucksensoren	<i>DSF_</i>	SHM
SHM - Antwortgrößen	Verschiebung / Verformung / Durchbiegung	kontaktlos	Sat. Radarinterferometrie	<i>SRL_</i>	SHM
			Tachymeter	<i>TAC_</i>	SHM
			Nivellement	<i>NIV_</i>	SHM
			laserbasierte Sensoren	<i>LAS_</i>	SHM
			terrestrische Radarinterferometrie	<i>TRL_</i>	SHM
			GNSS	<i>GPS_</i>	SHM
		kontakt	LVDTs	<i>LVD_</i>	SHM
			Extensometer	<i>EXT_</i>	SHM
			Inklinometer	<i>INK_</i>	SHM
SHM - Antwortgrößen	Riss.		Fugenmesser	<i>FUG_</i>	SHM
	Dehnung	El.	Dehnungsmessstreifen	<i>DMS_</i>	SHM
		FO	Faseroptische Sensoren	<i>FOS_</i>	SHM
	Schwingung	Dyn Versch.	laserbasierte Sensoren	<i>LAS_</i>	SHM
			terrestrische Radarinterferometrie	<i>RAD_</i>	SHM
		Gesc hwin.	Geophon/Seismometer	<i>GPH_</i>	SHM
			Gyroskope	<i>GYR_</i>	SHM
		Beschleunigung	Force Balance Accelerometer	<i>FBA_</i>	SHM
			Piezoresistiv	<i>PZT_</i>	SHM
			Kapazitive MEMs	<i>MEM_</i>	SHM
Zerstörungs- freie/arme Prüfmethoden	Rissbildung / Delamination / Materialeigenschaften	Optische Methoden	Endoskopie	<i>END_</i>	ZaP
			Mikroskopie	<i>MIK_</i>	ZaP
			DIC	<i>DIC_</i>	ZfP
		Akustische Methoden	Akustische Emission	<i>AEM_</i>	ZfP
			Impulsantwort	<i>IMP_</i>	ZfP
			Impact-Echo	<i>ECH_</i>	ZfP
			Ultraschalltechniken	<i>UTS_</i>	ZfP
	Korrosion / Dicke / Hohlräume / Delaminationen	Radio / Elektromagnetische	Radiografie/Gammagrafie	<i>RDG_</i>	ZfP
			Computertomographie	<i>CTM_</i>	ZfP
			GPR	<i>GPR_</i>	ZfP
			Eddy Current Testing	<i>ECT_</i>	ZfP
			Magnetflussverfahren	<i>MFL_</i>	ZfP
			Widerstandsmessverfahren	<i>WSM_</i>	ZfP
			Potentialfeldmessung	<i>ELP_</i>	ZfP
			Infrared Thermografie	<i>IRT_</i>	ZfP
		Sonst.	Sklerometrie	<i>SKL_</i>	ZfP
			Chloridgehaltmessungen	<i>CHL_</i>	ZP

A SHM - Umgebung/Lasten

A 1 Naturgefahren

Naturgefahren sind in der Regel keine direkt messbaren Grössen. In diesem Kapitel führen wir die wichtigsten Gefahren im Zusammenhang mit Kunstbauten auf und schlagen Möglichkeiten zur Messung ihrer Auswirkungen vor. Einige Beispiele werden zur Veranschaulichung erläutert, jedoch wird die Überwachung von Naturgefahren mit den Technologien verknüpft, die in den weiteren Kapiteln dieses Berichts aufgeführt und beschrieben werden.

7.1 Meteorologische Naturgefahren

Zu dieser Gefahrenkategorie gehören Hagelstürme, Orkane, Blitze, Schneefall, Frost und Tornados. Für die Überwachung der mit diesen Ereignissen verbundenen Lasten müssen in der Regel Technologien zur Überwachung von Starkwindeffekten eingesetzt werden, wie sie in den Abschnitten 7.9 (Wetterstation) und 7.10 (Anemometer) dieses Berichts beschrieben werden.

7.2 Gravitative Naturgefahren

Zu dieser Gefahrenkategorie gehören geologische Massenbewegungen, wie Rutschungen und Sturzprozesse (Stein- und Blockschlag bis Fels- und Bergstürze sowie Einsturzphänomene), aber auch alle Formen von Schnee- und Eislawinen. Geländeverschiebungen in Fels oder Boden sind oft nicht leicht zu quantifizieren. Um das Verhalten solcher instabilen Gebiete oder Landbewegungen zu überwachen, können Fernerkundungsmethoden eingesetzt werden, wie zum Beispiel die satellitengestützte Radarinterferometrie, oder die terrestrische Interferometrie, die in den Kapiteln 7.17 und 7.22 dieses Berichts beschrieben wird. Weitere Optionen sind geodätische Vermessungen (Kap. 7.18, 7.19), optische Methoden (Kap. 7.39). Für Messungen vor Ort kommen lokale Verschiebungsmessungen über Risse und Fugen sowie Neigungsmessungen zum Einsatz (Kap. 7.25 bis 7.27) oder GNSS-Systeme zum Einsatz (Kap. 7.23).

In einer Anwendung, die sich auf die Überwachung von Schneedeckenverschiebungen konzentriert, beschreiben Caduff et al. [11] den Einsatz der terrestrischen Interferometrie zur Überwachung von Schneedeckenverschiebungen. Als Testgelände diente der Dorfberghang in Davos, Schweiz, der im März 2014 kontinuierlich gemessen wurde. Die Sichtlinienverschiebung wurde mit einer räumlichen Auflösung im Millimeter- bis Zentimeterbereich und einer zeitlichen Auflösung von bis zu einer Minute unabhängig von der Sichtweite ermittelt. Die Auslösung einer kleinen Gleitschneelawine wurde nach 50 cm Gesamtverschiebung beobachtet.

7.3 Hochwasser

Die Gefahr von Hochwasser kann unter anderem durch Messungen des Wasserstandes beurteilt werden. Für eine solche Messaufgabe gibt es heute eine Reihe von Sensoren. Eine Klasse dieser Sensoren nutzt den Druck, der auf einem dünnen Wafersensor aufgebaut wird, um die Wassertiefe oder sogar den Luftdruck zu messen [9]. Weitere Möglichkeiten um Wasserstände zu messen sind das sogenannte Pegelradar und Laserdistanzmessungen (Kap. 7.21). Um die Gefahr von Hochwasser zu überwachen kommen weiter Geophone, Bewegungsradar (Dopplerradar) und Reissleinen zum Einsatz.

Um das Hochwasserrisiko im Voraus zu bestimmen, ist die Modellierung von potentiellen Hochwasserereignissen ein wichtiges Instrument. Dazu sind hochpräzise Höhenmessungen mit Hilfe von Lidar, photogrammetrischer Bildanalyse oder Radarinterferometrie nützliche Messsysteme.

7.4 Brückenkolkbildung

Überschwemmungen können hydrodynamische Druckbelastungen hervorrufen, die durch erhöhte Wasserstände auf Brücken einwirken und die Seitenstabilität beeinträchtigen können. Häufiger führt Hochwasser zu einer Kolkbildung bei den Fundamenten, ein Begriff der das Abschwemmen des Bodens um die Brückenfundamente durch hydraulische Einwirkungen beschreibt. Kolkbildung ist weltweit die Hauptursache für den Einsturz von Brücken, deren Fundamente in Wasserstrassen liegen, da sie die Steifigkeit und Kapazität der Fundamente verringert und zu plötzlichem Versagen führen kann [10]. Dieses Phänomen kann sich auch bei Stützmauern manifestieren, die im Wasser stehen und dem Wasserangriff entlang der Fliessrichtung ausgesetzt sind.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Überwachungsverfahren vorgeschlagen, die in der Lage sind, die Tiefe eines Kolklochs in der Nähe der Fundamente, bei denen das Gefährdungsbild relevant ist, zu überwachen. Tab. 7.11 skizziert die Art, die betrieblichen Vor- und Nachteile einer Reihe dieser Systemtypen und zeigt auf, dass keine Technologie die Kolkbildung weiträumig und zuverlässig erkennt.

Tab. 7.11 Kolk- Messgeräte und Methoden in Anlehnung an [10]

System	Modus operandi	Vorteile	Nachteile
Georadar (GPR)	Bestimmt die Wasser-Sediment-Grenzfläche mittels Radar; manuell betrieben	Liefert klare unterirdische Merkmale aus Hochfrequenz-Radarsignalen	Erfordert manuelle Bedienung und eignet sich daher nicht gut für die Fernüberwachung
Schwingungsbasierte Sensoren	Dynamische Dehnungssensoren messen Änderungen der Eigenfrequenzen von angetriebenen Stäben aufgrund von Kolkbildung	Gibt Hinweise auf die Kolkentiefe durch Anpassung des Bettungsmoduls an das numerische Referenzmodell des Systems	Erfasst nur Kolke in der Nähe der Sensoren und kann globale Kolkeffekte übersehen
FBG wasserquellbare Polymere	Wasserquellbare Polymere quellen bei Kontakt mit Wasser auf (aufgeschwemmter Boden) und FBG-Sensoren erkennen die entstehende Spannung	Die Angabe entlang einer Stange ermöglicht die Überwachung der Kolkentiefe an diskreten Punkten	Erfordert den Einsatz mehrerer Sensoren, da er nur Kolke in der Nähe der einzelnen Sensoren erkennen kann.
Ultraschall-Fathometer	Wird am Brückenelement oberhalb der Wasserlinie befestigt; misst die Wasser-Sediment-Grenzfläche	Misst kontinuierlich den Kolk vor Ort am Element	Kann durch mitgerissene Luft in turbulenter Strömung beeinträchtigt werden
Erschütterungs-basierte Methoden (Kapitel B6)	Die Überwachung von Erschütterungen um mögliche Steifigkeitsverluste im Zusammenhang mit Kolkbildung zu erkennen	Kontinuierliche Überwachungsmöglichkeit, die eine kostengünstige Alternative zu den präziseren, aber kostspieligen zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) darstellt.	Unpräzise und indirekte Messung

7.5 Erdbeben

Die Erdbebenüberwachung kann durch den Einsatz von Schwingungsmessgeräten erfolgen, die wir in den Kapiteln B5 und B6 näher beschreiben. Die Überwachung von Bodenbewegungen erfolgt in der Regel mit Geophonen oder Seismometern, die auf der

Aufnahme von Geschwindigkeitsmessungen beruhen. Im Zusammenhang mit dem Bauwerkszustand von Kunstbauten ist es jedoch sinnvoll, die Schwingungen des Tragwerks mit Beschleunigungsmessern ebenfalls zu überwachen, um mögliche Schäden aufzudecken. Dies wird durch die Berechnung entsprechender schwingungsbasierter Schadensindikatoren vorgenommen, die Informationen über die Steifigkeitsreduktion, die die Nichtlinearität bei zyklischer Belastung und den Zustand des Tragwerks liefern [12].

7.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [9] INMTN; Water & Weather Monitoring Systems, <https://www.inmtn.com/>, Zugriff am 06.09.2022

- [10] L.J. Prendergast, M.P. Limongelli, N. Ademovic, A. Anžlin, K. Gavin and M. Zanini, Structural Health Monitoring for Performance Assessment of Bridges under Flooding and Seismic Actions, *Structural Engineering International*, 28:3, 296-307, 2018.

- [11] R. Caduff, A. Wiesmann, Y. Bühler and C. Pielmeier, Continuous monitoring of snowpack displacement at high spatial and temporal resolution with terrestrial radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 42: 813–820, 2015.

- [12] Y. Reuland, P. Martakis, E. Chatzi. A Comparative Study of Damage-Sensitive Features for Rapid Data-Driven Seismic Structural Health Monitoring. *Applied Sciences*. 2023; 13(4):2708.

A 2 Umgebungsauswirkungen

7.7 Temperatur

Tab. 7.12 Temperatur - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Temperatur					
Kurzbeschreibung		Die Berücksichtigung von Temperaturschwankungen ist ein wichtiger, aber oft übersehener Aspekt der Überwachung des Gesundheitszustands von Brücken (Structural Health Monitoring, SHM).					
Überwachungstechnologie		Thermoelemente	Thermistoren	Widerstands-Temperaturdetektoren	Fasergittersensoren	Interferometer-Sensoren	Verteilte faseroptische Sensoren
"ID"		TM1_	TM2_	TM_3	TM_4	TM_5	TM_6
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/ph	6 faseroptisch/ph	6 faseroptisch/ph
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug						
	f. Zustand	2 zerstörungsarm	2 zerstörungsarm	2 zerstörungsarm	4 hybrid	4 hybrid	4 hybrid
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Temperatur					
	Messungsbereich	-200 bis 650°C	-100 bis 325°C	-200 bis 1750°C	-200 bis 300°C	-200 bis 300°C	-200 bis 300°C
	Auflösung				0.1m	0.1m	1m
	Genauigkeit	0,1 bis 1°C	0,05 bis 1,5°C	0,5 bis 5°C	0.1°C	0.1°C	0,1 bis 0,2°C
	Bemerkungen						
Kunstbauten		3	3	2	3	2	3
Naturgefahren		0	0	0	2	2	3
Umwelt		4	4	3	2	2	4
Einsatzzeitpunkt		W-N	W-N	W-N	V-N	V-N	V-N
Entwicklungsstand		●	●	●	◐	◐	◐
Kosten	initial / einmalig	◐	◐	◐	◐	◐	●
	wiederkehrend	◐	◐	◐	◐	◐	◐

7.7.1 Beschrieb der Technologie

7.7.1.1 Elektrische Sensoren

Thermoelemente

Thermoelemente sind Temperatursensoren, die aus einer elektrischen Verbindung zweier ungleicher Metalle bestehen. Bei Temperaturänderungen erzeugt das System eine Spannung, die durch den Seebeck-Effekt [30] direkt mit dem Temperaturunterschied zu einer Vergleichsstelle korreliert ist. Es gibt viele Arten von Thermoelementen, wie in der Norm IEC60584-1:2013 beschrieben, wobei die Kombination der verwendeten Metalle die Eigenschaften und die Kalibrierung des Sensors bestimmt. Thermoelemente werden dank ihrer relativ geringen Kosten und schnellen Ansprechzeiten in vielen technischen Anwendungen eingesetzt.

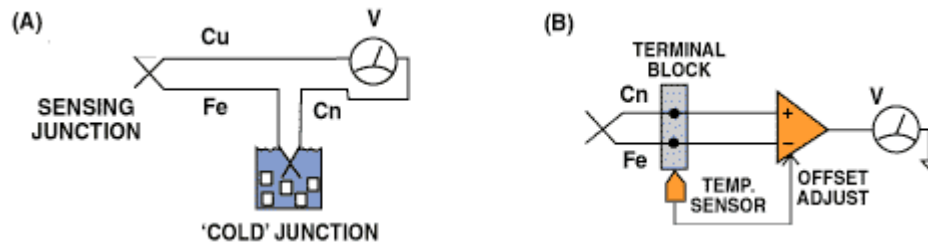


Abb. 7.17 Schema eines traditionellen Thermoelementaufbaus in (A). Moderne Thermoelemente verwenden einen zusätzlichen Temperatursensor, um das durch die Verbindung der beiden Metalle mit dem Messgerät verursachte Rauschen auszugleichen, wie in (B) dargestellt. Angepasst von [13].

Thermistoren

Thermistoren sind Temperatursensoren, die aus einem gesinterten Halbleitermaterial bestehen, dessen Widerstand sich bei geringen Temperaturschwankungen deutlich ändert. Die Temperaturkoeffizienten von Thermistoren sind in der Regel negativ, d. h. ihr Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab. Thermistoren gibt es in einer Vielzahl verschiedener Gehäuse, die unterschiedliche Sensoreigenschaften ermöglichen. Aufgrund ihrer stark nichtlinearen Beziehung zwischen Widerstand und Temperatur sind Thermistoren schwer zu kalibrieren. Mit den richtigen Kalibrierungsgleichungen sind diese Sensoren jedoch zu einer hohen Genauigkeit fähig [14]. Kürzlich wurden Thermistoren auf Graphenbasis [15] für Anwendungen vorgeschlagen, die flexible und dehnbare Temperatursensoren erfordern, die gegenüber grossen Verformungen robust sind [16].

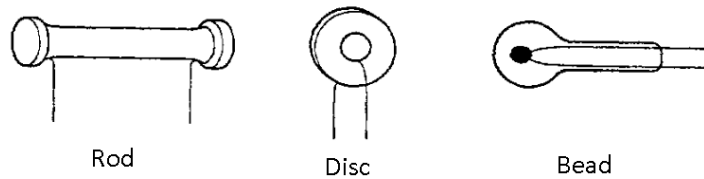


Abb. 7.18 Drei verschiedene Arten von Thermistorkonfigurationen. Angepasst von [17]

Widerstands-Temperaturdetektoren

Widerstandstemperaturfühler (RTD) werden aus Drahtwicklungen oder Dünnsfilm-Spulen hergestellt. Sie bestehen häufig aus Platindraht, der um einen Keramikern gewickelt ist. Diese Sensoren messen die Veränderungen des elektrischen Widerstands, die in der Regel linear mit Temperaturschwankungen korrelieren. RTD-Sensoren zeichnen sich durch hohe Genauigkeit und Langzeitstabilität aus, sind aber teurer als andere Widerstands- oder spannungsbasierte Temperatursensoren.

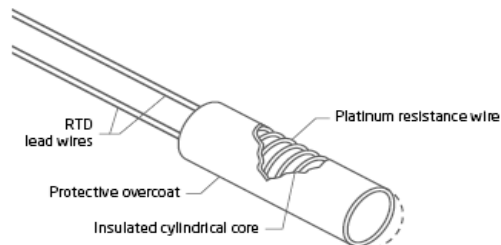


Abb. 7.19 RTD-Sensor aus Platindrähten, die um einen Keramikern gewickelt sind. Quelle: www.prelectronics.com

RTDs werden meist in Verbindung mit einer Wheatstone-Brückenschaltung¹ verwendet, um Fehler zu vermeiden, die durch die Selbsterhitzung der Drähte entstehen.

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge

7.7.1.2 Temperaturmessung mit Hilfe von Glasfasertechnik

Sensoren auf der Grundlage von Lichtwellenleitern funktionieren durch die Messung von Veränderungen der Eigenschaften des über eine Faser übertragenen Lichts. Temperaturschwankungen in der Faser spiegeln sich im Inhalt des übertragenen Lichtsignals wider. Mittels kalibrierter Glasfasern können diese Schwankungen gemessen werden. Man kann zwischen drei Arten von faseroptischen Temperaturmessverfahren unterscheiden: Gittersensoren, Interferometer Sensoren und verteilte Sensoren [19]. Sensoren, die auf Glasfasern basieren, haben mehrere Vorteile gegenüber Sensoren, die auf elektrischen Signalen beruhen: Sie haben ein geringeres Gewicht und sind kompakt; sie können sich an verschiedene Geometrien anpassen, sind unempfindlich gegenüber elektromagnetischen Störungen und robust [20].

Fasergittersensoren

Gittersensoren funktionieren, indem sie eine periodische Störung des Brechungsindex des Kerns entlang eines Abschnitts einer Faser erzeugen und messen. Diese Störungen führen dazu, dass bestimmte Wellenlängen des übertragenen Lichts reflektiert werden, während der Rest des Signals übertragen wird. Temperaturschwankungen verändern die effektive Periode des Gittermechanismus, was sich folglich im übertragenen und gemessenen Signal widerspiegelt. Für die Temperaturmessung werden hauptsächlich zwei Arten von Gittermechanismen verwendet: Faser-Bragg-Gitter (FBG) und Langperioden-Fasergitter (LPFG). Der Hauptunterschied zwischen den beiden Systemen in Bezug auf die Funktionalität ist die Periode der Störung (Λ_B): bei FBG-Sensoren ist die Periode typischerweise kleiner als $1\text{ }\mu\text{m}$, während sie bei LPFG-Sensoren typischerweise grösser als $100\text{ }\mu\text{m}$ ist [19]. Dies führt dazu, dass LPFG-Sensoren länger und räumlich weniger genau sind als FBG-Sensoren. Gittersensoren sind halbdiskrete faseroptische Sensoren.

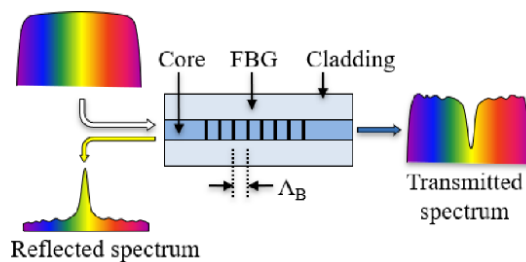


Abb. 7.20 Veranschaulichung des Faser-Bragg-Gitter-Mechanismus, der zur Messung der Temperatur einer optischen Faser verwendet werden kann. Angepasst von [19]

Interferometer-Sensoren

Faseroptische Interferometer messen Veränderungen in den Interferenzmustern zwischen zwei kohärenten Lichtstrahlen, die sich auf zwei verschiedenen Wegen bewegen. Der gebräuchlichste Interferometertyp für Temperaturmessungen ist das Fabry-Perot-Interferometer (FPI). Dieser Sensor misst Störungen der Phasendifferenz zwischen zwei Paaren von reflektierten und transmittierten Lichtstrahlen. Diese Störungen entstehen durch Veränderungen des optischen Weges, die durch Dehnungen oder Temperaturschwankungen verursacht werden. Zur Erzeugung der interferierenden Strahlenpaare werden zwei Reflektorflächen verwendet. Ein Nachteil der FPI ist, dass die Reflektoren gut ausgerichtet sein müssen, was eine sorgfältige und damit aufwändige Installation erfordert. Ausserdem wird die Temperatur im Gegensatz zu anderen faseroptischen Temperaturmessverfahren an einem bestimmten Punkt gemessen.

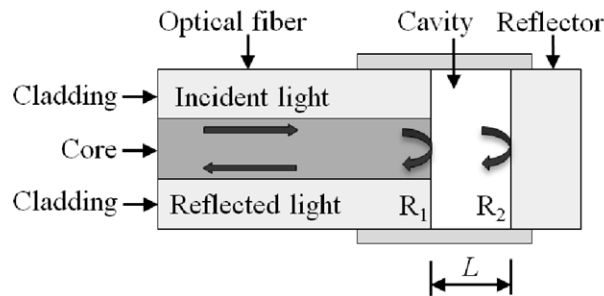


Abb. 7.21 Schematische Darstellung eines Fabry-Perot-Interferometers. Adaptiert von [19]

Verteilte faseroptische Sensoren

Verteilte Temperatursensoren (DSS) nutzen die Streueigenschaften von Licht, das ein Medium durchläuft. Streusignale entstehen, wenn Photonen mit den Atomen der Faser, die das Licht transportiert, in Wechselwirkung treten, und hängen von äusseren Faktoren ab, die auf die Faser einwirken, wie z. B. der Temperatur. Durch die Auswertung dieser Streusignale und ihrer spektralen Eigenschaften lassen sich Temperaturveränderungen entlang der Faser feststellen [21]. Es gibt mehrere Arten der Streuung, die für Messzwecke eingesetzt werden: Rayleigh, Raman und Brillouin [22]. Verteilte Sensoren erfordern keine zusätzlichen Änderungen an einer Faser, was zu niedrigen Kosten führt und ausserdem die Möglichkeit bietet, an jedem Punkt der Faser zu messen. Der grösste Nachteil dieser Methode ist die relativ geringe räumliche Auflösung im Vergleich zu anderen Sensortechnologien. Je nach Art der verwendeten Streuung und der Länge der Faser kann eine hohe räumliche Auflösung erreicht werden. Eine höhere Auflösung erfordert jedoch fortschrittliche und derzeit hochpreisige Aufnahmegeräte.

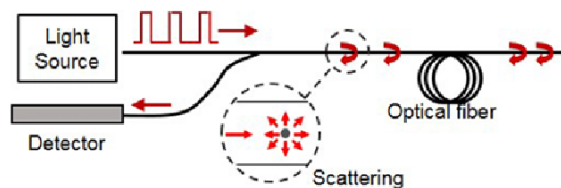


Abb. 7.22 Illustration eines verteilten faseroptischen Sensorsystems, aus [25]

7.7.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Berücksichtigung von Temperaturschwankungen ist ein wichtiger, aber oft übersehener Aspekt der Überwachung von Kunstbauten. In der Tat werden insbesondere Brücken durch tägliche Temperaturschwankungen oft ähnlich stark belastet wie durch wiederkehrende Verkehrslasten beeinflusst [27]. Dies gilt insbesondere für Stahlbrücken und im Allgemeinen für Brücken, die sich in kalten Umgebungen befinden und grossen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind [28].

Datengesteuerte Methoden zur Tragwerksüberwachung, die später als Teil des AP2 Berichts erörtert werden, hängen stark von der genauen Beobachtung der Umwelteinflüsse und insbesondere der Temperatur ab. Das liegt daran, dass sich datengesteuerte Methoden auf die relativen Veränderungen zwischen erfassten Signalen stützen, die naturgemäss anfällig für Einflüsse durch Veränderungen der Umwelt- und Betriebsbedingungen sind [29]. Die meisten der in diesem Abschnitt vorgestellten Technologien zur Temperaturerfassung können für die Brückenüberwachung eingesetzt werden, jedoch sind verteilte faseroptische Methoden zu bevorzugen, wenn die Verteilung der Temperatur über das Tragwerk wichtig ist, oder mit starkem Temperaturgefälle gerechnet wird. Mit dezentralen Messmethoden können Ingenieure Daten an zahlreichen Stellen erfassen und so einen Einblick in die Auswirkungen thermisch bedingter Spannungen auf eine Brücke gewinnen. Der Alterungsprozess und die Eigenschaften von Betonkonstruktionen werden erheblich von der Temperatur beeinflusst, sind aber aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit von Beton schwer zu quantifizieren. Verteilte Temperatursensoren würden diese Quantifizierung erleichtern [31]. Eine weitere attraktive

Möglichkeit zur verteilten Temperaturerfassung könnten drahtlose Netze aus kostengünstigen integrierten intelligenten elektronischen Sensoren sein.

Im Hinblick auf die in Kapitel 2 beschriebenen Kunstbauten spielt die Temperatur eine wichtige Rolle für die Verformungen der Fahrbahnplatte, insbesondere bei Sonderbauwerkteilen wie Lagern und Fahrbahnübergängen sowie bei Kabeln. Während Temperatureinflüsse auf alle Baumaterialien einwirken, sind die Verteilungen des Temperaturgradienten bei Verbundkonstruktionen komplexer und die thermisch bedingten Spannungen und Verformungen können bei solchen Konstruktionen bedeutender sein.

Temperaturmessungen sind auch wichtig, um den Einfluss von Temperaturschwankungen auf das Tragwerkverhalten zu ermitteln. Bei dauerhafter Bauwerksüberwachung (SHM) verhindert dies Fehlalarme.

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Die Bedeutung von Temperaturmessungen im Hinblick auf Umwelteinflüsse ist offensichtlich. Auch im Zusammenhang mit der Überwachung des Einflusses des Klimawandels auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken und deren abnehmende Leistungsfähigkeit durch langsam fortschreitende Schäden, wie z. B. durch Ermüdung sind Temperaturmessungen notwendig.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Die Überwachung der Temperatur ist eine notwendige Information im Zusammenhang mit Landbewegungen (Erdrutsche, Lawinen).

7.7.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die folgenden Tabellen fassen die Eigenschaften der zuvor erwähnten Optionen zur Temperaturmessung zusammen. Der Vergleich ist aufgeteilt in zwei Hauptkategorien, nämlich elektrische Messtechnologien in Tab. 7.13 und faseroptische Messtechnologien in Tab. 7.14.

Tab. 7.13 Vergleich der elektrischen Temperaturerfassungstechnologien [26]

Sensor-Typ	RTD	Thermistor	Thermoelement
Temperaturbereich	–200 bis 650 °C	–100 bis 325 °C	–200 bis 1750 °C
Messgenauigkeit	0,1 bis 1 °C	0,05 bis 1,5 °C	0,5 bis 5 °C
Langzeitstabilität bei 100°C	0,05 °C/Jahr	0,2 °C/Jahr	Variabel
Linearität	Ziemlich linear	Exponentiell	Nichtlinear
Erforderliche Leistung	Konstante Spannung oder Strom	Konstante Spannung oder Strom	Eigenstromversorgung
Reaktionszeit	Im Allgemeinen langsam (1 bis 50 s)	Schnell (0,12 bis 10 s)	Schnell (0,10 bis 10 s)
Anfälligkeit für elektrisches Rauschen	Selten empfindlich	Selten anfällig / Nur hohe Resistenz	Empfindlich / Kaltstellenkompensation

Tab. 7.14 Vergleich der faseroptischen Technologien zur Temperaturmessung [26]

Sensor-Typ	Fasergittersensor	Interferometer	Verteilt
Temperaturbereich	–200 bis 300 °C		
Räumliche Verteilung	Semidiskret	Diskret	Verteilt
Messgenauigkeit	0,1 °C	0,1 °C	0,1 bis 0,2 °C
Räumliche Auflösung	0,1 m	0,1 m	1 m
Eigenschaften	-Linearität -Genauigkeit -Hohe Auflösung	-Hohe Empfindlichkeit -Genauigkeit	-Unendliche Messpunkte -Glasfaser integriert

7.7.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Während Fasergitter (FBG)- und Interferometer (FPI)-Sensoren in diesem Stadium ausgereifte Technologien sind, befindet sich die verteilte faseroptische Sensorik noch in der Entwicklungsphase. Es ist jedoch zu erwarten, dass sie sich zu einer Schlüsseltechnologie für die Überwachung des Zustands von Bauwerken entwickeln wird [23]. Darüber hinaus haben die jüngsten Fortschritte in der Signalverarbeitung und im maschinellen Lernen das Potenzial, die räumliche Auflösung und Genauigkeit dieser Technologie erheblich zu verbessern [24]. Verteilte faseroptische Sensoren sind für Kunstbauten besonders wichtig, da diese Sensoren gut geeignet sind, grosse Entfernungen zu überbrücken, wie mehrere aktuelle Projekte zeigen [23].

7.7.5 Ausschreibungsanforderungen

Als Basis für die zu definierenden Anforderungen an die Ausschreibung dient ein objektspezifisches Messkonzept (siehe Kapitel 2.2), welches die spezifischen Gegebenheiten des Objekts entweder für Kunstbauten oder Naturgefahren berücksichtigt.

Mit Berücksichtigung dieser aufgeführten Themen können zusammen mit den vorgängig unter Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und -genauigkeit die entsprechenden Ausschreibungsanforderungen spezifisch vervollständigt werden. Ein Beispiel für detaillierte Spezifikationen zu einer häufig verwendeten Überwachungstechnologie, nämlich Dehnungsmessungen, wird in den Kapiteln 7.28 und 7.29 geliefert.

Für Temperaturmessungen müssen die Anforderungen an Messintervalle, Präzision und Reaktionszeit definiert werden. Zusätzlich sollte zwischen Umgebungstemperatur und Temperatur des Bauwerks unterschieden werden.

7.7.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [13] E. Ramsden, 'Temperature Measurement', Fierce Electronics, Sep. 01, 2000.
<https://www.fierceelectronics.com/components/temperature-measurement> (accessed May 04, 2022).
- [14] G. Liu, L. Guo, C. Liu, und Q. Wu, 'Evaluation of different calibration equations for NTC thermistor applied to high-precision temperature measurement', Measurement, vol. 120, pp. 21-27, May 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.02.007.
- [15] C. Yan, J. Wang, und P. S. Lee, 'Stretchable Graphene Thermistor with Tuneable Thermal Index', ACS Nano, vol. 9, no. 2, pp. 2130-2137, Feb. 2015, doi: 10.1021/nn507441c.
- [16] B. Arman Kuzubasoglu und S. Kursun Bahadir, 'Flexible temperature sensors: A review', Sens. Actuators Phys., vol. 315, p. 112282, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112282.
- [17] J. P. Bentley, 'Temperature sensor characteristics and measurement system design', J. Phys. [E], vol. 17, no. 6, pp. 430-439, Jun. 1984, doi: 10.1088/0022-3735/17/6/002.
- [18] 'What temperature probe is better for you? | Omega Engineering'.
<https://www.omega.co.uk/temperature/z/thermocouple-rtd.html> (accessed May 04, 2022).
- [19] Y. Bao, Y. Huang, M. Hoehler, und G. Chen, 'Review of Fiber Optic Sensors for Structural Fire Engineering', Sensors, vol. 19, no. 4, p. 877, Feb. 2019, doi: 10.3390/s19040877.
- [20] J.-N. Wang und J.-L. Tang, 'Feasibility of Fiber Bragg Grating and Long-Period Fiber Grating Sensors under Different Environmental Conditions', Sensors, vol. 10, no. 11, pp. 10105-10127, Nov. 2010, doi: 10.3390/s101110105.
- [21] A. Ukil, H. Braendle, und P. Krippner, 'Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications', IEEE Sens. J., vol. 12, no. 5, pp. 885-892, May 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2162060.
- [22] X. Bao und L. Chen, 'Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors', Sensors, vol. 12, no. 7, pp. 8601-8639, Jun. 2012, doi: 10.3390/s120708601.
- [23] M. F. Bado und J. R. Casas, 'A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring', Sensors, vol. 21, no. 5, p. 1818, Mar. 2021, doi: 10.3390/s21051818.
- [24] A. Venketeswaran et al., 'Recent Advances in Machine Learning for Fiber Optic Sensor Applications', Adv. Intell. Syst., vol. 4, no. 1, p. 2100067, 2022, doi: 10.1002/aisy.202100067.
- [25] H.-E. Joe, H. Yun, S.-H. Jo, M. B. G. Jun, und B.-K. Min, 'A review on optical fiber sensors for environmental monitoring', Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol., vol. 5, no. 1, pp. 173-191, Jan. 2018, doi: 10.1007/s40684-018-0017-6.

-
- [26] H. Guo, G. Xiao, N. Mrad, und J. Yao, Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms, *Sensors*, vol. 11, no. 4, pp. 3687-3705, Mar. 2011, doi: 10.3390/s110403687.
-
- [27] J. P. Reilly, A Temperature Driven Method For Structural Health Monitoring, 2019, Accessed: May 06, 2022. [Online]. Available: <https://dataspace.princeton.edu/handle/88435/dsp01gm80hz200>
-
- [28] F. Xiao, J. L. Hulse, und R. Balasubramanian, Fiber optic health monitoring and temperature behavior of bridge in cold region, *Struct. Control Health Monit.*, 24(11):e2020, 2017, doi: 10.1002/stc.2020.
-
- [29] R. Kromanis and P. Kripakaran, SHM of bridges: characterising thermal response and detecting anomaly events using a temperature-based measurement interpretation approach, *J. Civ. Struct. Health Monit.*, 6(2):237-254, Apr. 2016, doi: 10.1007/s13349-016-0161-z.
-
- [30] <https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelektrizit%C3%A4t>, Zugriff am 06.09.2022
-
- [31] T. Wu, G. Liu, S. Fu, und F. Xing, Recent Progress of Fiber-Optic Sensors for the Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure, *Sensors*, 20(16), 2020, doi: 10.3390/s20164517
-

7.8 Feuchtigkeitsmessung

Tab. 7.15 Feuchtigkeitsmessung - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Feuchtemessung				
Kurzbeschreibung		Übliche Arten von Feuchtigkeitssensoren				
Überwachungs-technologie		Kapazitiv	Piezoelektrisch	Resistiv	Gravimetrisch	Faseroptisch
"ID"		FHT_1	FHT_2	FHT_3	FHT_4	FHT_5
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch	13 akustisch	6 faseroptisch/photonisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	1 digital
	d. Lokalisaton	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug					
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	4 hybrid
Messgrößen und -genauigkeit	Größen	Feuchtigkeit				
	Messungsbereich	30-70 50-90	05-87	30-70 20-90		10-85
	Auflösung					
	Genauigkeit	0.86 %RH 0.025 %RH	34.7 %RH	4.4 %RH 0.026 %RH		3% RH
	Bemerkungen					
Kunstbauten		2	1	2	1	1
Naturgefahren		0	0	0	2	2
Umwelt		4	2	4	2	1
Einsatzzeitpunkt		W-N	W-N	W-N	V-N	V-N
Entwicklungsstand		●	●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●	●

7.8.1 Beschreibung der Technologie

Die herkömmliche Feuchtigkeitsmessung erfolgt mit Psychrometern, also mit Geräten, die die Temperatur der Umgebungsluft und die so genannte Feuchtkugeltemperatur (gemessen in einem feuchten Docht) messen. Mit Hilfe psychrometrischer Diagramme werden dann auf der Grundlage der beiden Temperaturmessungen die Feuchtemesswerte ermittelt. Heutzutage gibt es eine Reihe alternativer Arten von Feuchtigkeitssensoren [32], wie z. B. gravimetrische, kapazitive oder faseroptische Methoden.

7.8.1.1 Elektrische Sensoren

Zwei Hauptarten von Feuchtigkeitssensoren basieren auf elektrischen Signalen: kapazitive und resistive Sensoren. Kapazitätssensoren werden aufgrund ihrer einfachen Herstellung, ihrer Empfindlichkeit und ihres geringen Stromverbrauchs häufig verwendet. Diese Geräte funktionieren, indem sie die Änderungen der Eigenschaften eines Kondensators erfassen, die in der Regel aus zwei ineinandergreifenden Elektroden (IDE) besteht, die in eine dampfempfindliche dielektrische Schicht eingebettet sind [33]. Resistive Feuchtigkeitssensoren basieren auf der Messung von Schwankungen in der elektrischen Leitfähigkeit eines dampfempfindlichen Films. Beide Technologien sind einfach und relativ billig in der Herstellung, aber trotzdem robust [32]. Sie eignen sich daher gut für die Überwachung der Feuchtigkeit von Bauwerken.

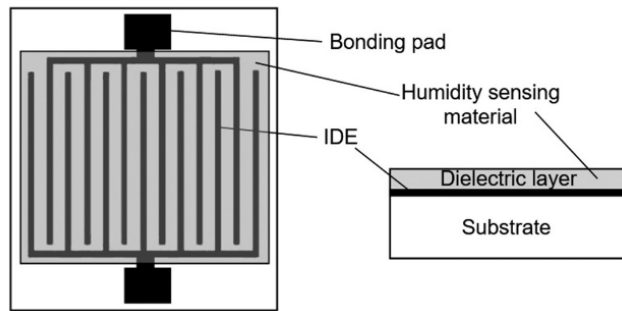


Abb. 7.23 Illustration eines kapazitiven Feuchtigkeitssensors mit ineinandergreifenden Elektroden. Quelle: [32]

7.8.1.2 Gravimetrische Sensoren

Gravimetrische Feuchtigkeitssensoren basieren auf der Messung von Massenänderungen bestimmter Elemente, die durch die Sorption von Wassermolekülen ihre Masse verändern. Eine der populärsten gravimetrischen Feuchtigkeitssensortechnologien basiert auf akustischen Oberflächenwellen. In der Regel funktionieren diese Geräte, indem die akustischen Oberflächenwellen über einen Dampfsensorfilm geleitet werden und die relativen Änderungen ihrer Phasengeschwindigkeit aufgezeichnet werden, die durch die Absorption von Wassermolekülen im Film verursacht werden. Andere gravimetrische Sensoren sind Quarzkristall-Mikrowaagen (QCM) oder Mikro-Kantileversysteme [32].

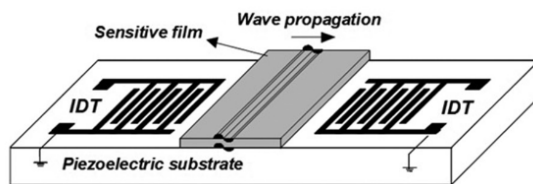


Abb. 7.24 Schematische Darstellung eines gravimetrischen Feuchtigkeitssensors, der auf akustischen Oberflächenwellen (SAWs) beruht, aus [32]

7.8.1.3 Optische Sensoren

Einige optische Feuchtigkeitssensoren funktionieren ähnlich wie faseroptische Temperatursensoren (siehe Abschnitt 7.7.1.2), d.h. es werden die Veränderungen der Eigenschaften des durch die Faser übertragenen Lichtsignals gemessen [34]. Diese Veränderungen entstehen durch von aussen verursachte Schwankungen des Brechungsindex des Fasermaterials. Bei Feuchtigkeitssensoren reagiert eine feuchtigkeitsempfindliche Mantelschicht auf Schwankungen des Wassergehalts, wodurch sich der Brechungsindex der Faser verändert. Einige neuere Sensormethoden nutzen die Absorptionswellenlänge von Wassermolekülen zur Messung der Feuchtigkeit, ohne dass eine spezielle Faserbeschichtung erforderlich ist [35].

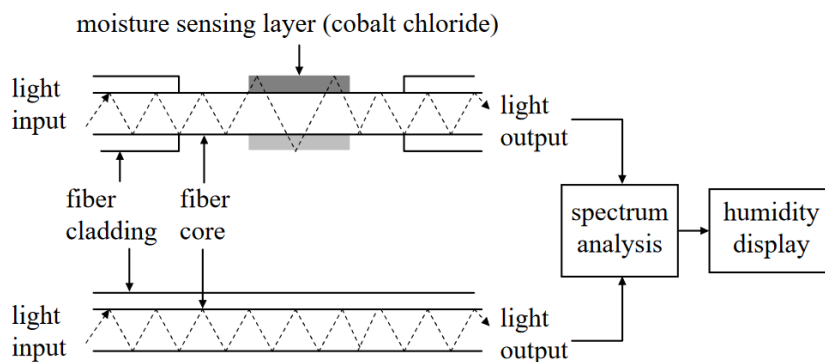


Abb. 7.25 Illustration eines faseroptischen Feuchtigkeitssensors, bei dem eine feuchtigkeitsempfindliche Mantelschicht verwendet wird, um den Brechungsindex der Faser zu stören. Angepasst von [33]

7.8.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Erfassung der Luftfeuchtigkeit ist für die strukturelle Überwachung von Kunstbauten von Bedeutung. In Kombination mit weiteren Messgrößen wie Temperatur kann die Luftfeuchtigkeit interessieren – z. B. um aufgrund des lokal herrschenden Klimas eine Prognose zur Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Zwischendecken zu erhalten – und eine mögliche Restnutzungsdauer besser abzuschätzen. Die Aufzeichnung der Luftfeuchtigkeitswerte liefert wichtige Hinweise zur Abwehr der durch die Korrosion verursachten Schädigung von Stahlkomponenten [36]. Bei Bauwerken in wetterfestem Stahl kann die Kenntnis der Verteilung der Luftfeuchte helfen, kritische Stellen rechtzeitig vorauszusagen – und generell die Einsatzgrenzen dieses Baustoffs besser auszuloten. Bei Holzkonstruktionen kann die Erfassung der Luftfeuchtigkeit entscheidend sein, um frühe Anzeichen von Verfall zu erkennen [37]. Die Überwachung der Luftfeuchtigkeit ist auch für Kunstbauten aus Beton von Bedeutung, da sie Informationen über das Fortschreiten von Verfallsprozessen, die mit Umwelteinflüssen zusammenhängen (z. B. Karbonatisierung) [38].

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Das ständige Vorhandensein von Wasserdampf und Feuchtigkeit kann – wie teilweise bereits erwähnt – zu Zersetzen von Holz, zu Korrosion bei Baustahl wie bei Betonstahl und zu Karbonatisierung von Beton führen, den elektrischen Widerstand des Zements verringern und die Alkali-Kieselsäure-Reaktion beschleunigen [39]. Die kontinuierliche Überwachung der Luftfeuchtigkeit ermöglicht die Entwicklung von Frühwarnsystemen für feuchtigkeitsbedingte Schädigungen.

7.8.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Das Messprinzip wurde in den vorangegangenen Abschnitten auf der Grundlage der einzelnen Sensortypen beschrieben. Die folgende Tabelle fasst die Genauigkeit und den Bereich für elektrische Feuchtemessung-Sensoren zusammen.

Tab. 7.16 Vergleich der Technologien zur Feuchtemessung aus [40].

Messtechnologie	Messbereich Feuchtigkeit [%]	Reaktionszeit [s]	Messempfindlichkeit [1/% r.F.]
Kapazitiv	30–70	3	0,86
	50–90	0,5	0,025
Piezoelektrisch	5–87	50	34,7
Widerstand	30–70	1	4,4
	20–90	60	0,026
	30–90	30	0,065

Auf der anderen Seite bieten gravimetrische Feuchtigkeitssensoren eine hohe Empfindlichkeit, eine schnelle Reaktionszeit und einen einfachen Versuchsaufbau. Allerdings benötigen sie in der Regel eine teure Antriebs- und Erfassungselektronik. Optische Feuchtigkeitssensoren sind ebenfalls sehr empfindlich, haben jedoch einige Nachteile, wie z. B. die Hysterese, die typischerweise zwischen 0,5% und 1% r.F. liegt [33]. Kürzlich wurde über optische Sensoren berichtet, die eine sehr lineare Reaktion im Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit (r.F.) von 3,8–90% und eine Empfindlichkeit von 0,046–0,051 $\mu\text{A} / \% \text{ r.F.}$ (μA Mikroampere) aufweisen [41].

In jüngster Zeit hat es Fortschritte bei der Entwicklung neuartiger Feuchtigkeitssensoren gegeben, z. B. Sensoren auf Mikrowellenbasis, MEMS-Geräte (mikroelektromechanische Systeme) und flexible Feuchtigkeitssensoren. Ausserdem geht der Trend bei der Feuchtemessung hin zu intelligenten, kostengünstigen, integrierten kabellosen Geräten. Diese Verlagerung ermöglicht eine einfache Bereitstellung und Digitalisierung der Messfunktionen. Netzwerke, die aus intelligenten kabellosen Sensoren bestehen, können sich selbst konfigurieren, selbst diagnostizieren und sogar potenziell selbst heilen [32]. Während einzelne integrierte Sensorsysteme aufgrund dieser Leistungsverbesserungen immer komplexer werden, erweisen sich intelligente Sensornetzwerke als kostengünstiger, da sie weniger Hardware und weniger wiederholte Tests erfordern.

7.8.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die typischen Mängel von herkömmlichen Feuchtigkeitssensoren sind [39]:

- Probleme mit langfristiger Stabilität und Zuverlässigkeit
- Langsame Reaktionszeiten, besonders für gravimetrische Sensoren (allerdings nicht für kapazitive Sensoren)
- Schwingungsinduzierte Störungen
- Schwieriger Betrieb in grossen Temperaturmessbereichen
- Temperaturinduzierte Abweichungen
- Gravimetrische Sensoren sind tendenziell größer und komplexer als andere Arten von Feuchtesensoren, was ihre Verwendung in bestimmten Anwendungen oder Umgebungen einschränken kann

Zu dem, was die optischen Sensoren konkret betrifft, sind relevante Nachteile, dass

- sie sehr sperrig sind,
- die Spiegel häufig dekontaminiert werden müssen,
- sie im Dauerbetrieb instabil sind,
- sie relativ viel Strom verbrauchen,
- eine Art Temperaturkompensation erforderlich ist, um präzise Feuchtigkeitsmessungen zu erhalten und
- relativ teuer sind.

Trotz dieser Einschränkungen ist die Fähigkeit optischer Feuchtigkeitssensoren, niedrige Feuchtigkeitsniveaus zu verfolgen, besser als die der alternativen Messgeräte, weshalb optische Feuchtigkeitssensoren im Allgemeinen in Laborumgebungen eingesetzt werden.

7.8.5 Ausschreibungsanforderungen

Die Ausschreibungsanforderungen sind wie in Kapitel 7.7.5 beschrieben. Speziell sollen die Anforderungen an Präzision und die Periodizität der Messungen ausgeschrieben werden.

7.8.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [32] G. Korotcenkov, Handbook of Humidity Measurement: Methods, Materials and Technologies. Boca Raton: CRC Press, 2019. doi: 10.1201/b22370.
-
- [33] C.-Y. Lee and G.-B. Lee, Humidity Sensors: A Review, *sens lett*, vol. 3(1):1–15, 2005, doi: 10.1166/sl.2005.001.
-
- [34] J. Ascorbe, J.M. Corres, F.J. Arregui, und I.R. Matias, Recent Developments in Fiber Optics Humidity Sensors, *Sensors*, vol. 17, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2017, doi: 10.3390/s17040893.
-
- [35] K. Xu et al., Optical Fiber Humidity Sensor Based on Water Absorption Peak Near 2- μ m Waveband, *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 1–8, Apr. 2019, doi: 10.1109/JPHOT.2019.2901290.
-
- [36] M.J. Deeble Sloane, R. Betti, G. Marconi, A.L. Hong, und D. Khazem, Experimental Analysis of a Nondestructive Corrosion Monitoring System for Main Cables of Suspension Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, no. 7, pp. 653–662, Jul. 2013, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000399.
-
- [37] A. Müller and B. Franke, Advantages of moisture content monitoring in timber bridges, p. 10.
-
- [38] S. Zhou, F. Deng, L. Yu, B. Li, X. Wu, und B. Yin, A Novel Passive Wireless Sensor for Concrete Humidity Monitoring, *Sensors (Basel)*, vol. 16, no. 9, p. 1535, Sep. 2016, doi: 10.3390/s16091535.
-
- [39] S. Taheri, A review on five key sensors for monitoring of concrete structures, *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 492–509, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.172
-
- [40] A. Alfaifi, A. Zaman, A. and Alsolami, MEMS Humidity Sensors. In M. T. S. Chani, A. M. A. Asiri, & S. B. Khan (Eds.), *Humidity Sensors [Working Title]*. IntechOpen, 2021. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98361>
-
- [41] B. Yu, Y. Luo, Y., L. Chen, Z. Chu, und K.H. Li, An optical humidity sensor: A compact photonic chip integrated with artificial opal. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 349, 130763, 2021.
-

7.9 Wetterstation

7.9.1 Beschrieb der Technologie

Eine Wetterstation ist eine Messplattform die mehrere Messtechnologien für Wettereinflüsse verbindet. Wetterstationen verbinden Anemometer (s. Kapitel 7.10), Wetterfahne, Barometer, Thermometer (s. Kapitel 7.7), Regenmesser und Hygrometer (s. Kapitel 7.8). Gelegentlich sind in Wetterstationen auch UV- und Lichtmessungen integriert. Der Zweck dieser kombinierten Messstation ist es, Informationen über verschiedene meteorologische Grössen wie Temperatur, Wind, Luftdruck Niederschlag, Feuchtigkeit und Lichtverhältnisse zu liefern.



Abb. 7.26 Beispiele für Wetterstationen auf Brücken. Bild (c) für die Øresundbrücke ist wiederverwendet aus [43]

7.9.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Der Hauptanwendungsfall für Wetterstationen auf Brücken besteht darin, die Wetterbedingungen insbesondere hinsichtlich Stürmen zu überwachen und die notwendigen Alarme innerhalb eines vordefinierten Zeitraums an die zuständigen Behörden zu übermitteln, die dann eine Reihe von Sicherheitsmassnahmen ergreifen, wie z. B. die Schliessung der Brücke bei Windgeschwindigkeiten, die einen bestimmten Schwellenwert überschreiten.

Windmessungen sind besonders wichtig für Brücken, die unter Flattereffekten leiden können, bei denen aerodynamische Kräfte, die auf die Fahrbahnplatte wirken, Energie in ein schwingendes Bauwerk einspeisen und so die Schwingungsamplituden erhöhen. Brücken, die mit Kabeln ausgestattet sind, profitieren ebenfalls von Windmessungen und der Korrelation dieser Effekte mit den Vibrationen der Kabel.

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Die Bedeutung von Windmessungen im Hinblick auf Umwelteinflüsse ist eindeutig. Wie bei den Temperaturmessungen sind die Windaufzeichnungen bedeutsam im Zusammenhang mit der Überwachung des Einflusses des Klimawandels auf Bauwerke.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Die Überwachung des Windes ist besonders wichtig in Bezug auf Stürme und starke Windereignisse, die das Bauwerk überlasten und seine Kapazität bedrohen können.

7.9.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Tab. 7.17 enthält eine Liste der meteorologischen Parameter, die durch Wetterstationen platziert auf Brücken gemessen werden. Die Abtastrate für Ultraschallanemometrie erreicht bis zu 32 Hz.

Tab. 7.17 Instrumentierung der Wetterstation

Instrument	Messgrösse	Bereich
Anemometer (mechanisch oder mit Ultraschall)	Windgeschwindigkeit	0 bis 270 km/h
Anemometer (mechanisch oder mit Ultraschall)	Turbulenzintensität	
Wetterfahne	Windrichtung	
Barometer	Luftdruck	300 bis 1100 hPa (in Hg, mmHg oder hPa) mit 0,1 hPa Auflösung
Thermometer	Lufttemperatur	–40 bis +60 °C
Regenmesser	Regenblume	0 bis 9999 mm, Auflösung 0,3 mm (wenn Regenmenge <1000 mm) oder 1 mm (wenn Regenmenge >1000mm)
Hygrometer	Relative Luftfeuchtigkeit	10 bis 99% (1% Auflösung)
Radiometer oder Optometer	UV-Index	1 bis 12
Beleuchtungsstärke-Messgerät	Lichtintensität in einem breiten Spektralbereich	0 bis 400 klx

7.9.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es handelt sich um eine Technologie, die im Allgemeinen auch unter rauen Umweltbedingungen und insbesondere über längere Zeiträume sehr zuverlässige Ergebnisse liefert. Je nach (1) Anzahl und Art der Messwerte, (2) Strom- und Kommunikationsoptionen, (3) Art des Datenloggers und (4) wetterfesten Gehäusen liegen die Kosten für professionelle Wetterstationen zwischen 500 und 4'000 CHF. Je nach Grösse der Brücke können mehrere Wetterstationen erforderlich sein.

Heutzutage werden die Daten über Datenverbindungen übertragen, die entweder für die drahtlose oder zellulare Kommunikation mit Gateways zu Standard-Cloud-Speichern und Dashboarding (Datenvisualisierung) konfiguriert sind. Hinzu kommen Installationskosten, die je nach Zugänglichkeit und Aufwand zwischen 2'000 und 4'000 (drahtlose) oder zwischen 10'000 und 20'000 (zellulare) CHF betragen. Die wiederkehrenden Kosten bestehen hauptsächlich aus dem Aufwand für die regelmässige Kalibrierung einiger Instrumente und eventuell der Inspektion und Reinigung von Anemometern, Solarpanels (Stromquelle), etc.

7.9.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.10 Wind – Anemometer

Tab. 7.18 Wind – Übersicht

Titel Einsatzzweck		Wind			
Kurzbeschreibung		Übliche Arten von Wind-Sensoren			
Überwachungs- technologie		Schalenanemometer	2D-Ultraschall-Anemometer	3D-Ultraschall-Anemometer	LiDaR
		AN1_	AN2_	AN3_	LDR_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	1 mechanisch	13 akustisch	13 akustisch	13 akustisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesu	3 analog (Ablesung)
	d. Lokalisaton	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen und -genauigkeit	Größen				
	Messungsbereich	0 bis 75m/s	0 bis 75m/s 0-359° Windrichtung	0 bis 75m/s 0-359° Windrichtung	0-80m/s
	Auflösung	0,05-0,1m/s	0,01m/s	0,01m/s	<0,4m/s
	Genauigkeit	±<2% @4-16m/s	±2% @12m/s	<1,5% RMS @12m/s	
	Bemerkungen				
Kunstbauten		3	3	3	3
Naturgefahren		3	3	3	3
Umwelt		3	3	3	3
Einsatzzeitpunkt			V-N	V-N	V-N
Entwicklungsstand			●	●	●
Kosten	initial / einmalig		●	●	●
	wiederkehrend		●	●	●

7.10.1 Beschrieb der Technologie

In der Praxis lassen sich drei Hauptfamilien von Anemometern unterscheiden: Schalenanemometer (mechanisch), 2D/3D-Ultraschallanemometer und – der Vollständigkeit halber – die Wind-LiDAR-Technologie [42]-[46]. Beispiele für kommerziell erhältliche Anemometer aller drei Typen sind in Abb. 7.27 unten dargestellt.



(a)



(b)



(c)



(c)



(e)

Abb. 7.27 (a) Schalenanemometer, (b) 2D-Ultraschallanemometer, (c) 2D-Ultraschallanemometer, (d) 3D-Ultraschallanemometer (Quelle: <http://gillinstruments.com/>, <https://www.munroinstruments.com/>) und (e) Wind-LiDAR

7.10.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Der primäre Anwendungsfall für ein Anemometer ist die Messung der Anströmbedingungen, insbesondere der Windgeschwindigkeit und Turbulenz. Die räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeiten ist zum Beispiel von besonderem Interesse und kann mit mehreren Anemometern oder LiDARs, welche entlang der Spannweite der Brücke installiert werden, gemessen werden. Die räumliche Verteilung der Windböen ist von grundlegender Bedeutung für die Abschätzung der Gesamtwindlast auf grosse Bauwerke wie Hängebrücken mit grosser Spannweite.

Die Bedeutung von Windmessungen für Kunstbauten wurde bereits in Abschnitt 7.9.2 beschrieben.

7.10.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Tab. 7.19 enthält eine Liste der meteorologischen Parameter, die mit Hilfe von Anemometern auf Brücken gemessen werden können.

Tab. 7.19 Spezifikationen für Anemometer.

Instrument	Messgrösse	Bereich	Messrate	Genauigkeit und Auflösung
Schalen-anemometer (mechanisch)	Horizontale Komponente (u) der Wind-geschwindigkeit	0 bis 75 m/s		Genauigkeit: $\pm 5\%$ bei 4–16 m/s Auflösung: 0,05–0,1 m/s
2D-Ultraschall-Anemometer	Zwei Vektor-komponenten (u,v) der Windgeschwindigkeit Temperatur Windrichtung	0 bis 75 m/s 0–359° Windrichtung	Bis zu 100 Hz	Genauigkeit: $\pm 2\%$ bei 12 m/s Auflösung: 0,01 m/s Temperaturbereich: –40 bis +70 °C –20 bis +30 °C innerhalb von ± 2 °C der Umgebungstemperatur, mit einer Auflösung von 0,01 °C
3D-Ultraschall-Anemometer	Drei Vektor-komponenten (u,v,w) der Windgeschwindigkeit Temperatur Windrichtung	0 bis 75 m/s 0–359° Windrichtung	Bis zu 100 Hz	Genauigkeit: $< 1,5\%$ RMS bei 12 m/s Auflösung: 0,01 m/s Temperaturbereich: –40 bis +70 °C

Tab. 7.19 Spezifikationen für Anemometer.

Instrument	Messgrösse	Bereich	Messrate	Genauigkeit und Auflösung
				–20 bis +30 °C innerhalb von ± 2 °C der Umgebungstemperatur, mit einer Auflösung von 0,01 °C
LiDAR	Drei Vektor-komponenten (u,v,w) der Windgeschwindigkeit Windrichtung	0 bis 80 m/s	Bis zu 50 Hz	Auflösung: <0,4 m/s

7.10.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Anwendungsbeschränkungen:

- Alle Arten von Anemometern müssen vom Hersteller kalibriert werden und manchmal ist eine spezielle Kalibrierung für die betreffende Anwendung erforderlich.
- Bei kalten und eisigen Bedingungen müssen sowohl Schalen- als auch Schallanemometer mit einer Wärmequelle versehen werden, um Eis-/Schneeablagerungen zu vermeiden.
- Regelmässige Inspektion und Reinigung von Becher-, Schall- und LiDAR-Anemometern sind erforderlich
- Bei grossen Bauwerken muss die Platzierung und der Standort der Anemometer sorgfältig gewählt werden, um Blockierungseffekte zu vermeiden, die zu einer fehlerhaften Messung der Windgeschwindigkeit führen.

Die Kosten für Schalenanemometer liegen zwischen 100 und 500 CHF. Die Kosten für Ultraschall-Anemometer bewegen sich zwischen 1'500 und 4'000 CHF (2D vs. 3D, beheizt oder unbeheizt, mit oder ohne Temperaturmessung, usw.).

Es hat sich eine gängige Praxis herausgebildet, bei der LiDARs auf einer mehrjährigen Mietbasis angeboten werden, wodurch die Notwendigkeit von Investitionsausgaben für den Besitz der Technologie entfällt. Typische jährliche Miet-/Betriebskosten für ein LiDAR liegen bei ca. 30'000 CHF.

7.10.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.10.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [42] E. Cheynet, J. Bogunović Jakobsen, J. Snæbjörnsson, N. Angelou, T. Mikkelsen, M. Sjöholm, und B. Svardal, Full-scale observation of the flow downstream of a suspension bridge deck, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 171: 261-272, 2017, ISSN 0167-6105, 10.1016/j.jweia.2017.10.007
- [43] Bart Peeters, G. Couvreur, O. Razinkov, C. Kündig, H. Van der Auweraer, und G. De Roeck, Continuous monitoring of the Øresund Bridge: system and data analysis, Structure and Infrastructure Engineering, 5(5): 395-405, 2009, DOI: 10.1080/15732470701478362
- [44] T Mikkelsen et al 2017 IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. 276 012004, 10.1088/1757-899X/276/1/012004
- [45] <https://www.electrooptics.com/news/lidar-monitor-wind-patterns-across-worlds-longest-floating-bridge>, Zugriff am 06.09.2022
- [46] https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-MET-CaseStudy_SuccessStory-Kjeller-B212269EN-A.pdf, Zugriff am 06.09.2022

A 3 Verkehrsbelastung

Tab. 7.20 A3 Verkehrsbelastung - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Verkehrsbelastung	
Kurzbeschreibung		Charakteristische Technologien zur Messung von Verkehrsbelastung, vor allem des Schwertransports.	
Überwachungs-technologie		Weigh-in-Motion	Wiegesysteme
	"ID"	WIM_	WGS_
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	1 direkt
	b. Datenerfassung	mixed	1 mechanisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug	2 separat	2 separat
	f. Zustand	1 zerstörend	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Achslast/Radlast	Achslast
	Messungsbereich		
	Auflösung	1kg	
	Genauigkeit	6%	2%
	Bemerkungen	Genauigkeit wird bei 95% der Messung erreicht	Kann an Bord von LKWs oder stationär sein
Kunstbauten		3	2
Naturgefahren		0	0
Umwelt		2	2
Einsatzzeitpunkt		N	N
Entwicklungsstand			
Kosten	initial / einmalig		
	wiederkehrend		

7.11 Weigh-in-Motion

7.11.1 Beschrieb der Technologie

Methoden aus dem Bereich der Weigh-in-Motion-Techniken ermöglichen die Messung der Achslasten von Fahrzeugen während der Fahrt. Dabei überfährt das Fahrzeug druckempfindliche Sensoren, welche auf der Fahrbahn aufgelegt sind, oder in die Fahrbahn eingelegt wurden. Abhängig von der Positionierung und Ausdehnung der Sensoren ist die Erfassung von Achslasten oder von einzelnen Radlasten möglich. Für die Erfassung von Achslasten müssen die Sensoren möglichst über die komplette Fahrbahnbreite verbaut werden (siehe Abb. 7.28), während für die Ermittlung einzelner Radlasten mehrere schmale Einzelsensoren zum Einsatz kommen.

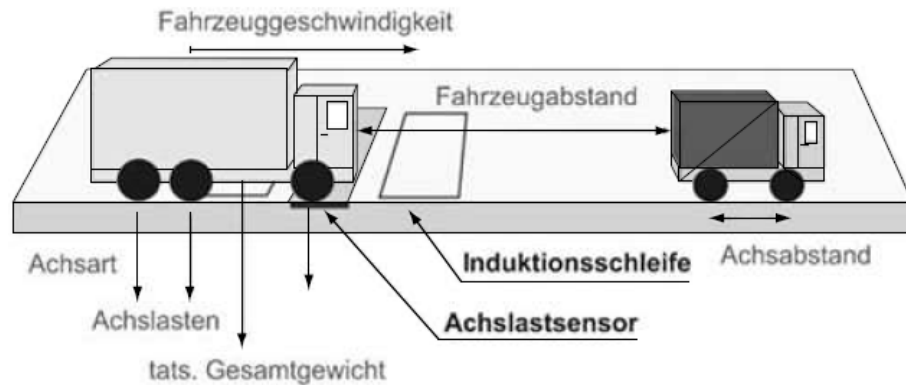


Abb. 7.28 Prinzipdarstellung der Achslastmessung über das Weigh-in-Motion-Verfahren. Bei der Überfahrt werden die einzelnen Achslasten des Fahrzeugs durch einen Sensor erfasst. Die Kombination der Sensoren mit Induktionsschleifen ermöglicht die sichere Zuordnung der Achslasten zu einzelnen Fahrzeugen. Quelle: [47]

Sensoren für die Weigh-in-Motion-Technik sind in [47] beschrieben und existieren sowohl für den temporären Einsatz als auch für den stationären Einsatz. Die Sensoren für den stationären Einsatz lassen sich wiederum in Streifensensoren und Wiegeplatten untergliedern.

Temporäre Sensoren

Temporäre Sensoren werden auf die Fahrbahn aufgelegt und müssen folglich sehr flach aufgebaut sein, um eine verkehrssichere Anbringung zu ermöglichen. Für diesen Einsatzzweck kommen in der Regel kapazitive Drucksensoren zum Einsatz, die durch Dübel und Kleber mit der Fahrbahn verbunden werden. Die Wiederverwendbarkeit und Haltbarkeit der Sensoren ist begrenzt. Weiterhin entstehen durch die von den Sensoren selbst verursachte Unebenheit der Fahrbahn Schwingungen an den Fahrzeugen, die einer genauen Lastmessung entgegenstehen. Daher weisen temporäre Sensoren in der Regel eine geringere Genauigkeit als stationäre Sensoren auf.

Stationäre Sensoren – Streifensensoren

Unter Streifensensoren werden Drucksensoren zusammengefasst, welche streifenförmig / schlauchförmig aufgebaut sind und quer zur Fahrtrichtung verlegt werden. Zu diesen Sensoren zählen vor allem piezoelektrische Drucksensoren (siehe Abb. 7.29, links) oder faseroptische Drucksensoren. Durch Druckeinwirkung ändern sich die elektrischen (piezoelektrischer Sensor) oder optischen (faseroptischer Sensor) Eigenschaften der Sensoren und ermöglichen eine indirekte Lastmessung.

Der Einbau von Streifensensoren erfolgt, indem die Fahrbahn mit einem schmalen Schlitz versehen wird, in welchem ein Streifensensor platziert wird (Abb. 7.29, rechts).

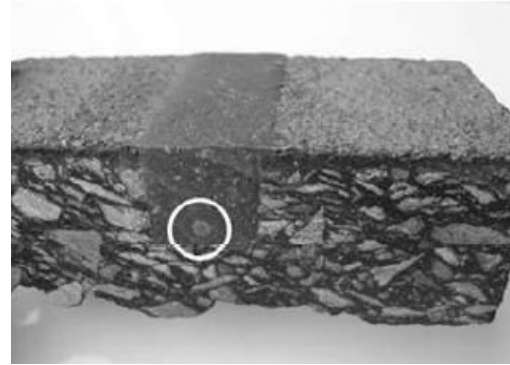
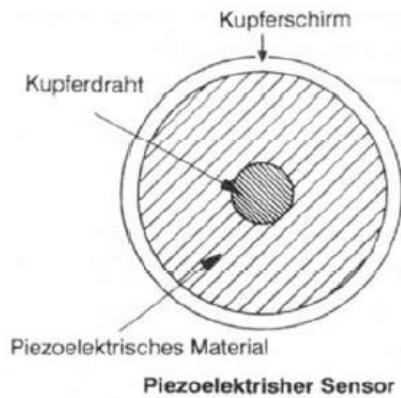


Abb. 7.29 Links: das piezoelektrische Material, das unter Lasteinwirkung zu einer Änderung des elektrischen Signals zwischen Innen- und Aussenleiter führt. Quelle: [47]; Rechts: Querschnitt durch einen in der Fahrbahn verlegten Piezosensor (weiss). Quelle: [47]

Stationäre Sensoren – Wiegeplatten

Wiegeplatten werden ebenfalls quer zur Fahrtrichtung in die Fahrbahn eingebaut. Die Sensoren sind von der Breite jedoch so dimensioniert, dass die vollständige Aufstandsfläche eines Reifens gleichzeitig auf den Sensor einwirkt.

Wiegeplatten können in Form von Biegeplatten ausgeführt sein (Abb. 7.30), welche sich bei einer Gewichtseinwirkung verformen. Diese Verformung wird über Dehnungsmessstreifen erfasst und kann in ein Gewichtsäquivalent umgerechnet werden. Es existieren allerdings auch andere Bauformen, bei denen die Gewichtsmessung auf dem plattenförmigen Sensor z. B. über piezoelektrische Druckdosen erfolgt. Diese kommen mit weniger Einbauhöhe aus (um 55 mm) und eignen sich deshalb auch auf Brücken (s. Kistler [49]).



Abb. 7.30 Wiegeplatte nach dem Prinzip der Biegeplatte, bei der der das Gewicht durch die Plattenverformung erfasst wird. Quelle [48]

Kombination mit Induktionsschleifen

Die Kombination der Weigh-in-Motion-Sensoren mit Induktionsschleifen ermöglicht die Zuordnung der Achs-/Radlasten zu einzelnen Fahrzeugen.

7.11.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

In Kombination mit Induktionsschleifen und (wenn Genauigkeit gefordert) mit Kameras für Fahrzeugklassen-Zuordnung lassen sich die folgenden fahrstreifenbezogenen Kenngrößen (Verkehrsbelastung) erfassen [47]:

- Achslasten
- Achsabstände
- Achsarten (Einfachachse, Doppel- und Dreifachachse)
- Fahrzeugmengen
- Fahrzeuggeschwindigkeiten
- Fahrzeugarten (einige Sensoren ermöglichen zusätzlich die Trennung der Achslasten in Radlasten)
- Tatsächliches Gesamtgewicht
- Überladungen
- Fahrzeuglängen

Die Messungen der aktuell installierten WIM-Stationen werden zur Aktualisierung der Verkehrslasten für bestehende Brücken verwendet, wie in der ASTRA-Dokumentation 82001 beschrieben. Darüber hinaus erstellt das ASTRA für jede WIM-Station einen Jahresbericht, der über den der jeweiligen Station zugeordneten Schwerverkehrspunkt für jedes Jahr informiert.

7.11.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Die Messdaten werden je nach eingesetzten Sensoren elektrisch oder optoelektronisch aufgenommen. Nach einer zwingenden periodischen Kalibrierung können die Messwerte vom System in Gewichtsäquivalente umgerechnet werden.

Die Messergebnisse der Technik werden durch dynamische Schwingungen der Fahrzeugachsen und des Fahrzeugs überlagert. Um den Einfluss dieser Störquellen zu minimieren, sollte der Einbau der Sensoren nur in ebenen Fahrbahnbereichen erfolgen und möglichst eben ausgeführt sein.

Die Systeme sind i.d.R. derart ausgelegt, dass für 95% der Messungen ein Messfehler von weniger als 6% des tatsächlichen Gewichts sichergestellt werden kann.

7.11.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Einsatz der Weigh-in-Motion-Technik ist Stand der Technik. Die Anwendungsgrenzen ergeben sich vor allem aus der Überlagerung der Messung mit dynamischen Schwingungen an den zu messenden Achsen/Fahrzeugen. Insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten oder bei Unebenheiten in der Fahrbahn ergeben sich dadurch systembedingte Messungenauigkeiten.

Einzelne Messsensoren sind für ca. 2'000 bis 5'000 CHF erhältlich. Für den Einbau mit einem Frässchnitt sind typischerweise ca. 1'000 CHF anzusetzen. Die nötige Investition für eine gesamte WIM-Anlage bewegt sich in der Höhe von ca. 100'000 CHF. Dazu kommen noch die in der Regel jährlichen Kalibrierungskosten. Eine Alternative ist die heute schon mögliche Nutzung der On-board-Weigh-Daten in Schwerverkehrsfahrzeugen, die im Kapitel 7.12 beschrieben sind oder das Brücken-WIM, welches die Verkehrslasten indirekt bestimmt (siehe Kapitel 8.7).

7.11.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Insbesondere ist zu definieren welche Auflösung erzielt werden soll und welche maximalen Messfehler toleriert werden können. Weiterhin ist anzugeben, ob die Kopplung der Messung mit Induktionsschleifen erfolgen soll.

7.11.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [47] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Technisches Regelwerk: Hinweise zur kurzzeitigen automatischen Erfassung von Daten des Strassenverkehrs, FGSV-Verl., 2010.
-

[48] Bildquelle Viscoindia, Webseite, <https://www.viscoindia.com/bending-plate-medium-speed-weigh-in-motion-mswim.aspx>, 2022, Zugriff am 14.06.2022

[49] <https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/piezoelektrischer-drucksensor/> Zugriff am 06.09.2022

7.12 Wiegesysteme

7.12.1 Beschrieb der Technologie

Die Kenntnis des tatsächlichen Verkehrs ist für ein optimales Management der Strasseninfrastruktur unabdinglich. Um die Achslasten, besonders von LKWs zu bestimmen, kommen Wiegesysteme zum Einsatz. Hierbei kann grundsätzlich zwischen Systemen, die an Bord des LKWs sind und externen Waagen unterschieden werden.

Durch das zuverlässige Wiegen von sämtlichen Fahrzeugen, die sich über einen bestimmten Kontrollpunkt bewegen, eignen sich externe Achswaagen (siehe Abb. 7.30). Achswaagen ermöglichen Kontrollwägungen, Überlastkontrolle und Verkehrsflussüberwachung. Um den Verkehrsfluss nicht zu behindern, ist der Einsatz von Wiegesystemen, welche die Achsenlasten während der Fahrt messen ideal (siehe Kapitel 7.11).

Bordwaagen werden in ein Fahrzeug eingebaut und ermöglichen das Wiegen der Ladung ohne Unterbrechungen oder zusätzliche Prozesse. Die Wägezellen der Waage sind zwischen Fahrgestell und Karosserie montiert, wodurch die Wägelösung sehr robust und in der Lage ist, den anspruchsvollen Bedingungen, unter denen die Fahrzeuge betrieben werden, standzuhalten [51]. Entsprechend dem Fahrzeugtyp, kommen bei den On-Board-Messungen Kraftdosen (mechanische Federsysteme) oder Luftdrucksensoren (Luftfederung) zum Einsatz. Erstere sind präziser und langlebiger, jedoch auch teurer und schwieriger zu installieren. Moderne System erlauben die Echtzeitanalyse der Achsenlasten ganzer LKW-Flotten. Jedoch ist es nicht üblich, dass diese Daten mit Infrastrukturbetreibern geteilt werden.

7.12.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Waagen werden benutzt um die Achslasten, besonders von LKWs zu bestimmen und dienen dementsprechend zur:

- Aktualisierung der Verkehrslasten, zum Beispiel um den Tragfähigkeitszustand der Materialermüdung zu bestimmen
- Alarm bei LKWs, welche die vorgeschriebene Maximallast überschreiten
- Bei Dauerüberwachungsansätzen, welche auf dem Verhalten von Bauwerken unter bekannten Einwirkungen beruhen

7.12.3 Datenerfassung, Messgrößen und – Genauigkeiten

LKW-Waagen wiegen das Fahrzeug Achse für Achse und verrechnen das Gesamtgewicht und die achsspezifischen Gewichte. Die Achsenlast der Fahrzeuge kann dabei nur statisch oder während einer sehr langsamen Fahrt bestimmt werden [55]. Die Wiegeinformationen von der Achswaage können elektronisch übertragen werden zur weiteren Verwendung und statistischen Aufbereitung. In Kombination mit einer Nummernschild-Identifikationsfunktion [52] kann das Leergewicht und das Gewicht der Ladung separat bestimmt werden. LKW-Waagen bestimmen das Achsengewicht von fahrenden LKWs mit einer Abweichung von weniger als 2%.

Auch Bordwaagen, welche idealerweise bei der Herstellung der LKWs eingebaut werden, sind relativ genau und haben eine Abweichung bei der Messung der Achslasten von weniger als 2% [53]. Typischerweise sind solche Wägezellen mit Cloudlösungen verbunden, welche die Achslasten in Echtzeit digital abspeichern und mit GPS-Koordinaten kombinieren können. Bordwaagen brauchen eine Stromzufuhr.

7.12.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Wiegesysteme sind ausgereifte Technologien die bereits heutzutage weit verbreitet sind und teilweise gesetzlich zertifiziert sind [53]. LKW Wiegesysteme kosten üblicherweise mehr als 100'000 CHF [54]. Wiegesysteme können nicht in das bestehende Strassennetz integriert werden, und benötigen deswegen eine zusätzliche Spur mit Aus- und Auffahrt.

Bordwaagen sind einfach zu montieren und können unabhängig von Fahrzeugmarke und -typ eingebaut werden. Bordwaagen kosten je nach Fahrzeugtyp 1000-8000 CHF pro LKW, das Ausrüsten einer ganzen LKW-Flotte ist also mit signifikanten Kosten verbunden. Einmal ausgestattet ist eine solche An-Bord Wägelösung sehr wartungsarm [51]. Im Vergleich mit Infrastrukturspezifischen Lösungen, wie WIM und BWIM, sind Wiegesysteme sehr zuverlässig, jedoch sind sie auf einen Bruchteil des Verkehrs limitiert [55] und benötigen deswegen statistische Modelle um die Verkehrslasten zu aktualisieren.

Diese Art von Daten ist typischerweise artfremd in dem Sinne, dass sie im Besitz einer dritten Partei sind und für ihre Verwendung eine Genehmigung erforderlich sein kann.

7.12.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5.

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind bei On-Board-Messungen auch die Periodizität der Datenübermittlung und gegebenenfalls deren Anonymisierung zu präzisieren.

7.12.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [50] Tamtron Scalex DW600 Axle Scale: <https://tamtrongroup.com/en/product/tamtron-scalex-dw600-axle-scale/> [am 25.10.22 konsultiert]

- [51] Tamtron On-Board-Scale. <https://tamtrongroup.com/en/product/one-power-truck-on-board-scale/> [am 25.10.22 konsultiert]

- [52] AXLE SCALE TAMTRON SCALEX DW600: https://tamtrongroup.com/wp-content/uploads/2022/03/scalex-dw600-axle-scale_dn15683_1-en_brochure_191126.pdf [am 25.10.22 konsultiert]

- [53] TAMTRON ONE POWER TRUCK ON-BOARD SCALE: https://tamtrongroup.com/wp-content/uploads/2022/03/One-Power-Truck-On-Board-Scale_dn16422_1-en_brochure_220125.pdf [am 25.10.22 konsultiert]

- [54] <https://www.americanscaleus.com/knowledge-center/2020/10/12/how-much-do-truck-scales-cost> [am 25.10.22 konsultiert]

- [55] Stawska, S., Chmielewski, J., Bacharz, M., Bacharz, K. and Nowak, A., 2021. Comparative accuracy analysis of truck weight measurement techniques. Applied Sciences, 11(2), p.745.

A 4 Kraft / Spannung

Tab. 7.21 A4 Kraft / Spannung - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Kraft / Spannung			
Kurzbeschreibung		Charakteristische Technologien zur Messung von Kraft/ Spannung			
Überwachungs- technologie	"ID"	Kraftmessdosen	Kapazitive Drucksensoren	Drucksensoren	Faseroptische Drucksensoren
		KMS_	DSK_	DSP_	DSF_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	1 mechanisch	2 elektrisch	2 elektrisch	6 faseroptisch/photonisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Kraft	Druck	Dynamischer Druck	Druck
	Messungsbereich	>0.5 N	0.25-70 MPa	0.7kPa - 70MPa	0-600kPa
	Auflösung				
	Genauigkeit	0.25 des Skalenendwerts	0.03-0.25% des Skalenendw.	1% des Skalenendwerts	+/- 3.8 Pa
	Bemerkungen	Messfrequenz bis 5 kHz;	Ungeeignet für konstanten Druck		
Kunstbauten		2	2	2	2
Naturgefahren		2	2	1	2
Umwelt		4	3	1	1
Einsatzzeitpunkt		N	N	N	N
Entwicklungsstand		●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●

7.13 Kraftmessdosen

7.13.1 Beschrieb der Technologie

Kraftmessdosen sind Kraftsensoren, die in der Lage sind, eine übertragene Last oder das Gewicht zu messen, indem sie mechanische Kräfte in lesbare und messbare Signale umwandeln. In technischen Anwendungen werden üblicherweise drei Arten von Kraftmessdosen verwendet, welche sich durch ihr Funktionsprinzip und das Ausgangssignal unterscheiden: pneumatisch, hydraulisch (beide mechanische Kraftsensoren) und Dehnungsmessstreifen.

Dehnungsmessstreifen sind die am häufigsten verwendeten Kraftmessdosen. Sie bestehen aus bis zu vier Dehnungsmessstreifen, die an einem ein- oder zweiseitigen elastischen Metallbalken befestigt sind. Der Metallkörper verformt sich unter der aufgetragenen Last, die entweder an der Oberseite des Trägers wirkt, während das andere Ende fixiert ist, oder in der Mitte, wenn sowohl die Ober- als auch die Unterseite eingespannt sind. Die Verformung des Trägers führt zu einer Veränderung der Form der Dehnungsmessstreifen und damit zu einer Spannungsänderung, die gemessen und in einen ablesbaren Ausgangswert (Gewicht oder Last) umgewandelt wird.

Tension load cell

'S-beam'

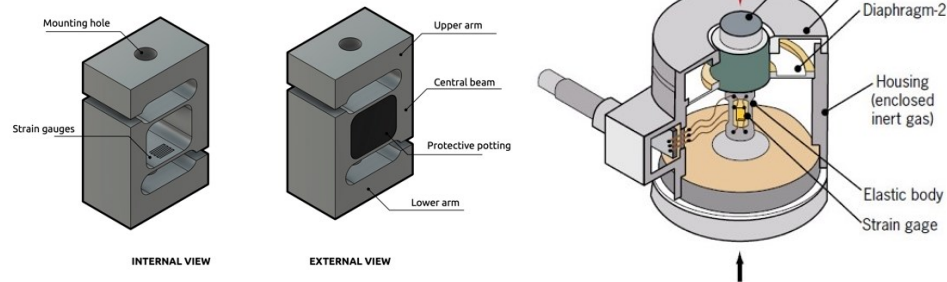


Abb. 7.31 Schematische Darstellung von Kraftmessdosen (Bilder wiederverwendet von [61], [58])

Die optimale Leistung der Kraftmessdosen wird durch die Einhaltung bestimmter Installationspraktiken gewährleistet:

- Die aufgebrachten Kräfte müssen präzise auf die Richtung der Wägezelle ausgerichtet sein. Falsch ausgerichtete Kräfte oder Bewegungen (seitlich, Durchbiegung, Torsion) sind zu vermeiden, da sie die Genauigkeit und Lebensdauer der Aufnehmer verringern.
- Die Stützstruktur sollte starr, flach und fest mit der Wägezelle verbunden sein und deren Unterseite vollständig bedecken, um sicherzustellen, dass die übertragenen Kräfte gleichmässig verteilt werden.
- Ein abgeschirmtes Gehäuse und Stahlrohre sollten verwendet werden, um die Messsensoren, ihre Elektronik und die Messkabel vor externen magnetischen und elektrischen Feldern, zu schützen, da diese mögliche Störquellen darstellen.

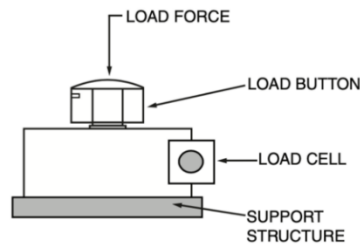


Abb. 7.32 Typischer Aufbau einer Kraftmessdose (Bilder wiederverwendet von [56])

7.13.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Kraftmessdosen sind für Anwendungen in verschiedenen Bereichen der Kunstbauten geeignet:

- Schätzung der Vorspannkräfte. Während des Vorspannens von Litzen können die Kraftmessdosen an deren Enden positioniert werden, sodass die Kraft nach dem Lösen der Vorspannböcke gemessen werden kann.
- Messung des zeitlichen Kraftverlaufs bei Spanngliedern und Schrägseilen durch Anbringung von Kraftmessdosen.
- Bestimmung der Verkehrsbelastung, ihrer zeitlichen Schwankung und ihres Einflusses auf die Brückenkomponenten. Zu diesem Zweck werden die Kraftmessdosen an den Brückenlagern oder Schrägseilen angebracht.
- Überwachung der Ermüdungsbelastung der Schrägseilverankerungen oder anderer zugänglicher Brückenelemente.
- Überwachung der Kräfte, die von Kränen oder Hebesystemen, an denen die Wägezellen befestigt werden, während des Anhebens und Positionierens auf die Brücke einwirken.

Solche Geräte werden bereits standardmässig in verschiedenen Bauprozessen für die Aufgaben des Einsetzens, Hebens usw. eingesetzt, insbesondere im Rahmen von Bau- und Rückbauphasen.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Können in die Bremsseile von Steinschlagschutznetzen eingebaut werden und so wichtige Erkenntnisse über Sturzereignisse liefern, die das Netz be- oder überlastet haben.

Fallbeispiel - Schwenktraversen-Dehnfuge, Digitales Testfeld Autobahn A 9 (DE)

Dieses Projekt über intelligente Brücken [72] umfasste eine modifizierte lärmgeminderte Schwenktraversen-Dehnfuge DS320GOi mit vier Dichtprofilen mit folgenden Besonderheiten:

- In den Elastomerlagern der Traversen sind zur Erfassung der überrollenden Verkehrslasten Kraftsensoren integriert, welche die impulsartigen Kräfte, die wenige Millisekunden dauern, genau messen.
- Weg- und Beschleunigungssensoren erfassen in jeder Fahrspur Abstand, Verschiebung und Beschleunigung der Lamellen.
- Zusätzlich zu den Sensoren sind Schaltschränke mit Verstärkereinheiten, Spannungsumwandlern und Messdatenerfassungssystem sowie mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung und einem Anschluss an den Server der Universität zu Lübeck mit Internetanbindung montiert.

Zur Eigenüberwachung des Fahrbahnübergangs werden kontinuierlich das Schwingungsverhalten und die Veränderung der Spaltweiten analysiert.

7.13.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Geeignet und effektiv für die Erfassung einer Vielzahl von Kraftarten (Zug, Druck, oder Drehmoment) und -werten. Sie sind für einen breiten Lastbereich ausgelegt, der von einem Minimum von 0,5 N oder weniger bis zu mehreren MN reicht. Je nach den zu messenden Kräften können sie als Kraftmesszellen mit geringer, mittlerer oder hoher Kapazität klassifiziert werden. Innerhalb des Nennlastbereichs, können niedrige Werte, nahe der unteren Grenze, nichtlinear sein.
- Die Messdatenerfassung kann entweder digital oder analog erfolgen. Damit die Kraftmessdosen ein analoges Ausgangssignal erzeugen können, müssen sie in einen Messkreis integriert werden. Diese besteht aus einer Stromquelle, die den Aufnehmer mit einem Strom von bis zu 10 V (Gleichstrom) versorgt, und einer digitalen Signalverarbeitung zur hochpräzisen Erfassung der Kräfte.
- Messungen an abgelegenen Orten sollen über hydraulische Kraftmessdosen erfolgen, da diese keine Stromversorgung benötigen.
- Kraftmessdosen bieten eine hohe Messgenauigkeit von 0,03 bis 1% des Skalenendwerts (maximaler Wert im Nennbereich), je nach gewähltem Typ des Kraftsensors. Die höchste Genauigkeit bieten pneumatische Kraftsensoren; Dehnungsmessstreifen-Aufnehmer bieten eine Genauigkeit von 0,03 bis 0,25% des Skalenendwerts.
- Die Messfrequenz beträgt bis zu 5 kHz.
- Die Messungen sind zerstörungsfrei.

7.13.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kraftmessdosen sind eine äusserst zuverlässige und präzise Technologie, die sich sowohl für kurze als auch für lange Messdauern eignet. Sie ermöglichen Messungen in einem breiten Spektrum von Umgebungsbedingungen, einschliesslich Innen- oder Aussentemperaturen und stabilen oder rauen Umgebungen, die durch abrupte Schwankungen von Temperatur und Feuchtigkeit gekennzeichnet sind. Die Kalibrierung dieser Geräte, die für die Beibehaltung ihrer hohen Präzision unerlässlich ist, wird im Allgemeinen vom Hersteller durchgeführt und erfordert eine regelmässige Wiederholung.

Im Gegensatz zu anderen Lastsensoren, weisen Kraftmessdosen an der unteren Grenze des Lastbereichs, für den sie ausgelegt sind, eine Nichtlinearität auf, wodurch sie sich besser für hohe Lasten eignen. Die aufgebrachten Lasten müssen perfekt auf die Achse der Wägezelle ausgerichtet sein und zusätzliche Bewegungen müssen ausgeschlossen werden. Kraftmessdosen sind eine teure Technologie, vor allem wegen der digitalen Signalverarbeitung. Diese Komponente macht die Sensoren ausserdem komplex und

erschwert die Einbindung in optimierte Anwendungen. So weisen einige Prototypen eine sperrige und massive Form auf, die sich nicht verändern und optimieren lässt. Aus diesem Grund müssen die umliegenden Komponenten angepasst werden. Eine Ausnahme bilden die Biegebalken-Kraftmessdosen, die sich durch geringe Kosten und einfache Konstruktion auszeichnen. Sie haben jedoch den Nachteil, dass ihre freiliegenden Dehnungsmessstreifen geschützt werden müssen.

Die Kosten für Kraftmessdosen variieren je nach Modell und Kapazität [57]. Der Preis eines einzelnen Wägesensors kann schätzungsweise von 100 CHF für Gewichte unter 1 Tonne bis zu 4'000 CHF für Gewichte bis zu 100 Tonnen reichen.

7.13.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.14 Kapazitive Drucksensoren

7.14.1 Beschrieb der Technologie

Kapazitive Drucksensoren nutzen Änderungen der elektrischen Kapazität, um den ausgeübten Druck zu messen. Die Änderung der elektrischen Kapazität kann auf verschiedene Weise erzeugt werden: durch Veränderung der Fläche der Kondensatorplatten, der Dielektrizitätskonstante des dazwischen liegenden Materials oder, was am einfachsten und gebräuchlichsten ist, durch Veränderung des Abstands zwischen den Elektroden über ein Diaphragma. Zu diesem Zweck wird eine der Elektroden als feste Platte und die andere als Membran angenommen, die sich unter einem angelegten Druck durchbiegt (siehe Druckanschluss in Abb. 7.33), wodurch eine Abstandsänderung im System entsteht, die die Kapazität verändert. Die erzeugte Differenzkapazität wird dann in ein elektrisches Ausgangssignal umgewandelt. Die Membran, die das Sensorelement des Systems darstellt, kann eine flache Form haben oder aus einer zentralen Masse bestehen, und ihr Baumaterial kann aus Silizium, Keramik, Kunststoff oder Glas ausgewählt werden.

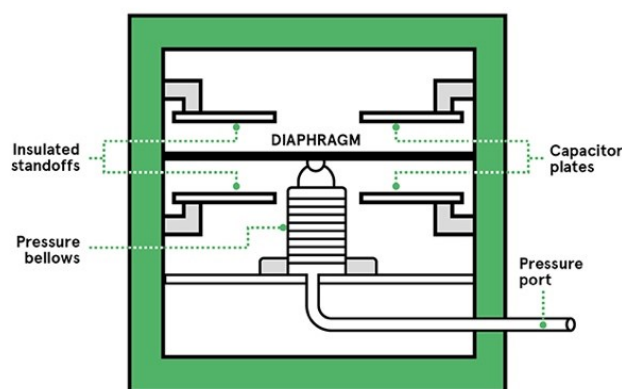


Abb. 7.33 Schematische Darstellung eines kapazitiven Drucksensors. Quelle: [62]

Bewährte Konstruktions- und Installationsverfahren für eine optimale Sensorleistung:

- Die Geometrie der Membran beeinflusst das Ansprechverhalten des Sensors. Kleinere Membranen führen zu schnelleren Reaktionen. Grosse Membranen liefern grosse Signale, allerdings auf Kosten eines begrenzten Betriebsfrequenzbereichs; grosse, aber dünne Membranen können unter vibrationsbedingtem Rauschen leiden.
- Die Sensoren können für zwei verschiedene Betriebsarten ausgelegt werden, die von der Konfiguration der Membran abhängen, wie in Abb. 7.34 dargestellt. Im normalen Modus muss die Membran von der Elektrode entfernt sein, während der Sensor im Berührungsmodus nur in dem Druckbereich arbeitet, in dem die Membran das Substrat berührt. Der zweite Ansatz bietet Vorteile in Form einer Reduzierung der Streukapazitätseffekte, und einer höheren Empfindlichkeit, die um eine oder zwei Größenordnungen grösser als die des normalen Gegenstücks ist.
- Die Empfindlichkeit des Sensors gegenüber Temperaturschwankungen lässt sich durch das Material steuern, aus dem die Kondensatorplatten bestehen. Temperaturunempfindliche Geräte erhält man insbesondere durch die Wahl eines Materials mit geringer Wärmeausdehnung.
- Um parasitäre Kapazitäten zu reduzieren und zu vermeiden, müssen die elektronischen Elemente in der Nähe des Sensors positioniert werden.

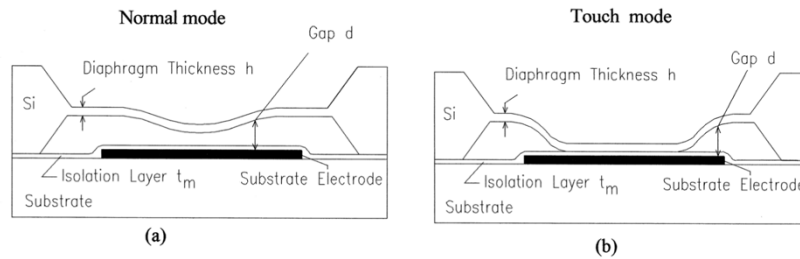


Abb. 7.34 Betriebsarten des Sensors: Normalmodus (links), Berührungsmodus (rechts).
Quelle: [66]

7.14.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Geeignet zur Ermittlung der Verkehrsbelastung und zur Messung der Radlast von Fahrzeugen. Zu diesem Zweck werden kapazitive Drucksensoren durch einen speziellen Stahlbetonblock auf der Strasse befestigt und quer zur Fahrtrichtung des Fahrzeugs positioniert. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und die damit verbundenen dynamischen Effekte können die Genauigkeit der Messung beeinträchtigen. Um diesen unerwünschten Effekt zu vermeiden, empfiehlt es sich, mehrere Sensoren entlang der Brücke anzuordnen und das endgültige Gewicht des Fahrzeugs als Durchschnitt ihrer Messungen zu ermitteln.

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

- Messung des Winddrucks auf Brücken in Echtzeit.
- Messung der Wassertiefe.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Bieten wichtige Erkenntnisse über den Winddruck bei Starkwind- und Sturmereignissen.
- Bieten wichtige Informationen über den Wasserstand bei Überschwemmungen von Brücken.
- Können wichtige Information über den Wasserstand oder Durchgang von Murgängen in Gerinnen liefern.

7.14.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Geeignet zur Messung von Absolut-, Relativ- oder Differenzdrücken und zur Verwendung als Manometer.
- Der Betriebsdruck reicht in der Regel von 250 Pa bis zu hohen Drücken von etwa 70 MPa.
- Die Bereiche des Betriebsdrucks und der Empfindlichkeit hängen von den Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften des für die Membrane gewählten Materials und seiner Geometrie ab. Hohe Drücke können durch Anpassung der Dicke dieses Elements erreicht werden.
- Die Ausgangsreaktion erfolgt in Form eines Gleichstromsignals und ist in der Regel nichtlinear in Bezug auf Eingangsänderungen.
- Die Kapazität liegt zwischen 50 und 100 Pa.
- Kapazitive Drucksensoren bieten hochpräzise Messungen mit einer Genauigkeit von 0,1% des Skalenendwerts des Sensors oder weniger und einem extrem niedrigen Fehlerbereich von 0,25% des Skalenendwerts des Sensors oder weniger.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

7.14.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

- Kapazitive Drucksensoren sind robuste Geräte mit geringem Stromverbrauch, da ihre Kondensatoren keinen direkten Stromfluss benötigen. Sie liefern langzeitstabile Messungen, auch in rauen Umgebungen oder bei vorübergehendem Überdruck. Sie werden durch elektromagnetische und hochfrequente Störungen kaum beeinträchtigt. Im Vergleich zu anderen Arten von Drucksensoren, sie sind für Messungen bei hohen Temperaturen geeignet, nicht besonders empfindlich gegenüber

Temperaturschwankungen, sehr genau und weisen eine relativ einfache Mechanik auf. Sie zeichnen sich in der Regel durch eine geringe Hysterese aus, und eignen sich sowohl für die Messung niedriger als auch hoher Drücke.

- Der grösste Nachteil kapazitiver Drucksensoren ist ihre weitgehend nichtlineare Reaktion, die sich aus der umgekehrten Proportionalität zwischen der Sensorreaktion und dem Abstand zwischen den Elektroden ergibt. Diese Eigenschaft kann bei Geräten mit hoher Empfindlichkeit stärker ausgeprägt sein und lässt sich auf Kosten einer höheren Hysterese verringern. Im Vergleich zu anderen Sensoren, wie z. B. piezoelektrischen Sensoren, erfordern sie eine komplexere Kalibrierung und haben kompliziertere Signalaufbereitungsschaltungen. Ausserdem sind sie empfindlich gegenüber Vibrationen.
- Kapazitive Drucksensoren sind eine kostengünstige Technologie, deren Preis je nach Anwendung und Eigenschaften von wenigen CHF bis zu einigen hundert CHF reichen kann.

7.14.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Art der Einbettung) zu definieren.

7.15 Piezoelektrische Drucksensoren

7.15.1 Beschrieb der Technologie

Piezoelektrische Drucksensoren sind Geräte, die sich den piezoelektrischen Effekt zunutze machen, der darin besteht, aufgebrachte mechanische Spannungen in elektrische Ladungen umzuwandeln, um Druckschwankungen zu messen. Der ausgeübte Druck wird durch eine Membran auf einen internen piezoelektrischen Kristall übertragen, der aus Quarz oder Turmalin besteht und dessen Verformung verursacht. Aufgrund der geringen Auslenkung des Kristalls entstehen an seinen gegenüberliegenden Flächen zwei Ladungen, die proportional zum ausgeübten Druck sind und von einem externen oder internen Ladungsverstärker in eine Spannung umgewandelt werden. Diese elektrische Potentialdifferenz induziert einen elektrischen Stromfluss im angeschlossenen Stromkreis, die sogenannte Piezoelektrizität. Ein externes Gehäuse wird verwendet, um den Sensor von äusseren Einflüssen (z. B. thermischen Schocks) zu schützen; es besteht häufig aus einem Gewinderohr, das die Installation des Geräts erleichtert.

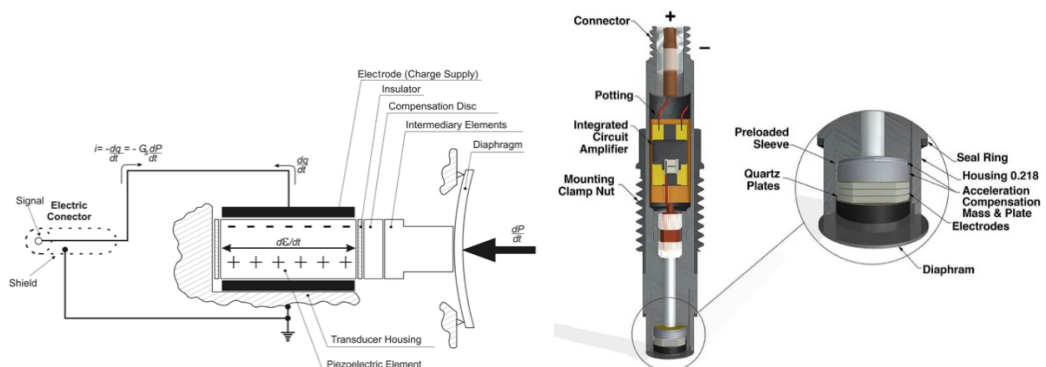


Abb. 7.35 Schematische Darstellung von piezoelektrischen Drucksensoren. Quelle: [69]

Bewährte Verfahren für eine optimale Sensorleistung:

- Um das Signal-Geräusch und die signalbedingten Fehler zu minimieren, sollte der Ladungsverstärker sowie die restlichen elektronischen Komponenten in der Nähe des Datenerfassungsgerätes platziert werden.
- Die Installation durch das eingebaute Gewinderohr soll vorsichtig ausgeführt werden, damit die Ausgangsempfindlichkeit des Geräts nicht beschädigt wird.
- Es wird empfohlen, das Gerät vor dem Einsatz mit der höchsten vorgesehenen Temperatur und dem höchsten erwarteten Druck zu betreiben, um einen Empfindlichkeitsverlust nach der ersten Exposition zu vermeiden.

7.15.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

- Einsatz bei der Überwachung des baulichen Zustands von Brücken mit Hilfe von Ultraschalltests. An der Oberfläche des Bauwerks angebrachte piezoelektrische Druckgeräte können die sich ausbreitenden Spannungswellen erfassen.
- Geeignet für die Messung der Radlast, der Fahrspur und der Überfahrtszeit von Fahrzeugen, wenn sie an den beiden Enden einer Brücke installiert werden.
- Messung der vorhandenen Spannungen und Vergleich mit dem zulässigen Höchstwert für das überwachte Tragwerk.
- Bei Anwendung auf Kraftmessdosen (z. B. eine in das Mauerwerk eingesetzte flache Buchse) können Änderungen der vorhandenen Spannungen gemessen werden.

7.15.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Messung der dynamischen relativen Druckschwankungen.
- Geeignet für die Messung verschiedener Arten von Kräften: Längskräfte, die parallel zur Kristallachse wirken, Querkkräfte, die quer zur Kristallachse wirken, oder Scherkräfte.

- Piezoelektrische Drucksensoren geben ein Wechselstromsignal aus, das proportional zum Eingangsdruck ist. Die Signalantwort ist über einen weiten Temperatur- und Druckbereich linear, wobei der Referenzbereich zwischen 0,7 kPa und 70 MPa liegt.
- Piezoelektrische Sensoren werden je nach dem gemessenen Druckbereich in drei Kategorien eingeteilt: Niederdrucksensoren (bis zu einigen Bar, wobei 1 bar = 100 kPa), Standardsensoren (bis zu mehreren hundert Bar), Hochdrucksensoren (über 1 kbar).
- Stabiles Ausgangssignal über ein breites Frequenzspektrum (nutzbarer Bereich in der Abbildung unten), das durch die Resonanzfrequenz des Sensors abgegrenzt ist, die normalerweise bei Hunderten von kHz auftritt. Die Grenze des Hochfrequenzverhaltens wird durch den Ansteuerstrom, die Kabelkapazität und die Länge bestimmt, während das Niedrigfrequenzverhalten vom Ladungsverstärker abhängt. Dieser Verstärker zeichnet sich durch eine Entladungszeitkonstante aus, die, wenn sie lang ist, die Messung niederfrequenter Ausgänge ermöglicht.
- Gängige piezoelektrische Drucksensoren funktionieren bei Temperaturen bis zu 200°C in einigen Fällen sogar 250 °C. Höhere Temperaturen erfordern spezielle piezoelektrische Wandler oder die Verwendung einer Wasserkühlung.
- Die typische Genauigkeit des Ausgangssignals beträgt 1% des Skalenendwerts.
- Die typische Messfrequenz ist jede Stunde.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

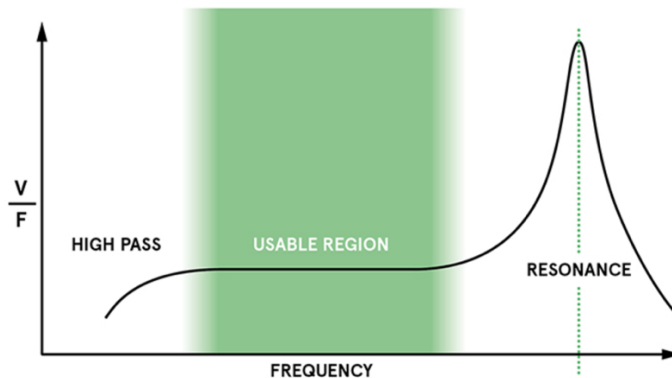


Abb. 7.36 Grafische Darstellung des piezoelektrischen Drucksensorausgangs im Frequenzbereich [62]

7.15.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

- Piezoelektrische Drucksensoren sind eine robuste Technologie, die zuverlässige Messungen in einem breiten Frequenzbereich und unter hohen Druckbedingungen oder in rauen Umgebungen ermöglicht. Sie sind für den Einsatz bei hohen Temperaturen geeignet und sind unempfindlich gegenüber Störungen durch elektrische und magnetische Felder und Strahlungen. Dank des starren und steifen Aufbaus des konstitutiven Kristalls reagieren sie sehr empfindlich auf kleine Druckänderungen und benötigen nur extrem geringe Verformungen, um ein zuverlässiges Ausgangssignal zu liefern. Sie sind kompakt und besitzen kleine Abmessungen und daher einfach einzuwenden. Darüber hinaus sind sie stromsparende Geräte, da sie keine externe Stromquelle benötigen.
- Diese Drucksensoren sind für die Messung statischer und konstanter Drücke ungeeignet, da die Kristallladung im Laufe der Zeit aufgrund von Leckagen, die durch unzureichende Isolierung, Innenwiderstand oder andere damit zusammenhängende Faktoren verursacht werden, nachlässt.
- Die Preisspanne bei piezoelektrischen Druckaufnehmern wird durch die Wahl des Materials für die Kristallkomponente bestimmt. Wählt man preiswerte Kristalle wie Quarz oder Turmalin, werden die Sensoren zu einer preiswerten Überwachungslösung. Die Kosten für einen piezoelektrischen Sensor können zwischen 10 und 100 CHF liegen.

7.15.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.15.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [56] OMEGA Engineering (2015): How to evaluate and install a load cell; www.omega.co.uk, Zugriff am 06.09.2022
 - [57] Trent D.: Strain gauge load cell basics; www.800loadcel.com, Zugriff am 06.09.2022
 - [58] Tekscan: Load cell vs force sensor; www.tekscan.com, Zugriff am 06.09.2022
 - [59] Bergmeister, K., & Santa, U. (2001). Global monitoring concepts for bridges. Structural Concrete, 2(1), 29-39
 - [60] LCM Systems: Solutions in load cells technology. www.lcmsystems.com, Zugriff am 06.09.2022
 - [61] Flintec: What is a tension load cell and how does it work? www.flintec.com, Zugriff am 06.09.2022
 - [62] Avnet Abacus: Capacitive pressure sensors; <https://www.avnet.com>, Zugriff am 06.09.2022
 - [63] M.H. Bao, Micro mechanical transducers: pressure sensors accelerometers and gyroscopes, Elsevier, 2000
 - [64] Li, X., Sun, J. Y., Shi, B. B., Zhao, Z. H., und He, X. T. (2020): A theoretical study on an elastic polymer thin film-based capacitive wind-pressure sensor. Polymers, 12(9), 2133
 - [65] ES Systems (2020): MEMS capacitive vs piezoresistive pressure sensors – what are their differences? <https://esenssys.com>, Zugriff am 06.09.2022
 - [66] W.H. Ko and Q. Wang, Touch mode capacitive pressure sensors. Sensors and Actuators A: Physical, 75(3): 242-251, 1999.
 - [67] Associazione Mondiale della Strada – AIPCR comitato nazionale italiano (2006): Monitoraggio delle caratteristiche e delle azioni del traffico veicolare per il progetto e la manutenzione delle pavimentazioni stradali, Convegno Nazionale Stradale, Firenze university press
 - [68] Sensor-Works (2019): How do piezoelectric sensors work; <https://www.sensor-works.com>, Zugriff am 06.09.2022
 - [69] PCB Piezotronics: Introduction to dynamic pressure sensors; <https://www.pcb.com>, Zugriff am 06.09.2022
 - [70] P. Sparkes and J. Webb, Structural health monitoring in civil engineering, CIRIA, 2020
 - [71] P. Gautschi, Piezoelectric sensors. In: Piezoelectric sensorics. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002
 - [72] P. Haardt, S. Dabringhaus, W.D. Friebe, R. Bayerstorfer, T. Bäumler and U. Freundt, Die intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn. Bautechnik, 94: 438-444, 2017.
-

7.16 Faseroptische Drucksensoren

7.16.1 Beschrieb der Technologie

Optische Drucksensoren erkennen eine Druckänderung durch Einwirkung auf Licht [76]. Im einfachsten Fall kann dies ein mechanisches System sein, das das Licht bei steigendem Druck blockiert. Bei fortschrittlicheren Sensoren ermöglicht die Messung der Phasendifferenz eine sehr genaue Messung kleiner Druckänderungen. Bei einem optischen Drucksensor auf Intensitätsbasis führt ein Druckanstieg dazu, dass die Lichtquelle nach und nach blockiert wird. Der Sensor misst dann die Veränderung des empfangenen Lichts. Im dem in Abb. 7.37 gezeigten Mechanismus bewegt der Druck eine Blende, worauf die daran befestigte lichtundurchlässige Lamelle mehr Licht der LED als zuvor blockiert. Der Rückgang der Lichtintensität wird von der Fotodiode erfasst und ergibt eine direkte Messung des Drucks.

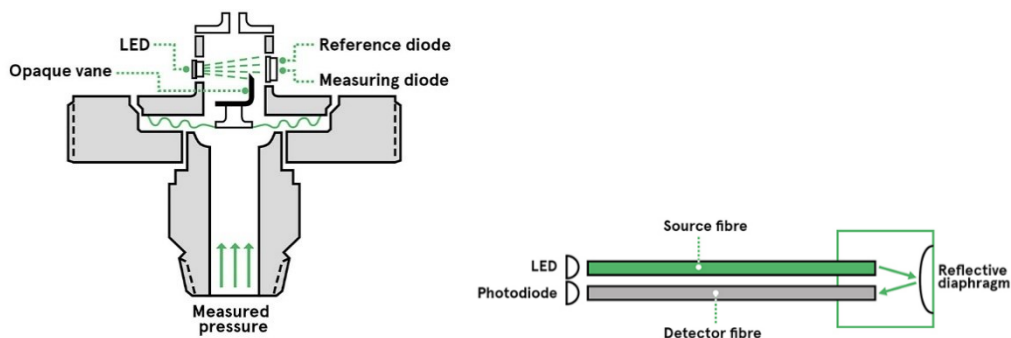


Abb. 7.37 Das Funktionsprinzip eines optischen Drucksensors. Abbildung wiederverwendet aus [76]

Faseroptische Drucksensoren können entweder als extrinsisch klassifiziert werden, bei denen die Messung ausserhalb der Faser stattfindet, oder als intrinsisch, bei denen sich die Faser selbst als Sensoren benutzt werden. Sehr empfindliche optische Messungen können mit Hilfe der Interferometrie durchgeführt werden, d. h. durch Messung der Phasenverschiebung zwischen Licht, das zwei verschiedene Wege genommen hat. Auf diese Weise können Abstandsänderungen festgestellt werden, die einem Bruchteil der Wellenlänge des Lichts entsprechen. Es gibt zwei gängige Arten von Drucksensoren, die die Interferometrie nutzen: das Fabry-Pérot-Interferometer (FPI) und das Faser-Bragg-Gitter (FBG).

Der FPI ist ein extrinsischer Sensor, der die Interferenz zwischen mehreren Lichtstrahlen nutzt, die zwischen zwei Oberflächen in einem Hohlraum hin und her reflektiert werden. Wenn sich der Abstand zwischen ihnen ändert, verändert sich durch die Interferenz die Menge des bei einer bestimmten Wellenlänge empfangenen Lichts. Dies ist eine der besten optischen Sensortechnologien. Sie ist eindeutig, genau und lässt sich leicht auf verschiedene Grössen und Druckbereiche skalieren.

Ein FBG ist ein intrinsischer Sensor, der eine regelmässige Reihe von Reflexionsstrukturen in der Faser aufweist. Diese reflektierenden Strukturen werden durch Dehnung oder Quetschung der Faser beeinflusst, wodurch sich die Wellenlängen des reflektierten Lichts ändern. Weitere Typen optischer Drucksensoren und eine Beschreibung ihres Funktionsprinzips finden sich in Ref. [73].

7.16.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Diese Sensoren finden breite Anwendung bei der Messung des Drucks auf Tunnelwände Dämmen und Rohrleitungen. Potenzielle Anwendungen von faseroptischen Drucksensoren in Kunstbauten umfassen:

- Langfristige Überwachung des Drucks auf Stützmauern. Als Hinweis sei angemerkt, dass dies nur sinnvoll interpretiert werden kann, wenn der Anteil des Wasserdrucks, der stark schwanken kann, für Bauwerke mit wasserführendem Untergrund bekannt ist.

- Überwachung des Drucks von Baugrubenwänden.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Neuste Studien haben gezeigt, dass verteilte faseroptische Sensoren erdbebenbedingte Spannungen messen und erste Anzeichen eines Hangrutsches erkennen können, was den Weg für die Entwicklung wirksamerer Frühwarnsysteme ebnet [77].

7.16.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Eine detailliertere Beschreibung der Datenerfassung finden Sie im Abschnitt Faseroptische Sensoren (0). Die Genauigkeit der Druckmessung variiert bei den verschiedenen Arten von faseroptischen Drucksensoren. Eine sehr hohe Genauigkeit bei der Druckmessung mit optischen Fasern wird berichtet in [75] mit frequenzmodulierter Dauerstrich-Laserinterferenz, die eine Genauigkeit von 3,8 Pa im Bereich von 0–600 kPa sowie eine gute Wiederholbarkeit und Stabilität aufweist.

7.16.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Faseroptische Drucksensoren haben folgende Vorteile:

- geringe Grösse und Flexibilität
- Unempfindlichkeit gegenüber Temperaturschwankungen
- Unempfindlichkeit gegenüber Verhältnisfrequenzstörungen und elektromagnetischen Störungen oder Blitzschlag,
- sehr geringe Hysterese und Wiederholbarkeit aufgrund der geringen erforderlichen Bewegung
- geringer Übertragungsverlust im Vergleich zu anderen elektrischen Sensoren.

Allerdings sind sie häufig mit den folgenden Einschränkungen verbunden:

- Empfindlichkeit gegenüber akustischen und mechanischen Vibrationen
- Anfälligkeit von Fasersensoren und Kabeln.

Die Kosten für einen fertigen Sensor belaufen sich auf ca. 125 CHF pro 10 m. Die Kosten für die optische Rohfaser betragen 400 CHF für 1 km Faser. Die Vorbereitung eines Sensors dauert ca. 20–30 Minuten für gut ausgebildetes Personal. Die Spleissmaschine kostet ca. 500 bis 1000 CHF, kann aber wiederverwendet werden. Die Installation eines Fasersensors dauert 10–60 Minuten, abhängig von der Länge des Fasersensors und der Stelle, an der er montiert bzw. geklebt wird.

7.16.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.16.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [73] HM Hashemian et. al. Assessment of Fiber Optic Pressure Sensors. (1995).
<https://www.osti.gov/servlets/purl/71391>, Zugriff am 06.09.2022

- [74] <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/optical/>, Zugriff am 06.09.2022

- [75] L. Baia, G. Zhenga, B. Sun, X. Zhang, Q. Sheng, und Y. Han, High-precision optical fiber pressure sensor using frequency-modulated continuous-wave laser interference, AIP Advances 11, 025038, 2021;
<https://doi.org/10.1063/5.0035643>

- [76] <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/optical/>, Zugriff am 06.09.2022

- [77] Schenato, L., Palmieri, L., Camporese, M. et al., Distributed optical fibre sensing for early detection of shallow landslides triggering. Sci Rep 7, 14686, 2017, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12610-1>

B SHM – Antwortgrössen

B1 Verschiebung / Verformung / Durchbiegung

Tab. 7.22 B1 Verschiebung / Verformung / Durchbiegung – Übersicht – Teil 1

Titel Einsatzzweck		Verschiebung / Verformung / Durchbiegung			
Kurzbeschreibung		In der folgenden Tabelle werden einige charakteristische Technologien aufgeführt, die sich sowohl auf statische als auch auf dynamische Messungen beziehen. Die Messungen, die sich auf dynamische Verschiebungen beziehen, werden in Abschnitt B4 aufgeführt.			
Überwachungs-technologie		Sat. Radarinterferometrie	Tachymeter	Nivellement	laserbasierte Sensoren
"ID"		SRI_	TAC_	NIV_	LAS_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	5 optisch	10 radar	5 optisch	7 laseroptisch
	c. Datenspeicher	3 analog (Ablesung)	1 digital	3 analog (Ablesung)	1 digital
	d. Lokalisation	5 raumbezogen	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrössen	Grössen	Verschiebung / Verformung / Durchbiegung			
	Messungsbereich		bis 10km	<1.0–100 m	10cm bis 3km
	Auflösung	1x4.4m	0.1" (0.01 mgon)		0.1 µm
	Genauigkeit	0.5-2mm	1 mm + 1.5 mm / km	± 0.2-2.0 mm/km	±1 mm
	Bemerkungen				
Kunstbauten		1	3	2	2
Naturgefahren		3	2	2	1
Umwelt		2	1	1	2
Einsatzzeitpunkt		V	V-W-N	V-W-N	W-N
Entwicklungsstand					
Kosten	initial / einmalig				
	wiederkehrend				

Tab. 7.23 B1 Verschiebung / Verformung / Durchbiegung – Übersicht – Teil 2

Titel Einsatzzweck		Verschiebung / Verformung / Durchbiegung				
Kurzbeschreibung		In der folgenden Tabelle werden einige charakteristische Technologien aufgeführt, die sich sowohl auf statische als auch auf dynamische Messungen beziehen. Die Messungen, die sich auf dynamische Verschiebungen beziehen, werden in Abschnitt B4 aufgeführt.				
Überwachungstechnologie		terrestrische Radarinterferometrie	GPS	LVDTs	Extensometer	Inklinometer
"ID"		TRI_	GPS_	LDV_	EXT_	INK_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	2 indirekt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	10 radar	10 radar	3 elektromagnetisch	mechanisch/elektrisch	mechanisch/elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	digital/analog	1 digital
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	1 punktuell	1 punktuell	2 streckenbezogen	1 punktuell
	e. Raumbezug					
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Verschiebung / Verformung / Durchbiegung				
	Messungsbereich	Flächenraster-Auflösung: 0.75m		±100µm bis ±25cm	bis zu 300mm	
	Auflösung			0.1mm	0.02%F.S.	
	Genauigkeit	0.01 mm	0.6 cm	±0.5%	±0.10%	±2-10 µrad
	Bemerkungen					
Kunstbauten		2	1	3	2	2
Naturgefahren		3	1	1	2	3
Umwelt		0	4	0	0	0
Einsatzzeitpunkt		V-W-N	W-N	W-N	W-N	W-N
Entwicklungsstand						
Kosten	initial / einmalig					
	wiederkehrend					

7.17 Flächige Deformation – Satellitengestützte Radarinterferometrie

7.17.1 Beschrieb der Technologie

Satellitengestützte Radarinterferometrie (auch InSAR für 'interferometric synthetic aperture radar' genannt) eignet sich für die Überwachung von grossflächigen, unbekannten Fels-, Hang- oder Gletscherinstabilitäten und liefert wertvolle Einsichten über instabile Zonen. Radar steht für 'radio detection and ranging' und bezieht sich auf verschiedene Detektions- und Ortungsverfahren. Bei der satellitengestützten Radarinterferometrie sendet ein satellitengestütztes Radargerät gebündelte elektromagnetische Wellen aus, welche an einem Objekt reflektieren, vom Gerät empfangen und nach unterschiedlichen Kriterien ausgewertet werden. Mit dem Vergleich zweier Phasenmessungen kann die Deformation in Blickrichtung des Radars berechnet werden.

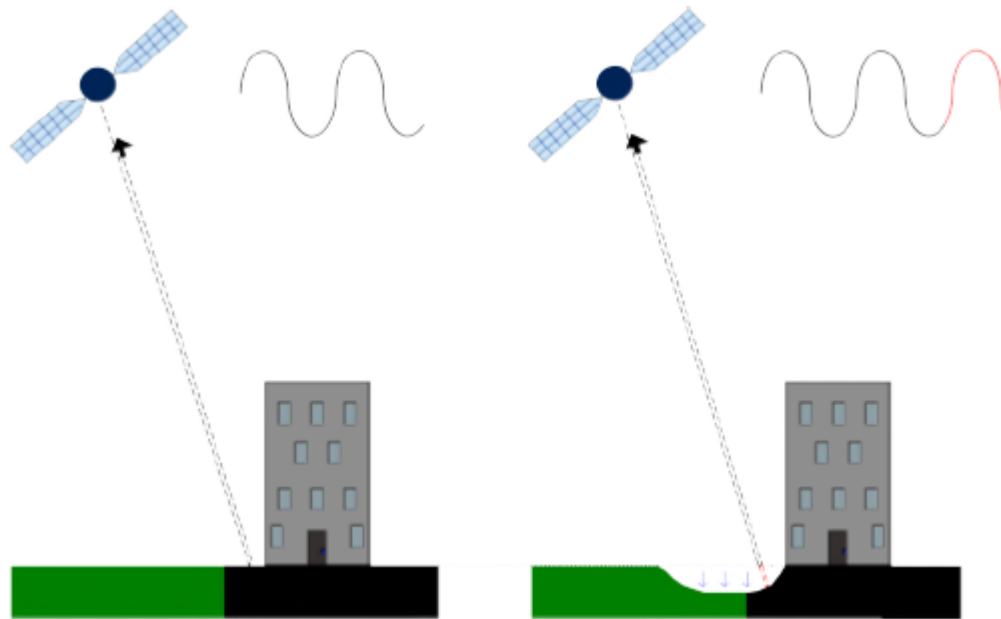


Abb. 7.38 Schemaskizze der satellitengestützten Radarinterferometrie (Quelle: [81]). Aus der Phasenverschiebung der reflektierten Radarstrahlen kann eine Deformation berechnet werden.

Radar-Satelliten befinden sich im Weltall auf Umlaufbahnen um die Erde in einer Höhe von 500–800 km und bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von rund 7,5 km/s vorwärts. Sie scannen die Erdoberfläche in Streifen und wiederholen denselben Kreis nach einer gewissen Anzahl Tage. Diese Wiederkehrperiode ist je nach Satellit unterschiedlich und beträgt zwischen 6 und 46 Tagen. Aufgrund der Erdrotation und der Umlaufbahn des Satelliten sowie dessen Blickrichtung wird derselbe Standort von Süd nach Nord («ascending orbit») sowie von Nord nach Süd («descending orbit») überflogen. Damit können horizontale und vertikale Verschiebungen festgestellt werden, wobei nur Messungen der gleichen Ansicht miteinander verglichen werden können. West- und Osthänge sind besser einsehbar als Nord- und Südexpositionen. Atmosphärische Einflüsse (Luftfeuchte, Luftdruck, Temperatur, Wind), welche einen Einfluss auf die Auflösung haben, können mit sogenannten Kalibrationspunkten herausgefiltert und minimiert werden.

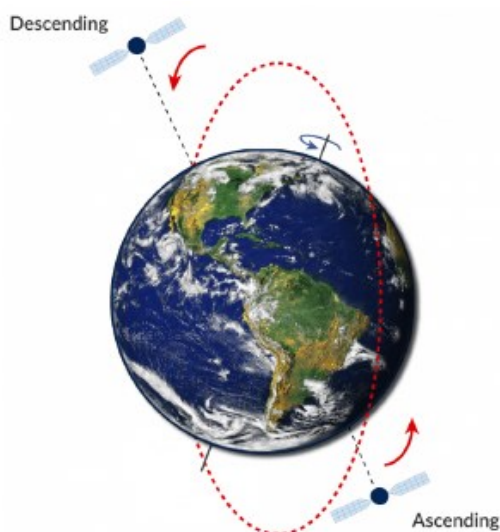


Abb. 7.39 Umlaufbahn eines Satelliten und Ansicht desselben Standorts, einmal von Süd nach Nord («ascending») und einmal von Nord nach Süd («descending»)

Nicht alle Objekte an der Erdoberfläche reflektieren Radarwellen gleich gut zurück zum Satelliten. Eckige Objekte wie Häuser und andere feste Infrastruktur reflektieren am besten, wo hingegen eine windstille Wasseroberfläche wie ein Spiegel wirkt und praktisch kein Signal zurück zum Satelliten sendet.

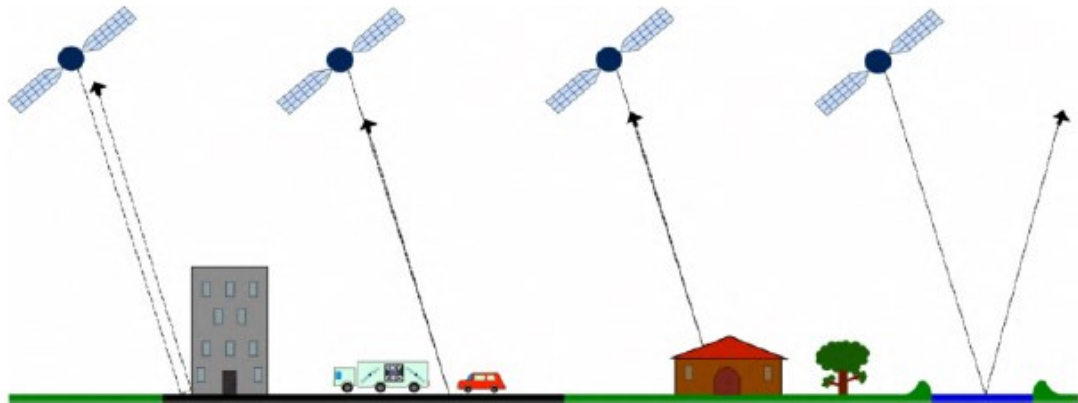


Abb. 7.40 Radarwellen werden nicht von allen Objekten an der Erdoberfläche gleich gut zum Satelliten reflektiert (Quelle: [81])

Je nach Satelliten und Region ist es möglich, tausend bis zehntausend Messpunkte pro Quadratkilometer zu erhalten. Die räumliche Auflösung beeinflusst die Genauigkeit der Messung, der Lokalisation des Messpunkts sowie die Genauigkeit der errechneten Bewegung:

Tab. 7.24 Spezifikationen für Satellitengestützte Radarinterferometrie

	Genauigkeit der Einzelmessung	Genauigkeit Lokalisation des Messpunkts	Genauigkeit der errechneten Bewegung
Standard Auflösung	6–8 mm	X,Y: 2–3 m Z: 2–2,5 m	1–2 mm/Jahr
Hohe Auflösung	2–3 mm	X,Y: 1–2 m Z: 1–1,5 m	<1 mm/Jahr

Verschiebungen werden mithilfe sogenannter Interferogramme ermittelt: Ein Interferogramm resultiert aus der Phasensubtraktion zweier SAR Bilder derselben Ansicht («ascending orbit» / «descending orbit»). In einem Interferogramm wird der Phasenunterschied mit der Pixelfarbe dargestellt. Die Anzahl sich wiederholender Farbabfolgen ist identisch mit der Anzahl zusätzlicher oder abzüglicher Wellenlängen, je nachdem ob es sich bei der Verschiebung um eine Senkung oder Hebung handelt. Zusammen mit der genau bekannten Wellenlänge kann die Verschiebung in Blickrichtung des Sensors berechnet werden.

Atmosphärische Einflüsse (Luftfeuchte, Luftdruck, Temperatur, Wind) stören die Bewegung der Radarwellen vom Satelliten zur Erde und zurück. Sie sind einerseits abhängig von der Lokalität (über dem Äquator z. B. kommt es aufgrund der höheren Luftfeuchte zu grösseren Turbulenzen als über den Polen), andererseits hat auch die Tageszeit (resp. der Sonnenstand und damit Temperatur und Luftfeuchte) einen Einfluss. Die atmosphärischen Einflüsse können mit sogenannten 'Kalibrationspunkten' herausgefiltert und minimiert werden. Als Kalibrationspunkte werden Orte verwendet, welche als stabil erachtet werden oder welche sich perfekt linear bewegen.

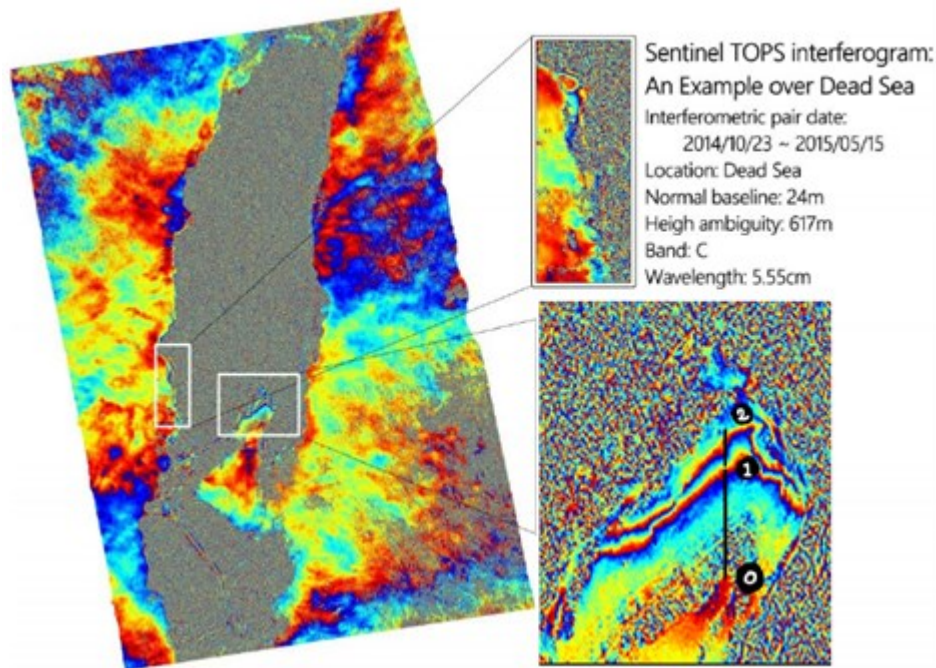


Abb. 7.41 Beispiel eines Interferogramms: Dieselbe Farbabfolge (rot- blau-rot) wiederholt sich dreimal in Richtung zusätzlicher Wellenlängen. Daraus kann geschlossen werden, dass sich dieser Bereich um die dreifache Wellenlänge gesenkt hat.

7.17.1 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Was die Überwachung des Bauwerks selbst betrifft, so haben neuere Arbeiten die Anwendbarkeit der satellitengestützten Radarinterferometrie für die hochpräzise Verformungsüberwachung von Seebrücken [84] sowie die Überwachung der Winkelverformung und der Setzungen von Brückenpfeilern [85] gezeigt.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Geländeverschiebungen im Fels- und Lockermaterial sind im Gelände von Auge oft nicht oder nur anhand lokaler Phänomene erkennbar und kaum quantifizierbar. Um das Verhalten von solchen instabilen Gebieten zu überwachen und Veränderungen in der Geschwindigkeit und somit Beschleunigungen zu erfassen, sind messtechnische Überwachungen notwendig. Somit können sich abzeichnende Abbrüche von grossen Instabilitäten frühzeitig erkannt und – unter günstigen Umständen – auch vorhergesagt werden. Flächige Überwachungsmethoden bieten den Vorteil, dass die Bewegungen in der gesamten instabilen Masse erfasst werden können und damit die geologische Modellbildung massgeblich unterstützt wird.

Limitierend für die Anwendung von Satellitengestützter Radarinterferometrie kann unter anderem sein, dass:

- dass die Bewegungsrichtung der Instabilität ungünstig ist (Hauptbewegungsrichtung Nord-Süd)
- Vegetation die Interpretation dauerhaft verhindert.
- Schneebedeckung die Interpretation der Daten temporär behindert
- die potenzielle Instabilität zu klein ist.

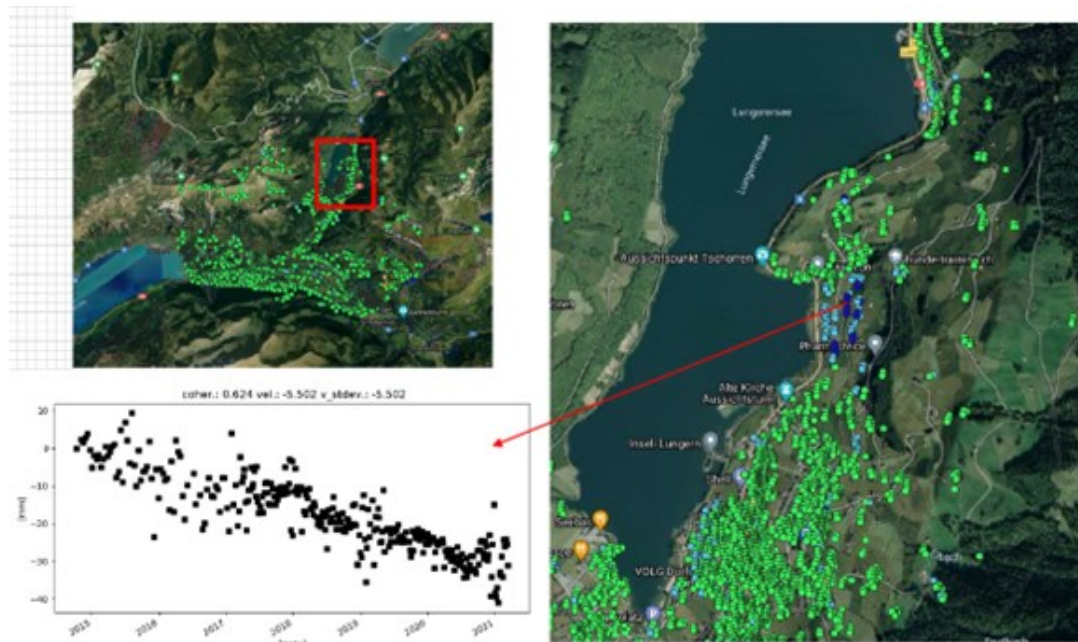


Abb. 7.42 Anwendung Satellitengestützter Radarinterferometrie in der Zentralschweiz. Die meisten analysierten Punkte zeigen keine Bewegung (grün). Bei einigen Punkten ist eine Bewegung erkennbar (blaue Farben). Diese repräsentieren ein bekanntes Rutschungsgebiet. Die Daten erlauben eine erste räumliche Abgrenzung der Rutschung. Für jeden Punkt innerhalb der Rutschung kann die Zeitlinie der Bewegungen ausgewertet und analysiert werden (unten links). Über die Auswertung mehrerer Punkte innerhalb der Rutschung können durchschnittliche Bewegungsraten und auch Phasen erhöhter Geschwindigkeiten bestimmt werden (Quelle: [86]).

7.17.2 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Die Messdaten werden vom Satelliten an einen Server des Betreibers übermittelt, wo eine Analyse erfolgt. Das Messintervall hängt von der Umlaufzeit der verwendeten Satelliten ab. Das Analyseintervall ist flexibel wählbar (zweiwöchentlich, monatlich, saisonal, jährlich). Die Berechnung der Deformation erfolgt anhand des Vergleichs zweier berechneter Punktwolken.
- Bei der Satellitengestützten Radarinterferometrie handelt es sich um eine flächige Überwachungstechnologie. Der Raumbezug ist gegeben durch die Umlaufbahn des verwendeten Satelliten und den Standort des «Point of Interest».
- Gemessen wird die Phasenverschiebung der reflektierten Radarwellen.
- Die räumliche Auflösung ist je nach Satelliten unterschiedlich und kann zwischen 1 m und ca. 100 m betragen. Die Genauigkeit der Deformationsanalyse liegt im Millimeter-Bereich (Verschiebungen von <1 mm/Jahr sind messbar).

7.17.3 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Mit der Satellitengestützten Radarinterferometrie ist eine periodische, wetterunabhängige, grossflächige Überwachung von Instabilitäten möglich. Diese Technologie ist noch nicht Standard, wird aber immer häufiger angewendet. Bedeckung wie z. B. Vegetation oder Schnee stört die Messung. Auch Felswände und steile Hänge, insbesondere nord- oder südexponiert, können oft nur ungenügend abgedeckt werden.

Für Überwachungssysteme dieser Art ist es sehr schwierig, generische Preise zu nennen. Sie sind stark abhängig von den Anforderungen (Analyseintervall, abzudeckende Fläche). Die Kosten für eine Überwachung mit satellitengestützter Radarinterferometrie (Datenbeschaffung und Auswertung) liegen jedoch in der hohen Preisklasse (mehrere 10'000 bis über 100'000 CHF pro Jahr).

7.17.4 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5 des Teilberichts Tunnel

7.17.5 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [78] M. Sättele and M. Bründl, Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz / BABS, Bern, 2015

- [79] Bundesamt für Umwelt (BAFU): Überwachungssysteme für gravitative Naturgefahren – Handbuch. Bern, 34 Seiten.

- [80] Webseite von Geopraevent, <https://www.geopraevent.ch/technologien/alarm>, Zugriff am 10.05.2022

- [81] Sky Geo. InSAR technical background: Explaining the basics of InSAR, v2.2.

- [82] Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Präsentationsunterlagen Radarinterferometrie für die Schweiz, 27.04.2018.

- [83] K.J. Reinders, G. Giardina, F. Zurfluh, J. Ryser, und R.F. Hanssen, Proving compliance of satellite InSAR technology with geotechnical design codes, Transportation Geotechnics, 33, 100722, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100722>

- [84] X. Qin, Q. Li, X. Ding, L. Xie, C. Wang, M. Liao, L. Zhang, B. Zhang, und S. Xiong, A structure knowledge-synthetic aperture radar interferometry integration method for high-precision deformation monitoring and risk identification of sea-crossing bridges, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 103, 2021

- [85] M.D. Soldato, R. Tomás, J.P. Castillo, G.H. García, J.C. Lopez-Davalillos, und O. Mora, A multi-sensor approach for monitoring a road bridge in the Valencia harbor (SE Spain) by SAR Interferometry (InSAR), 2016.

- [86] SarMap (2021): Monitoring and measurements of land displacements on the road network F2 and surrounding landscape using satellite differential SAR interferometry. Interim Report. October 2021.

7.18 Geodätische Techniken – Tachymeter

7.18.1 Beschrieb der Technologie

Tachymeter messen die Horizontalrichtung, den Vertikalwinkel und die Distanz (Schrägstrecke) zwischen dem Messgerät und einem Zielpunkt. Für die Durchführung der Messung muss zwischen dem Messgerät und dem Zielpunkt eine geradlinige Sichtverbindung bestehen. Das Tachymeter ist eine Weiterentwicklung des klassischen Theodolits (optische Winkelmessung) und wird auch als Totalstation bezeichnet. Für die Messung werden elektrooptische Distanzmesser (EDM) und elektronische Winkelmesser verwendet. Die Winkelmessung erfolgt dabei durch elektronisches Abtasten der codierten Teilung des Horizontal- und Vertikalkreises. Das Messgerät muss für die Messung horizontal positioniert werden. Als Zielpunkt für die Messung werden an einem Messbolzen befestigte Reflektoren (Prismen) verwendet, wobei heutige Geräte auch eine reflektorlose Distanzmessung mittels Laser erlauben.

Die Messgrößen des Zielpunktes (Horizontalwinkel, Vertikalwinkel und Distanz) sind gleichbedeutend mit den Polarkoordinaten in Relation zum Tachymeter. Für die Bestimmung des Zielpunktes in einem übergeordneten Koordinatensystem (z. B. LV95) muss die Position des Tachymeters in diesem bestimmt werden. Einerseits kann das Tachymeter direkt auf einem Referenzpunkt mit bekannten Koordinaten stationiert werden; andererseits kann das Tachymeter frei stationiert und die Position durch die Messung von Referenzpunkten berechnet werden. Mit der Messung von mehreren Referenzpunkten erhöht sich die Positionsgenauigkeit des Tachymeters und folglich auch der Zielpunkte. Die räumliche Verschiebung eines Messpunktes kann durch zeitlich gestaffelte Messungen erfasst werden. Die Messdatenerfassung erfolgt punktuell für einzelne Messpunkte. Die Daten werden im Gerät gespeichert und gegebenenfalls direkt in ein Koordinatensystem umgerechnet. Mittels automatisierter Zielerfassung und Ausrichtung können moderne Tachymeter für die automatisierte Erfassung von mehreren Messpunkten verwendet werden. Das Tachymeter wird dabei stationär verwendet und die Messdaten können digital übermittelt werden. Für die Sicherstellung der stationären Positionierung müssen neben den Messpunkten auch die Referenzpunkte wiederholt vermessen werden.

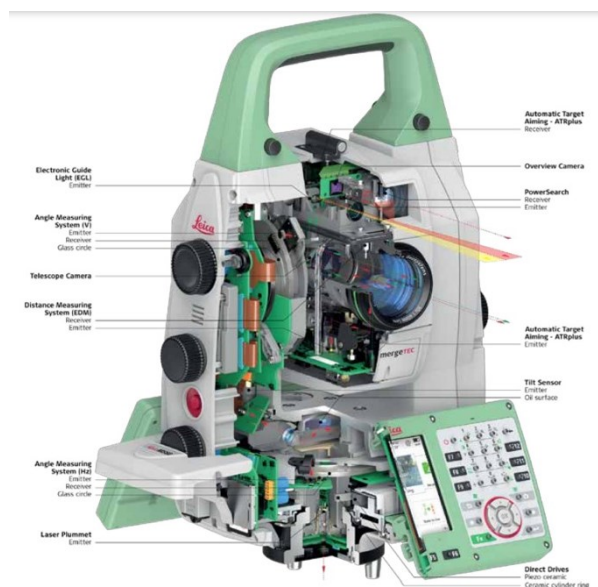


Abb. 7.43 Tachymeter / Totalstation [87]

7.18.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Geodätische Vermessungen mit Totalstationen eignen sich für die punktuelle Überwachung beliebiger Oberflächen (Boden oder Bauwerke). Mit Hilfe eines vordefinierten Gitters können flächenhafte Messungen des Bauwerks oder des Aushubes erstellt und überwacht werden. Die Position des Tachymeters kann durch einen Polygonzug von Messungen anhand von Referenzpunkten in der Umgebung bestimmt werden.

Geodätische Aufnahmen mit Tachymeter werden im Bereich Kunstbauten (ähnlich wie im Falle von Tunneln) für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurz- und langfristige Überwachung von Bauwerksverformungen (z. B. Verformung des Baugrubenausbaus oder des Baugrubenverschlusses);
- Kurz- und langfristige Überwachung von Bodenverformungen (z. B. an der Bodenoberfläche oder in angrenzenden Bauwerken);
- Überwachung / Kontrolle der Brückengeometrie (z. B. Geometrie der Fahrbahnplatte) während des Baus;
- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlauf über die Zeit und damit Rückschlüsse auf Stabilität und Verformungsverhalten von Böschungen, Erdrutschhängen und Steinschlaggebieten.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Überwachung von Hanginstabilitäten: Oberflächenverlauf über die Zeit und damit Rückschlüsse auf Stabilität und Verformungsverhalten von Rutschungen und Felssturzgebieten.

7.18.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt bei einem Tachymeter vor Ort. Mit einem stationären, motorisierten Tachymeter können die Messdaten automatisiert erfasst und digital übertragen werden. Das Messintervall bei einem automatisierten System kann den Anforderungen angepasst werden.
- Die Zielpunkte werden über die Messdaten in Polarkoordinaten zur Position des Tachymeters lokalisiert. Für einen Raumbezug im übergeordneten Koordinatensystem müssen zusätzliche Referenzpunkte mit bekannten Koordinaten eingemessen werden. Mittels wiederholter Messungen können die Verformungen der Zielpunkte als räumliche Verschiebungsvektoren aufgezeigt werden.
- Abgesehen von der Befestigung der Reflektoren (sofern erforderlich) erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Der Messbereich von einem Tachymeter für die Distanzmessung liegt mit einem Reflektor als Zielpunkt in einem Bereich von 1 bis 3'500 m. Mit speziellen Langstreckenmoden können Distanzen bis zu 10'000 m erreicht werden. Ohne Reflektor beschränkt sich die Reichweite auf maximal knapp 1'000 m bei optimalen Verhältnissen. Die Genauigkeit der Distanzmessung liegt ohne Reflektor bei rund 2–4 mm +2 mm/km. Mit einem Reflektor verbessert sich die Genauigkeit der Distanzmessung auf rund 1 mm +1,5 mm/km. Die Winkelmessung erfolgt mit einer Genauigkeit je nach Modell von 0,5" (0,15 mgon) bis 5" (1,5 mgon). Die Auflösung beträgt rund 0,1" (0,01 mgon). Zum Erreichen grosser Genauigkeiten müssen mittels Kontroll- und Mehrfachmessungen Messgerätfehler und äussere Einflüsse korrigiert werden.

Tab. 7.25 Messbereich / Genauigkeit von geodätischen Aufnahmen mit Tachymeter

Messgrösse	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Distanzmessung (Reflektor)	1,0–10'000 m	-	1 mm +1,5 mm/km
Distanzmessung (ohne Reflektor)	1,0–2'000 m	-	2–4 mm + 2 mm/km
Winkelmessung (Horizontal & Vertikal)	360° (400 gon)	0,1" (0,01 mgon)	0,5" (0,15 mgon) – 5" (1,5 mgon)

7.18.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Tachymeter werden aufgrund ihres flexiblen, erprobten Einsatzbereiches und der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Baugrunds- und Bauwerksflächen sowie für Vermessungsaufgaben verwendet. Für die Anwendung einer Messung muss ein direkter Sichtkontakt zwischen dem Messgerät und dem Zielpunkt vorhanden sein. Eingeschränkte Sichtverhältnisse (Nebel, Rauch) verschlechtern besonders die Genauigkeit von Messungen ohne Reflektor. Die Oberfläche von

reflektorlosen Zielpunkten wirkt sich ebenfalls auf die Genauigkeit und den maximalen Einsatzbereich aus. Für das Erreichen einer hohen Messgenauigkeit darf das Messgerät und der Zielpunkt zudem keinen Erschütterungen ausgesetzt sein.

Neuere Entwicklungen von Totalstationen ermöglichen ein Scannen von Oberflächen (rasches Messen von einem Raster von Zielpunkten ohne Reflektor). Integrierte Kameras ermöglichen zudem eine Bilddokumentation während den Messungen und das Anvisieren von Zielpunkten über digital verbundene Geräte.

Die Installationspauschalen für einen stationären und automatisierten Tachymeter mit digitaler Datenübertragung belaufen sich je nach Gerätetyp auf ca. 10'000 – 40'000 CHF. Wiederkehrende Kosten bestehen im Unterhalt, der Auswertung und Interpretationen der erhaltenen Daten. Einzelne Vermessung mit einem mobilen Tachymeter verursachen Kosten im Bereich von ca. 5'000 – 25'000 CHF / Messeinsatz, abhängig von der Zugänglichkeit, der Anzahl Zielpunkte und dem Umfang der Datenauswertung.

7.18.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5 des Teilberichts Tunnel

7.18.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[87] Leica Geosystems AG, Leica Nova MS60 White Paper, Hannes Maar, Hans-Martin Zogg, 2017.

7.19 Geodätische Techniken – Nivellement

7.19.1 Beschrieb der Technologie

Mit dem Nivellement wird die Höhendifferenz zwischen zwei Messpunkten bestimmt. Für ein geometrisches Nivellement wird ein Nivellier-Messgerät und mindestens eine Nivellierlatte mit einer Höheneinteilung benötigt. Das Nivellier wird zwischen den beiden Messpunkten aufgestellt und horizontal ausgerichtet. Präzise Nivelliergeräte enthalten zudem einen Kompensator, welcher kleine Abweichungen in der horizontalen Lage kompensieren kann. Die Nivellierlatten werden lotrecht auf dem Messpunkt aufgestellt und die Latteneinteilung wird vom Nivellier aus auf horizontaler Höhe optisch abgelesen. Mit der Messung von zwei Messpunkten von der gleichen Position des Nivelliers kann der Höhenunterschied zwischen den Punkten bestimmt werden. Für das Nivellement müssen die zwei Nivellierlatten der Messpunkte im horizontalen Blickfeld des Nivellier-Messgeräts liegen. Ein Nivellier-Messgerät ermöglicht durch ein optisches Auslesen einer vorgegebenen Distanz auf der Nivellierlatte eine grobe Distanzmessung zwischen Messgerät und Nivellierlatte.

Durch die Bestimmung der Höhendifferenz zu einem bekannten Referenzpunkt kann die Höhe des Messpunktes im übergeordneten Koordinatensystem (z. B. LV95) bestimmt werden. Die Messung zwischen Referenzpunkt und Messpunkt muss gegebenenfalls aufgrund von Hindernissen, der Distanz oder zu grossem Höhenunterschied in mehrere Messschritte unterteilt werden. Von einem Anfangspunkt (Referenzpunkt) werden durch aneinandergereihte Messungen, mit jeweils einem gemeinsamen Messpunkt, die Höhendifferenz zum Endpunkt (Messpunkt) bestimmt. Eine solche Messkette wird auch Liniennivellement genannt. Durch das Messen dieser Messkette in umgekehrter Richtung erfolgt eine Kontrolle und Überprüfung der Messung (Doppelnivellement). Für die Bestimmung der vertikalen Verschiebung eines Messpunktes muss der Bezug zu einem stationären Referenzpunkt mit bekannter Höhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen.

In klassischen Nivelliergeräten werden die Höhenunterschiede auf der Nivellierlatte mit dem Messgerät optisch abgelesen und analog erfasst. Digitalnivelliergeräte erfassen die Höhe auf der Nivellierlatte durch eine elektronische Bildverarbeitung. Die Nivellierlatte muss dazu eine codierte Einteilung aufweisen und unterscheidet sich je nach Hersteller. Die Höhenunterschiede werden direkt im Gerät gespeichert. Mit einem motorisierten, digitalen Nivelliergerät lassen sich mehrere Messpunkte mit stationären Nivellierlatten überwachen. Die einzelnen Messpunkte können automatisiert anvisiert werden und die Datenübermittlung kann digital erfolgen.

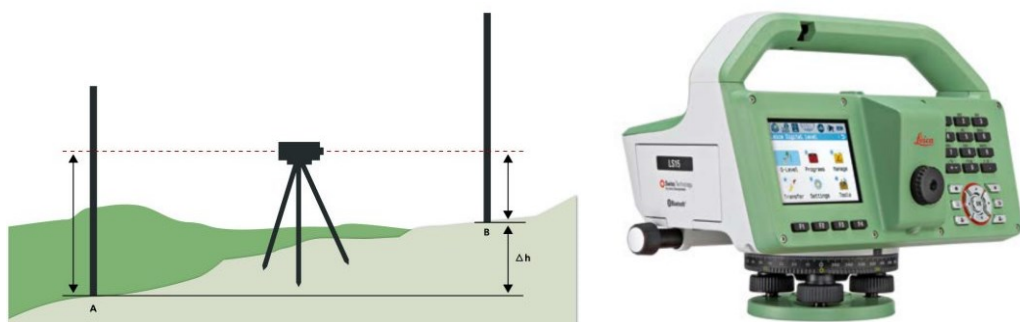


Abb. 7.44 Funktionsweise Nivellement (links, [88]) und digitales Nivelliergerät (rechts, [89])

7.19.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Geodätische Aufnahmen mit dem Nivellement eignen sich für die punktuelle Überwachung von Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Durch ein Raster lassen sich zudem flächenhafte Messungen von Oberflächen erstellen und überwachen. Im Allgemeinen werden Geodätische Aufnahmen mit Nivellement im Bereich Kunstbauten für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurzzeitüberwachung von Baugrundverformungen z. B. Setzungen/Hebungen an der Baugrundoberfläche

- Überwachung von Bauwerksverformungen z. B. Verformung einer Bodenplatte während oder kurz nach der Montage, im Laufe der Zeit und während kontrollierter Belastungsversuche (wie in [63] beschrieben).

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Überwachung von Hanginstabilitäten: Erkennen von Absenkungen über die Zeit und damit Rückschlüsse auf Stabilität und Verformungsverhalten von Rutschungen und Felssturzgebieten.

7.19.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt bei einem Nivellement vor Ort. Für die Messung muss eine direkte Sichtlinie zwischen Messgerät und Nivellierlatte vorhanden sein und beide Standorte müssen zugänglich sein.
- Für die Erstellung eines Raumbezugs des Messpunktes muss die Höhendifferenz im Vergleich zu einem Referenzpunkt mit bekannter Höhe ermittelt werden. Gegebenenfalls werden mehrere Messungen (Liniennivellement) benötigt.
- Abgesehen von der Befestigung von Messmarkierungen erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Der Messbereich von einem Nivelliergerät liegt in einem Bereich von weniger als 1 bis zu ca. 100 m. Die Genauigkeit der Messung ist abhängig vom Nivelliergerät und der Nivellierlatte und wird als Standardabweichung pro Kilometer Doppelnivellement angegeben. Ein Nivelliergerät erreicht je nach Typ zusammen mit einer Standard-Nivellierlatte eine Standardabweichung zwischen 1,0–2,0 mm/km. Mit hochpräzisen Nivellierlaten kann die Genauigkeit auf bis zu 0,2 mm/km gesenkt werden. Für das Erreichen einer hohen Genauigkeit müssen mittels Kontrollmessungen die Messgerätfehler und äusseren Einflüsse korrigiert werden.

Tab. 7.26 Messbereich / Genauigkeit von Nivellement

Messgrösse	Messbereich	Genauigkeit
Höhenmessung	<1.0–100 m	0.2–2.0 mm/km
Distanzmessung	2–100 m	1 mm/m (>10 mm)

7.19.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Nivellement wird aufgrund der hohen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Baugrunds Oberflächen sowie für Vermessungsaufgaben verwendet. Für die Anwendung einer Messung muss ein horizontaler Sichtkontakt zwischen dem Messgerät und der Nivellierlatte vorhanden sein. Eingeschränkte Sichtverhältnisse (Nebel, Rauch, Dunkelheit) verschlechtern die Genauigkeit von Messungen. Um eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, darf das Messgerät und die Nivellierlatte keinen Erschütterungen ausgesetzt sein und die Nivellierlatte muss lotrecht auf dem Messpunkt aufgestellt sein.

Die Kosten für eine Vermessung mit einem Nivellement belaufen sich auf rund 2'000 – 10'000 CHF / Messung, abhängig von der Zugänglichkeit, der Anzahl Messpunkte und dem Umfang der Datenauswertung.

7.19.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5 des Teilberichts Tunnel

7.19.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[88] Bundesamt für Landestopografie, Nivellement, <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/geodasie-vermessung/messverfahren/levelling.html>, Zugriff am 16.05.2022

[89] Leica Geosystems AG, Datenblatt Leica LS Digitalnivellier, <https://leica-geosystems.com/de-ch/products/levels/digital-levels/leica-ls15-and-ls10>, Zugriff am 16.05.2022

7.20 Schlauchwaage

7.20.1 Beschrieb der Technologie

Mit einer Schlauchwaage können die Höhendifferenzen zwischen mehreren Messpunkten bestimmt werden. Eine Schlauchwaagen Messung ist ein hydrostatisches Nivellement und funktioniert nach dem Prinzip der kommunizierenden Röhren. Mehrere Messpunkte sind über Röhren mit einem Referenzbehälter verbunden, welcher mit Flüssigkeit (in der Regel Wasser) gefüllt ist.

Bei einer Füllstandschlauchwaage ist an jedem Messpunkt ein Messgefäß angebracht. Aufgrund der Verbindungsröhren stellt sich in den Messgefäßen derselbe Flüssigkeitspegel wie im Referenzbehälter ein. Der Füllstand im Messgefäß entspricht der Höhendifferenz zwischen dem Messpunkt und dem Flüssigkeitspegel. Das Ablesen des Füllstandes kann manuell oder über Füllstandsensoren erfolgen. Mit der Bestimmung der Höhenlage des Referenzbehälters in einem übergeordneten Koordinatensystem und dessen Füllstand können über die gemessenen relativen Höhenunterschiede die absolute Höhe der Messpunkte bestimmt werden.

Bei einer Druckschlauchwaage ist an jedem Messpunkt eine Messzelle mit Drucksensor angebracht. Zusätzlich zum Referenzbehälter wird eine Referenzmesszelle eingebaut. In den Messzellen wird der hydrostatische Druck der Flüssigkeit über Drucksensoren ermittelt. Aus den Messwerten der Messzellen und dem spezifischen Gewicht der Flüssigkeit können die Höhendifferenzen im Vergleich zur Referenzmesszelle bestimmt werden. Durch die Bestimmung der Höhenlage der Referenzmesszelle in einem übergeordneten Koordinatensystem werden die Höhenangaben der einzelnen Messpunkte bestimmt.

Bei einer mobilen Schlauchwaage besteht das System nur aus einem Referenzbehälter und einer mobilen Messzelle / Messsonde, welche einen Drucksensor beinhaltet und über ein Hydraulikkabel mit dem Referenzbehälter verbunden ist. Die verschiebbliche Sonde kann die Druckdaten über Kabel an ein Anzeigegerät weiterleiten. Wie bei einem Füllstandschlauchwaage können durch die Höhenkoordinaten des Referenzbehälters und dessen Füllstand die absolute Höhe der Sonde bestimmt werden.

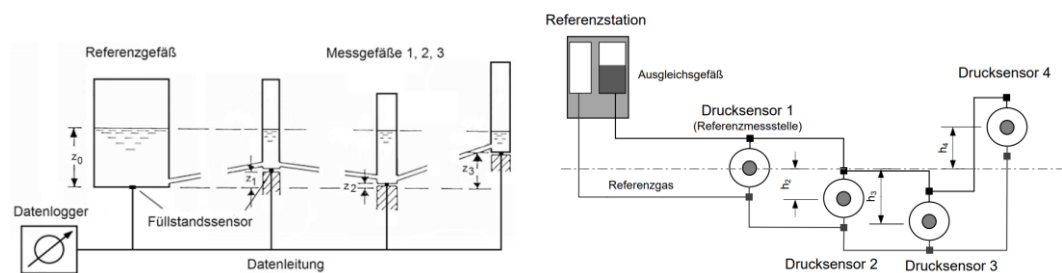


Abb. 7.45 Druckschlauchwaage (rechts, [91])

7.20.2 Fragestellungen in den Fachbereichen

Fragestellungen im Bereich Tunnel/Kunstbauten

Geodätische Aufnahmen mit Schlauchwagen eignen sich für die punktuelle Überwachung von Oberflächen (Baugrund oder Bauwerke). Es können sehr viele Messpunkte über einen längeren Zeitraum automatisiert überwacht werden. Messung können an der Oberfläche oder direkt im Tunnel erfolgen. Im Allgemeinen werden Schlauchwaagen im Tunnelbau für folgende Einsatzzwecke verwendet:

- Kurzzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. Setzungen/Hebungen an der Baugrundoberfläche oder in angrenzenden Bauwerken während des Tunnelvortriebs oder infolge Massnahmen im Baugrund (z.B. Ausgleichsinjektionen).
- Langzeitüberwachung von Baugrundverformungen z.B. infolge langfristigen Gebirgsdeformationen oder langfristigem Setzungsverhalten im Baugrund.
- Überwachung von Deformationen/Setzungen von Dämmen und Stauanlagen.

Fragestellung im Bereich Naturgefahren

- Geotechnik / Böschungsüberwachung: Oberflächenverlaufsentwicklung über die Zeit und somit Rückschluss auf Stabilität- und Deformationsverhalten von Böschungen und Rutschhängen.

7.20.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Messdaten Erfassung erfolgt bei Schlauchwaagen vor Ort. Bei einer automatisierten Datenerfassung kann die Übertragung digital erfolgen und ein kontinuierliches Aufzeichnen der Messungen ist möglich. Für die Messung mit Schlauchwaagen muss eine möglichst horizontale Rohrverbindung zwischen den einzelnen Messpunkten und dem Referenzbehälter vorhanden sein.
- Die Bestimmung der Höhe der einzelnen Messpunkte erfolgt für die Höhenlage der Referenzmessstelle. Veränderungen in der Höhe (Setzungen/Hebungen) der einzelnen Messpunkte können direkt aus dem Vergleich mit der Referenzmessstelle berechnet werden. Voraussetzung dazu ist jedoch eine stabile stationäre Lage der Referenzmessstelle (ausserhalb Setzungsbereich).
- Abgesehen von der Befestigung der Messbehälter / Messzellen erfolgen die Messungen zerstörungsfrei.

Der Messbereich von einer Schlauchwaage beträgt bis zu ca. 1'000 mm. Die Auflösung der Messung liegt in einem Bereich zwischen rund 0.1 mm bis zu 0.001 mm. Die Systemgenauigkeit ist abhängig vom Umfang des Messsystems und variiert zwischen rund +/- 0.3 mm bis zu +/- 0.01 mm. Die Messgenauigkeit ist abhängig vom Umfang des Messsystems (Anzahl Messpunkte, Länge der Leitungen) und der Messmethode. Für eine grössere Genauigkeit muss der Einfluss der Temperatur auf das spezifische Gewicht der Flüssigkeit für jede Messstelle berücksichtigt werden.

Tab. 7.27 Messbereich / Genauigkeit von Schlauchwaagen

Typ	Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
Schlauchwaagen	bis 1'000 mm	0.1 mm bis 0.001 mm	+/- 0.3 mm bis +/- 0.01 mm

7.20.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Schlauchwaagen werden aufgrund der grossen Genauigkeit für detaillierte Überwachungen von Verformungen an Bauwerken und Baugrundoberflächen verwendet. Für die Anwendung muss eine möglichst horizontale Rohrverbindung zwischen den Messpunkten vorhanden sein. Erschütterungen im Bereich der Messstellen können durch Dämpfungsregelung teilweise kompensiert werden.

Die Installationskosten für eine automatisierte Schlauchwaage mit digitaler Datenübertragung belaufen sich auf ca. 5'000 – 15'000 CHF je nach Umfang der Messtellen und deren Abstand untereinander. Der geodätische Fixpunkt, von dem aus die relativen Verschiebungen ausgewertet werden, liegt ausserhalb des Einflussbereiches und ist geodätisch vorgängig einzumessen. Wiederkehrende Kosten bestehen im Unterhalt, der Auswertung und Interpretationen der erhaltenen Daten.

7.20.5 Ergänzende Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5 des Teilberichts Tunnel

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Konsolen, Befestigungen, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit für Bau und Ablesen oder Auslesen der Daten, Eigentümer, etc.) zu beachten. Der geodätische Fixpunkt für die Bestimmung der Lage und Höhe der Schlauchwaagen muss ausserhalb des Setzungsbereichs liegen. Die Schlauchwaagen müssen periodisch von diesem Fixpunkt zur Kontrolle eingemessen werden.

7.20.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[90] Edwin Fecker (2018), Geotechnische Messgeräte und Feldversuche im Fels, 2. Auflage, Springer Spektrum Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-57824-7>

[91] Steffen Schindler (2014), Monitoringbasierte strukturmechanische Schadensanalyse von Bauwerken beim Tunnelbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation

7.21 Laserbasierte Sensoren

7.21.1 Beschreibung der Technologie

Laser sind Geräte, die einen intensiven Lichtstrahl mit hoch monochromatischer Strahlung erzeugen, indem sie eine Lichtquelle in einem optischen Resonator/Hohlraum von aussen verstärken [92]. Albert Einstein zeigte, dass Strahlung von atomaren Systemen durch stimulierte Emission erzeugt werden kann. Wenn ein aktives, verstärkendes Medium einem intensiven Ausbruch von breitbandigem (inkohärentem) Licht ausgesetzt wird, wird ein Teil der zugeführten Lichtenergie von den Atomen des Mediums absorbiert (oder die Atome im Medium werden angeregt), so dass das Energieniveau dieser Atome auf ein höheres Niveau angehoben wird. Nach Erreichen des gewünschten Energieniveaus werden diese Atome wieder in ihren nicht angeregten Zustand (Grundzustand, niedrigeres Energieniveau) zurückversetzt, was mit der Emission von Lichtwellen (Photonen) einhergeht. Die Auswahl des Verstärkermediums beruht auf der Anforderung, dass die angeregten Atome im Verstärkermedium eine Pause einlegen oder auf einem Energieniveau (metastabiler Zustand) verbleiben können, bevor sie in ihren Grundzustand zurückkehren. Während dieses Prozesses kann es zu einer Lichtemission mit der gleichen Wellenlänge des Eingangslichts im Medium kommen. Diese Merkmale sind schematisch in Abb. 7.46 dargestellt.

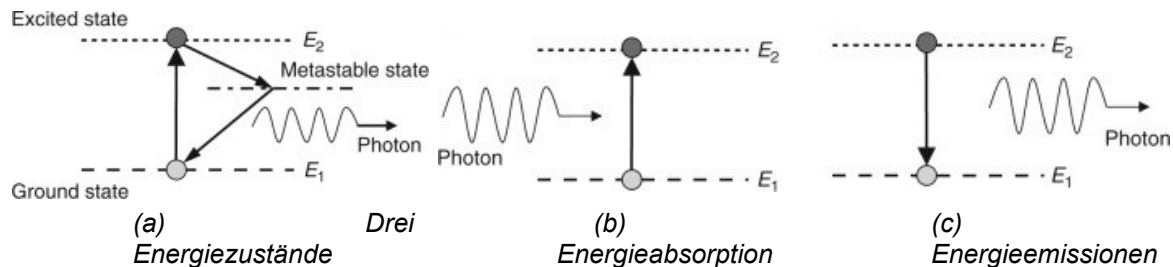
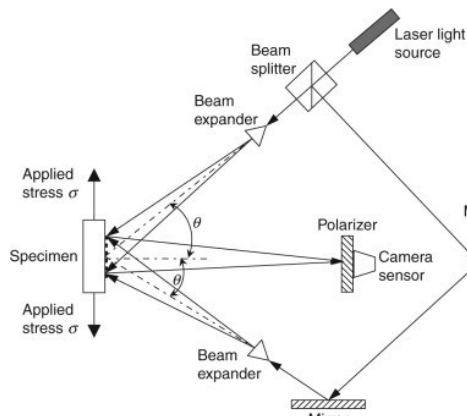


Abb. 7.46 Prinzipien von laserbasierten Sensoren [92]

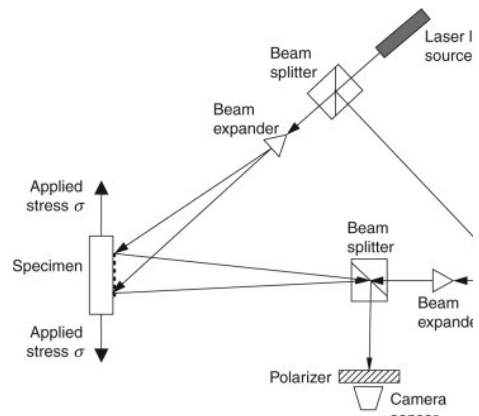
Lasersensoren werden im Allgemeinen in die folgenden Bereiche eingeteilt [92]:

- Laserinterferometrie (Abb. 7.47, (a)-(b)) ist die elektronische Verarbeitung von Specklemustern, die von einem Laserinterferometer erzeugt werden, das aus zwei Laserstrahlen (mit Hilfe eines Strahlteilers) besteht, die von derselben Laserquelle erzeugt werden. Interferometer werden in amplitudenverteilende und wellenfrontverteilende Interferometer eingeteilt.
- Die laserholographische Interferometrie (Abb. 7.47, (c)) kombiniert Laserinterferometrie und Holografie. Bei der Holografie wird eine exakte Abbildung des Zielobjekts rekonstruiert, indem ein Referenzlichtstrahl (Laser), der durch einen Strahlteiler geteilt wird, und ein von der Oberfläche des Zielobjekts zurückgeworfener Streulichtstrahl gleichzeitig auf einer holografischen Platte aufgezeichnet wird. Das auf der holografischen Platte aufgezeichnete Bild wird als Hologramm des Ziels bezeichnet, das sowohl die Amplitude als auch die Phase des vom Ziel zurückgeworfenen Streustrahls enthält. Die erste Belichtung der holografischen Platte mit dem Referenzstrahl führt zu einem Referenzhologramm, während die zweite Belichtung mit dem zurückgeworfenen Strahl alle Veränderungen des Targets auf das Referenzhologramm überträgt. Das Ergebnis ist ein Streifenmuster des Zielobjekts, das alle Informationen über die Veränderungen enthält, die zwischen der ersten und der zweiten Belichtung aufgetreten sind.
- Die digitale Laser-Shearografie (Abb. 7.47, (d)) beruht auf dem Prinzip der Bildschere: Ein Lichtstrahl durchläuft ein doppelt brechendes Prisma und teilt sich in zwei winkelmässig getrennte Strahlen. Durch die Bildschere werden zwei nicht parallele Lichtstrahlen, die von zwei verschiedenen Objektpunkten gestreut werden, nahezu kollinear, und die daraus resultierende niedrige Ortsfrequenz der Interferenzstreifen kann mit einem Bildsensor mit geringer Auflösung aufgelöst werden.

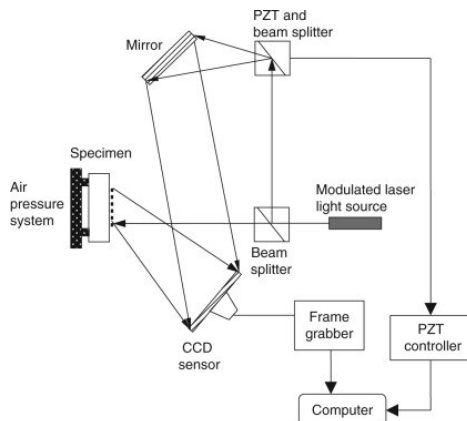
- Beim Laserscanning (Abb. 7.47, (e)) werden Laserstrahlen zur Abstandsmessung entlang einer Linie (2D) oder innerhalb eines Bereichs (3D) gelenkt/ausgerichtet. Laserscanner arbeiten entweder (i) im stationären oder (ii) im mobilen Modus. Im stationären Modus sind sie in der Regel auf einem Stativ installiert, während Laserscanner im mobilen Modus in der Hand gehalten, oder in einem Fahrzeug, an einem Roboter oder in einem Flugzeug montiert werden. Die Laserscanning-Photogrammetrie ist eine integrierte Technik, die Laserscanning und digitale Photogrammetrie kombiniert. Zu den wichtigsten Komponenten der Laserscanning-Photogrammetrie gehören: (i) ein Laserscanner, (ii) eine Digitalkamera, (iii) ein globales Positionierungssystem (GPS) (wenn sich die Position des Laserscanners ändert), (iv) eine Totalstation (optional), (v) ein tragbarer Computer und (vi) eine Datenverarbeitungssoftware für die 3D-Modellierung und Datenregistrierung.
- Ein Laser-Doppler-Vibrometer (LDV, siehe auch 7.30 für Schwingungsmessungen) ist ein passives dynamisches Interferometer, bei dem der aus dem Laser austretende Strahl in zwei Teile geteilt wird: einer davon wird als Sendestrahl und der andere als Referenzstrahl für die kohärente Detektion verwendet. Der Sendestrahl beleuchtet die Oberfläche eines Ziels, während der Referenzstrahl mit dem vom Ziel zurückkommenden Strahl am Detektor zur kohärenten Detektion kombiniert wird. Die Frequenzverschiebung zwischen dem zurückgeworfenen Strahl und dem Referenzstrahl hängt aufgrund des Dopplereffekts mit der Momentangeschwindigkeit des Ziels zusammen. Während das grundlegende Laser-Doppler-Vibrometer ein Ein-Punkt-Vibrometer ist, können durch Hinzufügen einer Videokamera und zweier orthogonaler Spiegel scannende LDV-Systeme hergestellt werden, die grossflächige Messungen mit hoher räumlicher Auflösung ermöglichen. Je nach Art der zu messenden Geschwindigkeit wird das LDV in Translations-, Rotations- und Torsionsschwingungen unterteilt (Abb. 7.47 (f)).



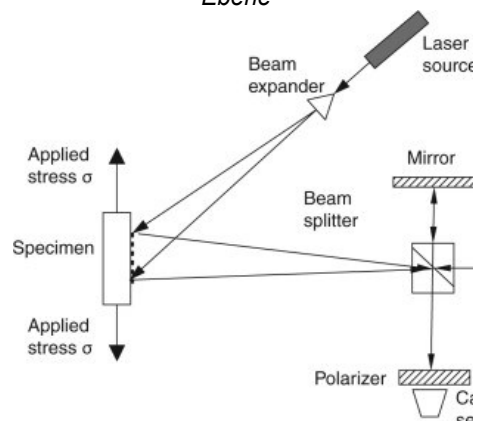
(a) Laserinterferometrie, in der Ebene



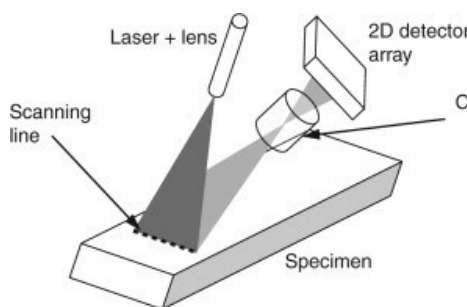
(b) Laserinterferometrie, ausserhalb der Ebene



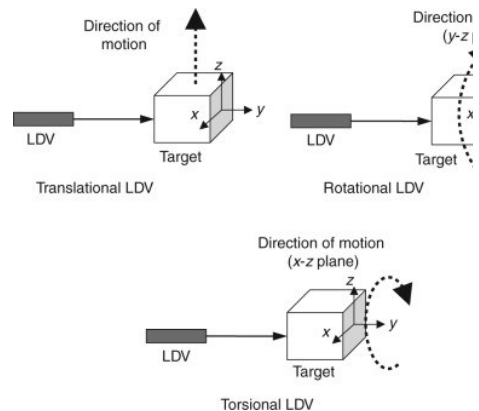
(c) Laserphasenverschiebende holographische Interferometrie



(d) Digitale Laser-Shearografie



(e) 2D-Laserscanning



(f) Arten der Laser-Doppler-Vibrometrie

Abb. 7.47 Technologien von laserbasierten Sensoren [92]

7.21.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Tabelle 1 zeigt Anwendungsfälle, bei denen laserbasierte Sensoren zum Einsatz kommen, sowie die zugehörigen Referenzen für weitere Informationen.

Tab. 7.28: Typische Anwendungen von Lasersensoren.

Art der Anwendung	Messgrößen	Referenzen
Bauüberwachung	Bodenbeschaffenheit vor Ort, Integrität des Tragsystems und/oder von Oberflächen von Bauwerksteilen	[93]
Spannung der Brückenkabel	Dynamische Eigenschaften von Schrägseilen unter Temperaturschwankungen und Umgebungsvibrationen zur Zustandsbewertung	[94]

Tab. 7.28: Typische Anwendungen von Lasersensoren.

Art der Anwendung	Messgrößen	Referenzen
Modalanalyse	Schwingungsüberwachung für experimentelle Modalanalysen	[95]
Tragwerksüberwachung	Maximale Auslenkungen/Verschiebungen, Schwingungspegel, Auslenkungsformen	[96]
Charakterisierung der Fahrbahnbeschaffenheit	Bestimmung der Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche durch Messung der Texturtiefe, der mittleren Profiltiefe und der durchschnittlichen Unebenheitsdichte	[97][98][99]
Strassenkartierung	Feldkartierung für Landschaften und Strassenansichten	[100]
Kulturgüter	Geometrische Erhebungen und nicht-intrusive strukturelle Dokumentation historischer Tragwerke	[101]
Wellenausbreitung zur Erkennung von Schäden	Oberflächenwellen	[102]

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Überwachung von Felsinstabilitäten mittels differentiellem Laserscanning sowie Pegelstandsmessungen mittels Lasertechnologie für die Hochwasserüberwachung.

7.21.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Das Angebot an laserbasierten Sensorlösungen ist sehr vielfältig, und viele Anbieter verwenden ihre eigene Technologie für die Datenerfassung. Die richtige Auswahl eines laserbasierten Messsystems erfordert eine sorgfältige Bestimmung der gewünschten Messgrösse, da die damit verbundenen Kosten sehr hoch sein können. Die relevanten Größen bei der Auswahl eines auf Lasertechnologie basierenden Sensors sind: die Genauigkeit, die Auflösung, die Wiederholbarkeit und die Linearität. Ebenso wichtig ist, dass Lasersensoren in vielen Fällen an entsprechend konfigurierten Rahmen befestigt werden müssen, um Relativbewegungen zwischen dem Sensor und der Messgrösse zu vermeiden. Diese Anforderung bringt zusätzliche Komplexität und Kosten bei der Installation des Messsystems mit sich.

7.21.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der globale Markt für Lasersensoren wurde im Jahr 2019 auf 912,5 Mio. USD geschätzt und wird voraussichtlich bis 2025 einen Wert von 1'565,5 Mio. USD erreichen. Zu den Zukunftstrends der laserbasierten Sensorik gehören u. a.:

- Lasermessgeräte für Messbereiche bis zu 10 m, Laser-Distanzsensoren für bis zu 3'000 m. Diese Sensoren werden in der Regel zur Positionierung und Typenklassifizierung im Maschinenbau und in der Handhabungstechnik eingesetzt.
- Autonome Lasersensoren für das industrielle Internet der Dinge (IIoT). Sie kombinieren berührungslose, hochauflösende Sensortechnologie mit integrierter Datenverarbeitung und drahtloser Kommunikation.
- Blaue Lasertechnologie für Bildqualität und Wiederholbarkeit bei Anwendungen mit geringem Sichtfeld. Modernste Geräte bieten 3D-Scans mit bis zu 20 Millionen Punkten pro Sekunde.
- Laser-Triangulationssensoren zur Messung von Schnellverschiebung, Abstand und Position. Die Sensoren verfügen über neue Hochleistungsobjektive, Lasersteuerung und Auswertelgorithmen, die präzise Messungen auf unterschiedlichen Oberflächen und Materialien ermöglichen.

Im Bauwesen haben laserbasierte Sensoren den Zugang zu schwierigen Stellen erleichtert. Im Allgemeinen sind sie nicht invasiv, ferngesteuert und relativ schnell einzurichten. Die Lasersicherheit ist nach wie vor ein Problem; beim Einsatz von Hochleistungslasersystemen an grossen Bauwerken (z. B. Brücken, Gebäuden, Tunneln, Eisenbahnstrecken) für Langzeitinspektionen ist Vorsicht geboten. In der Planungsphase

muss ein Kompromiss zwischen der Sicherheit und der Leistung der ausgewählten Lasersysteme gefunden werden [92].

Typische Anschaffungskosten hängen von der Anwendung ab und können von 150–200 CHF für laserbasierte Wegsensoren bis zu 600'000–700'000 CHF für 2D/3D-Laserscanner reichen. Hier sind jedoch eher die Anwendungskosten von Interesse. In diesem Sinne liegen die Kosten für die 2-jährige Überwachung einer Brücke (z. B. im Falle einer Verstärkung während des Betriebs) mit lasergestützten Verformungsmessungen in der Grössenordnung von 20'000 bis 50'000 CHF.

7.21.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.21.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [92] T.U. Yu, Laser-based sensing for assessing and monitoring civil infrastructures, Sensor Technologies for Civil Infrastructures - Volume 1: Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment, Elsevier, Cambridge, UK, 2014.

- [93] H.M. Zogg and D. Grimm, Kinematic surface analysis by terrestrial laser scanning, in Proc. of 1st International Conference of Machine Control Guidance, 2008.

- [94] S.E. Chen and S. Petro, Laser Vibrometer application on bridge cable tension measurements, Proc SPIE, 3897: 511-519, 1999.

- [95] D.M. Siringoringo and Y. Fujino, Noncontact operational modal analysis of structural members by laser Doppler vibrometer, Comp Aid Civil Infrastruct Eng, 24: 249-265, 2009.

- [96] H.H. Nassif, M. Gindy, and J. Davis, Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection vibration, NDT&E Int, 38(3): 213-218, 2005.

- [97] B. Gabriele, Evaluation of the laboratory prediction of surface properties of bituminous mixtures, Constr Bldg Mater, 23:943-952, 2009.

- [98] J.L. Vilaca et al., 3D-Oberflächenprofilgerät für die Charakterisierung der Fahrbahnbeschaffenheit - TexScan, Mechatronics, 20:674-685, 2010.

- [99] W. Wang et al., Design and verification of a laser based device for pavement macrotexture measurement, Transport Res C, 19:682-694, 2011.

- [100] D. Barber, J. Mills, und S. Smith-Voysey, Geometric validation of a ground-based mobile laser scanning system, Photogram Remote Sens, 63:128-141, 2008.

- [101] B. Riveiro et al., Terrestrial laser scanning and limit analysis of masonry arch bridges, Constr Bldg Mater, 25:1726-1735, 2011.

- [102] R. Zaccherini et al., Mitigation of Rayleigh-like waves in granular media via multi-layer resonant metabarriers, Applied Physics Letters, 117, 254103, 2020.

7.22 Terrestrische Radarinterferometrie

7.22.1 Beschreibung der Technologie

Die Radarinterferometrie ist eine berührungslose Sensortechnik, mit der sich kleine Verschiebungen feststellen lassen. Ursprünglich wurde sie im Zusammenhang mit der Satellitenfernerkundung entwickelt, um unterschiedliche Bodenverformungen in der Grössenordnung von einigen Millimetern festzustellen. Später wurde die bodengestützte Radarinterferometrie zunehmend auch zur Überwachung von Bauwerken oder Erdbeben eingesetzt.

Ein interferometrisches Radar ist ein Sensor, der in der Lage ist, durch Ausnutzung der Phaseninformation eines rückreflektierten Mikrowellensignals unterschiedliche Verschiebungen mehrerer Ziele in seinem Sichtkegel (halbe Leistungsstrahlbreite) zu erkennen. Sein Funktionsprinzip ist in folgender Abbildung dargestellt (Abb. 7.48). Das Radargerät sendet eine monochromatische Welle mit einer bestimmten Wellenlänge in Richtung eines unbewegten, streuenden Ziels aus und erzeugt so eine rückreflektierte Welle. Die Phasendifferenz zwischen der ausgesendeten und der rückreflektierten Welle wird vom Radar erfasst. Da eine Verschiebung des Ziels um ein Vielfaches einer halben Wellenlänge die gleiche Phasendifferenz erzeugt, ist die Entfernung des Ziels nicht eindeutig. Bewegt sich das Ziel jedoch um einen Bruchteil einer Wellenlänge, kann die Differenzverschiebung als Phasenverschiebung erkannt werden. Durch Modulation des Sendesignals können mehrere Ziele erfasst werden, sofern sie sich in unterschiedlichen Entfernungen zum Radar befinden (siehe Abb. 7.48). Die Auflösung zwischen den Zielen (Auflösungszelle) hängt von der verwendeten Frequenzbandbreite ab.

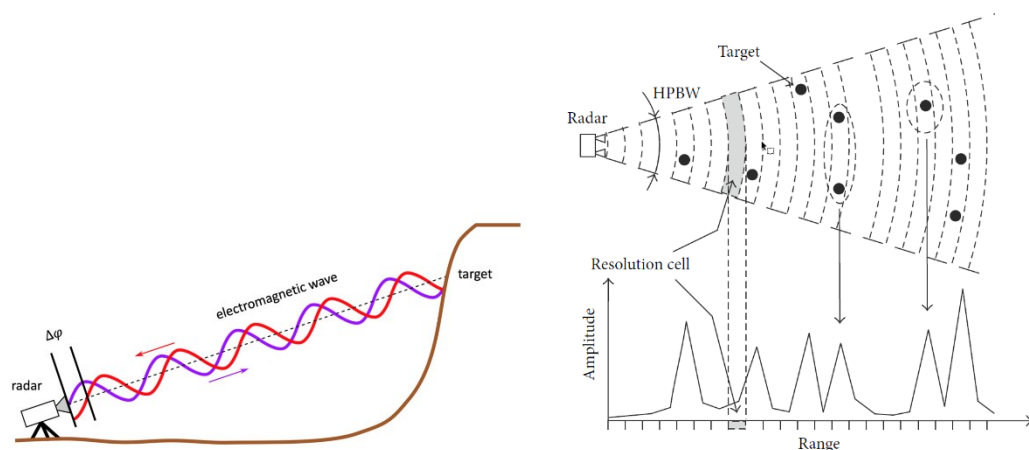


Abb. 7.48 Funktionsprinzip der bodengestützten/terrestrischen Radarinterferometrie [103]. Mehrfachziel in der Radarinterferometrie (HPBW: half-power beamwidth) [104]

7.22.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Interferometrische Radargeräte erfassen quasi statische und dynamische Differenzverschiebungen mehrerer Ziele. Für Brücken wird das Instrument auf dem Boden in der Nähe der Brücke positioniert (wie in Abb. 7.49). Der Kopf des Radars muss auf die Brücke gerichtet sein, und keine Hindernisse dürfen die Sicht zwischen dem Radar und den Zielen auf der Brücke behindern. Je grösser der Abstand zwischen dem Gerät und der Brücke ist, desto grösser ist der Teil der Brücke, der vom Radar erfasst wird. Die Ziele werden den Amplitudenspitzen des rückreflektierten Signals zugeordnet (Abb. 7.48). Jeder dieser Spitzenwerte entspricht einem geometrischen Merkmal der Brücke, das elektromagnetische Wellen reflektieren kann. An der Brücke können metallische Eckreflektoren angebracht werden, um die Identifizierung der Ziele zu vereinfachen oder wenn Messungen an bestimmten Stellen erforderlich sind. Es ist wichtig zu beachten, dass das Gerät nur die Komponente der Differenzverschiebung entlang der Blickrichtung erfasst. Um die Differenzverschiebung zu bestimmen, muss der Winkel zwischen der Blickrichtung und der Verschiebung berechnet oder (besser) gemessen werden (Theodolit) [104].

Spezifische Anwendungen im Bereich Kunstbauten:

- Statisches Verformungsverhalten von Fahrbahnplatte, Pfeilern und Widerlagern
- Statische und dynamische Verschiebungsmessungen [108], [109]
- Modalanalyse und Berechnung der Operative Ablenkungsformen (Operational Deflection Shapes) [108]
- Unterstützung von Setzungen
- Dynamische Schätzung der Kabelspannung

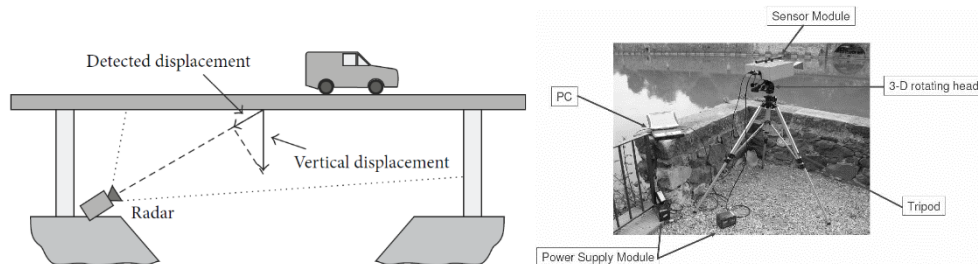


Abb. 7.49 Beispiel für die Brückenüberwachung mit einem bodengestützten interferometrischen Radar [104]. Ansicht eines typischen bodengebundenen Radarinterferometers [105]

Die Einsatzmöglichkeiten dieser Überwachungstechnologie ähneln den Anwendungen der laserbasierten Methoden, die eine alternative Form der berührungslosen optischen Messung darstellen.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Geländeverschiebungen im Fels sind im Gelände von Auge oft nicht oder nur anhand lokaler Phänomene erkennbar und kaum quantifizierbar. Um das Verhalten von solchen instabilen Gebieten zu überwachen und Veränderungen in der Geschwindigkeit und somit Beschleunigungen zu erfassen, sind messtechnische Überwachungen notwendig. Durch Verwendung von Terrestrischen Radarinterferometrie können sich abzeichnende Abbrüche von grossen Instabilitäten frühzeitig erkannt und - unter günstigen Umständen - auch vorhergesagt werden.

- Flächige Überwachungsmethoden bieten den Vorteil, dass die Bewegungen in der gesamten instabilen Masse erfasst werden können und damit die geologische Modellbildung massgeblich unterstützt wird. Limitierend für die Anwendung von Terrestrische Radarinterferometrie kann unter anderem sein, dass:
- es keine geeigneten stabilen und geschützten Gerätestandorte gibt, so dass eine direkte Sichtlinie (möglichst in Bewegungsrichtung) von der Station zur Instabilität besteht.
- die potenzielle Instabilität zu klein ist (siehe Bildauflösung).
- Vegetation, Schneebedeckung die Einsicht verhindern.
- unterschiedliche atmosphärische Bedingungen die Messgenauigkeit einschränken.
- bei der Einbindung in ein Alarmsystem die Vorlaufzeit zwischen Ereignisdetektion und Alarmierung zu kurz ist.

7.22.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Kommerziell erhältliche radargestützte Sensoren sind frequenzmodulierte Dauerstrichradare im Ku-Band. Durch die Modulation der Frequenz ist der Sensor in der Lage, einzelne Ziele anhand ihrer Entfernung zu unterscheiden. Die Bandbreite der Frequenzmodulation bestimmt den Mindestabstand zwischen zwei Zielen, die sogenannte Entfernungsauflösung, die bei einer Bandbreite von 200 MHz einen Wert von 0,75 m erreichen kann [110]. Die Messdatenerfassung für Radarsensoren erfolgt digital und bietet zusätzlich eine Fernverfügbarkeit der Daten.

Radargestützte Sensoren sind in der Lage, die Verschiebungen mehrerer Punkte auf einem Bauwerk mit einer Genauigkeit im Submillimeterbereich und mit einer

Abtastfrequenz von bis zu 200 Hz zu messen. Berührungslose Messungen können erzielt werden, indem natürlich reflektierende Merkmale des überwachten Systems, z. B. Ecken und Kanten, für die Reflexion der Radarsignale genutzt werden. Radarsensoren zeichnen sich gegenüber anderen Fernerkundungstechniken durch eine hohe Messgenauigkeit aus, die unter Laborbedingungen bewertet und zusätzlich mit Beschleunigungsmessern [111], terrestrischen Laserscannern [112] und Wegaufnehmern [113] verglichen wurde.

- Die erfassten Daten sind digitale Zeitreihen der auf die Blickrichtung projizierten Verschiebungen der Ziele. Der Datensatz ist in der Regel von bescheidener Grösse und proportional zur Anzahl der Ziele und der Abtastrate. Da alle Daten digital sind, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten.
- Eine dynamische Überwachung ist möglich, da die Abtastrate mehr als 100 Hz erreichen kann, was mehr als in Brückenanwendungen erforderlich ist.
- Die erfassten Daten entsprechen der Projektion der Verschiebungen auf die Blickrichtung. Die Empfindlichkeit des Endergebnisses hängt daher von der Amplitude des Winkels ab. Die höchste Empfindlichkeit wird bei kleinen Winkeln erreicht, und die Empfindlichkeit nimmt mit zunehmendem Winkel ab. In der Nähe von 90° geht die Empfindlichkeit gegen Null.
- Die Genauigkeit eines Radarinterferometers hängt von der Entfernung zu den Zielen ab. Bei Zielentfernungen von 100 m oder weniger liegt die Genauigkeit in der Grössenordnung von 0,01 mm. Eine Genauigkeit von etwa 0,1 mm wird bei Zielentfernungen bis zu 1 km erreicht, was den maximalen Betriebsbereich für Brückenanwendungen darstellt. Die Genauigkeit wird durch die Umgebungsbedingungen (Feuchtigkeit, Temperatur, Luftdruck) beeinflusst.
- Die Auflösung zwischen den Zielen hängt von der zulässigen Betriebsfrequenzbandbreite ab und beträgt in Europa etwa 0,75 m.

7.22.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Der Markt bietet (sehr wenige) kommerzielle Produkte an, die zuverlässig, stabil und leicht zu bedienen sind. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde die Technik erfolgreich für die Überwachung der Verschiebung von Brücken, Gebäuden, Türmen und Erdrutschen eingesetzt [103]. Die Geräte können sowohl für die Kurzzeit- als auch für die Langzeitüberwachung eingesetzt werden. Die wichtigsten Anwendungsgrenzen sind:

- Es muss eine klare Sichtverbindung zwischen Radar und Brücke bestehen.
- Die genaue Standortbestimmung der reflektierenden Ziele kann schwierig sein, wenn Reflektoren angebracht sind.
- Es kann zu Messfehlern kommen, wenn verschiedene Ziele in der gleichen Entfernung vom Radargerät platziert werden.
- Da das Radar die differentielle Bewegung entlang der Sichtlinie des Sensors misst, ist eine vorherige Kenntnis der Bewegungsrichtung der Ziele erforderlich, um genaue Ergebnisse zu erzielen.

Die Kosten für das Instrument sind hoch (ca. 60'000–100'000 CHF). Die Montagekosten hängen hauptsächlich von der Aufstellung der Reflektoren ab. Zusätzliche Kosten können durch die Messung des Projektionswinkels zu den Zielen entstehen. Im Allgemeinen sollten die Betriebskosten deutlich geringer sein als bei anderen Messgeräten mit ähnlicher Genauigkeit (z. B. LVDT), die an die Brücke angeschlossen werden müssen.

7.22.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.22.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[103] M. Pieraccini and L. Miccinesi, Remote Sensing, 11, 1029, 2019, DOI:10.3390/rs11091029.

[104] M. Pieraccini, Monitoring of Civil Infrastructures by Interferometric Radar: A Review, The ScientificWorld Journal, 2013, 786961, DOI: 10.1155/2013/786961.

-
- [105] C. Gentile and G. Bernardini, Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(4):495-516, 2010, DOI: 10.1080/19648189.2010.9693238
-
- [106] D.M. Pozar, *Microwave engineering*. 2nd ed., New York: Wiley, 1997.
-
- [107] A.G. Stove, Linear FMCW radar techniques, *Radar and Signal Processing*, IEE Proceedings F, 139(5):343-350, 1992.
-
- [108] J.A. Rice, C. Gu, C. Li, und S. Guan, A radar-based sensor network for bridge displacement measurements, *Proc. SPIE 8345, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 83450I, 2012.
-
- [109] C. Michel and S. Keller, Advancing Ground-Based Radar Processing for Bridge Infrastructure Monitoring. *Sensors*, 21(6):2172, 2021.
-
- [110] C. Gentile and G. Bernardini, An interferometric radar for non-contact measurement of deflections on civil engineering structures: laboratory and full-scale tests. *Struct. Infrastruct. Eng.*, 6:521–534, 2009.
-
- [111] J. Erdélyi, A. Kopáčík, P. Kyrinovic, Spatial Data Analysis for Deformation Monitoring of Bridge Structures, *Applied. Science*, 10, 8731, 2020.
-
- [112] F. Neitzel, W. Niemeier, S. Weisbrich, M. Lehmann, Investigation of low-cost accelerometer, terrestrial laser scanner and ground-based radar interferometer for vibration monitoring of bridges. In *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring*, Dresden, Germany, 1:542–551, 2012.
-
- [113] A. Firus, J. Schneider, M. Becker, J.J. Pullamthara, und G. Grunert, Microwave Interferometry Measurements for Railway-specific Applications, in *Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN 2015)*, Rhodes Island, Greece, 15–17 June 2017.
-

7.23 GNSS Sensoren

7.23.1 Beschreibung der Technologie

Global Navigational Satellite Systeme (GNSS), auch Globale Positionierungssysteme (GPS) genannt, sind eine bewährte Technik zur Überwachung von Verschiebungen in Bauwerken des Hoch- und Tiefbaus, einschliesslich Brücken. GNSS-Sensoren können zur Überwachung sowohl dynamischer als auch statischer (oder quasistatischer) Brückenverschiebungen im Zeitverlauf eingesetzt werden [124]. Das GNSS ist ein Funknavigationsverfahren, das entwickelt wurde, um geografische Standorte auf der Grundlage eines satellitengestützten Signalisierungsverfahrens genau zu bestimmen. Die verwendeten digitalen Signale enthalten die Standorte der genutzten Satelliten und die entsprechenden genauen Zeiten, die mit Hilfe von Atomuhren gemessen werden. Durch die Kombination dieser Informationen kann ein GNSS-Empfänger seine relative Position in Bezug auf die Satelliten berechnen, seinen Standort bestimmen und zusätzlich seine Bewegungs-Geschwindigkeit verfolgen. Eine detailliertere mathematische Erklärung des Systems befindet sich in [134], [132].

Ein GNSS-basiertes Überwachungssystem kann Bewegungen des Bauwerks präzise lokalisieren und sogar Verschiebungen mit geringer Amplitude im Millimeterbereich messen [134]. Solche Systeme wurden zum Beispiel eingesetzt, um Störungen in Gebäuden zu messen und Bodenbewegungen zu lokalisieren. Darüber hinaus können GNSS-Sensoren bei Brücken Erosionserscheinungen, (differentielle) Setzungen aufgrund von Flutwellen oder Stossbelastungen verfolgen oder vor durch Eigengewicht verursachten statischen Verschiebungen warnen, die zu einem Versagen führen können [132]. Durch die Kopplung solcher Systeme mit Finite-Elemente-Modellen kann die Überwachungsanalyse ausserdem einen Echtzeit-Einblick in die Verteilung von Spannungen und Dehnungen geben [122].

Die GNSS-Vermessungstechniken bestehen aus zwei Ansätzen, die in der Anfangsphase des Überwachungsprozesses angewendet werden: Die erste wird als Schnelle Statische (SS) Methode bezeichnet und basiert auf einem festen Netzsystem, während der Echtzeit-Kinematische (EK) Ansatz auf einem mobilen Rahmen beruht. Das Festnetz nutzt zwei Empfänger, von denen einer das Rover-GNSS und der andere das Referenz-GNSS ist. Es verfolgt die Positionsänderung über die Berechnung von Verschiebungsdifferenzen. Durch die Mittelwertbildung über die Zeit zur Verringerung von Fehlerquellen ist diese Methode am besten für die Langzeitüberwachung geeignet. Darüber hinaus wurde dieser konventionelle Aufbau mit fortschrittlichen Algorithmen gekoppelt, um eine kurzfristige Überwachung der Verschiebung und eine Bewertung der entsprechenden Auswirkungen zu ermöglichen. Dieser verbesserte Ansatz hat zu einer erheblichen Verkürzung der für die Zustandsbewertung erforderlichen Überwachungszeit geführt und wird daher als schnelle statische (SS) Methode bezeichnet.

Im EK-GNSS-Modus hingegen dient die Referenzempfängerstation als stationärer Kontrollpunkt und beobachtet ständig die Abweichung von ihrer ursprünglich ermittelten Position. Darüber hinaus kann die EK-Methode als mobile Vermessungstechnik eingesetzt werden, um dynamische Verschiebungen während der Wanderung zu verfolgen. Indem beispielsweise mehrere Messungen über die Länge einer Brücke durchgeführt werden, können mit dieser Methode geometrische Veränderungen, die durch (unterschiedliche) Setzungen oder Biegungen verursacht werden, verfolgt werden. Eine schematische Darstellung der beiden Methoden ist in Abb. 7.50 dargestellt.

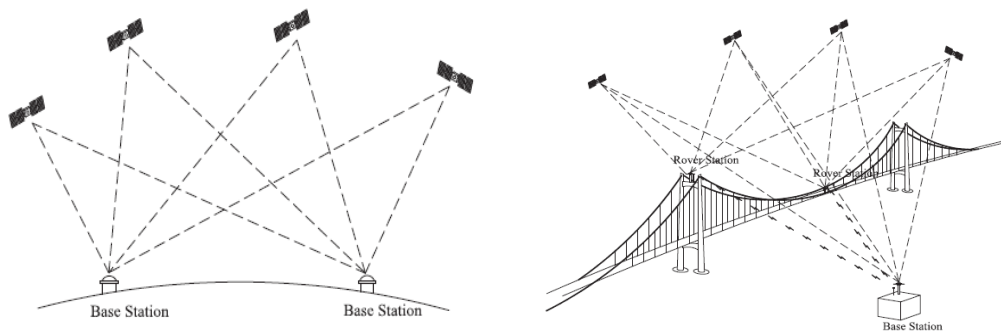


Abb. 7.50 Die schnelle statische (SS) Methode (links) und die Echtzeit-Kinematik (EK) Methode (rechts). Angepasst von [122]

7.23.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

GNSS erlaubt eine kontinuierliche Bewertung von statischen, dynamischen oder permanenten Verformungen für Bauteile von Kunstbauten. In der Regel ist eine GNSS-Antenne erforderlich, während je nach den Verkehrsbedingungen und dem Anwendungsbereich eine Vorkalibrierung und Validierung notwendig sein kann. Eine detailliertere Betrachtung der Umsetzungsaspekte sowie entsprechende Beispiele findet der interessierte Leser in [122], [128], [134].

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Der Einsatz von GNSS-Sensoren ist besonders nützlich für die Verfolgung der Verformung grosser Bauwerke bei starken Wind- und Erdbebenereignissen. Weiter hat sich der Einsatz von GNSS-Sensoren für die Überwachung von Rutschhängen und Felsinstabilitäten bewährt.

Fallbeispiel – GNSS-basierte Bewertung einer Schrägseilbrücke

In Hussan et al. [137] wird ein GNSS-System verwendet, um die Art der dynamischen Verformungen/Vibrationen zu verstehen und die Faktoren zu erforschen, die Schäden am Tragwerk verursachen. Die Schrägseilbrücke mit grosser Spannweite in Incheon, Korea, dient als Fallstudie. Sowohl die Fahrbahnplatte als auch der Pylon wurden mit hochfrequenten (10 Hz) GNSS-Messungen in lateraler, longitudinaler und vertikaler Richtung dynamisch überwacht. Es wurde eine Zeitreihenanalyse durchgeführt, um das dreidimensionale Verhalten der Brücke zu bewerten. Die Ergebnisse zeigen, dass das GNSS-System die dynamischen Eigenschaften der Brücke adäquat verfolgt und die Bewertung der Sicherheit einer Brücke unter dynamischen Belastungen unterstützen kann.

7.23.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Im Vergleich zu herkömmlichen Überwachungssystemen bieten die GNSS-Sensoren ergänzende Eigenschaften, die für integrierte Systeme interessant sind, die mehr als eine Sensortechnologie verwenden und die jeweiligen Vorteile nutzen. So haben beispielsweise die etablierten, auf Beschleunigungssensoren basierenden Überwachungssysteme, einen grossen Erfassungsbereich und messen das dynamische Verhalten von Tragwerken. Sie können jedoch keine statischen oder quasi-statischen Phänomene erfassen und sind aufgrund der erforderlichen Nachbearbeitung nur begrenzt für die Echtzeitüberwachung geeignet. Zur Überwachung solcher Phänomene stellen GNSS-Sensoren und neu entwickelte bildbasierte Ansätze interessante Alternativen dar, obwohl letztere Einschränkungen aufweisen. Tab. 7.29 fasst die Merkmale dieser drei Technikfamilien in Bezug auf Leistung und Anwendbarkeit zusammen. Weitere Einzelheiten sind zu finden in [134], [124], [122].

Tab. 7.29: Ergänzende Eigenschaften von GNSS-Sensoren zu anderen Überwachungstechnologien

Merkmal	GNSS-Sensoren	Beschleunigungs-Sensoren	Terrestrische Ortung / Lasersensoren / Videoaufnahmen
Dynamische Verschiebungsmessungen	Echtzeit	Erfordert doppelte Integration	Beeinträchtigung durch vorbeifahrende Fahrzeuge
Frequenzbandbreite	(Derzeit) bis zu 100 Hz	Bis zu 1000 Hz	Begrenzte Überwachungsabstände
Überlegungen zum Einsatz	Erforderliche Himmelssicht und Allwetter-System	Sowohl innen als auch aussen, niedrigere Temperaturen	Umgebungslicht, Staub, Regen
Genauigkeitsüberlegungen	Sehr genau	Instrumentelle Driftfehler	Genau, aber hohe Empfindlichkeit

Die GNSS-Technologie kann für die Lokalisierung von Schäden und die Quantifizierung des Schadensausmasses sowie für die Zustandsüberwachung eingesetzt werden [134]. GNSS-Techniken werden in grossem Umfang für verschiedene strukturelle Systeme in integrierten Rahmen eingesetzt, die auch andere Arten von Sensorausrüstung umfassen. Hochflexible Tragwerke, wie zum Beispiel weitgespannte Schrägseilbrücken oder mehrstöckige Gebäude, umfassen die meisten GNSS-Sensoranwendungen, wobei der Schwerpunkt auf statischen oder dynamischen, verschiebungsbasierten Studien, Vorhersage des Tragwerkverhaltens und Risikobewertung liegt [124]. Tab. 7.30 umreisst die Spezifikationen einer der fortschrittlicheren verfügbaren Lösungen.

Tab. 7.30: Messbereich / Genauigkeit von GNSS aus [136]

Positionierung Performance	Horizontal	Vertikal
GNSS Positionierung	0,25 m +1 ppm RMS	0,5 m +1 ppm RMS
Hochgenaue statische GNSS-Vermessung	3 mm +0.1 ppm RMS	3,5 mm +0,4 ppm RMS
Statische, schnelle statische Vermessung	3 mm +0.5 ppm RMS	5 mm +0,5 ppm RMS
Kinematische Vermessung in Echtzeit	8 mm +1 ppm RMS	15 mm +1 ppm RMS

7.23.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Obwohl neue Herstellungsstandards eine Generation von GNSS-Empfängern hervorgebracht haben, die in der Lage sind, hochpräzise Echtzeit-Standortinformationen zu liefern, hängt ihre Leistung immer noch von mehreren Faktoren ab, darunter die Datenabtastrate, die Satellitenabdeckung und die empfängerabhängigen Verzerrungen. Darüber hinaus können Phänomene wie der Mehrwegeeffekt oder troposphärische Verzögerungen die Genauigkeit von GNSS-Ortungssystemen weiter beeinflussen. Im Folgenden werden die möglichen Fehlerquellen kurz beschrieben:

- **Datenabtastrate:** Nach dem Nyquist-Theorem muss die Mindestabtastrate eines Sensors doppelt so hoch sein wie die Frequenz der überwachten Kunstbaute, damit die Daten zuverlässig sind. Dies beschränkt die Anwendbarkeit von GNSS-Sensoren auf relativ niederfrequente Tragwerke, wie z. B. Brücken, ein, da die maximale Abtastrate normalerweise bei etwa 100 Hz liegt.
- **Der Mehrwegeeffekt:** Bezeichnet den Ausbreitungsfehler, der darauf zurückzuführen ist, dass ein ausgestrahltes Satellitensignal über mehr als einen Weg zum vorgesehenen Empfänger gelangen kann. Das zusätzliche indirekte Signal bzw. die zusätzlichen indirekten Signale werden hauptsächlich durch reflektierende Oberflächen in der Nähe des Empfängers verursacht. Der entsprechende Fehler kann durch fortschrittlichere GNSS-Instrumentierungstechniken oder Algorithmen zur Nachbearbeitung der Daten gemildert werden [116].
- **Satellitenabdeckung:** Um die geometrische Stärke einer Satellitenkonfiguration indirekt zu bewerten, wird die "Dilution of Precision" (DOP), d.h. "Verringerung der Genauigkeit",

definiert. Hohe DOP-Werte stehen für eine "schwache" Geometrie und bedeuten, dass die sichtbaren Satelliten nahe beieinander liegen, während niedrige Werte für eine gute Satelliten-Empfänger-Konfiguration mit grossem geometrischen Volumen stehen. Der Hauptfaktor, der die DOP beeinflusst, ist das Vorhandensein von Hindernissen, insbesondere in städtischen Umgebungen.

- Atmosphärisch bedingte Effekte: Um ionosphärische Fehler zu vermeiden, die durch Änderungen der Signalgeschwindigkeit beim Durchqueren der Atmosphäre verursacht werden, kann der Benutzer die Empfängerposition anhand von ionosphärenfreien Daten aus mindestens zwei Frequenzmessungen berechnen. Darüber hinaus stehen mathematische Formeln zur Verfügung, um troposphärische Verzögerungen in den übertragenen Signalen aufgrund von Luftfeuchtigkeit, Druck und Temperatur abzuschwächen [122].
- Satelliten- und empfängerabhängige Verzerrungen: Ein Messfehler, der dazu führt, dass der Messbereich auf "systematische" Weise von der Realität abweicht, wird als Verzerrung bezeichnet. Bei GNSS-Sensoren gehören zu den satellitenabhängigen Verzerrungen Orbitalabweichungen und Taktfehler, während sich die Empfängerverzerrung auf Taktfehler auf der Empfängerseite bezieht. Diese Verzerrungen weisen in der Regel einen leicht erkennbaren Trend oder eine Korrelation zwischen den Signalen auf, die von verschiedenen Stationen, die die Kunstbaute gleichzeitig überwachen, empfangen werden, so dass algorithmische Ansätze zur Abschwächung dieser Fehler und zur Verbesserung der Genauigkeit der Geolokalisierung verfügbar sind.

Obwohl es immer noch Fehlerquellen gibt und GNSS-Sensoren vor allem für flexible Tragwerke geeignet sind, die sich durch niedrige Modalfrequenzen auszeichnen, stellen sie ein wirksames alternatives Instrument mit zunehmendem Potenzial für die Verfolgung sowohl statischer als auch dynamischer Verformungen dar.

Der GNSS-Empfänger ist die wichtigste Hardwarekomponente und damit auch die dominierende Kostenkomponente. Gegenwärtig (Juni 2022) liegen die typischen Kosten für GNSS-Empfänger bei einigen tausend CHF. Diese Kostenschätzung stützt sich auf Angaben mehrerer grosser Hersteller (Leica, Trimble, NovAtel, Sokkia), die auf den in SHM-Studien verwendeten Geräten in der Literatur basieren. Die Kosten hängen weitgehend von der Genauigkeit in jeder Richtung, der Abtastrate des Geräts und davon ab, ob es sich um einen Ein- oder Zweifrequenzempfänger handelt.

So beginnen die Preise für preisgünstige oder gebrauchte Geräte bei etwa 4'000 CHF, während Geräte mit höherer Präzision und zusätzlichen Funktionen bis zu 20'000 CHF kosten können.

7.23.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Zusätzlich sollten die minimal messbaren Verschiebungen definiert werden.

7.23.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[114] A.E. Scott, M.Mavrogordato, P.Wright, I.Sinclair, und S.M.Spearing, In situ fibre fracture measurement in carbon-epoxy laminates using high resolution computed tomography, Composites Science and Technology, 71(12), 1471, 2011.

[115] ASTM, C876, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1991, ASTM C876-91.

[116] W.S. Chan, Y.-L. Xu, X.-L. Ding; Y.-L. Xiong, und W.-J. Dai, Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions. Journal of Surveying Engineering 132(3):108-117, 2006.

[117] E.N.Landis and D.T. Keane, X-ray microtomography, Materials Characterization, 1305-1316, 2010.

[118] Farhangdoust, S. a. (2019). Health monitoring of closure joints in accelerated bridge construction: a review of non-destructive testing application. Journal of Advanced Concrete Technology 17, no. 7, 381-404.

-
- [119] S.C. Garcea, X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology* 156:305-319, 2018.
-
- [120] K.N. Henriksen, Overview Of Magnet Measurement Method. Cern, 1992.
-
- [121] F. Hunkeler, Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten. VSS, Zürich, Bericht Nr. 510, 1994.
-
- [122] S.B. Im, Summary review of GPS technology for structural health monitoring. *Journal of Structural Engineering* 139(10):1653-1664, 2013.
-
- [123] A.a. Knecht, Using GPS in structural health monitoring. *Smart Structures and Materials: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials*, 122-129, 2001.
-
- [124] H.N. Li, L. Ren, Z.G. Jia et al., State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1):3-16, 2016.
-
- [125] L. Liu and T. Guo, Seismic non-destructive testing on a reinforced concrete bridge column using tomographic imaging techniques, *Journal of geophysics and engineering*, 2:23-31, 2005.
-
- [126] F.P. Márquez, A review of non-destructive testing on wind turbines blades, *Renewable Energy*, 161:998-1010, 2020.
-
- [127] M. Taskin, U. Caligulu, und M. Turkmen X-Ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO₂ Laser beam welding, *Radiography*, 53:741-747, 2011.
-
- [128] C.X. Ogaja, Advances in structural monitoring with global positioning system technology: 1997–2006. *Journal Of Applied Geodesy*, 171-179, 2007.
-
- [129] S.K. Rehman, Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and building materials*, 107:58-86, 2016.
-
- [130] I.N. Robertson, Instrumentation performance during long-term bridge monitoring. *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*, (S. 331-340). Honolulu, 2004.
-
- [131] Schiegg, M. B. (2008). Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten . Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Forschungsauftrag AGB2002/007.
-
- [132] A.J. Sofi, Structural health monitoring using wireless smart sensor network—An overview. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 163:108-113, 2022.
-
- [133] D. Thaler, Cable Stay Bridge Inspection Service Using Magnetic Flux Leakage, 2020.
-
- [134] T.H. Yi, H.N. Li and M. Gu, Recent research and applications of GPS based technology for bridge health monitoring, *Science China Technological Sciences*, 53:2597-2610, 2010.
-
- [135] S.C.Garcea, Y.Wang, and P.J.Withers, Computed Tomography of Composites, *Comprehensive Composite Materials II*, 7:101-118, 2018.
-
- [136] <https://geospatial.trimble.com/>, Zugriff am 13.06.2022
-
- [137] M. Hussan, M.R. Kaloop, F. Sharmin et al., GPS Performance Assessment of Cable-Stayed Bridge using Wavelet Transform and Monte-Carlo Techniques, *KSCE J Civ Eng*, 22:4385–4398, 2018.
-

7.24 Lineare Stelltransformatoren (LVDTs)

7.24.1 Beschreibung der Technologie

LVDTs sind elektromechanische Positionssensoren, die zur Klasse der passiven induktiven Wandler gehören und zur Messung der linearen Verschiebung eines Objekts mit einer zur Position eines beweglichen Kerns proportionalen Ausgangsspannung verwendet werden [138], [139]. LVDTs nutzen das Prinzip der elektromagnetischen Induktion, bei dem eine Leiterspule durch ein statisches Magnetfeld bewegt wird, um eine Spannung bzw. einen Strom zu erzeugen. Durch die Anwendung dieses Konzepts und unter Berücksichtigung der Abb. 7.51 [140] besteht ein typischer LVDT aus drei Wicklungen (Spulen), die um einen zylindrischen Kern gewickelt sind. Die mittlere Spule (Primärwicklung) wird durch Gleich- oder Wechselstromerregung angetrieben, während die beiden anderen Spulen (Sekundärwicklungen) in Reihe geschaltet sind, so dass sich ihre Spannungen zu Null addieren, wenn sich der Koppelkern in der Null- oder Gleichgewichtsstellung befindet.

Der Kupplungskern ist ein separater rohrförmiger Anker aus magnetisch permeablem Material. Er besteht in der Regel aus einer gleichmässig dichten Nickel-Eisen-Legierung, die sorgfältig gegläht wird, um eine ausgezeichnete magnetische Permeabilität zu schaffen [141]. Er ist mechanisch mit dem Objekt gekoppelt, dessen Position gemessen werden soll. Der Kern bewegt sich frei in der hohlen Bohrung der Spule, die in der Regel gross genug ist, um ein beträchtliches radiales Spiel zwischen dem Kern und der Bohrung zu gewährleisten, ohne dass es zu einem physischen Kontakt zwischen dem Kern und der Spule kommt.

Während des Betriebs (Gleichstromfall) wird die Primärwicklung des LVDTs mit einer geeigneten Spannung erregt (Primärerregung), und das elektrische Ausgangssignal ist die Differenzspannung zwischen den beiden Sekundärwicklungen, die sich mit der axialen Position des Kerns innerhalb der LVDT-Spule ändert. Dies wird in Abb. 7.52 dargestellt [142].

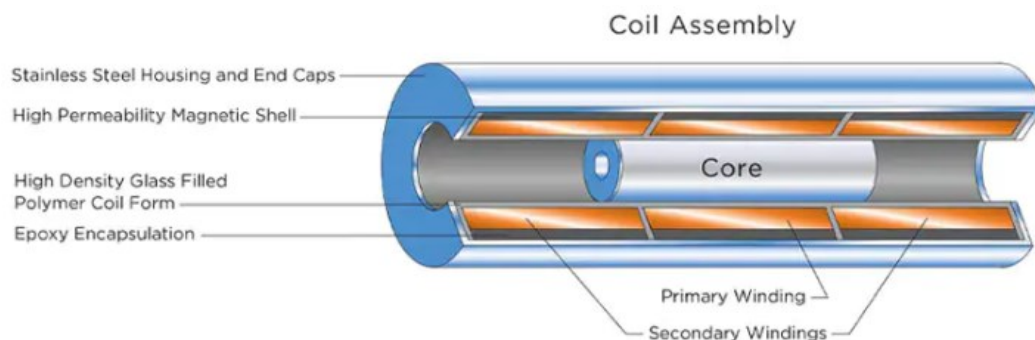


Abb. 7.51 Aufbau eines typischen LVDT [140]

7.24.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

LVDTs sind im Allgemeinen eine ausgereifte Technologie und werden in grossem Umfang für die Überwachung der folgenden Grössen eingesetzt [144]-[148]:

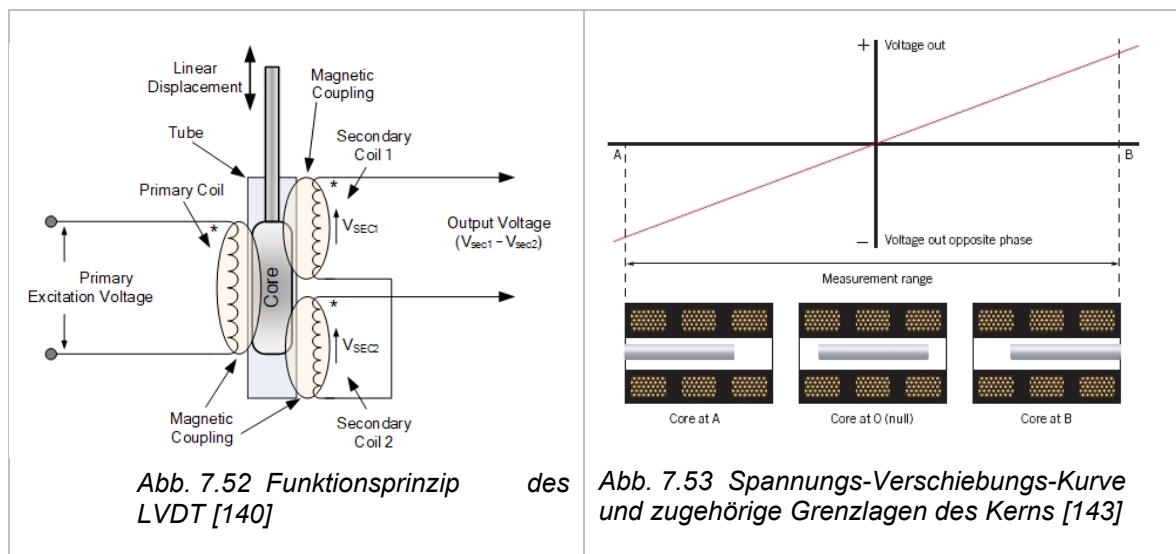
- Durchbiegung von Fahrbahnplatten
- Axialverschiebungen von Bauwerksteilen, in allen Betriebsphasen möglich
- Bewegung der Dehnungsfuge
- Überwachung von Betonrissen
- Bewertung von CFK-Nachrüstungen
- Prüfung beweglicher Tragwerke
- Tainter-Gate-Differenzialbewegung
- Bewegung der Hebebrücke
- Laboruntersuchungen

7.24.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

Der Spannungsausgang eines LVDTs ist eine lineare Funktion der Verschiebung über den kalibrierten Bereich des Sensors (Abb. 7.53). Der Messbereich ist definiert als Abstand von der Nullposition des Aufnehmers. Ausserhalb dieses Bereichs wird die Kurve stark nichtlinear. Die Messbereiche reichen von $\pm 100 \mu\text{m}$ bis $\pm 25 \text{ cm}$, wobei die Linearität

innerhalb des vollen Messbereichs besser als 0,5% ist. Ihre Betriebstemperaturbereiche beginnen bei $-265\text{ }^{\circ}\text{C}$ und reichen bis $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Für den Betrieb in Kernreaktoren sind auch strahlungsbeständige Ausführungen erhältlich. Die Empfindlichkeit des LVDTs hängt von der Erregerspannung, dem Widerstand der Sekundärwicklungen und der an diese Wicklungen angeschlossenen Stromkreise sowie der Erregung ab.

Die Erfassung der Verschiebung durch LVDTs erfordert die sorgfältige Entwicklung einer Signalaufbereitungsschaltung. Dies liegt daran, dass aufgrund von Konstruktionsfehlern zwischen den beiden Sekundärwicklungen und der Streuinduktivität kein echter Nullpunkt auftritt, wenn der Kern sich in der Mittelposition befindet. Die Messwerterfassung erfolgt dann in der Regel mit modernen Analog-Digital-Wandlern (z. B. einem Sigma-Delta-Gerät) mit den gewünschten Abtastraten. Der Frequenzgang von LVDTs ist in erster Linie durch die Trägheitseigenschaften des Geräts begrenzt, kann aber bis zu 500 Hz erreichen.



7.24.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Vor- und Nachteile aktueller LVDTs sind in Tab. 7.31 zusammengefasst. Die typischen Kosten hängen von der Anwendung ab und können von 150 (ohne Kabel, Installation, A-D-Wandler/Stromversorgung) bis zu 2'000 CHF pro Sensor reichen.

Während die Montage von LVDTs zur Messung der Bewegung von Dehnungsfugen oder Betonrissen einen moderaten Aufwand erfordert, nimmt der Aufwand zur Messung der Durchbiegung einer Brücke stark zu. Der Grund ist, dass ein LVDT-Sensor immer die Bewegung relativ zu einem Referenzpunkt misst, der als ruhend angenommen wird. Bei Durchbiegungen eines Brückenträgers ist dies üblicherweise der Untergrund senkrecht unterhalb der Messstelle. Um die Bewegung auf den LVDT-Sensor zu übertragen, muss eine mechanische Verbindung zwischen dem Untergrund und dem Brückenträger erstellt werden. Eine oft angewendete Montage besteht darin, den LVDT-Sensor auf einem Pfosten zu befestigen, der in den Untergrund gerammt wird (Abb. 7.54a). Der Läufer des LVDT-Sensors wird mit einem Metalldraht verbunden, der bis zum Brückenträger gezogen und dort befestigt wird (Abb. 7.54b). Der Draht muss zudem mit einer Feder, die ebenfalls am Pfosten befestigt wird, gespannt werden, damit die Bewegung des Brückenträgers unverfälscht an den Läufer des LVDT-Sensors übertragen wird. Bei Brücken mit sehr grossen Höhen über Grund oder über Flüsse mit hohem Wasserstand kann die aufwendige Montage den Einsatz von LVDT-Sensoren verunmöglichen.

Bei der Messung von Langzeiteinwirkungen (z. B. Temperatur) sollte der Draht aus Invar sein, um den Einfluss von Temperaturänderungen auf die Messungen zu minimieren. Zudem sollte sichergestellt werden, dass die Verschiebungen des Referenzpunktes sehr klein im Vergleich zu den zu messenden Bewegungen der Brücke bleiben. Bei grossen Bewegungen der Brücke und langen Drähten ist zudem der Einfluss der abnehmenden Drahtspannung infolge der Verformung der Feder zu berücksichtigen.

Die oben erwähnten Einschränkungen gelten nicht nur für LVDT-Sensoren sondern für alle Wegsensoren (z. B. Potentiometer, kontaktlose Laser-Triangulationssensoren).

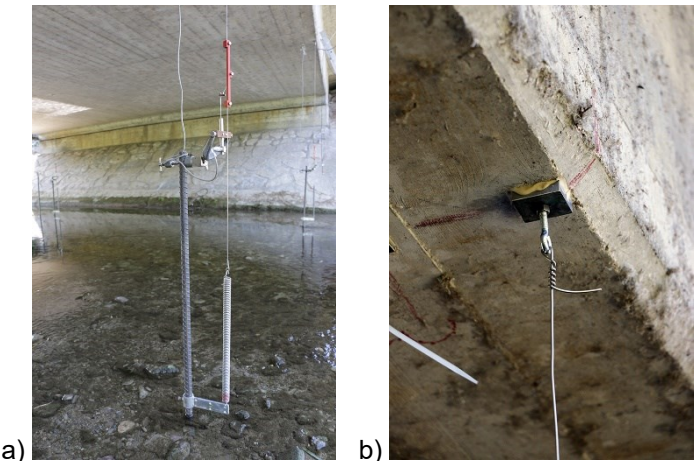


Abb. 7.54 a) Befestigung des LVDT-Sensors an einen Pfosten (Referenzpunkt). b) Befestigung des Drahts zur Übertragung der Durchbiegung am Brückenträger (Quelle EMPA). Eine solche Anwendung ist oft auf einen kurzen Messzeitraum beschränkt, wie z. B. Überfahrt Sondertransport oder Probelastung.

Die aktuelle Entwicklung moderner LDVTs konzentriert sich vor allem auf die Realisierung drahtloser und kontaktloser Sensoren sowie auf die Erhöhung des effektiven Dynamikbereichs.

Tab. 7.31: Vor- und Nachteile von LVDTs.	
Vorteile	Nachteile
Unendliche Auflösung	Begrenzte dynamische Reaktion
Geringer Stromverbrauch	Vibrationsverschiebung kann die Leistung einschränken
Geringer Hystereseverlust	Sie hat einen begrenzten dynamischen Reaktionsbereich
Kompaktheit	Empfindlich gegenüber magnetischen Streufeldern (Abschirmung erforderlich)
Robustheit gegenüber der Umwelt	

7.24.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend sollten die Anforderungen an bauliche Massnahmen (z.B. Pfosten für Referenzpunkt) und der zu erwartende Zeitrahmen der Messung beschrieben werden.

7.24.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte
[138] J.G. Webster and H. Eren, Measurement, Instrumentation, und Sensors Handbook, 2nd Ed. CRC Press, Boca Raton, CA, USA, 2014
[139] M.L. Wang, J.P. Lynch, und H. Sohn, Sensor Technologies for Civil Infrastructures - Volume 1: Sensing Hardware and Data Collection Methods for Performance Assessment, Elsevier, Cambridge, UK, 2014.
[140] LVDT Tutorial, https://www.te.com/usa-en/products/sensors/position-sensors/intersection/lvdt-tutorial.html , Zugriff am 13.06.2022.
[141] S. Braun, Encyclopedia of Vibration, Academic Press, London, UK, 2002.
[142] Linearer variabler Differenzialtransformator, https://www.electronics-tutorials.ws/io/linear-variable-differential-transformer.html . Letzter Zugriff am 13.06.2022.
[143] LVDT, Halbbrücke und digitale Wandlertheorie, https://www.solartronmetrology.com/service-and-support/knowledge-base/lvdt-half-bridge-and-digital-transducer-theory . Letzter Zugriff am 13.06.2022.

-
- [144] A. Peiris, C. Sun, und I.E. Harik, Lessons learned from six different structural health monitoring systems on highway bridges, *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control*, 39(3):616-630, 2018.
-
- [145] Giannopoulos, G., Vantomme, J., Wastiels, J., und Taerwe, L. (2004) Construction and Experimental Analysis of a Pedestrian Bridge with Concrete Deck and IPC Truss Girder, *Science and Engineering of Composite Materials*, 11(1), 9-18.
-
- [146] Hidayat, I., Suangga, M., und Maulana, M. R. (2017) The effect of load position to the accuracy of deflection measured with LVDT sensor in I-girder bridge, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 109 (1), #012024.
-
- [147] Mayunga, S.D., und Bakaone, M. (2021) Dynamic Deformation Monitoring of Lotsane Bridge Using Global Positioning Systems (GPS) and Linear Variable Differential Transducers (LVDT), *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 9(1), 30-50.
-
- [148] F. Moreu, J. Li, H. Jo, R.E. Kim, S. Scola, B.F. Spencer, und J.M. LaFave, Reference-free displacements for condition assessment of timber railroad bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 21(2), 04015052, 2016.
-

7.25 Extensometer

7.25.1 Beschrieb der Technologie

Das Extensometer (auch Dehnungsaufnehmer genannt) besteht aus einem oder mehreren Ankern, die in verschiedenen Tiefen eines Bohrlochs installiert werden, von denen einer die Referenzplatte ist, und einem Messkopf, wie in Abb. 7.38 aufgezeigt. Üblicherweise sind Bohrloch-Extensometer entweder Einpunkt- (misst die Verschiebung zwischen einem festen Punkt und einem Referenzpunkt) oder Mehrpunktaufnehmer (verwendet mehrere Stäbe, die Messungen zwischen mehreren festen Punkten und dem Referenzpunkt ermöglichen).

Das Extensometer misst den Abstand zwischen den verschiedenen Ankern und der Referenzplatte und überwacht dadurch ihre relative Verschiebung. Der tiefste Anker, bzw. die tiefste Platte, ist immer auf Höhe des Fundaments eingegraben oder im Bohrloch als tiefer Bezugspunkt im stabilen Boden verpresst. Daher liefert jede Änderung des Ankerabstands genaue Informationen darüber, welche Setzungen des Fundaments stattfinden. Eine in einem Schutzmantel (in der Regel ein Wellmantel) geführte Steigrohrmessstange ist mit der Referenzplatte verbunden. Gleitkappen an der Spitze und am Ende der Verbindung zwischen Steigrohr und Wellrohr verhindern, dass Kräfte auf das Steigrohr einwirken, die es nach unten ziehen.

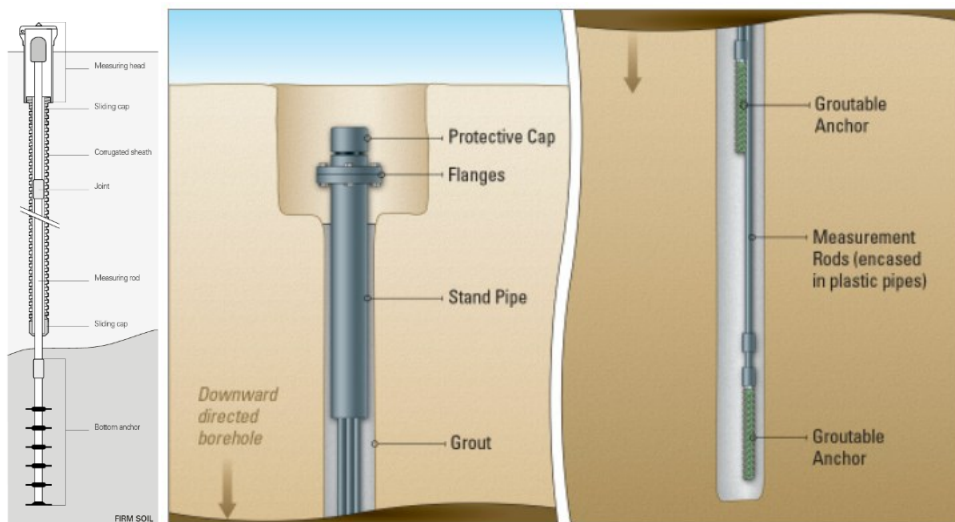


Abb. 7.55 Profil von mechanischen Extensometern in einem Bohrloch: Tell-tale extensometer (links) (www.sisgeo.com), Mehrpunkt Dehnungsaufnehmer (rechts) (www.geokon.com)

7.25.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Extensometer werden in der Regel zur Überwachung von Setzungen oder Hebungen zwischen zwei Punkten eingesetzt, ohne dass eine abnehmbare Sonde verwendet wird. Die Hauptanwendung von Extensometern betrifft geotechnische Vermessung, wie zum Beispiel:

- Überwachung von lateralen Bodenbewegungen in Brückenfundamenten und Böschungen (Setzungen oder Rutschungen).
- Berechnung der vertikalen und horizontalen Verschiebungen von Stützmauern, Pfeilern und Widerlagern.
- Überwachung der Auswirkungen durch die kontinuierlich zunehmende Belastung der Brückenfundamente während der Bauarbeiten.
- Überwachung der Setzungen/Bewegungen des Fundaments bei Instandhaltungsarbeiten (Reparaturen oder Nachrüstungen) oder Erweiterungsarbeiten.

- Langfristige Überwachung des geotechnischen Verhaltens von Brückenfundamenten und Widerlagern.

Extensometer können auch zur Überwachung der Längsverschiebungen von Brückenfeldern verwendet werden. Dabei wird der Extensometer so zusammengefügt, dass er sich von Pfeiler zu Pfeiler innerhalb des Hohlkastens erstreckt, wobei die Referenzplatte an der Fahrbahnplatte befestigt ist. Die relative Verschiebung liefert ein Mass für die Verkürzung der Spannweite [149].

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Extensometer werden zur Überwachung von Felsinstabilitäten verwendet, indem sie über die relevanten Trennflächen zwischen festem Fels und sich bewegender Felsmasse montiert werden.

Weiter können sie, eingebaut in Bohrungen, für die Überwachung von Rutschhängen verwendet werden.

Fallbeispiel: Anwendungen zur Brückenüberwachung

Um dem Risiko eines plötzlichen Kabelbruchs vorzubeugen, wie er bei einem korrosionsbedingten Schrägseilbruch an einer Schweizer Fussgängerbrücke in den 1960er Jahren aufgetreten ist, wurde von Bimschas und Kaufmann ein permanentes Überwachungssystem vorgeschlagen [150]. Das System zielt darauf ab, mögliche Drahtbrüche in den oberen Verankerungszonen zu erkennen, wo die Kabel in den Pylon eindringen. Das System basiert auf dem Einsatz eines Dehnungsmessers und ermöglicht nachweislich eine zuverlässige Erkennung von Drahtbrüchen, bevor ein potenziell kritischer Zustand erreicht wird. Am oberen Ende des Schrägseils wurde der Extensometer am Betonmast befestigt, da dieser starr mit dem Anker des Seils verbunden ist. Am unteren Ende war es konzeptionell nicht möglich, den Dehnungsmesser direkt an den Drähten zu befestigen. Daher wurde die Befestigung am Mörtel gewählt, da dieser mit den Drähten verbunden ist.

7.25.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung kann bei Stab- oder Drahtaufnehmern entweder analog oder digital erfolgen - je nachdem, wie zugänglich der Messkopf/Messort ist oder welche Anforderungen an die Kontinuität, zum Beispiel bei Langzeitmessungen, gestellt werden.
- Die Bewegungen des Ankers werden mechanisch mit einer Messuhr oder einem Tiefenmikrometer erfasst, um die Position der Spitze der befestigten Stange im Verhältnis zu einer Referenzplatte zu messen.
- Optische Nivelliermessungen an der Spitze des Steigrohrs ermöglichen eine präzise und direkte Überwachung durch topografische Vermessung.
- Die Dehnungsaufnehmer können mit elektrischen Messwertaufnehmern ausgestattet werden, um die Ablesung zu automatisieren und eine kontinuierliche Fernüberwachung durch einen automatischen Datenlogger zu ermöglichen, wie in Abb. 7.56 aufgezeigt.
- Neben der Fernverfügbarkeit der Messdaten ist bei der digitalen Auslesung auch eine digitale Messdatenaufzeichnung und/oder ein Online-Zugriff möglich.
- Die Messwerte beziehen sich auf die Abstandsänderungen des jeweils erfassten Ankers zum Messkopf (bzw. auch Abstände zwischen zwei Ankern bei Mehrfachaufnehmern) eines Stab- oder Drahtaufnehmers. Damit ist es möglich, nicht nur die Grösse der Bewegung, sondern auch eventuelle Versagensflächen und Bewegungszonen zu messen.

Die Dehnungsmessgeräte können minimale Dehnungen im Bereich von 25 μm erfassen. Diese Messgenauigkeiten werden über Einbaulängen von wenigen Metern bis hin zu Längenänderungsaufnehmern in Tiefen von bis zu 100 m aufgezeichnet. Wenn der mechanische Dehnungsaufnehmer mit einem Wegaufnehmer ausgestattet ist, beträgt die Auflösung 0,02% v.E. und die Genauigkeit $\pm 0,1\%$ v.E.

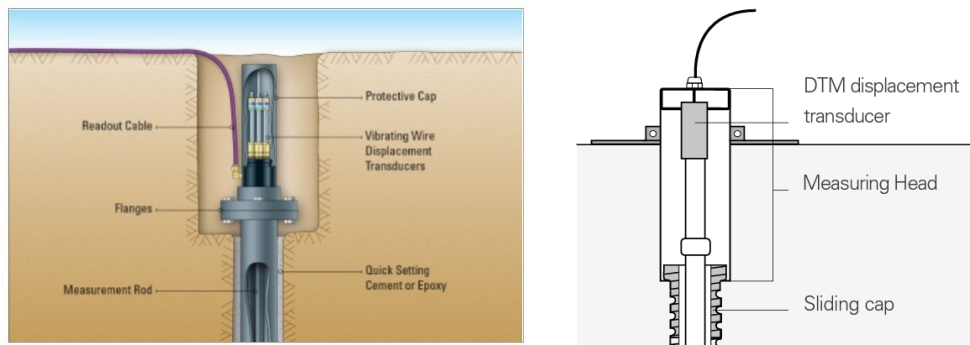


Abb. 7.56 Extensometer mit Wegaufnehmern zur Automatisierung der kontinuierlichen Überwachung [151]

Tab. 7.32 Messbereich/Genauigkeit der verschiedenen Extensometertypen

	Einzelner Punkt	Mehrere Punkte
Standard Bereich	bis zu 100 mm	bis zu 300 mm nominal
Messbare Mindestgrösse	0,025 mm	0,025 mm
Bohrloch-Durchmesser	35, 44, 51, 64 mm	76 mm oder mehr
Maximale Länge	3 m	100 m

7.25.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Extensometer sind einfach zu installieren und liefern auch unter eher rauen Umweltbedingungen (nahe Baustellen oder der Witterung ausgesetzt) und über längere Zeiträume sehr zuverlässige Ergebnisse. Darüber hinaus haben die möglichen Messbereiche zwischen <0,1 mm und bis zu mehreren dm (bis hin zu Metern) einen sehr grossen Spielraum. Mit neueren Entwicklungen des Fühleraufnehmers wurden dreidimensionale Längenänderungsaufnehmer ermöglicht. Der Sensor kombiniert einen hochgenauen biaxialen MEMS-Inklinometer zur Messung der horizontalen Verschiebung mit einem berührungslosen Magnetsensor zur Überwachung der vertikalen Verschiebung. Solche integrierten Sensoren ermöglichen die 3D-Kartierung des Bohrlochprofils. Allerdings sind diese Sensoren in Bezug auf die Erfassung grösserer Dehnungen im Messbereich eher begrenzt.

Die Kosten pro m' der Kernbohrung für einen Extensometer können mit ca. 150 - 250 CHF / m'. für kürzere Bohrstrecken von ca. 50-100 m und bis zu 500 CHF / m' für Bohrtiefen von mehr als 100 m bis 300 m angesetzt werden. Die Installationspauschalen können je nach Zugänglichkeit und Aufwand in einem Rahmen zwischen 2'000 bis 20'000 CHF liegen. Für die nötigen Einbauten des Draht- / Stangenextensometer (Hüllrohr, Injizieren, Messkopf und Messgestänge / Draht) ist mit Kosten von ca. 200 - 300 CHF / m' zu rechnen. Wiederkehrende Kosten liegen in der Grössenordnung von 500 CHF pro Monat und setzen sich aus dem Aufwand für die Ablesung und Interpretation der aktuellen Verschiebungswerte oder für den Betrieb (und Installation) einer digitalen Lösung (Erfassung, Übermittlung und ggf. automatisierte Auswertung der Daten) und der Wartung zusammen.

7.25.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu den Anforderungen an die Messtechnologie sind auch die Anforderungen an die baulichen Massnahmen (z.B. Bohrungen, Schutz Einrichtung, etc.) zu definieren sowie die Zugänglichkeiten (z.B. Erreichbarkeit, Eigentümer, etc.) zu beachten.

7.25.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [149] N. S. Robertson und G.P. Johnson, Instrumentation performance during long-term bridge monitoring, in Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring, Honolulu, 2004.
-
- [150] M. Bimschas und W. Kaufmann, An Innovative Deformation-Based System for Monitoring the Structural Safety of Stay-Cables, 4th Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2017), Zurich, Switzerland, September 13-15, 2017
-
- [151] BDI Groutable Head Assembly, <https://bditest.com/product/groutable-head-assembly/> Zugriff am 04.03.2024.
-

7.26 Winkelverschiebung / Neigungssensoren

In diesem Kapitel beschreiben wir die Messung von Neigungen eines Tragwerks. Für den Einsatz von Neigungsmessern in Bohrlöchern (geotechnische Überwachung) verweisen wir den interessierten Leser auf den Teilbericht Tunnel.

7.26.1 Beschreibung der Technologie

Neigungsmesser sind Instrumente zur Messung der Neigungs-/Kippwinkel eines Objekts in Bezug auf die Schwerkraft; damit ermöglichen Neigungsmesser die Überwachung der räumlichen Orientierung. Das Ergebnis wird entweder als Winkelmass (Grad, Minuten, Sekunden usw.) oder als Prozentwert in Bezug auf eine ebene Nullebene angegeben.

Es gibt verschiedene Arten von handelsüblichen Sensoren für die Neigungswinkelmessung, die je nach ihrem Funktionsprinzip in zwei Hauptarten unterteilt werden können [152]: feststoffbasierte und flüssigkeitsbasierte Mechanismen. Festkörperbasierte Neigungswinkelsensoren bestehen aus einer Prüfmasse, die an einem Ausleger, einer Feder oder einer Scharnierstange aufgehängt ist. Wenn sich der Sensorkörper unter dem Einfluss der Schwerkraft um eine vertikale oder horizontale Referenzausrichtung dreht, wird die aufgehängte feste Struktur verformt; diese Verformung wird in Form des Neigungswinkels gemessen. Bei flüssigkeitsbasierten Neigungswinkelsensoren wird die Schwerkraftbeschleunigung durch eine Flüssigkeitsbewegung erfasst. Damit sie sich aufgrund der Schwerkraft bewegen können, sollte die Flüssigkeitsdichte in einem Behälter nicht gleichmässig verteilt sein. Dies wird entweder durch die lokale Erwärmung einer homogenen Flüssigkeit oder durch die Verwendung eines Gemischs nicht mischbarer Flüssigkeiten erreicht, bei denen es sich um Flüssigkeit-Luft oder Flüssigkeiten mit unterschiedlicher Dichte handeln kann. Die lokale Erwärmung (thermisch-konvektiver Neigungssensor) wird in der Regel mit gasbasierten Sensoren erreicht: Durch Anlegen eines konstanten Stroms wird das Gas in einer abgedichteten Kammer erhitzt, und das Temperaturprofil bewegt sich in Übereinstimmung mit der angelegten Neigung.

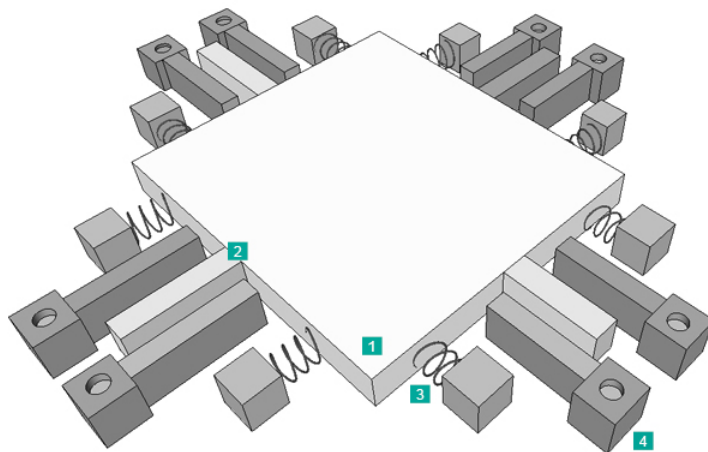


Abb. 7.57 Prinzip eines MEMS-Sensors; 1. Prüfmasse mit 2. Elektroden 3. Federn 4. festen Elektroden; (Quelle: www.posital.com)

Die derzeit am meisten genutzten Sensoren zur Messung der Neigung basieren auf der MEM-Technologie, die den zusätzlichen Vorteil niedriger Kosten bietet (Abb. 7.57). Ihr Prinzip liegt in der Verwendung von einem Beschleunigungsmesser, der die auf die Schwerkraft zurückzuführende Beschleunigungskraft misst, die am grössten ist, wenn der Beschleunigungsmesser in die volle 90-Grad-Kippstellung gedreht wird. Die gleiche Beschleunigungskraft aufgrund der Schwerkraft ist null (minimal), wenn der Neigungswinkel des Beschleunigungsmessers null beträgt. Bei Zwischenkippen ist die Kraft, die der Beschleunigungsmesser erfährt, gleich dem Produkt aus dem Sinus des Kippwinkels und der Erdbeschleunigung. Der Neigungssensor liefert also eine bipolare

Gleichspannung, die proportional zum Sinus des vom Neigungsmesser gemessenen Neigungswinkels ist. Bei einer wirklich vertikalen Position beträgt der Ausgang null Volt.

7.26.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Neigung eines Bauwerks kann durch verschiedene Bautätigkeiten wie Aushub, Tunnelbau oder Entwässerung verursacht werden, die den Boden, der das Bauwerk trägt, negativ beeinflussen können. Neigungsänderungen können auch aufgrund der Belastung des Bauwerks auftreten, z. B. durch die Belastung eines Staudamms beim Aufstauen, einer Schlitzwand beim Aushub oder einer Fahrbahnplatte durch Wind und Verkehr. Die vom Neigungsmesser erfassten Daten warnen frühzeitig vor drohenden Verformungen, so dass rechtzeitig Gegenmassnahmen ergriffen werden können.

Zu den spezifischen Anwendungen im Bereich der Kunstbauten gehören:

- Überwachung von Neigungsänderungen aufgrund von baulichen oder industriellen Aktivitäten; klassisch für die Überwachung von Baugrubenabschlüssen und angrenzende, dadurch setzungsgefährdete Bauwerke
- (Stützmauer-,) Fundament- und Brückenpfeiler-Bewegungen
- Überwachung von durch Erdbeben beschädigten Brücken
- Überwachung von Differenzsenkungen von Brückenpfeilern

Es ist zu beachten, dass diese Art der Messung eine eher globale Bewertung bietet und für die Erkennung lokaler Defekte nicht geeignet ist, da die Verformungen aufgrund lokaler Schäden (z. B. Bewehrungskorrosion) im Vergleich zu Verformungen durch Umwelteinflüsse (z. B. Temperaturänderungen) zu gering sind.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Inklinometer werden zur Überwachung von Felsinstabilitäten verwendet, indem mit Ihrer Hilfe Rotationen (Kipp- oder auch Rutschbewegungen) von instabilen Felsmassen detektiert werden können.
- Weiter können sie, eingebaut in Bohrungen, für die Überwachung von Rutschhängen verwendet werden.
- Auch zur Überwachung von Steinschlagschutznetzen werden Inklinometer verwendet, um Ereignisse, welche zu einer relevanten Auslenkung der Stützen führen, zu detektieren.

Fallbeispiel - Anwendungen zur Brückenüberwachung

Neigungssensoren wurden in einer Reihe von Benchmark-Studien zur Überwachung des Verhaltens von Brücken eingesetzt wie in Xiao et al. [156] beschrieben. Zhou et al. installierten Kippmesser auf der Oberseite eines Pylons einer Schrägseilbrücke, um die Drehungen des Pylons aufzuzeichnen [158]. Caglayan et al. messen die Neigung einer Fahrbahnplatte, um die vertikale Verschiebung einer Bogenbrücke zu ermitteln [157]. Helmi et al. messen die Verdrehungen und die Krümmung einer Hohlkastenbrücke, um die Durchbiegung zu berechnen [159]. Norouz et al. installierten Tiltmeter an den Pfeilern einer Fachwerkbrücke, um die Verschiebung der Pfeileroberkante zu messen [160]. Kim und Laman brachten ein Kippmessgerät an Brückenwiderlagern an und überwachten die Bewegungen der Widerlager [162]. Alle diese Messungen dienten der Ermittlung der Brückendurchbiegung.

7.26.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Neigungsmesser werden oft mit einem wasserdichten Gehäuse geliefert, das die Leistung im Freien und in rauen Umgebungen gewährleistet. Der Installationsprozess zielt in erster Linie darauf ab, die Nivellierung des Neigungsmessers sicherzustellen. Dies wird durch einfaches Bohren und die mögliche Verwendung von Ankern zur Befestigung der Halterung/des Gehäuses auf der Oberfläche (Fahrbahnplatte, Pfeiler, Dach) erreicht, auf der die Neigungsänderung gemessen werden soll.

Es gibt sowohl Sensoren mit digitalem als auch mit analogem Ausgang. Die meisten im Handel erhältlichen Sensoren verfügen über einen Spannungsausgang, der von jedem geeigneten Auslesegerät oder Datenerfassungssystem gelesen werden kann, das die Differenzspannung misst.

7.26.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Bei starken Erschütterungen und Vibrationen reicht die physikalische Dämpfung in statischen Neigungsmessern möglicherweise nicht aus, um Störungen zu unterdrücken. Softwarefilter können die Auswirkungen solcher Störungen nur in begrenztem Masse verringern. Bei statischen Neigungssensoren können spezielle Signalverarbeitungs-Tools wie «gleitender Durchschnitt» oder «exponentielle Filter» aktiviert und konfiguriert werden, um das Signal zu glätten, allerdings mit dem Nachteil, dass die schnelle Reaktionszeit des MEMS-Neigungssensors verloren geht und die Reaktion des Sensors langsamer wird.

Für Anwendungen, bei denen mit plötzlichen Bewegungen, Stößen und Vibrationen zu rechnen ist, wie z. B. bei der Messung der Reaktion auf Stösse, starke Böen oder Einschläge von schweren Fahrzeugen, können dynamische Neigungsmesser eingesetzt werden, die einen 3D-Beschleunigungssensor mit einem 3D-Gyroskop kombinieren [153]. Signale von den Beschleunigungssensoren und Gyroskopen (siehe mehr Informationen in Abschnitt 7.33) werden kombiniert, um eine Neigungsmessung zu erhalten, die die Auswirkungen von Beschleunigungen vollständig kompensiert. Diese Technologie hängt von der Reife der zugehörigen Technologie für Beschleunigungsmesser ab. Hochpräzise Neigungsmesser mit dynamischen Messwerten (Vibration) können kostspielig sein (600 bis 1'000 CHF). Die aktuellen Entwicklungen bei MEMs ermöglichen jedoch kostengünstige Lösungen (mit kundenspezifischen Optionen, die unter 100 CHF pro Sensor liegen). Ausserdem werden zunehmend drahtlose Lösungen angeboten, die den Einsatz an schwer zugänglichen Orten erleichtern. Diese erfordern ein Gateway, das häufig über eine Antenne für die LoRa-Kommunikation (grosse Reichweite) mit den Sensoren und eine Antenne für die 3G/4G-Datenverbindung mit einer Cloud zur Datenübertragung und -speicherung verfügt. Die Standardkonnektivität zur Verbindung mit der Cloud kann über eine 3G/4G-Daten-SIM-Karte sichergestellt werden.

Tab. 7.33 Messbereich/Genauigkeit der verschiedenen Neigungsmessgeräte

	kostengünstige MEMs [161]	Schwerkraft-bezogener elektrolytischer Neigungssensor [155]		
Eingangsbereich (°)	±3, ±14.5, ±30, ±45, ±0, ±90	±0.5	±3	±50°
Skalierungsfaktor	47.8, 10.0, 5.0, 3.5, 2.9, 2.5 V/g	0.1°/V (single-ended)	0.6°/V (single-ended)	10°/V (single-ended)
Auflösung	3.5 µrad (maximal)	0.0001° (1.75 µrad)	0.0006° (10,5 µrad)	0.01°
Betriebstemperatur	–55 bis +85 °C	–25 bis +70 °C		

7.26.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.26.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[152] Ha Tran Thi Thuy, Tiep Dang Dinh, Tuan Vu Quoc, Thinh Pham Quoc, Masahiro Aoyagi, My Bui Ngoc, Van Thanh Dau & Tung Thanh Bui, A Robust Two-axis Tilt Angle Sensor Based on Air/Liquid Two-phase Dielectric Capacitive Sensing Structure, IETE Journal of Research, 66(5):685-696, 2020, DOI: 10.1080/03772063.2018.1518732

[153] <https://www.posital.com/es/productos/inclinometros/mems/MEMS-Technology.php>, Letzter Zugriff am 13.06.2022

[154] <https://www.encardio.com/blog/tiltmeter-how-does-it-work-installation-how-to-read/>, Letzter Zugriff am 13.06.2022

[155] <https://smartec.ch/en/product/uniaxial-tiltmeter/>, Letzter Zugriff am 13.06.2022

-
- [156] F. Xiao, G.S. Chen, und J.L. Hulse, Monitoring Bridge Dynamic Responses Using Fiber Bragg Grating Tiltmeters, *Sensors*, 17, 2390, 2017, <https://doi.org/10.3390/s17102390>
-
- [157] B.O. Caglayan, K. Ozakgul, und O. Tezer, Assessment of a concrete arch bridge using static and dynamic load tests. *Struct. Eng. Mech.*, 41:83–94, 2012.
-
- [158] J. Zhou, X. Li, R. Xia, J. Yang, und H. Zhang, Health Monitoring and Evaluation of Long-Span Bridges Based on Sensing and Data Analysis: A Survey, *Sensors*, 17:603, 2017.
-
- [159] K. Helmi, T. Taylor, A. Zarafshan, und F. Ansari, Reference free method for real time monitoring of bridge deflections, *Engineering Structures*, 103:116–124, 2015.
-
- [160] M. Norouzi, K. Cormier, M. Aydemir, S. Hashtroodi, V. Hunt, D. Nims, und A. Helmicki, Measuring Displacement of Tall Concrete Columns During Construction: Jeremiah Morrow Bridge, Interstate 71, Lebanon, Ohio. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, 2408:97–106, 2014.
-
- [161] <https://www.althensensors.com/sensors/inclinometers-tiltmeters/geotechnical-inclinometers/4754/750-050-low-cost-mems-tiltmeter-black-diamond/>, Letzter Zugriff am 13.06.2022
-
- [162] W. Kim und J.A. Laman, Seven-year field monitoring of four integral abutment bridges. *J. Perform. Constr. Facil.* 2011, 26, 54–64.
-

B2 Rissmonitore

7.27 Fugen- und Rissmessgeräte

7.27.1 Beschreibung der Technologie

Schwingsaiten- (Vibrating Wire – VW) Rissmessgeräte bestehen aus einem Sensor-Aussenrohr und einem inneren, frei gleitenden Stab, der am inneren Ende durch eine Feder mit einem Schwingsaiten-Sensor verbunden ist, siehe Abb. 7.58. Am Sensorende des Aussenkörpers und am äusseren Ende des Stabes sind Anker angebracht, die auf beiden Seiten eines zu überwachenden Risses befestigt werden können. Die Anker verfügen über Kugelgelenke, mit denen sie am Messgerät befestigt sind, um eine unterschiedliche Bewegung in Querrichtung auszugleichen und zu verhindern, dass sich der innere Stab im äusseren Gehäuse festsetzt.

Der Rissmonitor arbeitet nach dem Prinzip, dass ein gespannter Draht mit seiner Resonanzfrequenz schwingt. Das Quadrat dieser Frequenz ist proportional zur Dehnung des Drahtes. Um den Draht herum befindet sich eine Magnetspule, die, wenn sie von einer vibrierenden Auslese- oder Datenlogger-Schnittstelle gepulst wird, die resultierende Resonanzfrequenz der Vibration misst. Eine Änderung des Abstands zwischen den Ankern, die durch das Öffnen oder Schliessen des Risses verursacht wird, führt dazu, dass sich der innere, frei gleitende Stab innerhalb des äusseren Körpers bewegt, wodurch sich die Spannung des schwingenden Drahtes ändert, was zu einer messbaren Änderung der Resonanzfrequenz des Drahtes führt.



Abb. 7.58 Vibrierendes Drahtrißmessgerät (<http://www.pcte.com.au/>)

Dreidimensionale Rissmessgeräte überwachen die Verschiebung über Risse und Fugen in drei Richtungen. Der zentrale Referenzblock ermöglicht es den Schwingsaitenaufnehmern, sich unabhängig voneinander in alle drei Richtungen zu bewegen. Der 3D-Montagerahmen besteht aus zwei Armen und zwei verpressbaren Ankern sowie drei Schwingsaiten-Wegaufnehmern, wie in Abb. 7.59. Jede Bewegung in der überwachten Position führt zu einer relativen Veränderung zwischen den beiden Ankern, wodurch sich einer oder mehrere der Schwingungsdraht-Wandlerstäbe unabhängig voneinander bewegen, wodurch sich die Frequenz des jeweiligen Drahtes ändert. Diese Frequenzänderung wird umgerechnet, um die Bewegung in Millimetern anzuzeigen.



Abb. 7.59 3D-Rissmessgerät (<http://www.geosense.co.uk/>)

Für die Messung der Drehung bei Rissen gibt es eine Messvorrichtung, siehe Abb. 7.60, die zur Messung der Rotation, der Quer- und der Längsbewegung bestimmt ist. Das Gerät besteht aus einer überlappenden oberen Platte, die durchsichtig ist, mit einem roten Fadenkreuz. Die untere Platte ist weiss und mit einem Messgitter versehen. Es ermöglicht eine händische Vor-Ort Überwachung von Rissen im Bereich von 0,5 bis 20 mm horizontal und 10 mm vertikal.



Abb. 7.60 Standard-Rissmonitor (Quelle: <https://www.avongard.com/products/>)

7.27.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

- Überwachen der Bewegung gerissener Oberflächen, z. B. Betonrisse in der Fahrbahnplatte, Quer- und Längsrisse an der Innenseite eines gemauerten Gewölbes.
- Überwachung von Fahrbahnübergängen.
- Messen der Rissbreite und überwachen von Veränderungen der Rissbreite.
- Langfristige Überwachung bestehender Risse zur Bestimmung des aktiven Mechanismus.
- Verschiebung des Pfahllagers.

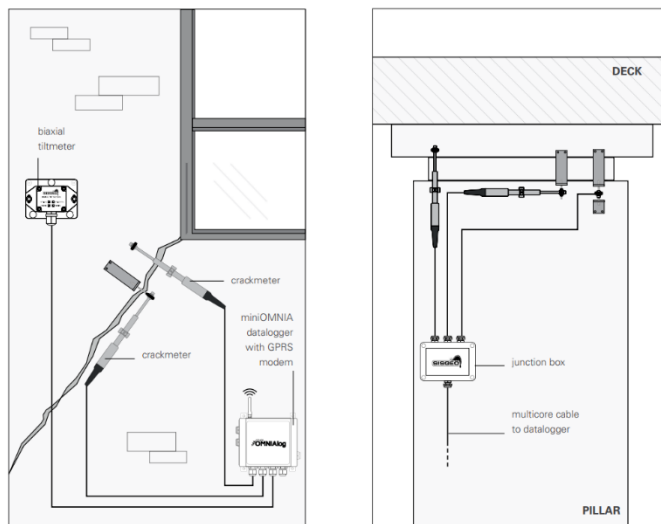


Abb. 7.61 Analoge drahtlose Rissüberwachung (links), 3D-Lagerverschiebung (rechts) (www.sisgeo.com)

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Rissmonitore werden zur Überwachung von Felsinstabilitäten verwendet, indem sie über die relevanten Trennflächen zwischen festem Fels und sich bewegnender Felsmasse montiert werden.

7.27.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung kann entweder analog oder digital erfolgen.
- Neben der Fernverfügbarkeit und Automatisierung der Messdaten ist auch eine digitale Messdatenaufzeichnung und/oder ein Online-Zugriff (cloudbasiertes Webportal) mit analoger und digitaler Auslesung über den WASP-Datenlogger möglich (Genauigkeit 0,1% und Kanalabtastrate von max. jeder Minute und Datenupload zweimal täglich).
- Die Messdatenerfassung des Rissmonitors kann digital mit einer Auflösung von 2,5µm und bis zu 100Hz erfolgen.

Tab. 7.34 Technische Daten

	VW Rissanzeiger	3D-Rissanzeiger
Bereiche	5, 12.5, 25, 50, 100, 150, 200, 300 mm	12.5, 25 mm
Auflösung	< 0,025% des Skalenendwerts (FS)	< 0,025% FS
Genauigkeit	± 0,1% FS	± 0,1% FS
Nichtlinearität	< 0,5% FS	< 0,5% FS
Frequenzbereich	1650–2700 Hz	1650–2700 Hz
Nominaler Nullwert	1850 Hz	1850 Hz

7.27.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es handelt sich um eine Technologie, die in grossem Umfang zur Überwachung von Rissbreiten und deren Entwicklung eingesetzt wird. Schwingsaiten-Rissmessgeräte zeichnen sich durch ihre hohe Genauigkeit, ihre Widerstandsfähigkeit gegen Umwelteinflüsse und ihre langfristige Stabilität der Messungen aus und liefern zuverlässige Ergebnisse unter verschiedenen Umweltbedingungen und über lange Zeiträume. In Verbindung mit der Möglichkeit der ferngesteuerten und automatisierten Datenaufzeichnung kann eine grosse Anzahl von Daten verwaltet werden.

Rissmonitore sind ein leistungsfähiges Werkzeug zur Ergänzung der automatischen Überwachung, das zudem grosse wirtschaftliche Vorteile bietet, mit Kosten von etwa 20 CHF pro Einheit und geringem Aufwand für die Installation und das Ablesen der Ausgaben. Allerdings muss die Datenerfassung (wenn sie nicht mit einem digitalen Logger ausgestattet ist) visuell erfolgen, was den doppelten Nachteil hat, dass es zeitaufwändig ist und zu höheren Messfehlern führen kann. Digitale Logger sind ab ca. 400 CHF erhältlich.

7.27.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu definieren sind: bauliche Massnahmen zur Fixierung; Periodizität der Messung und deren Speicherung; gegebenenfalls Schutz vor Witterung.

7.27.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [163] Edwin Fecker, Geotechnische Messgeräte Und Feldversuche Im Fels, Springer
- [164] Thut, A. (2008): Grundbau -Taschenbuch Geotechnische Messverfahren; solexperts AG
- [165] PPRINZ, H. & R. Strauss (2006): Abriss der Ingenieurgeologie. - 671 S., 4. Aufl., Elsevier GmbH (Spektrum Verlag).
- [166] Amstad, Chr. & Kováry (2001): Untertagbau in quelfähigem Fels; Forschungsauftrag 52/94, 5408.01 (Bundesamt für Strassen ASTRA)

B3 Dehnung

Tab. 7.35 B3 Dehnung - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Dehnungsmessungen		
Kurzbeschreibung		Die Tabelle zeigt verschiedene Möglichkeiten zur Messung von Dehnungen, wobei lokale/punktwise und verteilte (streckenbezogene) Messprinzipien verwendet werden. Durch den Einfluss von Verkehrslasten und Umwelteinflüssen entstehen Dehnungen in Brücken.		
Überwachungstechnologie		Dehnungsmessstreifen	Faseroptische Sensoren (Faser Bragg Gitter)	Faseroptische Sensoren (Verteilte Dehnungssensoren)
"ID"		DMS_	FOS_1	FOS_2
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	5 optisch	5 optisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	2 streckenbezogen	2 streckenbezogen
	e. Raumbezug			
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Dehnung	Dehnung	Dehnung
	Messungsbereich	Maximal 50 mm/m	Maximal -2,5 mm/m	
	Auflösung			
	Genauigkeit	±1 µm/m	0.2 µm/m	±1 µm/m
	Bemerkungen	Datenerfassung mit bis zu 300Hz möglich	Mittelwert über aktive Länge (von 0.01-10m)	Maximal Messlänge: 50m
Kunstbauten		2	3	3
Naturgefahren		1	2	2
Umwelt		2	2	2
Einsatzzeitpunkt		N	N	N
Entwicklungsstand		●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●

7.28 Dehnungsmessstreifen

7.28.1 Beschreibung der Technologie

Ein Dehnungsmessstreifen funktioniert nach dem Prinzip des elektrischen Leitwerts und dessen Abhängigkeit von der Geometrie des Leiters. Dehnungsmessstreifen (Abb. 7.62) messen Dehnungen auf der Grundlage des Dehnungseffekts, der entsteht, wenn der Leiter oder das Halbleitermaterial unter äusserer Krafteinwirkung mechanisch verformt wird. Dies führt zu Änderungen der gemessenen Widerstandswerte. In der Praxis ist ein Dehnungsmessstreifen als leitfähiges Gitter im Zickzack aufgebaut, dessen Dehnung empfindlich auf Verformung (Dehnung/Stauchung) reagiert. Wenn ein Dehnungsmessstreifen fest mit einem verformten Element verbunden ist, kann die Dehnung des Elements durch den Dehnungsmessstreifen gemessen werden. Ein Dehnungsmessstreifen misst effektiv die durchschnittliche Dehnung, die sich über seine Spannweite entwickelt.

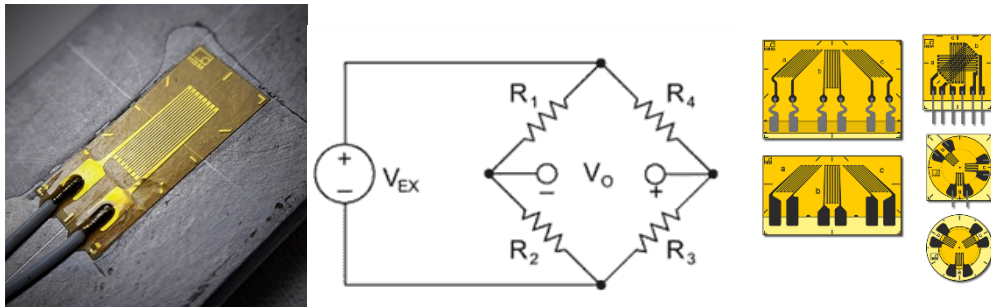


Abb. 7.62 Beispiel eines installierten Dehnungsmessstreifens (links); Leitungskreis eines Dehnungsmessstreifens (Mitte) (Bilder von www.encardio.com); Dehnungsmessstreifen-Rosetten (rechts) (Quelle: <https://www.hbm.com>).

Der Widerstand des Dehnungsmessstreifens ändert sich nicht nur als Reaktion auf die aufgebrachte Dehnung. Sowohl das Material des Dehnungsmessstreifens als auch das Material der Probe, auf der der Dehnungsmessstreifen angebracht ist, reagieren auch auf Temperaturänderungen. Die Hersteller versuchen, diese Empfindlichkeit zu minimieren, indem sie das Material des Dehnungsmessstreifens so bearbeiten, dass die Wärmeausdehnung des Probenmaterials, für das der Dehnungsmessstreifen bestimmt ist, kompensiert wird. Kompensierte Messgeräte verringern zwar die thermische Empfindlichkeit, beseitigen sie aber nicht vollständig. Um kleine Widerstandsänderungen zu messen und die Temperaturempfindlichkeit zu kompensieren, werden Dehnungsmessstreifen fast immer in einer Brückenkonfiguration mit einer Spannungs- oder Stromerregungsquelle verwendet. Die allgemeine Wheatstone-Brückenkonfiguration ist in Abb. 7.62 (Mitte) dargestellt [170].

Es gibt verschiedene Arten von Dehnungsmessstreifen, z. B. lineare (unidirektionale) Dehnungsmessstreifen, bidirektionale Dehnungsmessstreifen und 45°- oder 60°-Rosetten. Ein linearer Dehnungsmessstreifen misst lokal eine einzige Dehnungskomponente entlang einer bestimmten Richtung. Bidirektionale Dehnungsmessstreifen messen die Dehnungen in zwei zueinander senkrechten Richtungen. Eine 45°-Rosette misst lokal drei Dehnungskomponenten entlang der Richtungen 0°, $-(90+45)^\circ$ und $+(90+45)^\circ$, während die 60°-Rosettenkonfiguration aus drei Dehnungsmessstreifen besteht, die im 60°-Winkel angeordnet sind. Rosetten dienen der Messung des vollständigen Dehnungszustandes. Typische Dehnungsmessstreifen-Rosetten sind in Abb. 7.62 (rechts) dargestellt.

7.28.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die möglichen Anwendungen von Dehnungsmessstreifen im Bereich Kunstbauten sind:

- Messung der Dehnung an der Oberfläche eines Tragwerkelements, z. B. eines Trägers.
- Messung der Dehnung innerhalb eines Bauteils, z. B. eines Stahlbetonträgers, wenn Dehnungsmessstreifen auf die Stahlbewehrung appliziert sind [168].
- Messung der Vorspannung und des Vorspannungsverlustes bei vorgespannten Spanngliedern.
- Überwachung der Risslänge eines Bauteils, wenn der Rissverlauf vorhersehbar ist.
- Messung des Spannungsniveaus in verschiedenen Bauteilen einer Brücke, um gerissene Oberflächen zu überwachen oder die Ermüdungsakkumulation abzuschätzen.
- Dehnungsmessstreifen können auch verwendet werden, um die Reaktion der Brücke auf Verkehrslasten zu überwachen oder um Verschiebungen zu messen.

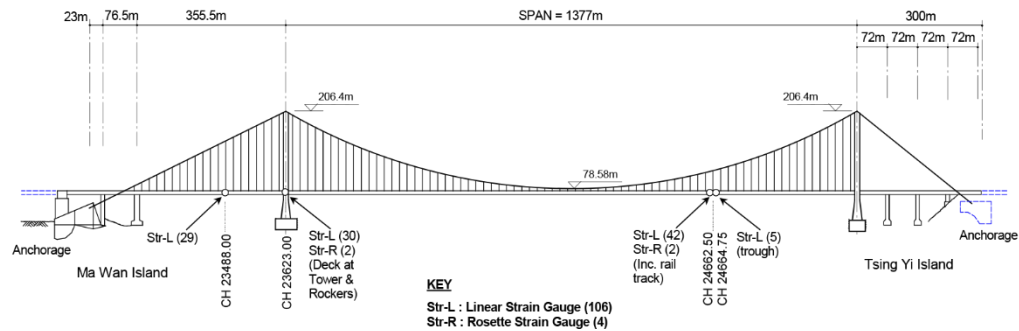


Abb. 7.63 Anordnung der Dehnungsmessstreifen an der Tsing-Ma-Brücke, Abbildung wiederverwendet aus [169]

Fallbeispiel - Dehnungsbasierte Bewertung von Brücken

Heute ist eine Reihe von Brücken mit Dehnungsmessstreifen zur Überwachung von Dehnungen/Spannungen an kritischen Stellen ausgestattet. Ein bekanntes Beispiel ist die Tsing-Ma-Brücke in Hongkong, eine der längsten Hängebrücken der Welt, die sowohl Strassen- als auch Bahnverkehr trägt. Die Brücke wird mit zahlreichen Dehnungsmessstreifen (und weiteren Sensoren) überwacht, um Ermüdungsschäden festzustellen (Abb. 7.63). In einer bekannten Anwendung in der Schweiz wurde das Chillon-Viadukt mit Dehnungsmessstreifen und Thermoelementen überwacht [171]. Dieses vorgespannte Stahlbetonbauwerk wurde mit einer Schicht aus ultrahochfestem, faserverstärktem Zementverbundstoff (UHPFRC) verstärkt. Die Dehnungsmessstreifen wurden zur Messung der Spannungen in der unteren Lage der Bewehrungsstäbe in der Platte verwendet, während die Thermoelemente das Verhalten des Tragwerks aufgrund von Temperaturschwankungen aufzeigen.

7.28.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Datenerfassungsrate kann bis zu 300 kHz betragen. Dadurch eignen sich Dehnmessstreifen sowohl für statische als auch für dynamische Messungen.
- Die gemessene Oberfläche sollte vor der Montage der Dehnmessstreifen mit Sandpapier abgeschliffen und mit Ethanol oder Aceton gereinigt werden.
- Nach dem Montieren und Löten eines Dehnmessstreifens sollten der Messstreifen und die Lötstellen vor Feuchtigkeit und Korrosion geschützt werden, um eine zuverlässige und langfristige Messung zu gewährleisten. Dringt Feuchtigkeit zum Messstreifen oder den Lötstellen durch, fällt in der Regel ein Dehnmessstreifen aus.
- Die Dehnung des Dehnmessstreifens wird als die Dehnung des gemessenen Substrats betrachtet.
- Dehnungsmessstreifen erreichen bei kleinen Dehnungen eine Genauigkeit von $\pm 1 \mu\epsilon$. Sie hängt jedoch stark von der Qualität der Montage ab. Je nach Art des Dehnmessstreifens liegt die maximal messbare Dehnung bei 3–5%. Bei Überschreitung dieser Grenze werden andere Methoden, wie z. B. Extensometer (siehe Abschnitt 7.25) empfohlen.

7.28.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Dehnungsmessstreifen sind eine ausgereifte Technologie, die in verschiedenen Präzisions- und Kostenbereichen erhältlich ist. Die messbare Dehnung ist in der Regel auf 3–5% begrenzt, doch wurden kürzlich Dehnungsmessstreifen mit einer maximalen Dehnung von 40% entwickelt [167]. Dehnungsmessstreifen sind darauf beschränkt, lokal über ihre meist kurze Spannweite zu messen. Das bedeutet, dass sie im Wesentlichen Dehnmessungen an einem Punkt bieten. Andere Technologien, wie z. B. faseroptische Sensoren (FOS), sind in der Lage, gemittelte und verteilte Dehnungen entlang einer Linie zu messen (siehe Kapitel 0 für weitere Einzelheiten).

Für Kurzzeit-Messungen in einer trockenen Umgebung können sogenannte Magnet-Dehnmessstreifen (Abb. 7.64) auf zu messenden Stahloberflächen eingesetzt werden. Bei

diesen Sensoren wird ein unidirektionaler Dehnmessstreifen mittels Feder und Permanentmagnet an das zu messende Objekt gepresst. Dadurch entfällt die zeitraubende Montage (Klebung und Lötung) der herkömmlichen Dehnmessstreifen. Die Dehnung des Messobjekts wird durch Haftreibung auf den Dehnmessstreifen übertragen. Magnet-Dehnmessstreifen eignen sich zur Messung von Dehnungen auf Bauteilen aus Stahl. Bis zu einer Dehnung von ca. 5‰ entspricht ihre Genauigkeit jener von geklebten Dehnmessstreifen. Magnet-Dehnmessstreifen können darüber hinaus mehrmals eingesetzt werden.

Die Montage eines Dehnmessstreifens dauert ca. 45–60 Minuten (je nach Zugänglichkeit) und erfordert erfahrenes Personal, das in der Vorbereitung der Oberfläche vor dem Aufkleben des Messstreifens sowie im Kleben und Löten des Messstreifens gut geschult ist. Vorverkabelte Dehnmessstreifen erlauben die Montagezeit zu verkürzen, da das Lötten am Dehnmessstreifen entfällt. Bei kalten Temperaturen erlauben Wärmelampen das Abhärten des Klebstoffs zu beschleunigen. Das Verfahren ist im entsprechenden HBM-Handbuch ausführlich beschrieben [168].

Der Preis für ein Dehnungsmessgerät liegt im Bereich von 200 bis 400 CHF und beinhaltet die Kosten für den benötigten Signalwandler. Die Kosten für die DMS-Sensoren selbst sind ca. 15 CHF pro 10 Stück geschätzt. Der Preis erhöht sich, wenn zusätzliche Messgrößen, wie z. B. die Temperatur, in das gleiche Gerät integriert werden müssen.



Abb. 7.64 Magnet-Dehnmessstreifen auf einem Stahlträger montiert

7.28.5 Ausschreibungsanforderungen

Die nachfolgende Auflistung von Anforderungen in den Ausschreibungsunterlagen gibt einen allgemeinen Überblick und ist objektspezifisch zusammen mit dem konkreten Gefährdungsbild in Abstimmung mit der Messtechnologie zu vervollständigen.

Installation:

- Einreichung einer detaillierten Skizze (CAD-Format), aus der die Positionierung der Sensoren an den Bauteilen hervorgeht, zusammen mit der Platzierung der Sensorkabel (bei angebundenen Sensoren) sowie den Abmessungen und dem Standort des Erfassungsgeräts. Vermerk der Art der Brückenkonfiguration (Viertel-, Halb-, Vollbrücke) auf der Zeichnung.
- Ergänzende Baumeisterarbeiten (z.B. Festlegung des erforderlichen Verfahrens zur Oberflächenvorbereitung)
- Erreichbarkeit (Lage, Zu- und Wegfahrten, Platzverhältnisse, etc.)
- Zugänglichkeit zu Bauwerksteil
- Einschränkungen aus Betrieb (Einschränkung Verkehrsführung, nur in Nacharbeit, Koordination mit Gebietseinheit (Sperrgesuche?), Fluchtwege betroffen, etc.).
- Strom, Materialzwischenlager, etc.
- Perimeter vollständig im Eigentum ASTRA?

Inbetriebnahme:

- Abgabe der Sensorplatzierungsskizze
- Konfiguration des Messprotokolls (Periodizität)
- Systemtests und allfällige Bereinigung von Fehlermeldungen / Mängeln.
- Nullmessung inkl. Datenauswertung.
- Freigabe durch ASTRA.
- Bei Bedarf: Installation eines Monitors und eines Mini-PCs für die Verfolgung vor Ort

Genauigkeit, Periodizität, Dauer und Datenmanagement:

- Messgenauigkeit/Messbereich: sollte die vom ASTRA vorgeschriebenen Kriterien entsprechend der zu erwartenden Verformung des überwachten Assets erfüllen.
- Temperatur-/Luftfeuchtigkeitsbereich
- Periodizität: kontinuierlich, periodisch oder getriggert durch z.B. Fahrzeugüberfahrten
- Dauer: je nach Zweck, z.B. langfristige Überwachung zur Verfolgung von Ermüdungserscheinungen oder kurzfristige Messungen zur Überwachung der Leistung nach Verstärkungs- und Reparaturarbeiten.
- Datenmanagement: Speicherung digital lokal vor Ort oder cloudbasierte Speicherlösung; Datenübertragung (falls erwünscht)
- Auslesen der Daten entsprechend der gewünschten Periodizität der Messungen; Option: Bereitstellung einer Remote-Login-Lösung für die Fernüberwachung
- Die Abtastrate sollte dem Zweck der Überwachung entsprechen. Bei der Vibration-basierte Überwachung sollte diese mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste Frequenz, die von Interesse ist.

Auswertung:

- Darstellung Dehnungsmessungen mit Angabe der Dehnung/Stauchung mittels 2D Grafik: x-Achse: Zeit in [s, hr, oder mon], y-Achse: Dehnung in [mm/m oder $\mu\epsilon$].
- Abgabe der Rohdaten halbjährlich sortiert in Zeilen / Spalten im csv-Format oder in bearbeitbarer Excel Tabelle gemäss Anforderungen aus der Darstellung.
- Bei Bedarf weitergehende Verarbeitungsschritte (z.B. Aufzeichnung und Klassifizierung von Extremwerten, Alarme und Auslöser bei Überschreitung von Schwellenwerten, Signalstatistiken, Berechnung der Ermüdungsakkumulation, Spektralinformationen)

7.28.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[167] https://tml.jp/e/product/strain_gauge/post-yield.html#yhf_list.html Letzter Zugriff am 13.06.2022

[168] <https://www.hbm.com/fr/7068/how-to-properly-install-strain-gauges/>, Letzter Zugriff am 29.02.2024

[169] Y. Yu, T. Chan, und Z.X. Li, Typhoon-induced accumulated fatigue damage evaluation using health monitoring data. In International Conference on Protection of Structures Against Hazards (3rd), 2006.

[170] http://elektron.pol.lublin.pl/elekp/ap_notes/ni_an078_strain_gauge_meas.pdf, Letzter Zugriff am 15.07.2022

[171] B. Sawicki und E. Brühwiler, Long-term strain measurements of traffic and temperature effects on an RC bridge deck slab strengthened with an R-UHPFRC layer, J Civil Struct Health Monitoring, 10:333–344, 2020

[172] Amol Mankar, Sima Rastayesh & John Dalsgaard Sørensen (2020) Fatigue reliability analysis of crêt de l'Anneau viaduct: a case study, Structure and Infrastructure Engineering, 16:4, 762-771.

[173] Pai, S.G.S.; Reuland, Y.; Smith, I.F.C. Data-Interpretation Methodologies for Practical Asset-Management. J. Sens. Actuator Netw. 2019, 8, 36. <https://doi.org/10.3390/jsan8020036>

7.29 Faseroptische Sensoren (FOS)

7.29.1 Beschreibung der Technologie

Eine optische Faser besteht in der Regel aus einer Glas- oder Quarzfaser und einer Polymerbeschichtung. Sie ähnelt einer normalen Telekommunikationsfaser, auch wenn die Verwendung von Gittern eine spezielle Verarbeitung erfordert, und kann bis zu mehreren Kilometern lang sein und viele Messpunkte entlang ihrer Länge aufweisen. Wenn die faseroptischen Sensoren (FO) ordnungsgemäss an einem Tragwerkselement befestigt/eingebettet sind (z. B. über einen Klebstoff), kann auf die Dehnung und/oder Temperatur des Elements geschlossen werden. Die Messung ist unempfindlich gegenüber anderen physikalischen Veränderungen, wie z. B. elektromagnetischen Feldern und Feuchtigkeit. Es werden drei Hauptklassen von Messtechnologien unterschieden: optische Interferometrie, Faser-Bragg-Gitter und verteilte Dehnungssensoren.

Optische Interferometrie (FPI)

Das Funktionsprinzip ähnelt dem der optischen Drucksensoren (siehe Abschnitt 7.16). Interferometrische FO-Sensoren nutzen die Interferenz zwischen zwei Lichtstrahlen, die sich auf unterschiedlichen optischen Wegen durch eine oder zwei verschiedene Fasern ausbreiten. Einer der optischen Pfade ist so beschaffen, dass er für äussere Störungen empfindlich ist. Die physikalischen Änderungen der Messgrösse, wie Temperatur, Dehnung, Druck, Verschiebung, Brechungsindex (RI), werden mit Änderungen des optischen Signals (wie Wellenlänge, Phase, Intensität, Frequenz, Bandbreite) der beiden Lichtstrahlen korreliert [174]. Es gibt vier repräsentative Arten von faseroptischen Interferometern, nämlich das Fabry-Perot-Interferometer (FPI), das Mach-Zehnder-Interferometer, das Michelson- und das Sagnac-Interferometer. Wir konzentrieren uns auf das FPI, das in der Regel für die Messung von Dehnungen verwendet wird.

Ein FPI besteht im Allgemeinen aus zwei parallelen reflektierenden Flächen, die einen gewissen Abstand voneinander haben. Die Reflektoren können innerhalb (intrinsisch) oder ausserhalb (extrinsisch) der Fasern angebracht sein. Extrinsische Sensoren (Abb. 7.65a) beruhen auf der Verwendung eines Hohlraums für die Reflexion und können eine hohe Auflösung bieten, sind leicht herzustellen und kostengünstig. Sie haben jedoch auch Nachteile in Bezug auf die Kopplungseffizienz, die Ausrichtung und die Verpackung. Intrinsische FPI-Fasersensoren enthalten reflektierende Komponenten in der Faser selbst. Abb. 7.65b zeigt ein intrinsisches Fabry-Perot-Interferometer, bei dem die reflektierenden Oberflächen durch Faser-Bragg-Gitter (FBGs), chemisches Ätzen oder Mikrobearbeitung hergestellt werden können, was jedoch aufgrund des Herstellungsprozesses mit höheren Kosten verbunden ist. An parallelen Oberflächen treten Interferenzen auf, wenn reflektierte und transmittierte Lichtstrahlen überlagert werden. Wenn die Faser gedehnt wird, verschiebt sich das Wellenlängenspektrum um einen Betrag, der proportional zur Änderung der Dehnung ist.

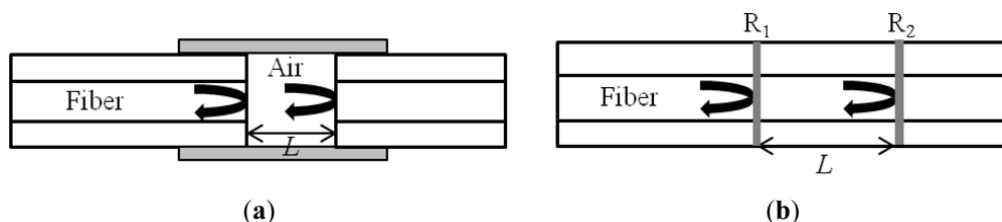


Abb. 7.65 a) Extrinsisches und b) intrinsisches Fabry-Perot-Interferometer zur Messung der Dehnung (Bild wiederverwendet aus [174])

Faser-Bragg-Gitter (FBG) Sensoren

Faser-Bragg-Gitter sind periodische Strukturen, die durch starke ultraviolette (UV) Strahlung im Millimeterbereich direkt in den Kern von optischen Glasfasern eingeprägt werden, siehe Abb. 7.66. Vereinfacht ausgedrückt kann man sich die Faser als einen zylindrischen Abschnitt aus transparentem Material vorstellen, der entlang seiner Länge mehrere dünne Scheiben aufweist [177]. Wenn das Licht des Lasers auf dieses Muster trifft, werden bestimmte Wellenlängen reflektiert, während andere durchgelassen werden. Die Materialinterferenzen, d. h. die «Scheiben», sind in bestimmten Abständen

angeordnet. Wenn die Faser gedehnt oder gestaucht wird - also einer positiven oder negativen Dehnung unterworfen wird - ändern sich diese Abstände. Die Änderung ist proportional zur Änderung der Wellenlänge des Lichtstrahls, der sich in der Faser ausbreitet (Abb. 7.66).

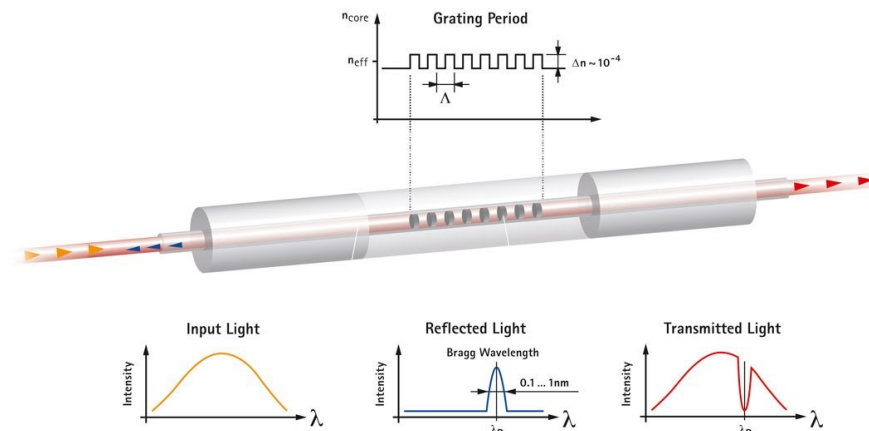


Abb. 7.66 Schema und Funktionsprinzip eines Faser-Bragg-Gitter (FBG)-Sensors (Bild wiederverwendet aus [177])

Bei handelsüblichen FBG-Sensoren besteht der Sensor aus einem aktiven und einem passiven Teil. Der aktive Teil enthält die Messfaser und misst im Wesentlichen Verformungen zwischen ihren beiden Enden (gemittelt über eine aktive Länge, die von Zentimeter bis zu mehreren Metern variiert) und wandelt sie in eine Wellenlängenverschiebung des Faser-Bragg-Gitters um. Der passive Teil ist unempfindlich gegenüber Verformungen und dient zum Anschluss des Sensors an die Ausleseinheit. In den passiven Teil des Sensors kann ein loses Faser-Bragg-Gitter zur Temperaturerfassung und -kompensation eingebaut werden. Die Sensoren sind in einseitiger, zweiseitiger und verketteter Konfiguration erhältlich. Es können bis zu sechs temperaturkompensierte Vollbereichssensoren angeschlossen werden.

Verteilte Dehnungssensoren – Distributed Strain Sensing (DSS)

Ein verteilter FO-Sensor besteht aus einer einzigen optischen Faser, die über ihre gesamte Länge empfindlich ist. Ein einziger verteilter FO-Sensor kann somit Tausende von diskreten Punktsensoren (wie FPIs und FBGs) ersetzen. Die geringe Faserdämpfung ermöglicht die Überwachung über extrem lange Strecken von bis zu 25 km, was für die Überwachung von Brückenaufbauten (z. B. Fahrbahnen) äußerst attraktiv ist. Die Entwicklung eines verteilten FO-Sensorsystems setzt eine bekannte und reproduzierbare Methode voraus, mit der die Messgröße mit dem in der Faser wandernden Licht interagieren kann. Dies kann durch drei verschiedene Streuphänomene erreicht werden, nämlich Raman-, stimulierte Brillouin- und Rayleigh-Streuung.

Wie in [180] erläutert, entsteht die Raman-Streuung durch die thermische Vibration der Glasmoleküle im Faserkern, wenn das Licht durch die Faser wandert, und ist sehr empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen. Die Brillouin-Streuung entsteht durch die Wechselwirkung von rückgestreutem Licht und akustischen Wellen, die bei Änderungen der Materialdichte infolge thermischer Effekte entstehen. Die Brillouin-Streuung reagiert empfindlich auf äussere Veränderungen sowohl der mechanischen Belastung als auch der Temperatur. Die Rayleigh-Streuung hingegen bezieht sich auf die elastische Verteilung des Lichts in alle Richtungen, die entsteht, wenn das Licht mit lokalen Inhomogenitäten im Faserkern interferiert, die kleiner als die Wellenlänge des Lichts selbst sind. Diese Inhomogenitäten werden durch Schwankungen in der Dichte und Zusammensetzung des Faserkerns verursacht, wodurch die Rayleigh-Streuung sowohl auf mechanische Beanspruchung als auch auf Temperaturänderungen anspricht. Das Prinzip der Rayleigh-Rückstreuung lässt sich wie folgt zusammenfassen (Abb. 7.67).

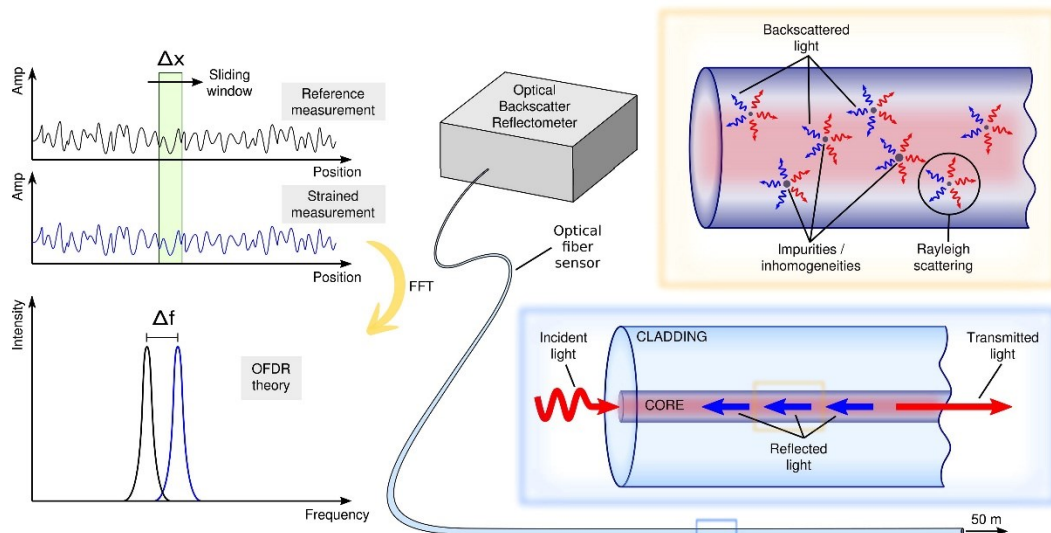


Abb. 7.67 Schema und Funktionsprinzip eines verteilten Dehnungssensors auf der Basis von Rayleigh-Rückstreuung (Bild wiederverwendet aus [180])

Wie in [180] beschrieben, ist die Brillouin-Streuung eine intrinsische Eigenschaft der Lichtausbreitung in dem Siliziumdioxidmaterial, aus dem die Sensorfaser besteht. Der Effekt der Brillouin-Streuung zeigt eine bekannte und reproduzierbare Reaktion auf externe Messgrößen wie Temperatur und Dehnung. Die Brillouin-Wechselwirkung führt zur Erzeugung von Streulicht, das eine etwas andere Wellenlänge hat als das ursprüngliche Licht, und die Abweichung von der ursprünglichen Wellenlänge ist direkt von der Dehnung und der Temperatur der Faser abhängig.

7.29.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

FO-Sensoren eignen sich für die Dehnungs-/Temperaturmessung eines Elements entweder an der Oberfläche oder im Inneren des Körpers (z. B. der in den Beton eingebettete Bewehrungsstab). Sowohl FBG- als auch FPI-Sensoren sind im Wesentlichen Punktsensoren in dem Sinne, dass sie über eine endliche und kurze Länge messen. Sie bieten die Vorteile der FO-Sensorik gegenüber herkömmlichen Dehnungsmessgeräten, wie z. B. die einfache Implementierung und Einbettung sowie die Robustheit gegenüber Störungen, die im Abschnitt über Anwendungen beschrieben werden.

Verteilte Dehnungssensoren haben offensichtliche Vorteile gegenüber Sensoren, die lokalisierte Messwerte liefern, wie z. B. FBG- und FPI-Sensoren, da sie in der Lage sind, Dehnungen mit hoher räumlicher Dichte (grosser Auflösung) über eine gesamte - entweder gerade oder gebogene - Linie zu messen.

Mögliche Anwendungen sind:

- Überwachung des Dehnungsniveaus von Stahlstäben, die in Betonelemente eingebettet sind, z. B. Träger, Fundamente (Pfähle) und Pfeiler.
- Langzeitüberwachung des Vorspannungsverlustes der Stahl/FRP-Spannglieder in Spannbetonelementen sowie Aufzeichnung der Spannungen in Brückenkabeln.
- Überwachung der Rissbildung im Beton und Verfolgung der Rissausbreitung.
- Überwachung der Ablösung von CFK-geklebten (carbonfaserverstärkter Kunststoff) Verstärkungssystemen.
- Langzeit-Überwachung von grossen, langen Brückenträgern bezüglich Längsdehnung (Verformung, Dehnung, Temperatur etc).

Auf der Grundlage des optischen Brillouin-Zeitbereichsreflektometers haben Zhou et al. (2009) SmART Strand vorgeschlagen, eine Spannstahlitze, die mit einer optischen Faser ausgestattet ist, um die Spannung entlang der gesamten Länge des Spannstahlseils während der Installation und der Nutzung genau zu messen [185]. Ein ähnliches System wird nun von Nakaue et al. als "SmART Strand" vorgeschlagen [186].

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Faseroptische Sensoren wurden auch schon für die Überwachung von Rutschungen eingesetzt. Sie werden ausserdem zur Überwachung von Felsinstabilitäten verwendet, indem sie über die relevanten Trennflächen zwischen festem Fels und sich bewegender Felsmasse montiert werden.

Fallbeispiel - Überwachung einer Schrägseilbrücke [183]

Ein FBG-basiertes Überwachungssystem (SOFO™) wurde auf einer Schrägseilbrücke installiert, die 2005 im Hafen von Venedig gebaut wurde, um sowohl die statische als auch die dynamische Überwachung zu ermöglichen. Das Überwachungssystem wurde während des Baus installiert, um die wichtigsten Bauphasen zu verfolgen und eine permanente statische Überwachung zu ermöglichen. Das System besteht aus 48 FO-Dehnungssensoren, 4 faseroptischen Neigungsmessern und 24 Temperatursensoren, die auf den beiden Spannweiten angebracht sind. Darüber hinaus ist jedes Kabel mit einem speziell verpackten FO-Sensor ausgestattet, während 12 FO-Sensoren und 6 Thermoelemente in die Struktur des Pylons eingebettet wurden (Abb. 7.68).



Abb. 7.68 a) Positionierung eines FO-Sensors im Inneren des Pylons, b) Anbringung eines SOFO-Sensors am Schrägseil (Bilder wiederverwendet aus [183])

7.29.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Das Datenerfassungsgerät für FO-Sensoren wird auch als Abfragesystem bezeichnet.

FBGs und FPIs

In diesem Fall sendet das Abfragegerät kontinuierlich Licht in verschiedenen Wellenlängen aus, so dass ein breites Spektrum abgedeckt wird. Das Licht breitet sich durch die Faser aus, wird an einem Punkt von einem FBG oder einem Lufthohlraum im FPI-Fall reflektiert und kehrt zum Abfragesystem zurück.

Dank der unterschiedlichen Perioden der einzelnen FBGs/FPIs ist es möglich, zwischen den Signalen der verschiedenen Sensoren zu unterscheiden. Der Rest des Lichts wird beim Erreichen des Faserendes gebrochen, so dass es die Messung nicht stört. Die tatsächliche Dehnung kann aus den rohen Lichtsignalen abgeleitet werden, die von den FBGs zurückkommen.

Darüber hinaus können diese Sensoren in Reihe (in einer Kette) geschaltet werden, indem Multiplexing-Verfahren verwendet werden, die im Wellenlängenbereich arbeiten, um die einzelnen Sensorsignale zu trennen. Die Genauigkeit typischer FBG-Sensoren, die bei Brückenarbeiten verwendet werden, kann je nach Abfrageeinheit $0,2 \mu\epsilon$ / $2 \mu\epsilon$ erreichen. Der Messbereich für die Dehnung reicht von $0,5 \%$ bei der Verkürzung bis $0,75 \%$ bei der Dehnung, was $-2500 \mu\epsilon$ bis $+3000 \mu\epsilon$ (für eine Kettenkonfiguration) entspricht. Die Sensoren funktionieren in einem Temperaturbereich von -40 bis $+80$ °C.

Verteilte FO-Sensoren (Distributed Strain Sensing – DSS)

Die Ausleseereinheit ist mit dem proximalen Ende des Sensors verbunden und kann weit entfernt vom Messbereich platziert werden, da ein Abschnitt eines Glasfaserkabels verwendet werden kann, um die Ausleseereinheit ohne Leistungseinbussen mit dem Sensor selbst zu verbinden. Die Verwendung von optischen Verstärkermusername zur Reichweitenverlängerung ermöglicht die Überwachung einer Entfernung von bis zu 300 km mit einem einzigen Instrument [178].

Je nach ausgewählter optischer Faser kann die Technologie eine minimale Dehnung und Temperaturänderung von 1 $\mu\epsilon$ bzw. 0,1 °C erkennen. Die räumliche Auflösung, die maximale Datenerfassungsrate und die maximale Messlänge können jeweils ca. 1 mm, 125 Hz und 50 m erreichen.

- Bei Systemen, die auf Brillouin-Streuung beruhen, kann der Messbereich bis zu mehr als 300 km betragen, allerdings ist die erreichbare räumliche Auflösung oft auf einige Zentimeter begrenzt.
- Systeme, die auf der Rayleigh-Streuung basieren, sind derzeit auf einen Messbereich von maximal 2 km beschränkt, bieten dafür aber eine beispiellose räumliche Auflösung, die bis in den submillimetrischen Bereich reichen kann und damit neue Möglichkeiten für die Entwicklung von Schadenserkennungssystemen bietet.

7.29.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

FBGs und FPIs

Vorteile gemäss [179]

- FBGs (und FPIs) sind mit neuen Verbundwerkstoffen wie glas- oder kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen kompatibel, die zur Verstärkung bei Kunstbauten verwendet werden. FBGs können direkt in Verbundwerkstoffe integriert oder direkt oder als Patches auf der Oberfläche des Prüfobjekts wie normale Dehnungsmessstreifen befestigt werden.
- FBGs können sehr hohe Dehnungen messen (>10 mm/m) und eignen sich daher sehr gut für hochbelastete Verbundtragwerke.
- FBGs sind klein und leicht.
- FBGs sind immun gegen elektromagnetische Störungen (sogar gegen Blitzeinschläge).
- FBGs sind inhärent passiv (keine elektrische Energie erforderlich) und können daher in rauen Umgebungen, wie z.B. in Hochspannungs- und explosionsgefährdeten Bereichen, eingesetzt werden.
- FBG-Signale sind nicht entfernungsabhängig (bis zu >50 km Verbindungslänge sind möglich).
- Auf einer einzigen Faser können viele Fiber Bragg Gratings in einer Reihe angeordnet werden (>20 FBG; mit speziellen Abfragetechnologien bis zu >100 FBG). Es wird keine Rücklauffaser benötigt. Aus Gründen der Redundanz wird jedoch häufig eine Rückleitfaser bevorzugt.
- Die langfristige Stabilität ist sehr hoch.
- FO-Sensoren haben eine gute Korrosionsbeständigkeit.
- Spezielle Versionen von FBGs können bei sehr hohen Temperaturen (>700 °C) eingesetzt werden.
- FBGs werden auch vorteilhaft in kryogenen Umgebungen eingesetzt, da die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Faser, die viele Sensoren speist, gering ist und die optischen Eigenschaften mit sehr geringen Resttemperaturabhängigkeiten nahe der Temperatur von flüssigem Helium stabil sind.
- Einfacher Einbau (Zeit, Verkabelung, Prüfung). Die Sensoren können schnell und einfach installiert werden, ohne den Bauablauf zu beeinträchtigen. Sie können direkt in Beton und Mörtel eingebettet oder auf der Oberfläche montiert werden.

Nachteile gemäss [179]

- FBGs und FPIs sind in Bezug auf Preis und Präzision nicht ganz konkurrenzfähig mit Dehnungsmessstreifen aus Metall.

- FBG zeigen eine hohe Temperaturabhängigkeit. Die Temperaturkompensation erfordert spezielle Konfigurationen und beruht in der Regel auf dem Auslesen von zwei FBG-Sensoren.
- FBG können keine Selbstkompensation der scheinbaren Dehnung bieten. Die Temperaturkompensation muss über separate Temperaturmesskanäle und entsprechende Berechnungen erfolgen.
- Die geringe Grösse von Dehnungsmessstreifen kann mit FBG-Patches nicht erreicht werden.
- Die Steifigkeit von FBG-Sensoren ist höher als die von Folien-Dehnungsmessstreifen, was zu einer höheren Parallelkraft auf die Probe führt.
- Der Sensorfaserkern befindet sich in einem grösseren Abstand zur Probenoberfläche. Dies kann zu Kalibrierungsfehlern führen, wenn das Pflaster auf gekrümmten Oberflächen angebracht wird.
- Der Radius der Faser sollte >10 mm betragen; FBG-Rosetten sind daher meist recht gross.
- Abfragegeräte für FBG-Sensoren sind kostenintensiv (bei vielen Sensoren pro Abfragegerät können die Kanalkosten einschliesslich der Installation jedoch niedriger sein als bei Foliendehnungsmessstreifen).

Der Preis eines Interrogators für diese FO-Technologie liegt im Bereich von 25'000 bis 30'000 CHF, je nach Anzahl der Kanäle und den dynamischen oder statischen Erfassungsmöglichkeiten. Die Sensoren selbst erfordern eine spezielle Vorbereitung und Konfiguration, was sie teurer macht als einfache optische Fasern. Die Kosten für einen typischen FBG-Single-Ended-Sensor (von 20 cm aktiver Länge) ohne Temperaturkompensation liegen bei ca. 700 bis 900 CHF. Die Verwendung von doppelendigen Sensoren erhöht die Kosten um etwa 200 bis 300 CHF, während die Verwendung eines Temperatursensors zur Temperaturkompensation die Kosten um 200 CHF erhöht.

Verteilte Dehnungssensoren (DSS)

Vorteile

- DSS haben den primären Vorteil, dass sie Dehnungen/Temperaturen entlang eines handelsüblichen FO-Sensors ohne Gitter messen können.

Beschränkungen/Nachteile

- Sie weisen eine Querempfindlichkeit zwischen Dehnung und Temperatur auf. Die Messung verteilter Temperaturen unter -20°C oder über $+60^{\circ}\text{C}$ erfordert ein spezielles Kabeldesign, insbesondere für Systeme mit Brillouin-Streuung.
- Die Abfragegeräte für diese Art von Technologie sind recht kostspielig und übersteigen 100'000 CHF für eine begrenzte Anzahl von Kanälen. Für kurzfristige Überwachungszeiträume gibt es jedoch Mietlösungen, deren Kosten je nach Anbieter variieren.
- Die Signalverarbeitung kann aufgrund der überwältigenden Menge an Daten, die erfasst und verarbeitet werden können, eine Herausforderung darstellen. Mit dem Raleigh-Rückstreu-DSS können Dehnung oder Temperatur alle 1,25 mm in einer 10 m langen Faser bei einer maximalen Erfassungsrate von 23,8 Hz oder alle 5 mm bis zu einer Länge von 10 m bei 100 Hz überwacht werden [187].
- Die maximal nachweisbare Dehnung beträgt typischerweise ca. 1,2%, daher können extreme Dehnungen, z. B. über die Streckgrenze von Stahl hinaus, nicht gemessen werden.
- Die Faser selbst ist zerbrechlich. Fasern sind empfindlich auf Knicken, sehr dünn und übersehbar; Handling im harschen Baustellenumfeld ist nicht trivial. Besondere Vorsicht ist bei der Vorbereitung sowie bei der Einbettung, z. B. beim Giessen des Betons, geboten. Die Ausrichtung der Faser sollte berücksichtigt werden; wenn der Fasersensor unglücklicherweise in der Mitte beschädigt wird, verliert das entfernte Ende das Signal, während das Anschlussende noch funktionsfähig sein kann.

Der Preis eines Interrogators liegt im Bereich von 100'000 bis 150'000 CHF, abhängig von der Anzahl der Kanäle. Die Kosten für faseroptische Sensoren hängen davon ab, ob man vorgefertigte Sensorprodukte von einem Anbieter kauft oder ob man Fasersensoren aus den gekauften Rohfasern selbst herstellt. Die Kosten für vorgefertigte Sensoren liegen bei ca. 125 CHF pro 10 m. Die Kosten für Rohfasern liegen bei 400 CHF pro 1 km, was bedeutet, dass die Vorbereitung eines FO-Sensors ca. 20–30 Minuten für gut ausgebildetes Personal benötigt. Die Spleissmaschine kostet ca. 500 bis 1000 CHF. Die Installation eines FO-Sensors dauert 10-60 Minuten, abhängig von der Länge des LWL-Sensors und der Stelle, an der er montiert bzw. geklebt wird.

7.29.5 Ausschreibungsanforderungen

Die Anforderungen aus Abschnitt 7.28.5 gelten auch in diesem Fall, mit den folgenden Spezifikationen für den Fall von Glasfasertechnologien.

Installation:

- Im Falle von FO-Sensoren:
 - Vermerk der aktiven Messlänge pro Sensor
 - Kennzeichnung der Einbettung der Sensoren
 - Angabe der erforderlichen Vorbereitung (z.B. Freilegung der Bewehrung)
 - Ergänzende Baumeisterarbeiten/erforderliche Ausrüstung für die Montage (z.B. Montagebühgel auf Beton, Anker für die Montage auf Spanngliedern/Bewehrungsstäben)

Auswertung:

- Im Falle von verteilten FO-Sensoren
 - 3D Grafik: x-Achse: Zeit in [s, hr, oder mon], y-Achse: Position entlang der Faserlänge [mm/m oder $\mu\epsilon$], z-Achse: Dehnung / Stauchung in [mm/m oder $\mu\epsilon$], oder
 - 2D Grafik zu ausgewählten Messzeitpunkten: x-Achse: Position entlang der Faserlänge [mm/m oder $\mu\epsilon$], y-Achse: Dehnung / Stauchung in [mm/m oder $\mu\epsilon$]

7.29.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [174] B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park, J.B. Eom, M.J. Kim, B.S. Rho, und H.Y. Choi, Interferometric Fiber Optic Sensors, *Sensors*, 12:2467-2486, 2012.
-
- [175] T.K. Gangopadhyay, Prospects for Fibre Bragg Gratings and Fabry-Perot Interferometers in fibre-optic vibration sensing, *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 113, Issue 1, 2004, pp 20-38, ISSN 0924-4247
-
- [176] ODiSi 6100 User Guide. <https://www.lunainc.com/sites/default/files/assets/files/resource-library/ODiSi%206100%20User%20Guide.pdf>, Letzter Zugriff am 15.07.2022
-
- [177] HBM Support - https://www.hbm.com/en/6827/article-how-does-an-optical-strain-gauge-actually-work/?product_type_no=How%20Does%20an%20Optical%20Strain%20Gauge%20Work?, Letzter Zugriff am 15.07.2022
-
- [178] D. Inaudi und B. Glisic, Long-Range Pipeline Monitoring by Distributed Fiber Optic Sensing. *ASME. J. Pressure Vessel Technology*, 132(1):011701, 2010.
-
- [179] HBM Germany, http://micronoptics.ru/uploads/library/documents/FBGS_StrainMeasurement_mo.pdf, Letzter Zugriff am 07.06.2022
-
- [180] C.G. Berrocal, I. Fernandez, und R. Rempling, Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors, *Structure and Infrastructure Engineering*, 17(1):124-139, 2021
-
- [181] A. Brault und N. Hoult, Monitoring Reinforced Concrete Serviceability Performance Using Fiber-Optic Sensors, *International Concrete Abstracts Portal*, 116(1), 2019.
-
- [182] J. Mata-Falcón, S. Haefliger, M. Lee, T. Galkovski, und N. Gehri, Combined application of distributed fibre optical and digital image correlation measurements to structural concrete experiments. *Engineering Structures*, 225, 111309, 2020.
-
- [183] A.E. Del Grosso und A. Pietrogrande, Monitoring System for a Cable-Stayed Bridge using static and dynamic Fiber Optic Sensors, 2005.
-
- [184] U. Meier, Carbon Fiber Reinforced Polymer Cables: Why? Why Not? What If?. *Arab J Sci Eng*, 37:399–411, 2012.
-

-
- [185] Z. Zhou, J. He, G. Chen, und J. Ou, A Smart Steel Strand for the Evaluation of Prestress Loss Distribution in Post-tensioned Concrete Structures, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 20(16):1901-1912, 2009, doi:10.1177/1045389X09347021
-
- [186] S. Nakaue, K. Oshima, M. Oikawa, M. Nishino, Y. Matsubara, und M. Yamada, "SmART Strand" Prestressing Steel Strand with Optical Fiber for Tension Monitoring, Sumitomo Electric Technical Review, Number 92, 2021, https://sumitomelectric.com/sites/default/files/2021-04/download_documents/E92-12.pdf
-
- [187] Palmieri, L.; Schenato, L.; Santagiustina, M.; Galtarossa, A. Rayleigh-Based Distributed Optical Fiber Sensing. Sensors 2022, 22, 6811. <https://doi.org/10.3390/s2218681>
-

B4 Schwingung – Dynamische Verschiebung

Tab. 7.36 B4 Schwingung – Dynamische Verschiebung - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Schwingungen - Verschiebungen	
Kurzbeschreibung		Es sei darauf hingewiesen, dass wir uns in diesem Fall auf dynamische Messungen von Verschiebungen beziehen.	
		Laserbasierte Sensoren	Radarbasierte Sensoren
"ID"		LAS_	RAD_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	7 laseroptisch	10 radar
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	4 flächenbezogen
	e. Raumbezug		
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Verschiebung	
	Messungsbereich		Flächenraster-Auflösung: 0.75m
	Auflösung	0.1 µm	0.75 m (spazial)
	Genauigkeit		0.01 mm
	Bemerkungen	Sehr hohe Messfrequenz	Messfrequenz: bis zu 100Hz
Kunstbauten		2	2
Naturgefahren		1	3
Umwelt		1	1
Einsatzzeitpunkt		W-N	W-N
Entwicklungsstand		●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●
	wiederkehrend	●	●

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 3.1.3)

Es wird darauf hingewiesen, dass die Überwachung von Erschütterungen durch die verschiedenen aufgeführten Technologien besonders wichtig für die Messung von Bodenbewegungen, welche zum Beispiel bei Erdbeben entstehen, aber auch von deren Auswirkungen auf strukturelle Systeme ist.

7.30 Laserbasierte Sensoren

In den letzten Jahren gab es neue Entwicklungen bei der Anwendung verschiedener Arten von berührungslosen Messgeräten für Schwingungsmessungen. Unter ihnen sind Laser-Doppler-Vibrometer (LDV). Diese hochpräzise Schwingungssensoren stellen den weltweit etablierten Goldstandard für die berührungslose Schwingungsanalyse dar.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Messverfahren mit Kontaktaufnehmern ist die Messung dynamischer Systemeigenschaften mit LDVs eine zerstörungsfreie, berührungslose Fernmethode, die die Bestimmung von Resonanzfrequenzen, Betriebsablenkungsformen

sowie Materialparametern wie Steifigkeit und Dämpfung ohne Massenbelastung ermöglicht.

7.30.1 Beschreibung der Technologie

Die Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) ist derzeit die Methode mit der besten Weg- und Geschwindigkeitsauflösung [48] und wird in vielen Bereichen der Grundlagenforschung eingesetzt. Sie ermöglicht eine Femtometer-Amplitudenauflösung und ist linear und hat daher eine gleichbleibende Amplitude bis in die sehr hohen Frequenzbereiche – derzeit praktisch bis über 2 GHz. Diese Eigenschaften sind unabhängig vom Messabstand, so dass dieses Prinzip sowohl bei mikroskopischen Operationen als auch über sehr grosse Entfernungen eingesetzt wird. Da Licht als Sensor die Probe nicht beeinflusst, ist es nicht invasiv und ermöglicht daher Messungen an extrem kleinen und sehr leichten Strukturen.

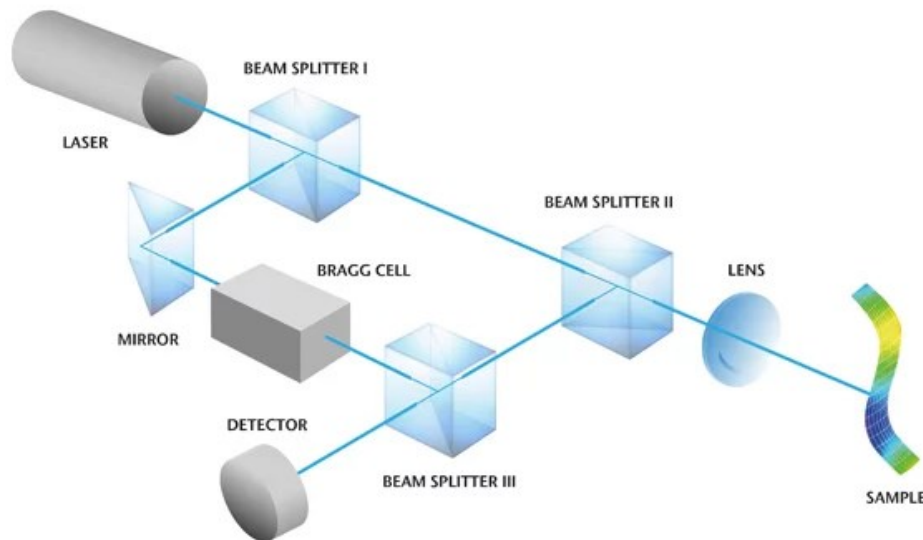


Abb. 7.69 Grundlegendes Messprinzip der Vibrometrie und Aufbau eines Laser-Doppler-Vibrometers [342]

Ein-Punkt-Vibrometer

Einpunktvibrometer messen die Schwingungsstärke an einem einzigen Punkt auf der Oberfläche eines Objekts. Genauer gesagt, misst ein Laservibrometer die projizierte Komponente des Oberflächenschwingsvektors eines Objekts entlang der Richtung des einfallenden Laserstrahls. Ist das Vibrometer beispielsweise senkrecht auf die zu prüfende Oberfläche ausgerichtet, misst es die Schwingung ausserhalb der Ebene der Oberfläche. Ein-Punkt-Vibrometer werden deshalb häufig auch als Vibrometer ausserhalb der Ebene bezeichnet.



Abb. 7.70 Links: Ein-Punkt-Vibrometer; Rechts: vollfeld-Vibrometer. (Quelle: polytec.com)

Nachfolgend sind einige beispielhafte Anwendungsbereiche aufgeführt:

- **Automobilindustrie** (Verbrennungsmotoren, elektrische Antriebe, Kompressoren, Getriebe, Klimagebläse, Mensch-Maschine-Schnittstellen)
- **Haushaltsgeräte** (Pumpen, Kompressoren für Klimaanlage und Kühlschränke, haptische Antriebe)
- **Unterhaltungselektronik** (Mikrofone, Lautsprechermembranen, Lüfterantriebe für Instrumente und Elektronik, akustische Prüfung von Festplatten und Laufwerken für optische Datenspeicher)
- **Medizintechnik** (Membranen und Pumpen von Inhalationssystemen)

Vollfeld-Vibrometer

Nach dem gleichen Prinzip wie oben beschrieben, können Vollfeldmessgeräte die Schwingungen dreidimensionaler Objekte (bis zu 25 MHz) für Akustik, Strukturdynamik, Ultraschall und die Validierung von Finite-Elemente-Modellen (FEM) erfassen.

Anwendungsbereiche:

- **Experimentelle Modalanalyse.** Vollfeld-Vibrometer ermöglichen präzise Messungen an einer grossen Anzahl von Messpunkten und ermöglichen die Messung von Übertragungsfunktionen und Auslenkungsformen.
- **Analyse der Betriebsablenkungsform.** In einem ähnlichen Zusammenhang ermöglichen Vollfeld-Lasergeräte die schnelle und genaue Bestimmung von Betriebsablenkungsformen und Eigenmoden komplexer Objekte über einen breiten Frequenzbereich.
- **Akustik.** Scanning-Laservibrometer ermöglichen die quantitative Erfassung von Schallquellen mit hoher räumlicher Auflösung und können für die Entwicklung leiser, vibrationsarmer Produkte wie Kraftfahrzeuge, Musik-, Medizin- und technische Geräte eingesetzt werden.
- **Ultraschall und zerstörungsfreie Prüfung.** Die Herstellung von Ultraschallgeräten für Industrie und Medizin basiert auf dem Einsatz von Vollfeld-Laservibrometern zur Messung und Visualisierung der Schwingungseigenschaften von Aktoren und Sensoren.
- **Messungen von Spannungen und Dehnungen.** In strukturellen und mechanischen Systemen werden Vollfeldmessungen für den Vergleich von Spannungs- und Dehnungsberechnungen verwendet. Die hohe räumliche Auflösung solcher Geräte ermöglicht die Lokalisierung und Berechnung von Spannungsmaxima und damit die Verbesserung der Konstruktion von Bauteilen.

7.30.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

LVDs sind ferngesteuert, was bedeutet, dass keine physische Befestigung an der gemessenen Struktur erforderlich ist. Sie ermöglichen auch Messungen an schwer zugänglichen Stellen des Bauwerks. Messungen können über eine Strecke von bis zu 30 m durchgeführt werden, ohne dass die Genauigkeit signifikant abnimmt. Viele handelsübliche LVD können verschiedene Punkte auf einer Oberfläche innerhalb von 10 ms messen, was eine hohe räumliche Auflösung im typischen Frequenzbereich von Brücken ermöglicht [189]. Der grösste Nachteil für den Einsatz von LDV bei der Brückenüberwachung sind die Kosten, die eine permanente Installation in dem zu überwachenden Bauwerk unpraktisch machen. Im Allgemeinen sind LDV von guten Sichtverhältnissen abhängig, die unter Aussenbedingungen nicht immer gewährleistet sind, was ihre Nützlichkeit für langfristige Strukturüberwachungen weiter einschränkt.

Zu den spezifischen Anwendungen gehören:

- Bestimmung des Elastizitätsmoduls oder der Bruchfestigkeit für Brücken in Zusammenhang mit einem numerischen Modell
- Überwachung und Identifizierung von Spannungs- und Dehnungsfeldern
- Dynamische und statische Verformung der Fahrbahnplatte und der Pfeiler
- Berechnung der Durchbiegung der Kabel

7.30.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Messdatenerfassung erfolgt ausschliesslich digital.
- Die ermittelten Messwerte beziehen sich auf Weg und Geschwindigkeit
- Die Messungen sind zerstörungsfrei und berührungslos

Laserbasierte dynamische Verschiebungssensoren stellen derzeit die Methode mit der besten Auflösung von Weg und Geschwindigkeit dar und werden in vielen Bereichen der Grundlagenforschung eingesetzt. Je nach Gerätetyp können Einzelpunkt- und Vollfeld-Lasersensoren Schwingungsverschiebungen von Mikro bis Makro bis zu 25 MHz - und bis in den Sub-pm-Bereich - messen. Was die Geschwindigkeiten betrifft, so eignen sich Lasersensoren für Schwingungsprobleme mit Geschwindigkeiten von bis zu 30 m/s. Die Wegdemodulation eignet sich besser für Messungen bei niedrigen Frequenzen (im Sub-Hz-Bereich), während die Geschwindigkeitsdemodulation besser für höhere Frequenzen geeignet ist.

7.30.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Es handelt sich um eine Technologie, die im Allgemeinen unabhängig von den Witterungsbedingungen sehr zuverlässige, genaue und robuste Ergebnisse liefert. Mit den neueren Entwicklungen und der Verfügbarkeit von Vollfeldmessgeräten können laserbasierte Sensoren für die Überwachung von Verschiebungen und Geschwindigkeiten ganzer Oberflächen und dreidimensionaler Objekte eingesetzt werden. Sie können sowohl im Innen- als auch im Aussenbereich eingesetzt werden, wobei sie derzeit vor allem im Labor für dynamische Messungen genutzt werden. Der Einsatz im Feld (im Freien) an grossen Strukturen (z. B. Brücken) ist begrenzt, weil die laserbasierte Messung eine punktuelle Messung ist. Da die Technologie nach wie vor hauptsächlich im Labor eingesetzt wird, ist sie mit hohen Kosten verbunden, die von 120'000 CHF für ein einachsiges LDV bis zu mehr als 500'000 CHF für einen 3D-LVD-Aufbau reichen.

7.30.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend sind die Anforderungen an bauliche Massnahmen für die Installation und Zugang zu den Sensoren zu definieren.

7.30.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[188] <https://www.polytec.com/int/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry>, letzter Zugriff am 15.07.2022

[189] I. González, Study and application of modern bridge monitoring techniques, Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2011.

7.31 Radarbasierte Sensoren

Wie schon in Kapitel 7.22 beschrieben.

B5 Schwingung – Geschwindigkeit

Tab. 7.37 B5 Schwingung – Geschwindigkeit - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Schwingungen - Geschwindigkeit		
Kurzbeschreibung		Die Messung von Schwingungen enthält Informationen zu den dynamischen Eigenschaften von Bauwerken, vor allem für eher steife Kunstbauten.		
Überwachungstechnologie		Geophon / Seismometer	Gyroskope (Optisch)	Gyroskope (MEMS)
"ID"		GPH_	GYR_1	GYR_2
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug			
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen	Größen	Geschwindigkeit	Winkelgeschwindigkeit	Winkelgeschwindigkeit
	Messungsbereich	+/- 0.01m/s; 3-300Hz (Frequenzbandbreite); 130dB (dynamische)		±250 °/s
	Auflösung			
	Genauigkeit	0.001 mm/s		5-96 mV/°/s
	Bemerkungen			
Kunstbauten		2	1	2
Naturgefahren		2	1	2
Umwelt		2	1	1
Einsatzzeitpunkt		W-N	W-N	W-N
Entwicklungsstand		●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●

Schwingungssensoren können, je nach Technologie, in Geschwindigkeitsmesser, zum Beispiel Geophon und Seismometer (Kapitel B5), und Beschleunigungsmesser eingeteilt werden. Die letztgenannten sind im Kapitel B6 beschrieben.

Alle Schwingungssensoren haben gemein, dass das Messprinzip darauf beruht, die relativen Bewegung einer Prüfmasse, die mit einem steifen Gehäuse mit bekannter Steifigkeit verbunden ist, zu messen [190]. Die Ausgabe von Schwingungssensoren (üblicherweise Stromspannung) ist direkt proportional zur absoluten Geschwindigkeit am Messpunkt. Dieses feste Verhältnis gilt nur für einen Frequenzbereich, wie er durch die Frequenzgangkurve beschrieben wird (nähere Details hierzu in Kapitel B6). Unter Abb. 7.71 sind beispielhaft einige kommerzielle Schwingungssensoren für Geschwindigkeitsmessungen abgebildet.



(a)



(b)



(c)

Abb. 7.71 Kommerzielle erhältliche Geschwindigkeitsmesser: (a) analoger Seismometer (b) digitaler Seismometer, (c) analoge Geophone

Im Vergleich zu Beschleunigungssensoren, sind Geschwindigkeitsmesser viel grösser und schwerer, da sie eine grössere Referenzmasse benötigen. Im Gegenzug erlauben sie sehr präzise Messungen mit einem sehr tiefen Geräuschpegel. Jedoch deckt der Frequenzbereich, insbesondere bei Geophonen, die tiefen Frequenzen (unter 2 Hz) oft nicht ab, was bei Brückenbauten unbrauchbar ist.

7.32 Geophon/ Seismometer

7.32.1 Beschrieb der Technologie

Geophone (auch bekannt als Seismometer) sind passive analoge Geräte, die eine federmontierte Drahtspule umfassen. Diese Drahtspule bewegt sich im Feld eines am Gehäuse montierten Permanentmagneten, wodurch ein elektrisches Signal erzeugt wird. Geophone sind sehr empfindliche Geräte und werden typischerweise bei seismologischen Bodenuntersuchungen verwendet, um die Vibration im Boden in eine Spannung umzuwandeln und dadurch zu messen. Im Gegensatz zu Beschleunigungsmessern ist die Resonanzfrequenz von Geschwindigkeitsmessgeräten sehr niedrig (typischerweise unter 10 Hz) und hängt von der Grösse der Prüfmasse ab – je grösser die Masse desto niedriger die Resonanzfrequenz des Sensors und desto tiefer reicht die messbare Frequenzbandbreite. Daher werden Geophone mit sehr niedriger Resonanzfrequenz aufgrund der dafür erforderlichen Grösse und des Gewichts der Prüfmasse unpraktisch.

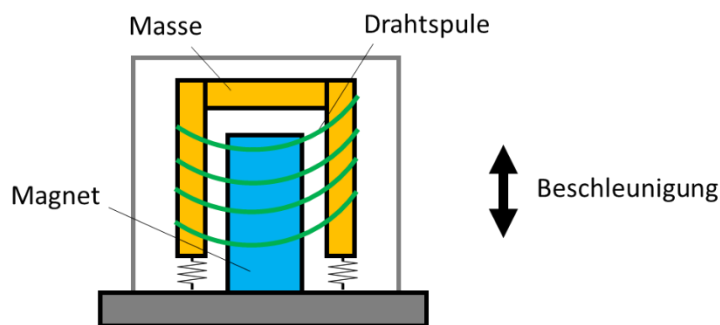


Abb. 7.72 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips des Geophons. Abgewandelt von [190]

7.32.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Geophone sind etablierte Instrumente für seismologische und geologische Anwendungen. Ihr einfaches mechanisches Prinzip und die hohe Empfindlichkeit der Messungen machten sie über viele Jahre hinweg zu einzigartigen Kandidaten für die Aufzeichnung von Mikrotremoren (sehr schwache Erdbeben) und den von der unterirdischen Geologie reflektierten Energiewellen. Ihr begrenzter Frequenzbereich, insbesondere in den niedrigeren Frequenzen (1–10 Hz), sowie ihr begrenzter Amplitudenbereich machen sie jedoch für die meisten Anwendungen der strukturellen Zustandsüberwachung unpraktisch. Da Geophone mit Bezug auf die Empfindlichkeit jedoch kostengünstig sind, bieten sie eine praktikable Alternative bei Strukturen mit hoher Steifigkeit, bei denen die Schwingungsamplitude sehr gering und die Eigenfrequenz grösser als 5 Hz sind.

Durch die Entwicklung für Messungen im Bereich der Geologie und Seismologie, können Seismometer in den folgenden Bereichen Anwendung finden:

- Messung der Bodenvibrationen und der Begebenheit der Gründung von Brückenfundamenten und Verankerungen.
- Messungen der Erdbebenaktivität nahe der Brückenfundamente.
- Dynamische Messungen von Brücken ohne starke Verkehrslasten und bei sehr steifen Brückensystemen.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

Die Überwachung der Schwingungen an Brückenfundamenten und an der Brückenstruktur ist eine sehr hilfreiche Information im Zusammenhang mit der lokalen Intensität von Erdbebenlasten.

Weiter können Geophone zur Detektion von grossen Niedergängen von Erd- und Felsmassen sowie Murgängen eingesetzt werden.

7.32.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und –Genauigkeit

- Die Messdaten bestehen aus dem elektrischen Widerstand, normalerweise in Volt. Eine Spannungsversorgung ist erforderlich.
- Die gemessenen Werte beziehen sich auf die absoluten Geschwindigkeiten an der Position des Sensors.
- Die Messung ist lokalisiert, und es gibt ein- oder mehrachsige (2-D- oder 3-D-) Lösungen für Beschleunigungsmesser.
- Die Messungen führen der Struktur keinen Schaden zu.
- Die typische Frequenzbandbreite bei Geophonen beginnt bei 1–15 Hz. Moderne Seismometer decken aber eine Bandbreite von 0,01–0,5 Hz bis 50–100 Hz ab.

7.32.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Resonanzfrequenz der Geophone ist im unteren Frequenzbereich, was ihre Anwendung für Messungen von Brücken limitiert. Da die untere Grenze der Frequenzbandbreite von physischen Parametern des Sensors, hauptsächlich der Masse, abhängt, ist ihre Entwicklung begrenzt.

Geophone sind, hinsichtlich der Messpräzision, in der Regel günstig. Die analogen Messkomponenten können für deutlich unter 100 CHF pro Messrichtung erworben werden. Analoge Sensoren brauchen jedoch einen digitalen Signalumwandler um die Messungen zu digitalisieren und zu speichern, welche deutlich teurer sind.

Seismometer sind üblicherweise teurer als Geophone, da sie eine weitere Bandbreite abdecken. Schätzungsweise kosten moderne Seismometer mit hoher Präzision und grosser Bandbreite über 1'000 CHF.

7.32.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.32.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [190] Collette, C. & Fernandez, P & Janssens, Stef & Artoos, Kurt & Guinchard, Michael & Hauviller, C. (2011) : Review of sensors for low frequency seismic vibration measurement.
-
- [191] Felix Levinzon (2014), Piezoelectric Accelerometers with Integral Electronics
-
- [192] Ibrahim M. Elfadel, Ha Duong Ngo, Mahmoud Rasras (2019), MEMS Accelerometers
-
- [193] John M Reynolds (2011), An Introduction to Applied and Environmental Geophysics
-
- [194] Fujino, Y., Siringoringo, D. M., Ikeda, Y., Nagayama, T., & Mizutani, T. (2019). Research and implementations of structural monitoring for bridges and buildings in Japan. Engineering, 5(6), 1093-1119.
-
- [195] Apaydin, N., & Erdik, M. (2001): Structural vibration monitoring system for the Bosphorus suspension bridges. In Strong motion instrumentation for civil engineering structures (pp. 343-367).
-

7.33 Gyroskope (Kreisel)

7.33.1 Beschreibung der Technologie

Kreisel, auch Gyroskope genannt, sind Geräte zur Messung der Winkelgeschwindigkeit. Bei Kreiseln kann der Drehwinkel durch Integration gewonnen werden, dies ist jedoch weniger präzise als die Messung der Verdrehung mittels Inklinometers. Die meisten Kreisel zur Anwendung an Kunstbauten sind entweder laserbasierte oder mikroelektromechanische Kreisel (MEMS-Kreisel) [196]. Diese beiden Typen werden in Abb. 7.73 gezeigt.

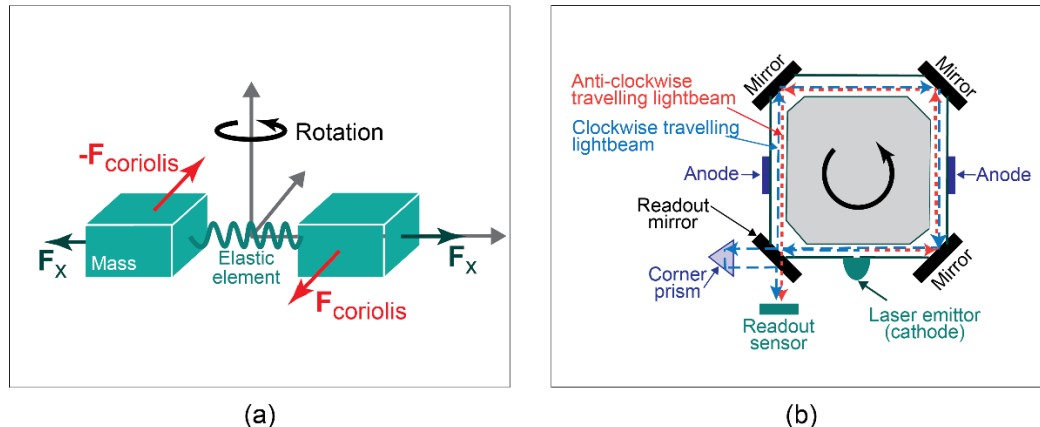


Abb. 7.73 a) Funktionsprinzip des MEMS-Kreisel (angepasst von [197]), und b) Funktionsprinzip des Ringlaserkreisels (angepasst von [198])

7.33.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Obwohl Gyroskope weit verbreitet sind, wurden sie bisher nur begrenzt für die Überwachung von Kunstbauten eingesetzt. In den letzten Jahren wurden jedoch mechanische Kreisel oftmals in Kombination mit Sensoren zur Beschleunigungsmessung im Bereich der Brückenüberwachung genutzt [196]. Gyroskope sind vor allem in Systemen mit grossen Rotationen, wie Flugzeuge und Smartphones, stark verbreitet; bei Kunstbauten ist die Messpräzision oftmals nicht genau genug. Winkelbeschleunigungen werden gemessen zur:

- Schätzung der Brückenneigung bei höheren Frequenzen [199]
- Ergänzung von Beschleunigungsmessung mit Rotationsmessungen bei der Brückenüberwachung [196],[200]
- Überwachung der Brückenverformung und Kombination mit künstlicher Intelligenz zur Erkennung von Strukturschäden [201]
- Messung der Nickbewegung von Fahrzeugen, die Brücken überqueren, was dann zur indirekten Bewertung der modalen Eigenschaften der überquerten Brücke verwendet wird [202]

7.33.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Bei den von Kreiseln erfassten Messungen handelt es sich um Winkelgeschwindigkeiten (Geschwindigkeitskreisel). Es gibt mechanische Gyroskope, diese sind jedoch sehr teuer. Deshalb sind MEMS-Gyroskope und Ringlasergyroskope bei Messungen an Kunstbauten weiter verbreitet [196].
- Zu den weiter verbreiteten Gyroskopen gehören optische und MEMS-Kreisel. Zu den optischen Kreiseln gehören faseroptische Kreisel und Ringlaserkreisel, wie in Abb. 7.73 gezeigt. Beide Geräte beruhen auf ähnlichen Prinzipien, wobei die Interferenz von Licht zur Messung der Winkelgeschwindigkeit durch den Sagnac-Effekt verwendet wird. MEMS-Gyroskope nutzen den Coriolis-Effekt zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit [196]. Beide Gerätetypen messen Winkelgeschwindigkeiten, welche integriert werden können um Winkel zu bestimmen, jedoch leidet die Genauigkeit der Messungen unter der numerischen Integration.

- Die Daten können mit Hilfe von zeitsynchronisierten Datenloggern aufgezeichnet werden, die an den Gyroskopen angebracht sind. Die Logger sollten in der Lage sein, die Gyroskopdaten mit Daten aus anderen Quellen, z. B. Beschleunigungsmessern, zu synchronisieren. Dazu müssen die Datenlogger über eine ausreichende Autonomie verfügen, um die Betriebsfähigkeit des Systems zu gewährleisten [196]. Oftmals werden Gyroskope mit Beschleunigungssensoren kombiniert.
- Messungen können in einer Achse (einachsige Kreisel) oder in drei Achsen (dreiachsige Kreisel) durchgeführt werden.

Gyroskope zeichnen sich durch erhöhte Genauigkeit und Präzision aus. Bei modernen kommerziellen einachsigen MEMS-Gyroskopen kann der Bereich zwischen $\pm 10^\circ/\text{s}$ und $\pm 900^\circ/\text{s}$ und die Empfindlichkeit zwischen $96 \text{ mV}/^\circ\text{s}$ und $5 \text{ mV}/^\circ\text{s}$ liegen. Die Abweichung des Skalenfaktors beträgt maximal 1,5% und die Stabilität der Vorspannung beträgt $12^\circ/\text{h}$ [203]. Bei kommerziellen triaxialen MEMS-Gyroskopen liegt der Bereich zwischen $\pm 10^\circ/\text{s}$ und $\pm 400^\circ/\text{s}$ und die Empfindlichkeit zwischen $200 \text{ mV}/^\circ\text{s}$ und $5 \text{ mV}/^\circ\text{s}$. Jüngste Entwicklungen bei MEMS-Gyroskopen haben ihre Vorspannungsstabilität verringert, die Werte zwischen $0,03^\circ/\text{h}$ und $0,10^\circ/\text{h}$ erreichen kann. [203]. Trotz des erreichten Präzisionsniveaus kann dies bei Kunstbauten unzureichend sein, da die Amplituden der dynamischen Rotation bei steifen Strukturen sehr gering sein können.

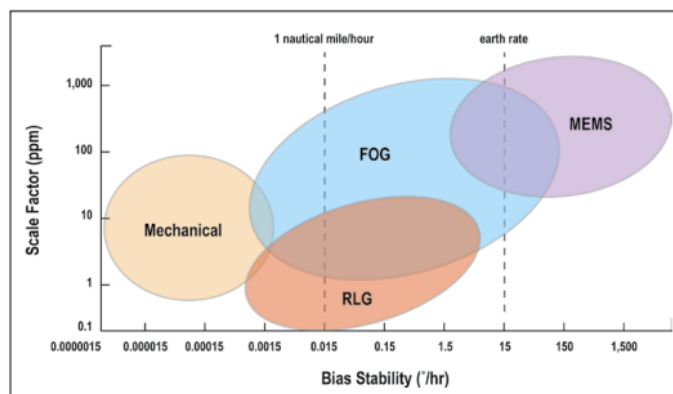


Abb. 7.74 Skalierungsfaktor und Vorspannungsstabilität für verschiedene Arten von Kreiseln gemäss einem Bericht über faseroptische Kreisel von KVH und ihre Vorteile gegenüber anderen Kreiseltechnologien [204]

7.33.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Gyroskope basieren auf der Messung der Winkelgeschwindigkeit. Für Anwendungen, die eine hohe Leistung erfordern, werden in der Regel Laserkreisele (RLG) verwendet. Laserkreisele enthalten keine mechanischen Teile, die Reibung erzeugen können, so dass es keine Drift gibt [205]. Faseroptische Kreisele (FOGs) haben ähnliche Eigenschaften wie Laserkreisele, aber sie weisen in der Regel eine höhere Auflösung auf [205]. MEMS-Gyroskope, die ursprünglich für teure militärische Anwendungen eingesetzt wurden, werden nun auch für kostengünstige kommerzielle Zwecke verwendet, wodurch sie für SHM-Projekte leichter zugänglich werden [206]. Niedrige Preise in Verbindung mit ihrer verbesserten Messgenauigkeit machen sie für moderne Inertialmesssysteme (IMU) beliebt [196]. Der Vorteil von MEMS-Gyroskopen ist, dass sie in einer Reihe von Grössen hergestellt werden können und genaue Rotationsdaten aus kleinen Komponenten liefern. Die steigende Nachfrage nach mobilen Geräten fördert ebenfalls das Wachstum des MEMS-Gyroskopmarktes, während die Kosten für MEMS-Gyroskope in den nächsten Jahren voraussichtlich radikal sinken werden, was zu einem Anstieg der Verwendung dieser Geräte führen wird [206].

Trotz ihrer rasanten Entwicklung stossen Gyroskope immer noch auf gewisse Einschränkungen. Laserkreisele sind zwar genau, aber bei sehr langsamen Drehungen können gegenläufige Frequenzen nicht mehr unterschieden werden, was zu einem «Lock-in»-Effekt führt, der die Bewegung des Geräts auf zwei Achsen reduziert. Ausserdem können Laserkreisele nur Informationen für eine Achse liefern (einachsig) [205]. FOGs erfordern in der Regel längere Produktionszeiten aufgrund höherer Anforderungen an die

Kalibrierung und können auch nur für eine einzige Achse verwendet werden [205]. Andererseits weisen MEMS-Kreisel eine geringere Stabilität bei extremer Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Belastung auf, und der Integrationsfehler zur Ermittlung der Winkelrotation ist im Vergleich zu FOGs oder Laserkreisel grösser [205].

Die Kosten für Laserkreisel und FOGs variieren je nach Anwendung und gewünschtem Genauigkeitsgrad. Der Preis für preisgünstige FOGs liegt bei etwa 1'000 CHF. [207]. Hochgenaue Laserkreisel und FOGs (z. B. 0,1 °/h Bias-Stabilität) können Werte von etwa 10'000 CHF pro Achse erreichen [208]. Beachten werden muss, dass Laserkreisel - und FOG-Technologien keine mehrachsigen Messungen unterstützen. Die Kosten für MEMS-Gyroskope sind in der Regel niedriger und liegen bei kommerziellen Sensoren in der Grössenordnung von einigen Dutzend CHF. Für leistungsstarke MEMS-Gyroskope steigen die Kosten auf 600 bis 1'000 CHF [209].

7.33.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.33.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [196] K. Faulkner, J.M.W. Brownjohn, Y. Wang, und F. Huseynov, Tracking bridge tilt behaviour using sensor fusion techniques; Journal of Civil Structural Health Monitoring, 10:543-555, 2020.
 - [197] <https://www.analogictips.com/gyroscopes-part-2-optical-and-mems-implementations-faq/>, Letzter Zugriff: 29.02.2024.
 - [198] Qu, T., Yang, K., Han, X. et al. Design of a superluminal ring laser gyroscope using multilayer optical coatings with huge group delay. Sci Rep 4, 7098 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep07098>
 - [199] C. Liu, J.W. Park, B.F. Spencer Jr, D.S. Moon, J. Fan, Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope, Smart Materials and Structures, 26:105005, 2017.
 - [200] S.H. Sung, J.W. Park, T. Nagayama, und H.J. Jung, A multi-scale sensing and diagnosis system combining accelerometers and gyroscopes for bridge health monitoring; Smart Materials and Structures, 23:015005, 2014.
 - [201] S. Li, X. Zuo, Z. Li, und H. Wang, Applying Deep Learning to Continuous Bridge Deflection Detected by Fiber Optic Gyroscope for Damage Detection; Sensors, 20: 911, 2020.
 - [202] J. Kim, J.P. Lynch, J.J. Lee, C.G. Lee, Truck-based mobile wireless sensor networks for the experimental observation of vehicle-bridge interaction; Smart Materials and Structures, 20:065009, 2011.
 - [203] ALTHEN Sensors & Controls: High Precision Gyroscopes, <https://www.althensensors.com/sensors/gyroscope-sensors/high-precision-gyroscopes/>, Letzter Zugriff am 15.07.2022
 - [204] KVH (2014): White Paper, An Update on KVH Fiber Optic Gyros and Their Benefits Relative to Other Gyro Technologies
 - [205] CEVA the experts blog: Exploring the Application of Gyroscopes, <https://www.ceva-dsp.com/ourblog/exploring-the-application-of-gyroscopes/>
 - [206] V.M.N. Passaro, M. De Carlo, und C.E. Campanella, Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective, Sensors, 17(10):2284, 2017.
 - [207] FIZOPTICA: Economy Design Gyroscopes, <https://fizoptika.com/low-cost-gyroscopes/>
 - [208] Imamura, T., Matsui, T., Yachi, M., Kumagai, H. (2019): A low-cost interferometric fiber optic gyro for autonomous driving; Proceedings Volume 11128, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXVII: 111280C
 - [209] Digi-Key Electronics: High-performance MEMS Gyros, <https://www.digikey.com/en/product-highlight/t/tronics/high-performance-mems-gyros>, Letzter Zugriff am 15.07.2022
-

B6 Schwingung – Beschleunigung

Tab. 7.38 B6 Beschleunigung - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Schwingungen - Beschleunigung		
Kurzbeschreibung		Die Messung von Schwingungen enthält Informationen zu den dynamischen Eigenschaften von Bauwerken, vor allem für eher steife Kunstbauten.		
Überwachungstechnologie		Kraft-ausgeglichener Beschleunigungsmesser	Piezoresistiver Beschleunigungsmesser	Kapazitive MEMS
		FBA_	PZT_	MEM_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	2 elektrisch	2 elektrisch	2 elektrisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug			
	f. Zustand	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend	3 nicht zerstörend
Messgrößen	Größen	Beschleunigung		
	Messungsbereich	+/-2g (Beschleunigung); 0-200Hz (Frequenzbandbreite); 155	min. +/-2g (Beschleunigung); 5- min. 200Hz	+/-2g (Beschleunigung); 0-100Hz (Frequenzbandbreite)
	Auflösung			
	Genauigkeit	0.05 mg	0.5mg	1 mg
	Bemerkungen	Lange Kabel können die Auflösung verringern. Oftmals ist es die digitale Messaufnahme. Welche die Genauigkeit limitiert.	Lange Kabel können die Auflösung verringern. Oftmals ist es die digitale Messaufnahme. Welche die Genauigkeit limitiert.	Lange Kabel können die Auflösung verringern. Oftmals ist es die digitale Messaufnahme. Welche die Genauigkeit limitiert.
Kunstbauten		4	2	4
Naturgefahren		3	2	3
Umwelt		2	2	2
Einsatzzeitpunkt		W-N	W-N	W-N
Entwicklungsstand		●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●

Beschleunigungsmesser messen die absolute Beschleunigung basierend auf der relativen Bewegung einer Prüfmasse, die mit einem steifen Gehäuse durch eine bekannte Steifigkeit verbunden ist. Es gibt drei Hauptkategorien von Beschleunigungsmessern, nämlich die piezoelektrischen, die MEMS- und die kraftausgeglichene Beschleunigungsmesser. In Abb. 7.75 sind ausgewählte kommerzielle Produkte für jede Sensortechnologie dargestellt.

Die Ausgabe von Schwingungssensoren (üblicherweise Stromspannung) ist direkt proportional zur absoluten Beschleunigung am Messpunkt. Dieses feste Verhältnis gilt nur für einen Frequenzbereich, wie er durch die Frequenzgangkurve (siehe Abb. 7.76) beschrieben wird. Der nutzbare Frequenzgang ist der flache Bereich der Frequenzgangkurve. Die Definition von flach muss näher bestimmt werden und erfolgt durch Angabe des Abfalls der Kurve entweder in Prozent (normalerweise 5% oder 10%) oder in dB (normalerweise ± 3 dB). Der Dynamikbereich von Schwingungssensoren ist der Bereich zwischen der kleinsten und der größten erkennbaren Schwingung und beschreibt die Empfindlichkeit der Sensoren.

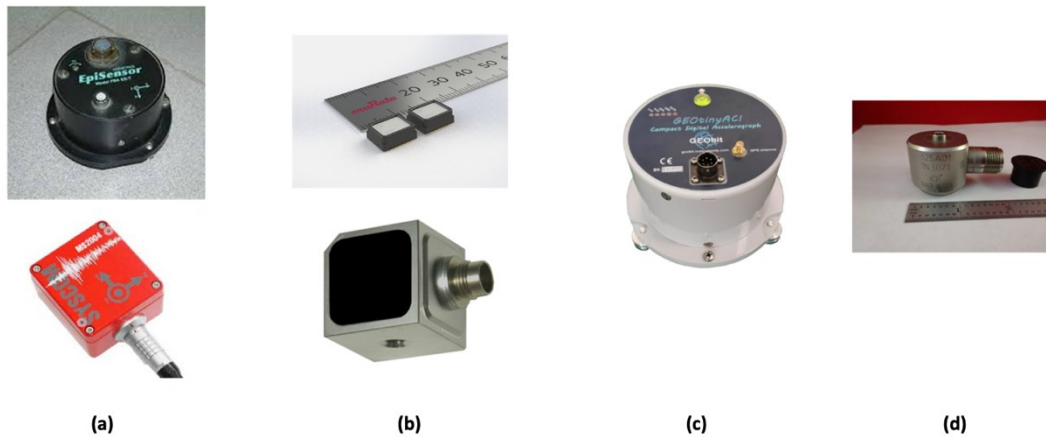


Abb. 7.75 Kommerzielle erhältliche Beschleunigungssensoren: (a) kraftausgeglichene analoge Beschleunigungsmesser, (b) analoger MEMS-Beschleunigungsmesser, (c) digitaler MEMS-Beschleunigungsmesser, (d) piezoelektrischer analoger Beschleunigungsmesser

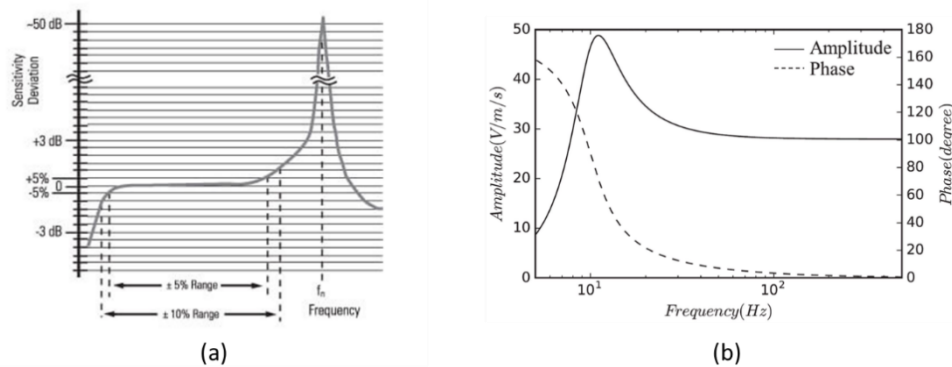


Abb. 7.76 Vergleich der charakteristischen Frequenzgangs zwischen Beschleunigungsmesser (a) und Geophon (b)

Die Digitalisierung der erfassten Signale kann entweder zentral (analoge Erfassung) oder lokal an jedem Sensorknoten (digitale Erfassung) erfolgen. Im ersten Fall werden die Sensoren über Kabel mit dem Datenerfassungsgerät verbunden, wo die Signale digitalisiert und an einen Rechner übertragen werden, der die Daten lokal speichert oder an einen Online-Server übermittelt. Analoge Sensoren verbrauchen typischerweise sehr wenig Strom, der durch dieselbe Kabel bereitgestellt werden kann, die das analoge Signal übertragen. Da die Digitalisierung der gemessenen Signale zentral erfolgt, sind keine weiteren Überlegungen zur Synchronisierung der Daten erforderlich. Analoge Kabel können die Daten über grosse Entfernungen (typischerweise bis zu 100 m) übertragen. Es sollten jedoch besondere Überlegungen angestellt werden, um elektromagnetische Interferenzen zu vermeiden, falls Hochspannungskabel, Magnete oder andere relevante elektromagnetische Quellen in naher Umgebung sind.

Die digitale Erfassung wird typischerweise lokal an jedem Sensorknoten durchgeführt, indem ein Analog-Digital-Wandler, ein Mikrocontroller und eine Speichereinheit in jeden Knoten integriert werden. Die erfassten Daten werden lokal gespeichert oder an einen zentralen Rechner übermittelt, der die Daten lokal sammelt oder auf einen Online-Server hochlädt. Kommerzielle digitale Sensoren sind typischerweise mit Wi-Fi-Sendern ausgestattet, die die drahtlose Übertragung von Daten ermöglichen, sowie mit GPS-Empfängern, die die Zeitsynchronisierung der Erfassung ermöglichen. Die hinzugefügten Komponenten erhöhen die Grösse, das Gewicht und den Stromverbrauch der Sensoren. Bei drahtlosen Anwendungen sollte besonderes Augenmerk auf die Stromversorgung und die Zeitsynchronisation der Sensoren gelegt werden. Bei kabelgebundenen Anwendungen gibt es keine besonderen Einschränkungen hinsichtlich der maximalen Kabellänge, obwohl für Entfernungen über 100 m Signal-Verstärker erforderlich sein können.

Anwendungen mit Beschleunigungssensoren

Vibrationsbasierte Überwachung hat in den letzten zwanzig Jahren nach Fortschritten in der Sensortechnologie und Dateninterpretationstechniken an Popularität gewonnen und zu zahlreichen Anwendungen an realen Brücken geführt. Die Möglichkeit, die globalen Schwingungseigenschaften einer Struktur mit einer begrenzten Anzahl von Sensoren zu erfassen, macht die Schwingungsüberwachung für praktische Anwendungen besonders attraktiv. Nachfolgend sind ausgewählte Beispiele aktueller Fallstudien zusammengefasst.

Fallbeispiel - Autobahnbrücke Z24, Schweiz

Vor dem geplanten Abriss wurde die Brücke kontrollierten Schadensszenarien unterzogen, um zu zeigen, wie sich die dynamischen Eigenschaften mit zunehmender Schädigung verändern und ob diese als eindeutige Schadensindikatoren dienen können [210]. Anhand dieses Benchmark-Datensatzes konnte das Potenzial der schwingungsbasierten Zustandsüberwachung nachgewiesen werden, da ein deutlicher und trennbarer Rückgang der Eigenfrequenzen für verschiedene Schadensstufen nachgewiesen wurde [213]. Des Weiteren können die Modalformen, welche aufgrund der Beschleunigungsmessungen ermittelt werden, zur Schadenslokalisierung genutzt werden [210], [213].

Vibrationsbasierte Schadenserkenkung stellt im Gegensatz zu Rissmessungen oder Verformungsmessungen eine indirekte Messung des Strukturzustands dar. Die gemessenen Eigenfrequenzen und Modalformen werden nicht nur durch Schäden, sondern auch Umwelteinflüsse, wie zum Beispiel die Lufttemperatur, die Sonneneinstrahlung und Bodenfrost, beeinflusst [214]. Diese Umwelteinflüsse können jedoch bei Langzeitmessungen bestimmt und herausgerechnet werden, um eine erfolgreiche Schadenserkenkung zu ermöglichen [214]. Auch numerische Modelle, wie zum Beispiel Finite-Elemente Modelle, können mit vibrationsbasierten Messungen kalibriert werden und somit bei der Bestimmung der Schadensszenarien helfen [215].

Fallbeispiel - Autobahnbrücke S101, Österreich

Vor ihrem geplanten Abriss wurde die Brücke S101, eine dreifeldrige Autobahnbrücke aus vorgespanntem Stahlbeton aus den 1960er Jahren, kontrollierten Schadensszenarien unterzogen. Die Versuchskampagne bestätigte die Schwingungsüberwachung des Bauwerkszustands als geeignete Methode zur Zustandsbewertung [216]. Die erste empirische Bewertung - basierend auf einer visuellen Inspektion - stufte die S101-Brücke in die Kategorie 4 von 5 ein, was auf einen problematischen Zustand hindeutet. Die schwingungsbasierte Überwachung des Bauwerks zeigte jedoch, dass sich das Objekt in einem zufriedenstellenden Zustand befand, der die Fortsetzung des Betriebs ermöglichte.

Darüber hinaus wurde eine zerstörende Prüfmethode verwendet, um verfeinerte Methoden zur Analyse von bevorstehenden, langsam fortschreitenden Schäden und deren Auswirkungen auf die Parameter des dynamischen Verhaltens zu evaluieren. Die Ergebnisse zeigen, dass vibrationsbasierte Schadensindikatoren in der Lage sind, Schäden, die einen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften aufweisen, zu identifizieren, zu lokalisieren und detailliert zu bewerten.

Fallbeispiel - Chillon-Viadukte, Schweiz

Der Oberbau des Chillon-Viadukt wurde 2015 verstärkt, um die Auswirkungen der Verschlechterung aufgrund der Alkali-Silica-Reaktion zu mildern. Um die Wirksamkeit der Nachrüstung zu bewerten und ihre langfristige Leistung weiter zu bewerten, wurde eine Kampagne zur Überwachung des strukturellen Zustands durchgeführt, die sich auf kostengünstige MEMS-Beschleunigungsmesser stützt [217]. Zu diesem Zweck wurde ein Finite-Elemente-Modell des Systems erstellt und mit Hilfe der Modaleigenschaften, welche aufgrund der Beschleunigungsmessungen bestimmt wurden, aktualisiert und anschliessend genutzt, um einen Vergleich zwischen der ursprünglichen und der sanierten Struktur zu liefern. Schliesslich wurde unter Nutzung des aktualisierten Systemmodells eine Zuverlässigkeitsanalyse durchgeführt, die die Effizienz der Verstärkungslösung bestätigte.

Viele weitere Beispiele erfolgreicher Anwendungen von Schwingungsmessungen werden in der Literatur beschrieben [218]-[224]. Diese Anwendungen beziehen sich auf unterschiedliche Brückentypen mit verschiedenen Materialien, einer unterschiedlichen Anzahl von Spannweiten und statischen Systemen. Während alle Fallstudien die Wirksamkeit von schwingungsbasierten Überwachungsmethoden belegen, ist es wichtig, dass diese mit effizienten datengesteuerten Verarbeitungsverfahren gekoppelt werden, wie z. B. Algorithmen für maschinelles Lernen, die eine verbesserte datengesteuerte Erkennung und Klassifizierung von Schäden ermöglichen.

7.34 Kraftausgeglichener Beschleunigungsmesser

7.34.1 Beschrieb der Technologie

Kraftausgeglichene Beschleunigungsmesser bestehen aus einer (seismischen) Masse, die auf einem nachgiebigen Element angebracht ist. Die Beschleunigung der Masse ruft aufgrund ihrer Trägheit eine Kraft hervor. Diese Kraft wird mit Hilfe eines Stroms ausgeglichen, der durch ein Übertragungsmaterial fließt. Die Kalibrierung des Beschleunigungsmessers bestimmt das Verhältnis zwischen der Beschleunigung, die die Masse aus dem Gleichgewicht bringt und der Ausgleichskraft, die gemessen werden kann. Es gibt zwei Arten von kraftausgegleichenen Beschleunigungsaufnehmern, entweder mit einer drehbaren Masse mit Winkelverschiebung oder mit einer linear verschobenen Masse. Kraftausgeglichene Beschleunigungsmesser zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeit und geringes Rauschen aus und sind in der Lage, auch sehr niederfrequente Strukturen (Frequenz kleiner als 0,5 Hz) zu überwachen, da sie theoretisch einen flachen Frequenzgang bis DC (0 Hz) aufweisen [190].

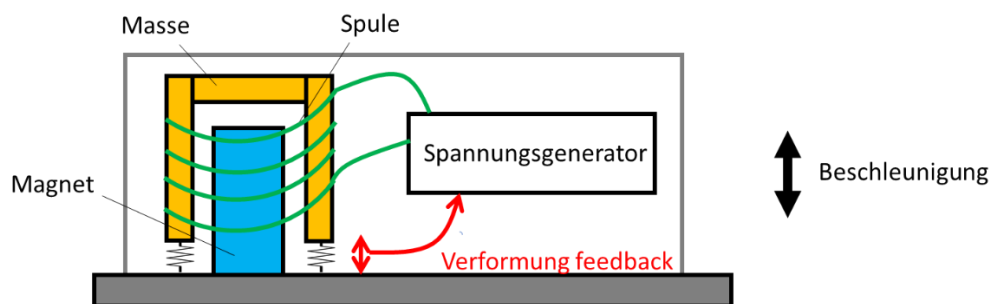


Abb. 7.77 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der kraftausgegleichenen Beschleunigungsmesser. Abgewandelt von [190]

7.34.2 Einsatzzweck(e) in Kunstbauten

Das Prinzip der kraftausgegleichenen Beschleunigungsaufnehmer kann zur Messung der Beschleunigung bis hinunter zu theoretischen Gleichstromwerten (0 Hz) verwendet werden. Daher eignen sie sich gut für die Messung der absoluten Beschleunigung von Strukturen, die durch niedrige Frequenzen gekennzeichnet sind, wie z. B. Brücken. Einsatzzwecke sind:

- Betriebsmodalanalyse – zur Ableitung von Eigenfrequenzen, Schwingungsformen und Dämpfung – einer Brücke. Das geringe Rauschen und die hohe Empfindlichkeit von kraftausgegleichenen Beschleunigungsaufnehmern ermöglichen die Identifizierung der Modalwerte auch ohne starke oder erzwungene Erregung, z. B. durch den Verkehr. Die Modaleigenschaften können anschliessend zur Aktualisierung der technischen Modelle einer Brücke verwendet werden.
- Überwachung der Höhe der verkehrsbedingten Schwingungen einer Brücke aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit.
- Die Langzeitüberwachung von Brücken ermöglicht die Verfolgung von Änderungen der modalen Eigenschaften, die sich aus Schäden oder Verschlechterungen ergeben können. Änderungen der Modelleigenschaften ermöglichen zusammen mit weitergehenden Grössen, die aus Beschleunigungszeitreihen abgeleitet werden können, eine datengestützte Überwachung des Bauwerkszustands. Ein Überblick über die schwingungsbasierte Schadenserkennung findet sich in [211] und [212].
- Echtzeitmessung der seismischen Intensität an einem Brückenstandort im Falle eines Erdbebens.
- Die hohe Genauigkeit bei niedrigen Frequenzen ermöglicht eine doppelte Integration der Beschleunigungen, um Schätzungen der Verschiebungen zu erhalten, was bei weniger genauen Verfahren keine brauchbaren Resultate liefern würde

7.34.3 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

- Die Messsignale sind normalerweise Stromspannungssignale in Volt. Für kraftausgeglichene Beschleunigungsaufnehmer ist eine Stromversorgung mit Netzstrom oder Batterien erforderlich.
- Kraftausgeglichene Beschleunigungssensoren sind in der Regel analog und erfordern daher eine Verkabelung und eine Zentraleinheit zur Digitalisierung und Synchronisierung der Messungen von mehreren Sensorknotenpunkten. Die Verluste durch lange Kabel und das potenzielle Vorhandensein elektromagnetischer Quellen müssen berücksichtigt werden und eine angemessene Abschirmung der Kabel ist erforderlich.
- Bei der digitalen Datenerfassung sind der Fernzugriff und das Daten-Streaming zu einem entfernten Server möglich.
- Die gemessenen Werte beziehen sich auf die absolute Beschleunigung an der Position des Beschleunigungsmessers.
- Die Messung ist lokalisiert und es gibt ein- oder mehrachsige (2-D oder 3-D) Lösungen für kraftausgeglichene Beschleunigungsmesser.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.
- Typische Messbereiche reichen von $\pm 1 \text{ m/s}^2$ bis $\pm 20 \text{ m/s}^2$. Die typische Frequenzbandbreite reicht von 0 bis 50 Hz.

7.34.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Kraftbasierte Beschleunigungsmesser sind eine zuverlässige und bewährte Messtechnik mit allgemein hoher Präzision (Empfindlichkeit $< 0,1 \text{ mm/s}^2$) sowie geringer achsenübergreifender Empfindlichkeit und geringer Nichtlinearität. Kraftausgeglichene Beschleunigungsmesser sind in der Regel selbstgesteuert und benötigen keine zusätzliche Signalaufbereitung oder -verstärkung.

Während die Preise für andere Technologien zur Messung von Beschleunigungen, insbesondere MEMS (siehe Abschnitt 7.36), in den letzten Jahren gesunken sind, sind kraftausgeglichene Beschleunigungssensoren nach wie vor kostspielig und kosten in der Regel mehrere Tausend CHF pro Sensor exklusive Digitalisierer und Verkabelung.

7.34.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.35 Piezoelektrische Beschleunigungsmesser

7.35.1 Beschrieb der Technologie

Piezoelektrische Beschleunigungsmesser (PE) nutzen den piezoelektrischen Effekt bestimmter Materialien, um dynamische Änderungen mechanischer Grössen (z. B. Beschleunigung) zu messen. Piezoelektrische Kristalle können entweder künstliche oder natürliche Strukturen sein, die elektrische Ladung erzeugen, wenn sie komprimiert, gebogen oder Scherkräften ausgesetzt werden. Bei einem piezoelektrischen Beschleunigungsmesser ist eine Masse an einem piezoelektrischen Kristall befestigt, der am Gehäuse des Sensors montiert ist. Wenn der Körper des Beschleunigungsmessers Vibrationen ausgesetzt wird, verursacht die Trägheitskraft der Masse Verzerrungen des piezoelektrischen Kristalls, die elektrische Ladungen erzeugen, welche proportional zur Beschleunigung sind [191].

Der Ladungsausgang kann durch die Verwendung einer integrierten Elektronik in einen niederohmigen Spannungsausgang umgewandelt werden. In den meisten Fällen wird die kleinste messbare Beschleunigung durch das Grundrauschen der Elektronik vorgegeben. Es wird eine maximal messbare Beschleunigung definiert, um zu vermeiden, dass der Kristall beschädigt oder die den Kristall haltende Struktur verzerrt wird.

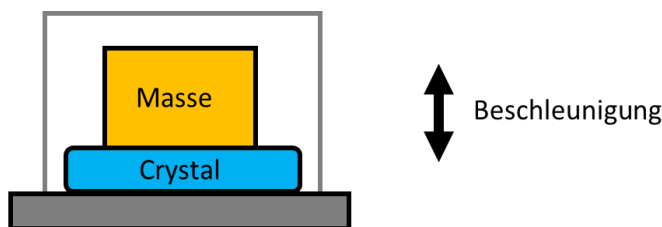


Abb. 7.78 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der piezoelektrischen Beschleunigungsmesser

7.35.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Piezoelektrische Beschleunigungsmesser reagieren nicht auf gleichmässige Beschleunigung (auch bekannt als statische oder Gleichstrombeschleunigung). Wird eine gleichmässige Beschleunigung aufgebracht, nimmt das Ausgangssignal bis zur vollständigen Entladung ab. Daher eignen sich piezoelektrische Beschleunigungsmesser nicht für die Messung sehr niedriger Frequenzen. Der Frequenzbereich, der durch PE-Beschleunigungsmesser abgedeckt wird variiert zwischen 0,2 Hz (Seismische Sensoren) bis zu 10 kHz (Schocksensoren). Da dieser Frequenzbereich den erforderlichen Frequenzbereich für die Überwachung der allermeisten Bauwerke (Ausnahmen sind z. B. Hängebrücken, teilweise Schrägseilbrücken) umfasst, eignen sich PE-Beschleunigungsmesser zur:

- Betriebsmodalanalyse von Brücken mit Grundfrequenzen grösser als 0,5 Hz. PE-Beschleunigungsaufnehmer kombinieren einen sehr niedrigen Rauschpegel mit einem hohen Dynamikbereich, was sie zu geeigneten Kandidaten auch für die Messung von Umgebungsschwingungen solcher steifen Strukturen macht.
- Überwachung von verkehrsbedingten Erschütterungen in der Nähe ihrer Quelle. Diese Erschütterungen sind im Allgemeinen durch hohe Frequenzen gekennzeichnet.

7.35.3 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

- Die Messsignale sind normalerweise Stromspannungssignale in Volt. Die Stromversorgung erfolgt mit elektrischem Strom oder Batterien.
- PE-Beschleunigungssensoren sind in der Regel analog und erfordern daher eine Verkabelung und eine Zentraleinheit zur Digitalisierung und Synchronisierung der Messungen von mehreren Sensorknotenpunkten. Die Verluste durch lange Kabel und das potenzielle Vorhandensein von elektromagnetischen Quellen müssen berücksichtigt werden, und eine angemessene Abschirmung der Kabel ist erforderlich.
- Bei der digitalen Datenerfassung sind der Fernzugriff und das Daten-Streaming zu einem entfernten Server möglich.

- Die gemessenen Werte beziehen sich auf die absolute Beschleunigung an der Position des Beschleunigungsmessers.
- Die Messung ist lokalisiert, und es gibt ein- oder mehrachsige (1-D- oder 3-D-) Beschleunigungsmesser.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

7.35.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

PE-Beschleunigungssensoren basieren auf ausgereifter und etablierter Technologie und haben sich seit langem als Standard für die Zustandsüberwachung von Industriemaschinen und Automobilen etabliert. PE-Sensoren weisen in der Regel einen geringeren Geräuschpegel auf als MEMS-Sensoren. Wenn PE-Sensoren Beschleunigungen ausgesetzt sind, die ihre Auslegungsschwellen stark überschreiten, können sie gesättigt werden und es dauert lange (Größenordnung einige Minuten), bis sie wieder einsatzfähig sind. Die zerbrechlichen PE-Kristalle können bei Schockereignissen beschädigt werden. Der kommerzielle Preis von analogen PE-Beschleunigungssensoren liegt je nach Leistung zwischen 500 und 3'000 CHF.

7.35.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.36 Kapazitive MEMS Beschleunigungssensoren

7.36.1 Beschrieb der Technologie

MEMS steht für Micro Electro Mechanical System und gilt für jeden Sensor, der mit mikroelektronischen Fertigungstechniken hergestellt wird. Diese Techniken erzeugen mechanische Sensorstrukturen von mikroskopischer Grösse, typischerweise aus Silizium. In Verbindung mit mikroelektronischen Schaltkreisen können MEMS-Sensoren zur Messung physikalischer Parameter wie z. B. der Beschleunigung verwendet werden. Der typische Aufbau von MEMS-Beschleunigungsmessern besteht aus einem steifen Rahmen, einem Differentialkondensator und einer beweglichen Masse. Die Beschleunigung lenkt die sich bewegende Masse ab und bringt den Differentialkondensator aus dem Gleichgewicht (siehe Abb. 7.79), was zu einer Amplitude der Sensorausgangsspannung führt, die proportional zur Beschleunigung ist. Im Gegensatz zu piezoelektrischen Sensoren, messen MEMS-Sensoren Frequenzen bis hinunter zu 0 Hz (statische oder DC-Beschleunigung). Es gibt zwei Arten von MEMS-Beschleunigungsmessern, nämlich variable kapazitive und piezoresistive. Variable kapazitive (VK) MEMS-Beschleunigungsmesser sind hochempfindliche Geräte im unteren Frequenzbereich, (ca. 0–100 Hz), die für die Strukturüberwachung und konstante Beschleunigungsmessungen verwendet werden. Piezoresistive (PR) MEMS-Beschleunigungsmesser sind Geräte mit breiterem Frequenzbereich und geringer Empfindlichkeit [192].

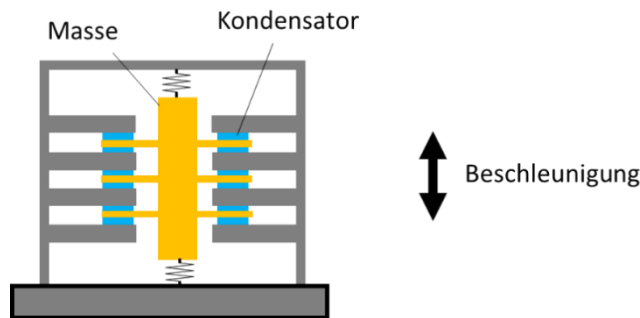


Abb. 7.79 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips der kapazitiven MEMS Beschleunigungsmesser

7.36.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

MEMS Beschleunigungsmesser decken ein breites Spektrum von Anwendungen zur Strukturüberwachung ab. Da sie in der Lage sind, sehr niedrige Frequenzen (theoretisch bis zu 0 Hz) zu messen, eignen sich MEMS-Beschleunigungsmesser für die Schwingungsüberwachung von flexiblen Strukturen wie Fussgängerbrücken, weitgespannten Brücken und Hochhäusern. Gegenwärtig beschränkt der relativ hohe Rauschpegel von PR-Beschleunigungsmessern ihre Anwendbarkeit auf Fälle, in denen eine aktive Erregung vorliegt, wie z. B. Personen-, Fahrzeug- oder Eisenbahnverkehr. Geeignete Anwendungen sind Fussgängerbrücken, Eisenbahn- oder Autobahnbrücken mit mittlerer bis langer Spannweite, Betonplatten mit grosser Spannweite, Geschossdecken und Hochhäuser. VK-Beschleunigungsmesser bieten einen viel niedrigeren Geräuschpegel, wodurch Umgebungsschwingungsmessungen in viel steiferen Strukturen wie Brücken mit kurzer Spannweite, niedrigen Gebäuden, dicken Betonplatten und Dämmen möglich sind.

7.36.3 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

- Die Messsignale sind normalerweise Stromspannungssignale in Volt. Für MEMS-Beschleunigungsaufnehmer ist eine Stromversorgung mit elektrischem Strom oder Batterien erforderlich.
- MEMS-Beschleunigungssensoren sind in der Regel analog und erfordern daher eine Verkabelung und eine Zentraleinheit zur Digitalisierung und Synchronisierung der Messungen von mehreren Sensorknotenpunkten. Die Verluste durch lange Kabel und das potenzielle Vorhandensein von elektromagnetischen Quellen müssen berücksichtigt werden und eine angemessene Abschirmung der Kabel ist erforderlich.

- Bei der digitalen Datenerfassung sind der Fernzugriff und eine laufende Daten-Übermittlung zu einem entfernten Server möglich.
- Die gemessenen Werte beziehen sich auf die absolute Beschleunigung an der Position des Beschleunigungsmessers.
- Die Messung ist lokalisiert, und es gibt ein- oder mehrachsige (2-D- oder 3-D-) Lösungen für kraftausgeglichene Beschleunigungsmesser.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

7.36.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

In den vergangenen Jahren verhinderten die begrenzte Bandbreite und der hohe Rauschpegel von MEMS-Beschleunigungsmessern ihren Einsatz in Zustandsüberwachungsanwendungen. Fortschritte in der MEMS-Technologie haben zur Entwicklung von MEMS mit mittlerer bis hoher Leistung geführt, die eine vergleichbare Leistung wie PE-Beschleunigungsmesser aufweisen. Heutzutage sind MEMS-Sensoren robust, kosteneffizient und bieten einen flachen Frequenzgang ab 0 Hz, was sie ideal für Anwendungen zur langfristigen Überwachung des strukturellen Zustands macht. Bei sehr steifen Strukturen, wie z. B. massiven Fundamenten, kann es vorkommen, dass VK-Sensoren an ihre Grenzen stossen. Der Sensorpreis hängt stark von der Technologie ab. Die ungefähren Kosten für analoge triaxiale PR-Sensoren betragen ca. 200 pro Stück, während digitale Sensoren mit integrierter Erfassung und Datenübertragung bis zu 500 CHF pro Stück erreichen. Die ungefähren Kosten für analoge triaxiale VK-Sensoren liegen bei etwa 2'000 CHF pro Stück, während digitale Sensoren mit integrierten Erfassungs- und Datenübertragungskomponenten bis zu 5'000 CHF pro Stück erreichen können.

7.36.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.36.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [210] J. Maeck, B. Peeters, und G. De Roeck, Damage identification on the Z24 bridge using vibration monitoring, *Smart materials and structures*, 10(3):512, 2001.
- [211] G. De Roeck, The state-of-the-art of damage detection by vibration monitoring: the SIMCES experience, *Journal of Structural Control*, 10(2):127-134, 2003.
- [212] J.R. Casas und J.J. Moughty, Bridge damage detection based on vibration data: past and new developments, *Frontiers in Built Environment*, 3(4), 2017.
- [213] E. Reynders und G. De Roeck, Vibration-based damage identification: the Z24 benchmark, *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 1 – 8, Springer, Berlin, 2014.
- [214] B. Peeters und G. De Roeck, One-year monitoring of the Z24-Bridge: environmental effects versus damage events, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 30(2):149-171, 2001.
- [215] A. Teughels und G. De Roeck, Structural damage identification of the highway bridge Z24 by FE model updating, *Journal of Sound and Vibration*, 278(3):589-610, 2004.
- [216] H. Wenzel, R. Veit-Egerer, und M. Widmann, Case Study: S101.
- [217] H. Martín-Sanz, K. Tassis, V. Dertimanis, L.D. Avendaño-Valencia, E. Brühwiler, und E. Chatzi, Monitoring of the UHPFRC strengthened Chillon viaduct under environmental and operational variability, *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(1):138-168, 2020.
- [218] J. Brownjohn, P. Moyo, P. Omenzetter, und Y. Lu, Assessment of highway bridge upgrading by dynamic testing and finite-element model updating, *Journal of Bridge Engineering*, 8(3):162-172, 2003.
- [219] T.-N., Hoa, S. Khatir, G. De Roeck, Thanh Bui-Tien, L. Nguyen-Ngoc, und M.A. Wahab, Model updating for Nam O bridge using particle swarm optimization algorithm and genetic algorithm, *Sensors*, 18(12): 4131, 2018.
- [220] Q.W. Zhang, T.Y.P. Chang, und C.C. Chang, Finite-element model updating for the Kap Shui Mun cable-stayed bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 6(4): 285-293, 2001.
- [221] B. Jaishi und W.X. Ren, Structural finite element model updating using ambient vibration test results. *Journal of structural engineering*, 131(4):617-628, 2005.
- [222] K.C. Chang und C.W. Kim, Modal-parameter identification and vibration-based damage detection of a damaged steel truss bridge, *Engineering Structures*, 122:156-173, 2016.

-
- [223] R.V. Farahani und D. Penumadu, Damage identification of a full-scale five-girder bridge using time-series analysis of vibration data, *Engineering Structures*, 115:129-139, 2016.
-
- [224] Delgadillo, R. M., & Casas, J. R. (2020). Non-modal vibration-based methods for bridge damage identification, *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(4), 676-697.
-
- [225] J. Meyer, R. Bischoff, G. Feltrin, M. Motavalli, Wireless sensor networks for long-term structural health monitoring, *Smart Structures and Systems*, Techno-Press, 6(3):263-275, 2010.
-
- [226] P. Martakis, Y. Reuland, und E. Chatzi, Ponte Moesa Campagnola bridge - Artificial damage scenarios - Monitoring report (Version 1), Zenodo, 2022, <https://doi.org/10.5281/zenodo.6756890>
-

C Zerstörungsfreie/ Zerstörungsarme Prüfmethoden

C1 Optische Methoden

Tab. 7.39 C1 Optische Methoden - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Schadenserkenkung mittels optischer Methoden		
Kurzbeschreibung		Zu dieser Kategorie gehören Methoden, die auf der Grundlage von optischen Messprinzipien arbeiten. Diese werden in verschiedenen Maßstäben angewendet (Innenraum, Oberflächenprobe, erweiterte Oberfläche).		
Überwachungstechnologie		Endoskopie	Mikroskopie	Digitale Bildkorrelation
"ID"		END_	MIK_	DIC_
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt
	b. Datenerfassung	5 optisch	5 optisch	5 optisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen
	e. Raumbezug			
	f. Zustand	2 zerstörungsarm	2 zerstörungsarm	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Bildgebung	Bildgebung	Bildgebung: Verschiebung/Dehnung
	Messungsbereich	Sichtfeld 65°-105°	Proben mit einer Größe von 1-20 Zentimetern	
	Auflösung	75×45 bis 240×180 Pixeln	Nano- bis Mikrometer	1 Hundertstel Pixel
	Genauigkeit			~10% unter 0,3% Dehnung (3.000 µe), ~1% über 3% Dehnung
	Bemerkungen			
Kunstbauten		2	2	1
Naturgefahren		0	0	2
Umwelt		2	0	0
Einsatzzeitpunkt		N	N	N
Entwicklungsstand		●	●	●
Kosten initial / einmalig		●	●	●

7.37 Endoskopie

7.37.1 Beschreibung der Technologie

Die endoskopische zerstörungsarme Prüfung stützt sich auf optische Bilder, die von Endoskopen aufgenommen werden, die in (vorgebohrte) Bohrlöcher eingeführt werden (Abb. 7.80). Diese optischen Bilder werden dann ausgewertet, um mögliche Defekte zu erkennen und die inneren strukturellen Eigenschaften zu bewerten [227]. Diese Technik stammt aus dem medizinischen Bereich und wird derzeit in der Bauindustrie häufig eingesetzt. Die gängigsten Arten von Endoskopen sind starre optische, flexible optische und Videoendoskope [229].



Abb. 7.80 Endoskopische Prüfung an einem Mauerwerk mit einem Videoendoskop RIDGID micro-CA 330 [230]

7.37.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Für die endoskopische Inspektion von Brücken ist je nach Aufgabe eine breite Palette von Geräten erforderlich, die von einfachen starren Endoskopen bis hin zu voll flexiblen Videoendoskopen mit kleinem Durchmesser reicht. Solche Geräte werden für Inspektionen eingesetzt, bei denen herkömmliche Methoden nicht angewendet werden können. Beispiele für solche Arbeiten sind [231]:

- Überprüfung des Zustandes von Materialien in Hohlräumen und verdeckten Rohrleitungen. Inspektion von nicht zugänglichen Hohlräumen wie kleine Hohlkästen, Aussparungskörper („Cofratolrohre“), enge Pfeiler etc.
- Inspektion von Honeycombs im bewehrten Mauern aufgespürt, und Beurteilung des Zustandes elektrischer Leitungen in Hohlwänden [228].
- Verifizierung von mit anderen Methoden vermuteten Hohlräumen in verpressten Spanngliedern.
- Untersuchung von Fehlern und Rissen (Rissbreite und Ausrichtung) in verdeckten Betonflächen.
- Untersuchung von Gummilagern.
- Überwachung von Stahlbetonbrücken mit Fahrbahnübergängen.
- Sichtprüfung von Bauteilen wie Dehnungsfugen, Hohlraumwänden, Böden und Brüstungen.

Endoskopische Inspektionen sind in der Regel Teil grösserer Inspektionskampagnen, die kritische Bauteile abdecken.

7.37.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Die Endoskopie kann mit starren optischen, flexiblen optischen oder Video-Endoskopen durchgeführt werden [229] (siehe Abb. 7.81). Starre Endoskope bestehen aus einem optischen System, einem mechanischen und einem Lichtleitersystem. Sie sind robust und für industrielle Anwendungen konzipiert [232]. Flexible Endoskope bestehen aus Glasfasern, die den Zugang zu verschlungenen und stark verwinkelten Räumen, engen Kanälen, Rohren und Strukturen ermöglichen, die ansonsten nicht zugänglich sind [232]. Videoendoskope sind im Wesentlichen miniaturisierte Videokameras mit CCD-Kamerasensor. In diesem Fall erfolgt die Bildübertragung elektronisch [229].
- Zur Datenerfassung wird ein Loch mit einem Durchmesser von etwa 1 cm in die Struktur gebohrt und mit Hilfe des Endoskops ein Bild der Struktur aufgenommen. Bei starren optischen Endoskopen werden die optischen Bilder von der Linse zum Okular übertragen. In Verbindung mit einer leistungsstarken Lichtquelle können hervorragende, scharfe Bilder aufgenommen werden, die eine zuverlässige Beurteilung des zu untersuchenden Objekts ermöglichen. Starre Endoskope sind die am häufigsten verwendeten endoskopischen Geräte im Bauwesen [229]. Flexible optische Endoskope übertragen das Bild über optische Fasern zum Okular, so dass die Auflösung des Bildes von der Anzahl der verwendeten Fasern abhängt [229]. Videoendoskope schliesslich übertragen digitale Bilder, die leicht aufgenommen, gespeichert und verarbeitet werden können [229].

- Einer der grössten Fortschritte bei den aktuellen endoskopischen Methoden ist die Verwendung von CCD-Komponenten zur Beobachtung von Objekten und zur Umwandlung optischer in digitale Signale. Diese Signale werden dann zur weiteren Verarbeitung, Visualisierung und Datenextraktion an die Videoverarbeitungsgeräte übertragen.
- Abgesehen von eventuell notwendigen Bohrungen sind die Messungen zerstörungsfrei.

Der Durchmesser der Endoskope variiert je nach Anwendung (1,5 bis 15 mm für feste optische Endoskope, 0,64 bis 20 mm für flexible optische Endoskope und 6 bis 20 mm für Videoendoskope [232]. Um die beste Bildqualität und Helligkeit zu erreichen, sollte der grösstmögliche Durchmesser gewählt werden. Es können verschiedene Perspektiven gewählt werden (gerade, seitlich, diagonal gerade oder rückwärts), und auch der Betrachtungswinkel kann angepasst werden. Schliesslich kann die Entfernung des Objekts in der Grössenordnung von Millimetern bis Dezimetern eingestellt werden.

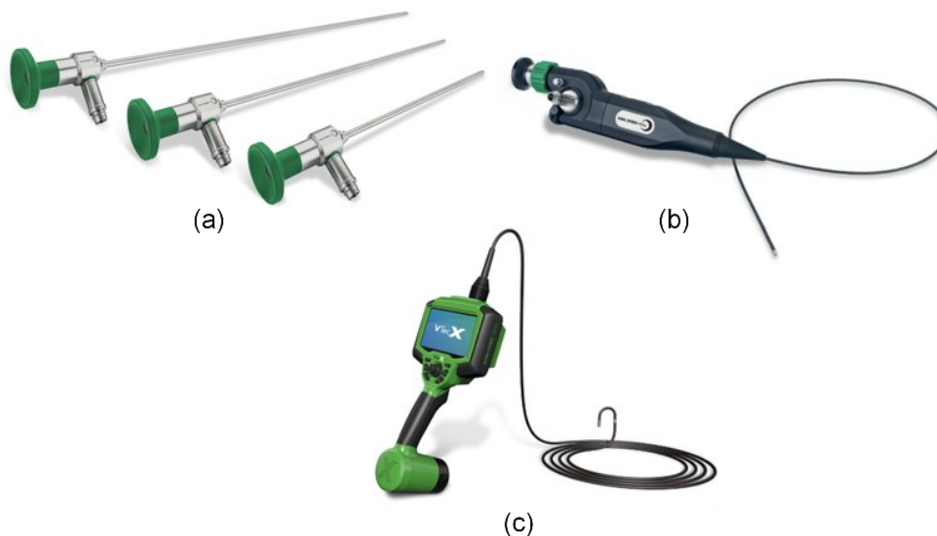


Abb. 7.81 a) starres optisches Endoskop, b) flexibles optisches Endoskop und c) Videoendoskop [232]

7.37.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Als zerstörungsfreie Prüfmethode ermöglicht die Endoskopie die Bewertung der strukturellen Merkmale von unzugänglichen Oberflächen, ohne deren physikalischen und geometrischen Zustand zu verändern. Sie ermöglicht die Untersuchung kleiner Hohlräume, die bei der regulären Inspektion oft vernachlässigt werden. Darüber hinaus ermöglichen flexible Endoskope den Zugang zu Stellen, die über das Zugangsloch hinausgehen [233]. Dank der rasanten Entwicklung der industriellen Mikroelektronik können moderne Endoskope, die mit Kameras ausgestattet sind, auch detaillierte Bilder auf Monitoren und Farbdisplays liefern und ermöglichen gleichzeitig die Fernsteuerung durch drahtlose Bildübertragung und kabelgebundene Sonden mit automatischer Verfolgung [229],[233]. Vor allem aber erleichtern die endoskopischen Methoden die Interpretation der Inspektionsergebnisse.

Andererseits ist die Endoskopie nur an Körpern mit Schlitten von mindestens einigen Millimetern möglich, die je nach Art der verwendeten Sonde geradlinig oder leicht gebogen verlaufen [233]. Ausserdem bedeutet die Verwendung von Sonden ein teilweises Eindringen in das zu untersuchende Objekt, was in einigen Fällen zu Abrieb oder sogar zu mechanischen Beschädigungen der Materialien führen kann [233]. Schliesslich sind Erfahrung und Ausbildung erforderlich, um korrekte Ergebnisse zu erzielen.

Die Kosten für Endoskope hängen vom Typ und der dazugehörigen notwendigen Ausrüstung (Lichtquelle, Lichtleiter, Display und Dokumentationssystem) ab. Sie können

stark variieren, wobei die Preise zwischen 100 und 60'000 CHF liegen, je nach der zu überwachenden Struktur und der gewünschten Genauigkeit der erfassten Daten [234].

7.37.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.37.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [227] Y.K. Zhu, G.Y. Tian, R.S. Lu, und H. Zhang, A Review of Optical NDT Technologies; Sensors, 11:7773-7798, 2011.
-
- [228] International Atomic Energy Agency (2002): Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17
-
- [229] TUM Wiki-System (2019): Endoscopy, <https://wiki.tum.de/display/zfp/Endoscopy>, Zugriff am 06.09.2022
-
- [230] A. Grazzini, Sonic and Impact Test for Structural Assessment of Historical Masonry; Applied Sciences, 9(23):5148, 2019.
-
- [231] Nicholls Colton Group, Endoscopic inspections, <http://nicholls-colton.co.uk/services-2/bridges/specialist-investigations/nicholls-colton-endoscopic-inspection/>, Zugriff am 06.09.2022
-
- [232] NDTec: Industrial Endoscopes for Nondestructive tests, <https://www.ndtec.net/products/videoscopes/vtec-x/>
-
- [233] PuntoNetto Assistance and Quality Inspections in Motion: Video-inspection or endoscopy, <https://www.puntonetto.it/en/video-inspection-or-endoscopy.html>, Zugriff am 06.09.2022
-
- [234] VIEW TECH BORESCOPES, <https://www.viewtech.com/what-is-the-cost-of-a-borescope/#~:text=The%20Pricing%20of%20Borescopes%20Varies,%3F%E2%80%9D%20Between%20%24100%20and%20%2460%2C000>, Zugriff am 06.09.2022
-

7.38 Mikroskopie

7.38.1 Beschreibung der Technologie

Mikroskopische Prüfverfahren für Bauwerke stammen aus dem Bereich der Petrographie und umfassen hauptsächlich die optische und petrographische Mikroskopie [235]. Durch die Kommerzialisierung der Rasterelektronenmikroskopie (REM) seit den 60er Jahren haben sich mikroskopische Abtastverfahren etabliert [236]. Diese mikroskopischen Prüfverfahren stützen sich auf Proben, die der zu untersuchenden Struktur entnommen werden und klein genug sind, um mit Mikroskopen untersucht zu werden. Die aus der Untersuchung der Proben gewonnenen Bilder werden dann verarbeitet, um die topologischen und morphologischen Merkmale der Proben zu bestimmen.

Alternative mikroskopischen Methoden, wie die faseroptische Mikroskopie (FOM), können vor Ort eingesetzt werden, um vergrößerte Bilder im sichtbaren Spektrum zu erhalten. Im Gegensatz zur traditionellen optischen Mikroskopie, bei der eine Probe am Mikroskop platziert werden muss, ist bei der FOM keine Probenahme erforderlich, da das Bild vor Ort aufgenommen werden kann [237].

7.38.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Mikroskopische Inspektion von Kunstbauten:

- Aufbau / Stärke / Haftungszustand von Beschichtungsstoffen
- Beurteilung Korrosionstyp, -tiefe an Bewehrungsstäben
- Identifizierung von Zementart, Zuschlagstoffen und Zementersatzstoffen [229]
- Identifizierung der ursprünglichen Betonzusammensetzung.
- Bestimmung des Luftporengehalts, einschliesslich mitgerissener und eingeschlossener Luft.
- Untersuchung des chemischen Verhaltens und der Dauerhaftigkeit (chemischer Angriff, Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Schwinden der Gesteinskörnung oder des Zements, Frostangriff, Karbonatisierung, Auslaugung, Nachweis von unzulässigen Verunreinigungen, Brandschäden), oft in Kombination mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDA) und chemischen Methoden [235], [239], [231]
- Inspektion der Rissbildung im Beton aufgrund interner expansiver Reaktionen [239]

Solche Inspektionen sind in der Regel Teil grösserer Inspektionskampagnen, die sich auf kritische Teile von Strukturkomponenten erstrecken. Da die Proben entnommen werden müssen, handelt es sich um eine zerstörende oder teilweise zerstörende (zerstörungsarme) Prüfung.

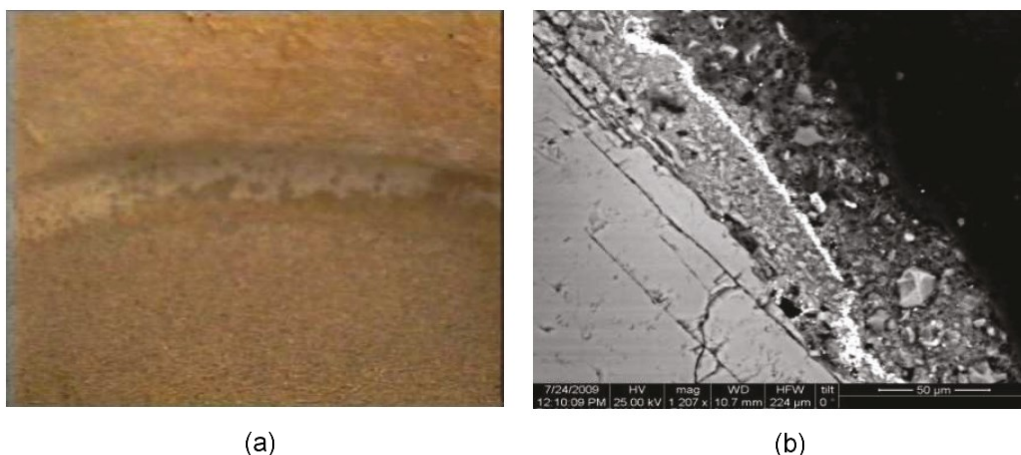


Abb. 7.82 Schwarze Kruste einer Marmorkapelle im Freien: a) digital-optisches Mikroskopie-Bild b) REM-Bild [236]

7.38.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Abgesehen von der Probenahme ist die Mikroskopie eine zerstörungsfreie Methode. Die Proben sollten aus verschiedenen Teilen des Bauwerks entnommen werden, um die Untersuchung geschädigter Bereiche, z. B. gerissener Zonen, zu gewährleisten. Die untersuchten Proben sollten auch den inneren Zustand des Bauwerks erfassen [239]. Diese Proben werden dann mittels Licht- oder Elektronenmikroskopie analysiert.

Die optische Mikroskopie Im behandelten Fachbereich wird typischerweise mit Polarisationsmikroskopie, Stereomikroskopie oder Fluoreszenzmikroskopie durchgeführt [235]. Bei der Polarisationsmikroskopie werden mehr als eine Linse und eine polarisierte Lichtquelle verwendet. Dieser Gerätetyp ist klein, einfach zu handhaben und kann aufgrund ihrer mehreren Linsen eine grosse Menge an Details aufdecken [241]. Die Stereomikroskopie hat eine geringe Vergrösserungsleistung und verwendet zwei separate Okulare mit zwei Objektiven, die den visuellen Effekt der Tiefenwahrnehmung erzeugen. Sie dient in erster Linie der Betrachtung relativ grosser und fester Oberflächen oder Proben und bietet auch eine dreidimensionale Perspektive [241]. Schliesslich verwendet die Fluoreszenzmikroskopie Hochleistungs-Lichtwellen, die einzigartige Bildbetrachtungsoptionen ermöglichen, die mit herkömmlichen Mikroskopen nicht möglich sind [241].

Die Elektronenmikroskopie stützt sich auf das REM, das für die Untersuchung historischer Strukturen weit verbreitet ist [236]. Das REM basiert auf einem Elektronenstrahl, der die Probe in parallelen Linien abtastet, um ein Bild in der gewünschten Zoomstufe zu erhalten. Der REM-Bediener kann den Strahl über einen Computer steuern, um die Vergrösserung zu kontrollieren und die zu scannende Oberfläche zu bestimmen. Der Strahl wird auf den Objektstisch fokussiert, auf dem eine feste Probe platziert wird. Die meisten Proben erfordern eine gewisse Vorbereitung, bevor sie in die Vakuumkammer gelegt werden [241]. Die mit dem REM untersuchten Proben müssen nicht flach sein, wie dies bei der optischen Mikroskopie der Fall ist. Die erhaltenen Bilder werden in verschiedenen Graustufen eingefärbt, die je nach verwendetem Detektor unterschiedliche Informationen enthalten [236]. Die Bildvergrösserung kann bis zu 10 Nanometer betragen, was eine grössere Sichttiefe, eine höhere Auflösung und letztlich ein detaillierteres Bild der Oberfläche ergibt.

Die quantitative Analyse der aufgenommenen Bilder erfolgt mit Hilfe eines Punktzählers oder eines Bildanalysegeräts, wobei auch Referenzdünnstufungen erforderlich sind. Die Untersuchungen werden je nach verwendeter Technik an Handmassenproben, geschliffenen Schnitten, polierten Schnitten, Dünnstufungen, in der Regel mit Farbstoffimprägnierung, und kleinen Fragmenten durchgeführt. Die Mikroskopie ist kein standardisierter Ansatz, da die Komplexität der Probleme, auf die sie angewandt wird, ein hohes Mass an Flexibilität erfordert. In der Regel zeigt sich die am besten geeignete mikroskopische Technik erst, wenn durch eine erste Analyse der untersuchten Struktur genügend Anhaltspunkte gesammelt wurden [235].

Schliesslich kann die FOM, eine völlig zerstörungsfreie mikroskopische Methode, für In-situ-Prüfungen eingesetzt werden. FOM ist ein mikroskopisches System, das fortschrittliche Optik, Faseroptik und digitale Komponenten integriert. Es liefert hochauflösende, kontrastreiche, vergrösserte (bis zu 600-fach) Bilder der Oberfläche, die für die weitere Verarbeitung digital erfasst und gespeichert werden können [237].

7.38.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Als zerstörungsfreie Prüfmethode ermöglicht die Mikroskopie die Bewertung der topologischen und morphologischen Eigenschaften der beteiligten Materialien in Kunstbauten, ohne deren physikalischen und geometrischen Zustand zu verändern. Die Fülle der mikroskopischen Methoden bietet auch eine Vielzahl von Anwendungen mit Proben im Bereich von einigen Dezimetern bis hin zu Nanometern. Darüber hinaus bieten moderne REM-Methoden eine Auflösung im Nanobereich, was die Präzision deutlich erhöht [236].

Da die Untersuchung mit mikroskopischen Mitteln erfolgt, kann das zu untersuchende Materialvolumen (z. B. Beton) recht klein sein und somit nicht den Gesamtzustand

repräsentieren, insbesondere bei grossen Bauwerken (z. B. Brücken). Daher ist eine angemessene Auswahl der Proben und der Prüfstellen unerlässlich. Darüber hinaus sollte eine spezialisierte Untersuchung nur von einem ausgebildeten und erfahrenen Fachmann (in der Regel einem Petrografen) durchgeführt und interpretiert werden, während die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung durch eine chemische Analyse ergänzt werden sollten [235]. Schliesslich können die Kosten für die Mikroskopie im Falle des REM sehr hoch sein, und der Bediener muss speziell geschult werden.

Die Kosten für Mikroskope hängen von der Art des Mikroskops und der dazugehörigen notwendigen Ausrüstung ab und können stark variieren. Kommerzielle Polarisationsmikroskope kosten zwischen 1'000 und 7'000 CHF [242]. Die Preise für einfache Stereomikroskope beginnen bereits bei 850 CHF [243]. Fluoreszenzmikroskope kosten zwischen 2'400 und 21'000 CHF [244]. REM ist eine kostspielige mikroskopische Methode, wobei die Preise für traditionelle REM zwischen 120'000 und 250'000 CHF liegen [245]. Wie bei zerstörungsarmen Methoden üblich, kann die mikroskopische Analyse von einzelnen Proben in Auftrag gegeben werden. Der Preis pro Probe variiert hierbei je nach Art des Mikroskops das benötigt wird und zusätzlich zur Entnahme der Probe, welche im Bereich von 150-200 CHF liegt, fallen zwischen 100 CHF und 500 CHF an.

7.38.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.38.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [235] International Atomic Energy Agency (2002): Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17
-
- [236] Moropoulou, A., Zendri, E., Ortiz, P., Delegou, E.T., Ntousi, I., Balliana, E., Becerra, J., Ortiz, R. (2019): Scanning Microscopy Techniques as an Assessment Tool of Materials and Interventions for the protection of Built Cultural Heritage; Scanning, 2019: 5376214
-
- [237] Moropoulou, A., Labropoulos, K., Delegou, E.T., Karoglou, M., Bakolas, A. (2013): Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage; Construction and Building Materials, 48: 1222-1239
-
- [238] Wiley Analytical Science Magazine (2018): Building bridges with stronger concrete, <https://analyticalscience.wiley.com/do/10.1002/micro.2502>, Zugriff am 11.09.2022
-
- [239] Santos Silva, A., Gonçalves, A., Salta, M. (2010): Degradation of Concrete Bridges by Internal Expansive Reactions – Portuguese Case Studies; 16th IRF World Meeting, Lisboa 2010
-
- [240] DTU Civil Engineering, Concrete Expert Center: Long-term durability (2013), <http://www.concreteexpertcentre.dk/long-term-durability/32859>
-
- [241] Microscope master: Cement under a Microscope, <https://www.microscopemaster.com/cement-under-a-microscope.html>, Zugriff am 06.09.2022
-
- [242] R.J. Maude, W. Buapetch, K. Silamut, A Simplified, Low-Cost Method for polarized Light Microscopy, The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene, 81(5):782-783, 2009.
-
- [243] MicroscopeWorld: Stereo Microscopes, <https://www.microscopeworld.com/c-429-stereo-microscopes.aspx>
-
- [244] New York Microscope Company: Fluorescence Microscopes, <https://microscopeinternational.com/fluorescence-microscopes/>, Zugriff am 16.09.2022
-
- [245] NANOIMAGES Perfect Focus: Tabletop (Scanning Electron Microscopes), SEM <https://www.nanoimages.com/tabletop-sem-products/>, Zugriff am 06.05.2022
-

7.39 Digitale Bildkorrelation (DBK)

7.39.1 Beschrieb der Technologie

Das digitale Bildkorrelationsverfahren (DBK) ist ein berührungsloses optisches Weg- (und indirekt Dehnungs-) Messsystem [246], [248]. Ein DBK-System besteht im Allgemeinen aus folgenden Komponenten: Kamera(s), einem Stativ (oder Ständern zur Fixierung der Kamera), einem Controller zum Starten und Synchronisieren der Messung und einem Computer zur Aufzeichnung und Verarbeitung der Daten. Da gute Lichtverhältnisse notwendig sind, kann auch ein Beleuchtungssystem erforderlich sein. Je nach Bedarf kann eine einzelne Kamera für Messungen in der Ebene (2D-planar) oder ein 2-Kamera-Stereokamerasystem für 3D-Raummessungen verwendet werden. Ein kontrastreiches Speckle-Muster (Punktgrösse 3-7 Pixel) wird auf die Oberfläche des Messobjekts aufgebracht. Mit dieser Technik wird ein vollständiges Verschiebungsfeld berechnet, indem Variationen in einem kontinuierlichen Graustufenmuster der digitalen Bilder erkannt werden. Der DBK-Algorithmus kann eine Gruppe von Pixeln (Subset) des Graustufenmusters identifizieren und sie in verschiedenen Zeitabschnitten verfolgen, indem er die Koordinaten mit dem Referenzabschnitt (unverformtes Objekt) vergleicht. Ein Subset muss mehrere Grauabstufungen enthalten, und ihre Grösse sollte etwa das Fünffache der Speckle-Grösse betragen. Die vollflächige Dehnung wird anhand der Gleichungen der Kontinuumsmechanik berechnet; diese Berechnung erfolgt in der Regel mit Dreiecksnetzen und unter Anwendung von linearen oder Spline-Dehnungsberechnungen. Vor Beginn der Messung ist ein Kalibrierungsprozess erforderlich. Durch die Kalibrierung werden alle intrinsischen (Brennweite, Bildmitte, Verzerrung, Schräglage) und extrinsischen (relative Position des Kamerapaares) Parameter des Aufbaus ermittelt. Bei diesem Verfahren werden mehrere Bilder eines kalibrierten Zielobjekts in verschiedenen Positionen und Ausrichtungen aufgenommen. Da die Grösse des Ziels bekannt ist, kann der Algorithmus den Massstab und die Einheiten des Messfelds festlegen. Ein kalibriertes System bleibt für den gewählten Abstand zum Objekt kalibriert, wenn der Abstand und der Winkel zwischen den Kameras unverändert bleiben, auch wenn beide Kameras bewegt werden. Bei 3D-DBK sollte die Verschiebung des Objekts während der Messung auf ein vorher definiertes Messvolumen begrenzt sein.

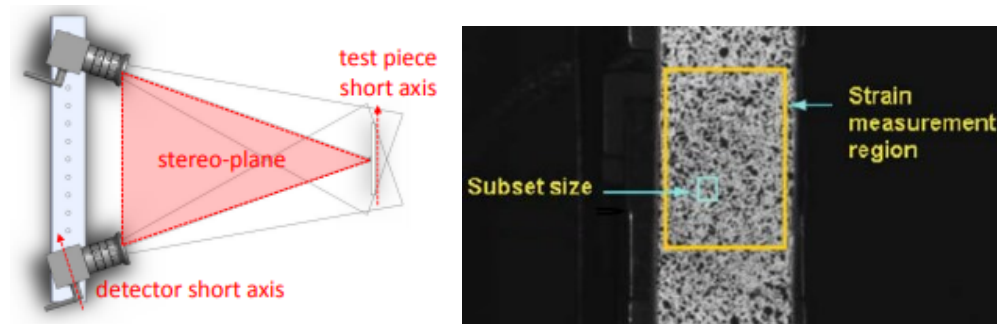


Abb. 7.83 3D-DBK-Standardaufbau (links) nach [1], Beispiel einer DBK-Messung zur Rissmustererkennung (rechts) nach [248]

In die gleiche Gruppe von Messtechniken fallen auch die Punktverfolgung und die target-less Ansätze. Bei der Punktverfolgungstechnik werden Kameras verwendet, um eine diskrete Anzahl von Punkten auf der Struktur zu identifizieren. Bei diesem Verfahren werden optische Targets verwendet, und anstelle eines Verschiebungs-/Dehnungsfeldes wird ein diskretes Messfeld gewonnen, so dass nur die Verschiebung des Targets berechnet werden kann. Als Faustregel gilt, dass die Grösse des Targets grösser als acht Pixel sein sollte [249]. Die target-less Ansätze ermöglichen es, die Verschiebungen eines Objekts anhand seiner Merkmale, z. B. seiner Kanten, zu ermitteln. Daher benötigt dieser Ansatz kein Target oder Muster. Bei den target-less Verfahren handelt es sich um eine neue Technologie, die weniger präzise ist als DIC.

7.39.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Aufgrund ihrer Vielseitigkeit eignet sich die DBK für zahlreiche Anwendungen an Kunstbauten, insbesondere für Brücken und ihren Bauteilen. Mit dieser Technik lassen sich

Durchbiegungen, Scherverformungen und axiale Verkürzungen von Bauteilen bestimmen sowie lokale Dehnungen, Rissmuster oder relative Verschiebungen zwischen beweglichen Teilen abbilden. Die 3D-Bildkorrelationsmethode eignet sich besonders für dreidimensionale Verformungsmessungen unter statischer Belastung; Hochgeschwindigkeitskameras können jedoch auch zur Überwachung dynamischer Ereignisse eingesetzt werden [249]. Die Vorteile der DBK-Methode liegen in der vollflächigen Verformungsmessung, auch bei komplexen Geometrien. Darüber hinaus ist es möglich, durch zerstörende Prüfungen grosse Dehnungen oder Risse zu überwachen, ohne dass die Gefahr besteht, einen Sensor zu beschädigen. Die DBK-Methode eignet sich vor allem für Kurzzeitmessungen, doch ist auch eine Langzeitüberwachung möglich.



Abb. 7.84 DBK-Messung der Vertikalverschiebungen einer gemauerten Bogenbrücke aus [252]



Abb. 7.85 Beispiel einer Brückenüberwachung mit DBK. Bild wiederverwendet aus [252]

Hauptanwendungen im Bereich Kunstbauten:

- Verfolgung der Verformung von Brücken-Bauteilen (z. B. Fahrbahnplatte, Pfeiler, s. Abb. 7.84 und Abb. 7.85).
- Rissöffnung.
- Information über Korrosion oder Abplatzungen.
- Materialprüfung.
- FE oder Modellvalidierung.
- Berechnung der Dehnung.
- Messung des Verschiebungs-/Dehnungsfeldes einer Probe im Labor, wie z. B. bei Balkenprüfungen, Auszieh-/Abreissversuchen und Säulenprüfungen.
- 3D-Messung von Rissentstehung, -ausbreitung und -breite auf der zu prüfenden Bauteiloberfläche.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Deformationskameras sind eine kosteneffiziente, flächendeckende Lösung zur Langzeitüberwachung von Instabilitäten in Fels und Eis. Mithilfe von vollautomatisierten Deformationsanalysen können Verschiebungen senkrecht zur Blickrichtung im Bereich von wenigen Zentimetern einfach festgestellt werden. Eine Situationsveränderung oder eine Beschleunigung kann somit detektiert werden. Die Bilder können je nach

gewünschtem Intervall aufgenommen werden (stündlich, täglich, wöchentlich, ...). Für eine bessere Einsicht oder zur 3D Visualisierung ist auch eine Überwachung mit mehreren Kameras möglich. Somit können sich abzeichnende Abbrüche von grossen Instabilitäten frühzeitig erkannt und - unter günstigen Umständen - auch vorhergesagt werden.

- Flächige Überwachungsmethoden bieten den Vorteil, dass die Bewegungen in der gesamten instabilen Masse erfasst werden können und damit die geologische Modellbildung massgeblich unterstützt wird.

7.39.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die erfassten Daten sind digitale Bilder, die nachbearbeitet werden, um Verschiebungen und Dehnungen zu berechnen. Die Nachbearbeitungsphase kann während oder nach der Erfassung durchgeführt werden.
- Diese Technik eignet sich für Messungen von Verschiebungen, Verformungen und Dehnungen. Die Rohbilder können zu Dokumentationszwecken gespeichert werden.
- Die dynamische Überwachung durch DBK erfordert spezielle Kameras und Steuergeräte, die in der Lage sind, Bilder mit hoher Frequenz zu erfassen.
- Die Datenerfassung erzeugt sehr grosse Datensätze, die mit der Kameraauflösung und der Anzahl der gespeicherten Bilder (d. h. Abtastrate) skalieren.
- Die digitale Erfassung ist mit Fernzugriff und -steuerung kompatibel.
- Die geschätzten Dehnungen werden durch Veränderungen im Verschiebungsfeld berechnet. Daher kann das berechnete Dehnungsfeld durch die für das Post-Processing verwendete Konfiguration erheblich beeinflusst werden.

Die Genauigkeit des DBK-Systems hängt von der Art der Kameras und Objektive, der Grösse des Objekts und dem Abstand zum Objekt ab. Im Allgemeinen liegt die Verschiebungsgenauigkeit in der Grössenordnung von Subpixeln (d. h. 1/100 Pixel). Die Auflösung eines 3D-DIC-Systems in der Ebene kann unter Laborbedingungen ca. 5 Millionstel eines Pixels des Sichtfelds erreichen (Auflösung ausserhalb der Ebene ca. 1 Millionstel eines Pixels).

7.39.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Auf dem Markt werden vielseitige, stabile und robuste DBK-Systeme und -Software angeboten, die den Einsatz der DBK-Methode für eine grosse Zahl von Unternehmen und Anwendern zugänglich machen. Die DBK ist eine Technologie, die nur unter guten Umgebungsbedingungen und bei Bedienung durch einen erfahrenen Anwender sehr zuverlässige Ergebnisse liefern kann. 3D-DBK wird im Allgemeinen gegenüber 2D-DBK bevorzugt, da Verschiebungen ausserhalb der Ebene die Messungen in der Ebene erheblich beeinflussen können.

Die Einschränkungen beziehen sich hauptsächlich auf langfristige Installationen:

- Da die Messung auf der Analyse der aufgenommenen Bilder beruht, wirken sich alle Faktoren, die die Qualität der Bilder beeinflussen, auf die Qualität der Messungen aus. Mögliche Einflussfaktoren sind Lichtintensität, Wärmewelle, Abstand zwischen Objekt und DBK-Kamera(s), Qualität des DBK-Musters usw.
- Bei einem grossen Abstand zwischen dem DBK-System und dem Messobjekt kann die Genauigkeit der Methode unzureichend sein. Darüber hinaus kann die Kalibrierung relativ aufwändig sein.
- Die Kameras müssen immer eine klare Sicht ohne Störungen haben. Wetterumschwünge oder andere Faktoren, die die Sicht der Kameras behindern können, können die Qualität der Messungen beeinträchtigen. Dies kann die Verwendung von DBK für Langzeitüberwachungsanwendungen erheblich beeinträchtigen.
- Auch starke Lichtveränderungen beeinflussen die Messung. In der Praxis werden in der Regel künstliche Beleuchtungssysteme eingesetzt.
- Die Genauigkeit wird auch durch die Lufttemperatur zwischen dem Objekt und dem Messsystem sowie durch die Vibrationen der Kamera beeinflusst.

- Mit DBK kann die Dehnung nur in der Tangentialebene einer Oberfläche ermittelt werden, es sei denn, es wird eine volumetrische Messung durchgeführt.

Die Kosten hängen stark von der geforderten Genauigkeit und dem Abstand zu den Messobjekten ab. Ein professionelles DBK-System kostet 30'000 bis 60'000 CHF. Im Preis inbegriffen sind die Hardwarekomponenten wie Kameras und Objektive sowie die Softwarelizenzen. Zusätzliche Kosten müssen für das Speckle-Muster oder die Zielanwendung einkalkuliert werden.

Für 2D-DBK-Anwendungen können handelsübliche Spiegelreflexkameras verwendet werden, die eine hohe Auflösung, aber eine geringere optische Qualität aufweisen. Allerdings muss die berechnete Verschiebungsgenauigkeit mit der geforderten Messgenauigkeit übereinstimmen. Eine erhebliche Kostenreduzierung kann durch den Einsatz von lizenzfreier Software erreicht werden; allerdings muss deren Leistung und Robustheit bewertet werden.

7.39.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu definieren ist der erwartete Zeitrahmen der Messung, die Notwendigkeit von Zielen um die Präzision zu erhöhen, und der Schutz vor Witterung und eventuelle Massnahmen um die direkte Sicht der Kamera auf das Bauwerk zu garantieren.

7.39.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [246] Sutton M.A. et al., (2009) Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications, DOI: 10.1007/978-0-387-78747-3_1
-
- [248] International Digital Image Correlation Society (iDICs) (2018) A Good Practices Guide for Digital Image Correlation, Standardization, Good Practices, and Uncertainty Quantification Committee
-
- [249] Niezrecki C et al., (2020) DIC and Photogrammetry for Structural Dynamic Analysis and High-Speed Testing. In Allemang R., Avitable P. (eds.) Handbook of Experimental Structural Dynamics, Society of Experimental Mechanics.
-
- [250] Winkler J., Hendy C (2017). Improved Structural Health Monitoring of the DLR Warton Road Bridge using Digital Image Correlation. Proceedings of SMAR conference. Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures.
-
- [251] Research Report 0-6950-1CIV (2021) Civil Infrastructure Vision© v1.0: Bridge Calibration User Manual and Validation Manual
-
- [252] Iris Koltsida, Adrienn Tomor, Colin Booth. The use of digital image correlation technique for monitoring masonry arch bridges
-

C2 Akustische Methoden

Tab. 7.40 C2 Akustische Methoden - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Schadenserkenkung mittels akustischer Methoden			
Kurzbeschreibung		Akustische Methoden der zerstörungsfreien Prüfung werden bei Kunstbauten eingesetzt um Schäden zu erkennen und zu lokalisieren, die Tiefe von Betonelementen zu bestimmen und Bewehrungselemente und Vorspannkabel zu lokalisieren.			
Überwachungs-technologie		Akustische Emission	Impulsantwort	Impakt-Echo	Ultraschalltechniken
"ID"		AEM_	IMP_	ECH_	UTS_
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	13 akustisch	13 akustisch	13 akustisch	13 akustisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	5 raumbezogen	4 flächenbezogen	5 raumbezogen	5 raumbezogen
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Wellen	Dynamische Steifigkeit	Wellen	Wellen
	Messungsbereich				0.5-50 MHz
	Auflösung				
	Genauigkeit	20cm (Schadenslokalisierung)	Abweichung: 10-50 %		<10% Abweichung
	Bemerkungen	Kann nur neu-entstehende Schäden erkennen.			
Kunstbauten		3	3	3	3
Naturgefahren		1	0	0	0
Umwelt		2	2	2	2
Einsatzzeitpunkt		N	N	N	N
Entwicklungsstand		●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●

7.40 Akustische Emission

7.40.1 Beschrieb der Technologie

Die Entstehung und Ausbreitung von Rissen und anderen Defekten in Bauteilen setzt Energie frei. Diese Energie stellt eine lokale Quelle von akustischen Wellen dar, welche gemessen werden können Abb. 7.85. Durch Rückrechnungen der gemessenen Wellen, können Informationen über die Zustandsänderung des Bauteils ermittelt werden. Es ist möglich die entstandenen Defekte zu erkennen, zu lokalisieren und zu charakterisieren. Auch können Abschätzung zur Korrosion von Bauteilen gemacht werden. Es ist wichtig anzumerken, dass aufgrund der Funktionsweise der Methode nur neu entstehende oder sich ausbreitende Schäden gemessen werden können, wohingegen bestehende Schäden unerkant bleiben. [253]

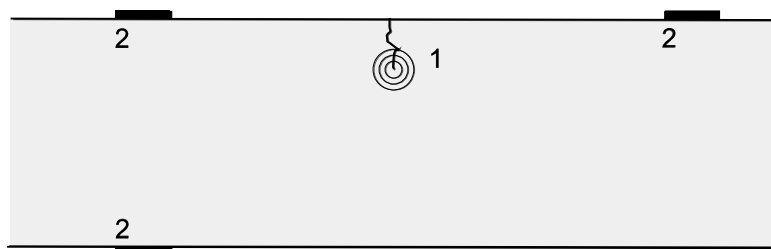


Abb. 7.86 Schematische Darstellung einer Messung von Schallemissionen auf einem Träger: (1) Sich ausbreitender Riss als Schallquelle, (2) Messsensoren

7.40.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Methode findet insbesondere bei kritischen strukturellen Komponenten Anwendung, bei denen lokale Defekte zu erwarten sind. Da Verfahren basierend auf Schallemissionen Energie von neu entstehende und sich ausbreitende Schäden nutzen, eignen sie sich um kontinuierliche Überwachung von Bauteilen. Die Technik lässt sich auf verschiedene Materialien anwenden. Eine, nicht abschliessende, Liste sei hier gegeben [253]:

- Stahl und andere Metalle
- Frischer und gehärteter Beton
- Stahlbeton
- Holz
- Mauerwerk
- Verbundmaterialien
- Fels
- Erdkruste

Ein wichtiger Effekt im Zusammenhang mit Schallemissionen ist der sogenannte Kaiser Effekt [254]. Er besagt, dass es bei moderaten Belastungen kaum neue Quellen für Schallemissionen gibt, so lange der Spannungszustand geringere Spannungen aufweist als die in der bisherigen Belastungsgeschichte des Bauteils, womit das Verfahren von eben dieser Belastungsgeschichte abhängig ist. Diesen Effekt kann man sich auf unterschiedliche Art und Weise zu nutzen machen. So ist es ein Zeichen eines neu aufgetretenen Defekts, wenn es bei Belastung eines Bauteils trotz höherer vorheriger Lasten zu Schallemissionen kommt. Ein solcher neuer Defekt kann zum Beispiel Korrosion in Stahlbetonbauteilen darstellen [253].

In Stahlbetonbauteilen, insbesondere Stahlbetonbalken, kann mit Hilfe von Schallemissionen die potentielle Versagensart bestimmt werden. Durch Bestimmung des Ursprungs der Schallemissionen können Cluster von Mikrorissen erkannt werden. Je nach Lage zeigt der Balken ein Schub- oder ein Biegeversagen. Dies ermöglicht eine frühzeitige Ankündigung des Erreichens des physischen Schubwiderstandes. [253].

Des Weiteren ist es möglich zu ermitteln, wie stark ein Bauteil beschädigt ist. Dafür ist eine wiederholte Belastung des Bauteils notwendig. Je höher die Last bei der Wiederbelastung sein muss um Schallemissionen hervorzurufen und desto schneller Schallemissionen bei Entlastung abklingen, desto besser ist der Zustand des Bauteils.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten von Schallemissionen sind [253]:

- Monitoring von Spanndraht-Brüchen – infolge Spannbetonkorrosion [259]
- Korrosionsmessung in Stahlbeton
- Steifigkeitsermittlung in jungem Beton
- Monitoring von Rissfortpflanzung
- Überwachen von Delamination in Verbundbauteilen

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

- Akustische Emissionen wurde in der Vergangenheit schon verwendet, um Spannungsänderung in grossen Felsinstabilitäten zu detektieren und so einen möglichen Abbruch vorherzusagen.

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Akustische Messungen können lokale Defekte aufdecken, die auf korrosionsbedingte Verschlechterungsprozesse zurückzuführen sind, wie z. B.:

- Alkali-Kieselsäure-Reaktion
- Korrosive Umgebungen

7.40.3 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

Die Schallemissionen werden an der Oberfläche der Bauteile gemessen. Grundsätzlich kommen alle Messgeräte, welche Dehnungen in ausreichend kurzen Intervallen messen können in Frage. Häufig werden piezoelektrische Sensoren hierfür eingesetzt. Im herkömmlichen Verfahren werden die Messsignale kabelgebunden übertragen und verstärkt. Aufgrund der aufwendigen Installation und der hohen Anfälligkeit dieses Aufbaus, wurden kabellose Verfahren entwickelt [253].

Die folgende Aufstellung soll einen Überblick über mögliche Grössen, welche mit Hilfe von Schallemissionen ermittelt werden können, geben. Da tatsächlich nur die Dehnungen über die Zeit von einzelnen Sensoren gemessen werden, müssen die gesuchten Informationen aus den Daten nachbearbeitet werden. Es ist auch möglich weitere Grössen abzuleiten. Welche Grössen abgeleitet werden können, hängt zusätzlich von Ort und Anzahl der Sensoren sowie des gemessenen Frequenzbereichs ab.

- Der Zeitpunkt des Auftretens oder Ausbreitens eines Defekts
- Der Ort eines Defekts
- Die p-Wellengeschwindigkeit im Bauteil
- Charakterisierung eines Defekts (mehrere Emissionen nötig)

Die Genauigkeit der Messungen wird wesentlich von der Anzahl und der Positionierung der Sensoren beeinflusst. Des Weiteren spielt die gemessene Frequenz eine Rolle. Höhere Frequenzen können zu einer besseren Genauigkeit führen, haben aber eine kürzere Reichweite. Ein kritischer Punkt ist die Bestimmung des Zeitpunktes zu welchem die Welle den Sensor erreicht. Dies kann manuell erfolgen oder mit Hilfe von automatischen Kriterien. Bei der Verwendung einer ausreichend grossen Anzahl an Sensoren kann der Fehler des ermittelten Ortes direkt bestimmt werden. Bei einer realen Brücke konnte eine Lokalisierung mit etwa 20 cm Genauigkeit erreicht werden [255].

7.40.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Technologie wird seit mehreren Jahrzehnten entwickelt und ist auch bereits seit mehreren Jahrzehnten an realen Bauwerken genutzt worden. Ein Beispiel hierfür stellt die Moesa Brücke in Roveredo dar, an der schon in den 2000er Jahren Tests durchgeführt wurden [255]. In mehreren Ländern gibt es Normen oder Standards für die Anwendung von Schallemissionsverfahren.

Da Schallemissionen bei irreversiblen Änderungen auftreten, sind diese geeignet neu entstehende oder sich ausbreitende Schäden zu beurteilen. Dies führt dazu, dass Messungen nur in sehr begrenztem Rahmen wiederholt werden können. Ein Problem im Vergleich zu anderen wellenbasierten Methoden ist, dass die gemessenen Signale sehr schwach sind. Es ist daher notwendig Signalverstärker zu benutzen [253].

Die Kosten für Schallemissionsmessungen setzen sich aus drei wesentlichen Komponenten zusammen: (i) die Ausrüstung, die zur Überwachung der Struktur benötigt wird und die von der Grösse der zu überwachenden Bauwerksteile und den verwendeten Messgeräten (zum Beispiel verkabelt oder kabellos) abhängt; (ii) der Bedarf an qualifiziertem Personal zur Interpretation der aufgezeichneten Daten (welche mittels Automatisierung und künstlicher Intelligenz reduziert werden kann); (iii) die Dauer der Überwachung [253]. Externe Anbieter bieten Schallemissionsmessungen im Kostenbereich von 150 CHF pro Stunde an, da diese Technik grösstenteils als Dauerüberwachung genutzt wird ist es meistens günstiger das Messsystem zu kaufen oder leihen.

7.40.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.40.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [253] Grosse, Ohtsu, Aggelis, Shiotani, Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Engineering. Springer Nature, 2021.
-
- [254] Kaiser, Josef Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Geräuschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen. Archiv für das Eisenhüttenwesen
-
- [255] Fricker S. und Vogel, T., Site installation and testing of a continuous acoustic monitoring. Construction and Building Materials, 21:3, 2007, pp. 501-510
-
- [256] Nazarchuk, Zinoviy, Valentyn Skalskyi, und Oleh Serhiyenko. "Acoustic emission." Foundations of Engineering Mechanics (2017).
-
- [257] Ono, Kanji. "Review on structural health evaluation with acoustic emission." Applied Sciences 8.6 (2018): 958.
-
- [258] Gholizadeh, Samira, Z. Leman, und BT Hang Tuah Baharudin. "A review of the application of acoustic emission technique in engineering." Structural Engineering and Mechanics 54.6 (2015): 1075-1095.
-
- [259] Fricker S. and Vogel, T., Detecting wire breaks in a prestressed concrete road bridge with continuous acoustic monitoring, Advances in Bridge Maintenance, Safety Management, and Life-Cycle Performance, CRC Press, ISBN9780429158094, 2006.
-

7.41 Impulsantwort

7.41.1 Beschrieb der Technologie

Bei der Bauwerksuntersuchung mittels Impulsantwort, wird das Bauteil mittels eines Hammers angeregt. Die Antwort des Bauteils wird mittels eines Geophons (Geschwindigkeitsmessgerät) gemessen. Wiederholte Messungen an mehreren Stellen im Bauteil sind notwendig um ein vollständiges Bild zu erhalten. Es lassen sich Rückschlüsse auf Hohlräume, interne Risse und mangelhaften Verbund im Bauteil ziehen.

7.41.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Methode wird vor allem bei flächigen Betonbauteilen genutzt. Es gibt jedoch auch Anwendungen für Bauholz und andere Materialien. Mögliche Anwendungen sind [260], [261]:

- Erkennen von Hohlräumen
- Erkennen von mangelndem Verbund von Bewehrung und Beton aufgrund von Korrosion
- Erkennen interner Risse in dem Bauteil
- Erkennen von unzureichendem Verbund zwischen Asphalt und Beton
- Erkennen unterschiedlicher Betonqualitäten
- Überprüfen von Ankersystemen in Wänden
- Überprüfen von Pfählen

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Ähnlich wie bei der akustischen Emission, kann auch dieser Ansatz lokale Defekte aufdecken, die auf korrosionsbedingte Verschlechterungsprozesse zurückzuführen sind.

7.41.3 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

Für die Messung benötigt man einen Impulshammer, welcher die Spannungen an der Spitze messen kann. Ausserdem benötigt man ein Geophon. Beides ist mit einem Feldcomputer verbunden. Messungen sollten in einem Raster von 15 cm bis 2 m durchgeführt werden [261].

Eine wichtige Messgrösse stellt die sogenannte «Mobility» dar. Um diese zu errechnen werden die gemessenen Geschwindigkeiten der Schwingungen des Bauteils mittels Fast Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Ebenfalls transformiert wird der Impuls des Hammers. Der Bruch dieser beiden Grössen (Geschwindigkeit/Impuls) ergibt die Mobility. Diese bildet (bei intaktem Beton) vereinfacht eine bilineare Kurve. Sie steigt für die Frequenzen bis zu 100 Hz linear an. Im Bereich zwischen 100 und 800 Hz lässt sich dann eine horizontale gemittelte Mobility darstellen. Die Steigung bis 100 Hz entspricht der Inversen der dynamischen Steifigkeit (siehe Abb. 7.87) [260].

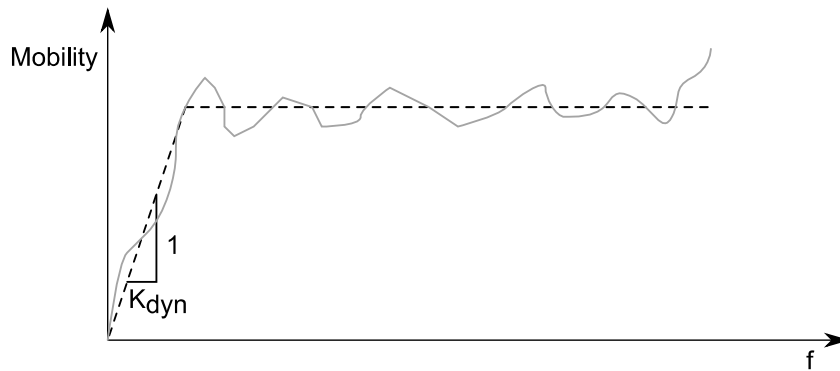


Abb. 7.87 Typische Kurve der Mobility. f beschreibt die Frequenz (angepasst aus [260])

Die Genauigkeit der Methode hängt im Wesentlichen mit drei Faktoren zusammen. Zum einen ist die Form des Bauteils relevant. Eine gleichmässig dicke Platte ist hierfür am geeignetsten. Ebenfalls einen grossen Einfluss hat die Vorbereitung der zu messenden Betonoberfläche. Je weniger Imperfektionen in dieser sind, desto besser für die Messungen. Der dritte Faktor ist das Equipment und das Testteam. Bei geschultem Personal mit kalibriertem Gerät können Messungen mit weniger als 10% Variabilität wiederholt werden. In anderen Fällen können die Messwerte um bis zu 50% abweichen [261].

7.41.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Technologie wird seit dem Ende des 20. Jahrhunderts in Nordamerika angewendet und internationale Standards sind bereits etabliert. Für sehr dicke Strukturen, ist die Analyse mittels Impulsantwort schwierig. Gemäss [264] können je nach Baugrund Pfähle einer Länge bis 20-mal Pfahldurchmesser (Böden mit hoher Reibung) bzw. 40-mal D (weiche Böden mit geringer Reibung) geprüft werden. Generell gilt eine Begrenzung bei $L/D \leq 30$. Die Kosten für eine Messausrüstung bewegen sich in etwa im fünfstelligen Bereich [262]. Innerhalb eines Tages können etwa 500 bis 1000 Messungen durchgeführt werden [261], [263]. Wenn Impulsantworten als Dienstleistungen beansprucht werden, kann man mit ungefähr 200-250 CHF pro Stunde rechnen.

7.41.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu definieren ist die Auflösung des Punktrasters der auszuführenden Messungen.

7.41.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [260] Allen G Davis, The nondestructive impulse response test in North America: 1985–2001, NDT & E International, Volume 36, Issue 4, 2003, Pages 185-193,
- [261] Dodge, Ethan C., und Salvador VILLALOBOS Chapa. "Impulse response testing—analysis of relative test data." International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) September. 2015.
- [262] https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/08/Impulse-Response_Final_-1.pdf
- [263] https://www.olsonengineering.com/wp-content/uploads/techbrief_slabIR_web.pdf
- [264] A. Steiger: Integritätsprüfung von Pfählen und deren Interpretation, Referat der Tagung Bau und Wissen: Pfahlfundationen - Bemessung, Prüfung und Ausführung vom 14.01.2010 in Burgdorf

7.42 Impakt-Echo

7.42.1 Beschrieb der Technologie

Das Impakt-Echo-Verfahren besitzt einen ähnlichen Aufbau wie das Verfahren mittels Impulsantwort in Kapitel 7.41. Zum Messen wird der Prüfkörper mit einer kleinen Stahlkugel angeregt, sodass sich Wellen ausbreiten. Ein auf der Bauteiloberfläche befindlicher Sensor misst die sich ausbreitenden und reflektierten Wellen. Mittels Impakt-Echo können primär die Dicke von Betonbauteilen sowie Hohlräume und Ablösungen erkannt werden.

7.42.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Das Impakt-Echo-Verfahren wurde in den 1980er Jahren in den USA entwickelt [265]. Es dient dazu Messungen an Beton durchzuführen. Die folgenden Eigenschaften können damit ermittelt werden [266]:

- Schichtdicken
- Delaminationen
- Hohlstellen und Fehlstellen

Mit Abstrichen können auch

- Verpressfehler in Hüllrohren und
- Materialeigenschaften, wie das E-Modul ermittelt werden [266].

Als Anwendungsbeispiel ermöglicht es diese Methode, die Beschädigungen von Spannkabel-Hüllrohren durch Anbohren mit hoher Präzision zu erkennen, sofern der Zugang zur Ankerplatte gewährleistet ist. Eine relevante Anwendung in der Schweiz betrifft die Zustandserfassung des (alten) Bünztal-Viadukts (Pfeilerkopf-Balken), Anfang der 90er Jahre.

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Ähnlich wie bei den weiteren Methoden, die auf akustischen Signalen beruhen, kann dieser Ansatz lokale Defekte aufdecken, die auf korrosionsbedingte Verschlechterungsprozesse zurückzuführen sind.

7.42.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Der Aufprall der Kugel erzeugt Schallwellen in dem Bauteil. Die Druckwellen werden in dem Bauteil wiederholt reflektiert, wobei die Wellen an der Oberfläche gemessen werden können (Abb. 7.88). Wird das gemessene Signal mittels Fourier Transformation in den Frequenzbereich transformiert ergibt sich eine dominante Frequenz. Aus dieser Frequenz lässt sich die Dicke des Bauteils bestimmen. Auch bei Ablösungen, Hohlräumen, Rissen oder dem Übergang zwischen zwei Schichten kommt es zu Reflexionen, welche im Frequenzspektrum erkennbar sind. Aus diesen lässt sich dann wiederum erkennen, ob und wie tief ein Defekt liegt. Bei Messungen über ein regelmässiges Raster lassen sich so die Dimensionen des Defekts abschätzen [267].

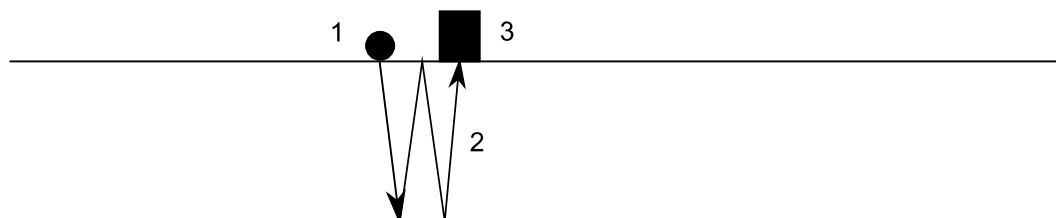


Abb. 7.88 Funktionsprinzip des Impact-Echo-Verfahren auf einem Träger: 1 Stahlkugel, 2 reflektierte Wellen, 3 Sensor

Die Genauigkeit des Verfahrens hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst ist an dieser Stelle anzumerken, dass die reflektierenden Druckwellen eine Vereinfachung darstellen. Tatsächlich treten bei der Ausbreitung von Wellen in Platten auch Rayleigh- und Lamb-

Wellen auf. Ihre Einflüsse müssen entweder durch Kalibrierung auf der Grundlage von Referenzmessungen oder durch die Verwendung komplexerer Theorien zur Wellenausbreitung berücksichtigt werden [266]. Zusätzlich basiert die Berechnung der Dicke auf der Wellengeschwindigkeit von Beton. Diese beträgt ungefähr 4000 m/s, ist jedoch von der Zusammensetzung des Betons abhängig.

7.42.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Methode wurde in den 1980er Jahren entwickelt und ist seither vielfach angewendet worden. Eine heute übliche Praxis ist die Verwendung von luftgekoppelten Sensoren (Mikrofonen). Diese haben den Vorteil, dass eine raue Oberfläche einen geringeren Einfluss auf den Sensor hat. Zusätzlich ermöglichen Luftgekoppelte Sensoren ein schnelleres Versetzen des Messaufbaus, was mehrere Messungen ermöglicht. Nachteilig an luftgekoppelten Sensoren ist der Einfluss von der Umgebung, welche von den Mikrofonen ebenfalls aufgezeichnet wird [266].

Computerprogramme ermöglichen eine schnelle erste Auswertung, insbesondere bei einfachen Geometrien. Umfangreiche Möglichkeiten zur Visualisierung und automatisierten Datenanalyse, auch mittels künstlicher Intelligenz, stehen zur Verfügung [268].

Einen wichtigen Einfluss auf die Messungen haben Reflexionen von Bauteilgrenzen und mehreren Materialschichten. Diese erschweren die Interpretation der Ergebnisse [266]. Ähnliche Effekte treten auch bei Sprunghaften Änderungen der Dicke auf. Letzteres kann mittels eines dichten Rasters an Messpunkten aufgefangen werden [267]. Grenzen der Anwendung liegen auch bei der Detektion von Fehlern bei der Verpressung von Hüllrohren.

Impuls-Echo Systeme sind kommerziell erhältlich und nicht sehr teuer. Marktübliche Preise für Anwendungen, inklusive Sensorleihe und Arbeitsstunden, liegen im Bereich von 200-250 CHF pro Stunde.

7.42.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu definieren ist die Auflösung des Punktrasters der auszuführenden Messungen.

7.42.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[265] Carino, Nicholas J. "The impact-echo method: an overview." Structures 2001: A Structural Engineering Odyssey (2001): 1-18.

[266] Algeron, Daniel, Feistkorn, Sascha, und Scherrer, Michael. «Zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen mit dem Impact-Echo-Verfahren»

[267] Colla, C., et al. "Automated Impact-Echo: 2-and 3-D imaging of concrete elements." NDT. Net 4.5 (1999).

[268] Algernon, D., Feistkorn, S., Kicherer, P., Rössler, L., Scherrer, M. "Echolyss – Entwicklung eines Impact-Echo-Systems für Scanning, Analyse und Machine Learning" ZfP-Zeitung 172, 34-41 (2020).

7.43 Ultraschalltechniken

7.43.1 Beschrieb der Technologie

Die Ultraschallmethode fällt in den Bereich der zerstörungsfreien Bewertungsverfahren für Bauwerke und hilft bei der Erkennung von volumetrischen Fehlern unter der Oberfläche. Die Ausbreitung von Ultraschallwellen in der zu prüfenden Struktur wird zur Erkennung von Fehlern, die nicht an der sichtbaren Oberfläche sind, genutzt.

Mit einem Funktionsgenerator wird eine Impulswelle definiert, und piezoelektrische Wandler erzeugen die Ultraschallwellen, die sich im Material ausbreiten. Bei Strukturelementen ohne Fehler unter der Oberfläche breitet sich die Welle durch die Unterstruktur aus und prallt von der gegenüberliegenden Oberfläche auf einen anderen oder denselben piezoelektrischen Wandler zurück, der das zurückgeprallte Wellensignal misst (Echomethode). Das Signal zeigt die Reflexion an der hinteren Oberfläche an und deutet somit darauf hin, dass in der zu prüfenden Struktur keine Schadstellen oder Einbauteile vorhanden sind [271]. Liegt eine Schadstelle, wie zum Beispiel ein Riss oder ein Kiesnest, im gemessenen Element vor, so wird das vom piezoelektrischen Wandler empfangene Signal verzerrt.

Impakt-Echo- (wie im Kapitel 7.42 beschrieben) und Ultraschallmethoden beruhen beide auf der Ausbreitung elastischer Wellen, wobei sich die Frequenzbereiche unterscheiden. Der Frequenzbereich beim Impakt-Echo, welcher die Ausbreitung von elastischen Wellen nach einem mechanischen Impakt analysiert, reicht dabei von 2 kHz bis 40 kHz. Die Impulswellen, welche von einem Ultraschallsender erzeugt werden, haben einen Frequenzbereich von 0,1 bis 15 MHz (2 bis 5 MHz bei Stahl) [269], wobei die Frequenz bei Dickenmessungen von Brückenelementen manchmal bis zu 50 MHz betragen kann.

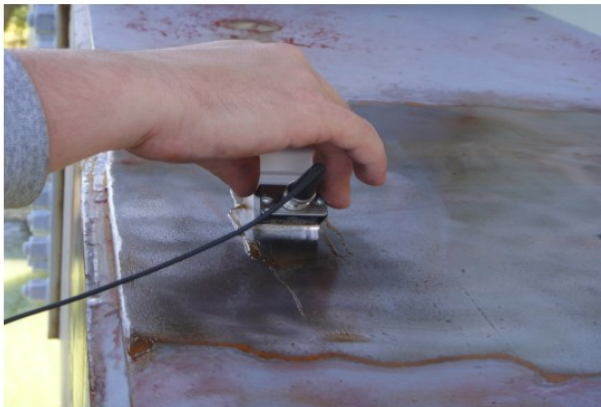


Abb. 7.89 Scherwellen-Ultraschallprüfverfahren einer Stumpfschweissung mit einem piezoelektrischen Wandler auf der I-275 Carroll Cropper Bridge in den Vereinigten Staaten von Amerika. Die Abbildung zeigt die Oberflächenvorbereitung des zu prüfenden Brückenunterbaus, die Platzierung des piezoelektrischen Wandlers mit viskoser Flüssigkeit für einen effektiven Kontakt und den kritischen Bereich der Schweissnaht der zu prüfenden Brücke [270].

7.43.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Ultraschallprüfverfahren (UP) werden heute zur Identifizierung von Fehlern generell auf praktisch alle Bauteile angewendet. Zwei Methoden werden am häufigsten angewendet: Impulsmessung (der Sensor wird auf der anderen Seite der Komponente als der Sender platziert) und Echomessung. Die heutigen Geräte sind extrem kompakt und benötigen nicht mehr standardmässig das Auftragen von Gel auf den Oberflächen.

Eine typische Anwendung auf einer Brücke verläuft in folgenden Schritten: zunächst wird die Oberfläche des Brückenunterbaus (z. B. Stahl [274]) gereinigt und poliert, um Farbe, Schutt, Staub, Schlacke und Schweißspritzer zu entfernen. Dann wird eine viskose Flüssigkeit wie z. B. dickflüssiges Öl verwendet, um die Aufnehmer mit der

Brückenoberfläche zu verbinden. Die piezoelektrischen Wandler erzeugen mechanische Impulse in Form von Druck- oder Scherwellen. Eine Illustration des UP-Arbeitsprinzips wird in Abb. 7.90 gezeigt. Diese Impulse werden in die atomare Anordnung des Strukturelements zur Wellenausbreitung induziert. Kompressionswellen versetzen die Partikel des Strukturmaterials in die gleiche Richtung wie die Wellenausbreitung, während die Ausbreitung von Scherwellen zu Partikelschwingungen in die senkrechte Richtung führt. Aufnehmer, die Druckwellen erzeugen, sind Geradstrahl-Aufnehmer, während Aufnehmer, die Scherwellen erzeugen, als Schrägstrahl-Aufnehmer bezeichnet werden. Die erfassten und verarbeiteten internen Reflexionssignale geben schliesslich Aufschluss über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Fehlern unter der Oberfläche von Brückenelementen.

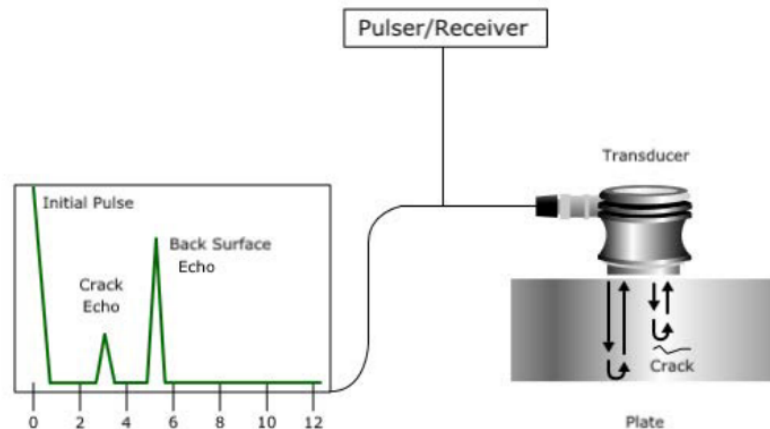


Abb. 7.90 Illustration des Ultraschallprüfverfahrens mit Signalausgangsmerkmalen zur Unterscheidung von Riss und Rückflächenecho [270]

Moderne Anwendungen von Ultraschallverfahren beruhen auf einer Anordnung von mehreren Wandlern in einem Gerät, welche abwechselnd als Wandler und Empfänger funktionieren. Diese Technik wird häufig als Ultraschall-Tomographie bezeichnet [276] [277]. In Kombination mit künstlicher Intelligenz ermöglicht dies schnelle und dreidimensionale Messresultate.

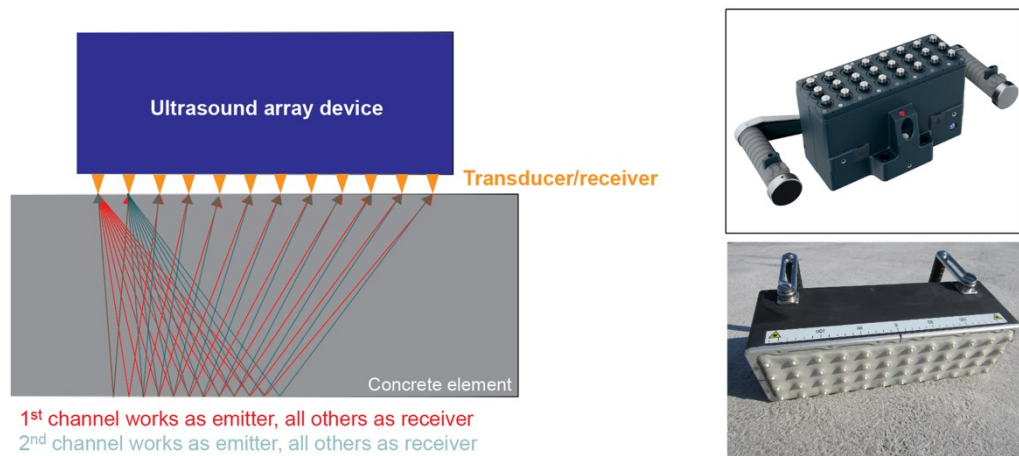


Abb. 7.91 Die Aneinanderreihung mehrerer Ultraschallwandler in einem Gerät ermöglicht schnelle und präzise Messresultate. Diese Anwendung wird auch Ultraschalltomographie genannt. Die Funktionsweise (links) beruht auf dem „Pitch-and-catch“ Prinzip [278], in welchem die Ultraschallwandler abwechselnd Impulse senden und empfangen. Es gibt mehrere kommerzielle Sensoren (Bildquellen: <https://www.screeningeagle.com/> und <https://acs-international.com/product/a1040-mira/>), die auf diesem Prinzip beruhen (rechts).

Nachfolgend sind einige konkrete Anwendungsbeispiele aufgeführt, in denen die Ultraschallprüfung bei Kunstbauten eingesetzt werden kann:

- Erkennung von volumetrischen Fehlern wie Schlackeneinschlüsse in Stahlbrücken
- Geometriebestimmung (flächiges Bestimmen Belagsstärken), Ortung von Bewehrung-Werkleitungen-Spannkabeln-Hohlkörpern
- Prüfung von Schweissnähten
- Prüfung der Homogenität von Beton
- Aufspüren von Oberflächenschäden.
- Erkennen von Bauteilen wie Bolzen, Beschlägen usw.
- Prüfung des Zustands der Träger- und Plattenstruktur.
- Erkennen und Überwachen der Ausbreitung von Schäden aufgrund von Korrosionsausbreitung von der Oberfläche in die Brückenelement hinein.
- Erkennen von Korrosion und Drahttrissen in Schrägseilen, Spannkabeln und Litzen über eine Länge von 2 m nach der Verankerung (siehe Abb. 7.92).
- Bestimmen der Tiefe eines Betonelements.

Die Ultraschallmethoden sind schneller als Röntgenmethoden, bleiben jedoch zeitaufwändig, da die Oberflächenvorbereitung arbeitsintensiv ist. Das Vorhandensein jeglicher Form von Lamellen in der Brückenkonstruktion erschwert die Anwendung der Ultraschallmethode. Bei entsprechender Berücksichtigung können jedoch auch Hindernisse wie Rippenplatten oder Plattenbalken berücksichtigt werden. Die Methode erfordert erhebliche Fähigkeiten und Kenntnisse, um die Prüfung korrekt durchzuführen und die erhaltenen Ergebnisse zu interpretieren. Des Weiteren ist die Methode kostenintensiv.

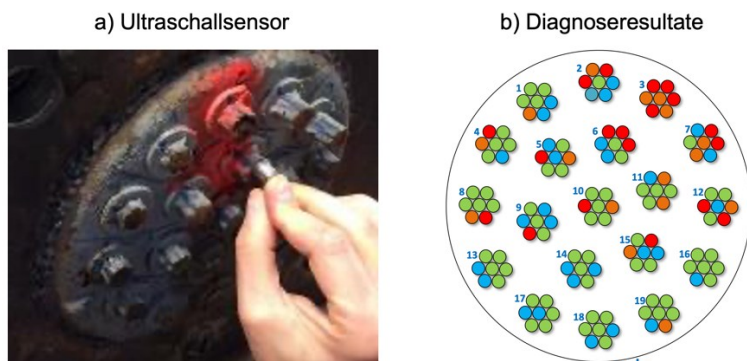


Abb. 7.92 Anwendung des Ultraschallverfahrens zur Bestimmung des Zustands der Litzen über eine Länge von 2 m nach dem Ankerkopf. Die Methode unterscheidet kein Drahtbruch (Grün), Drahtbruch (Rot) und Defekt (Orange) und ist vor allem zuverlässig intakte und korrodierte Drähte zu unterscheiden. Die Methode ermöglicht es, 2-3 Ankerköpfe pro Tag zu untersuchen. (Quelle: [273])

7.43.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die empfangenen Ultraschallwellenimpulse, die von der Oberfläche der Rückseite oder von der unterirdischen Fehlstelle reflektiert werden, werden in elektrische Signale umgewandelt. Das digitale Datenerfassungssystem (National Instruments, Analogue Discovery oder Diligent System, OROS usw.) sammelt die analogen Signale des piezoelektrischen Wandlers und zeigt oder speichert das Signal. Die Schwankungen in den Signalen würden auf Fehler unter der Oberfläche hinweisen. Die Messdaten können entweder in analoger oder digitaler Form vorliegen, je nach Übertragungstechnologie und endgültiger Verwendung der erfassten Daten. Für Inspektionsroutinen vor Ort ist auch eine internetbasierte Datenübertragung zur Speicherung in der Cloud möglich. Das gemessene Signal zeigt die Veränderungen in der Untergrundumgebung an, und das reflektierte Signal liefert ein eindeutiges Signal im Vergleich zur Reflexion von internen Fehlstellen.

Rezente Fortschritte bei Sensoren und Aktoren auf piezoelektrischer Basis haben die Verwendung von piezoelektrischen Wandlern für UP erhöht, und auch die Datenmenge nimmt proportional zu. Die Zusammenführung von Daten aus UP mit physikalischen Rechenmodellen verbessert die Möglichkeiten der Überwachung des Strukturzustands [275]. Statistische Methoden und Algorithmen des maschinellen Lernens unterstützen die Visualisierung von Schäden und die Erkennung von Fehlern.

7.43.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Ultraschallprüfung von Ingenieurbauwerken ist weit entwickelt und verfügt über gut beschriebene Methoden zur Validierung und Verifizierung von Ergebnissen und Daten. Sowohl der dauerhafte Einsatz von piezoelektrischen Wandlern für ferngesteuerte Messungen als auch gelegentliche Prüfungen in regelmässigen Abständen sind möglich. Diese Flexibilität ermöglicht eine angemessene Planung der Wartung und Reparatur von Brückenkomponenten. Oberflächenbehandlungen, Oberflächenveränderungen oder Umwelteinflüsse auf die Brückenkomponenten müssen angemessen bewertet und berücksichtigt werden, um die Prüfdaten nutzen zu können. Eine Ankopplung an die Brückenkomponente ist erforderlich. Probleme können entstehen, wenn ein Bauteil nicht aus einem einzigen Material besteht, zum Beispiel aufgrund eines Estrichs [271].

Die verschiedenen Arten von piezoelektrischen Aufnehmern, die heute zur Verfügung stehen, bieten eine breite Palette von Optionen für den Bereich der Frequenzerzeugung und die Amplitude der für die UP erzeugten Impulswellen. Der Messbereich kann je nach Amplitude und Frequenz der von den piezoelektrischen Wandlern erzeugten Impulswellen zwischen einigen Millimetern und einigen Metern variieren. Die Kosten für einen piezoelektrischen Aufnehmer variieren im Allgemeinen zwischen 10 und 1'000 CHF, abhängig von der Empfindlichkeit des Aufnehmers, dem Frequenzbereich und der Leistung bei verschiedenen Prüfmaterialien. Die Kosten für Datenerfassungssysteme beginnen bei 1'000 CHF für ein Aufnehmersystem mit mindestens vier Messkanälen. Die Datenanalyse oder -interpretation kann mit eigener oder Open-Source-Software durchgeführt werden, gemäss den Anforderungen an die Nachbearbeitung. Kommerziell erhältliche Produkte umschliessen heutzutage auch Produkte mit mehreren Aufnehmern und integrierter Datenaufnahme und -aufbereitung, welche ungefähr 20'000 CHF kosten.

Ultraschallanwendungen werden auch von spezialisierten Ingenieurbüros angeboten und kosten 200 bis 250 CHF pro Stunde.

7.43.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu erwähnen ist die Oberfläche des zu untersuchenden Bauwerksteils und die Notwendigkeit einer Oberflächenpräparation.

Ähnlich wie bei anderen ZfP-Methoden, sollten die ausführenden Personen durch eine nach EN ISO/IEC 17024 anerkannte Stelle als Experten zertifiziert sein.

7.43.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [269] Y. Sang, Y. Pan, W. Ying, Y. Yang, Assessment of mechanical performance and ice content of concrete at low temperature using impact-echo method, Construction and Building Materials. (2022) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128286>
- [270] T. Hopwood, C. Gof, J. Fairchild, S. Palle, Nondestructive Evaluation of Steel Bridges : Methods and Applications, Rep. No.KTC-16-26/SPR14-485-1F. (2016) 1–95. <https://doi.org/10.13023/KTC.RR.2016.26>.
- [271] Mühlán, B., Schiegg, Y., Hasenstab, A., Algernon, D. and Feistkorn, S., Zerstörungsfreie Prüfmethode (ZfP): Bedürfnisse der Praxis und Stand der Technik. Forschungsprojekt AGB 2012/016. Bundesamt für Strassen (2017).
- [272] S.S. Khedmatgozar Dolati, N. Caluk, A. Mehrabi, S.S. Khedmatgozar Dolati, Non-Destructive Testing Applications for Steel Bridges, Appl. Sci. 11 (2021) 9757. <https://doi.org/10.3390/app11209757>.
- [273] C. Ostrowski, S. Joye, A. Audouin-Dubreuil. PIARC case study: pont de l'île de Ré, France (2023).

-
- [274] A. Elbeheri, T. Zayed, Non-destructive evaluation techniques for steel bridges inspection, 2016 Transp. Assoc. Canada's Conf. Exhib. TAC 2016. (2016).
-
- [275] S. Mohamadi, D. Lattanzi, H. Azari, Fusion and Visualization of Bridge Deck Nondestructive Evaluation Data via Machine Learning, *Front. Mater.* 7 (2020) 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.576918>.
-
- [276] H. Kwon,; C. Joh, W.J. Chin. 3D Internal Visualization of Concrete Structure Using Multifaceted Data for Ultrasonic Array Pulse-Echo Tomography. *Sensors* 2021, 21, 6681.
-
- [277] A. Lorenzi, K. Stein, L.A. Reginatto, L.C. Pinto da Silva Filho. Concrete structures monitoring using ultrasonic tests. *Revista de la construcción*, 19(3), pp.246-257 (2020).
-
- [278] W.A. Zatar, H.D. Nguyen, H.M. Nghiem. Ultrasonic pitch and catch technique for non-destructive testing of reinforced concrete slabs. *J Infrastruct Preserv Resil* 1, 12 (2020).
-

C3 Radar / Elektromagnetische Methoden

Tab. 7.41 C3 Radar / Elektromagnetische Methoden – Übersicht – Teil 1

Titel Einsatzzweck		Charakteristische Radar/Elektromagnetische Technologien			
Kurzbeschreibung		Zu dieser Kategorie gehören Methoden, die auf der Grundlage von Radar/elektromagnetischen Messprinzipien arbeiten.			
Überwachungs-technologie	"ID"	Radiografie/ Gammagrafie	Computer- tomographie	Georadar	Wirbelstrom- prüfung
Typisierung	a. Messprinzip	1 direkt	1 direkt	1 direkt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	3 elektromagnetisch	3 elektromagnetisch	3 elektromagnetisch	3 elektromagnetisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	3 tiefenbezogen	5 raumbezogen	5 raumbezogen	4 flächenbezogen
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Strahlungsdurchlässigkeit	Strahlungsdurchlässigkeit		Impedanz
	Messungsbereich	Dicke von 10-600 mm	Winkel bis 180 Grad		
	Auflösung	25 µm	< 0.3 mm	1cm	0.05-0.5mm
	Genauigkeit				
	Bemerkungen				
Kunstbauten		3	2	3	2
Naturgefahren		0	0	2	0
Umwelt		2	2	2	2
Einsatzzeitpunkt		N	N	N	N
Entwicklungsstand		🕒	🕒	🕒	🕒
Kosten	initial / einmalig	🕒	🕒	🕒	🕒
	wiederkehrend	🕒	🕒	🕒	🕒

Tab. 7.40 C3 Radar / Elektromagnetische Methoden – Übersicht – Teil 2

Titel Einsatzzweck		Charakteristische Radar/Elektromagnetische Technologien			
Kurzbeschreibung		Zu dieser Kategorie gehören Methoden, die auf der Grundlage von Radar/elektromagnetischen Messprinzipien arbeiten.			
Überwachungs-technologie	"ID"	Magnetische Streufeld-methode	Widerstands-messverfahren	Potentialfeld-messung	Thermografie
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt	2 indirekt
	b. Datenerfassung	3 elektromagnetisch	3 elektromagnetisch	3 elektromagnetisch	3 elektromagnetisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	4 flächenbezogen	4 flächenbezogen	1 punktuell	4 flächenbezogen
	e. Raumbezug				
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei	3 zerstörungsfrei
Messgrößen	Größen	Magnetfluss	Elektrischer Widerstand	elektrisches Potential	Wärmeübertragungsrate
	Messungsbereich				<10cm Tiefe
	Auflösung				
	Genauigkeit	Centimeterbereich			erkennt Defekte von 5x5cm
	Bemerkungen	Nur ferromagn. Elemente		Durch Feuchte beeinflusst	
Kunstbauten		2	2	2	2
Naturgefahren		0	0	0	0
Umwelt		2	2	2	2
Einsatzzeitpunkt		N	N	N	N
Entwicklungsstand		●	●	●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●	●	●
	wiederkehrend	●	●	●	●

7.44 Radiografie / Gammaografie

7.44.1 Beschrieb der Technologie

Die radiographische Prüfung (mit Röntgen- oder Gammastrahlung) ist eine Methode der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP), bei der das ganze Volumen eines Prüfkörpers untersucht wird. Bei der Radiographie werden klassischerweise Röntgenstrahlen eingesetzt, um ein Röntgenbild einer Probe zu erstellen (siehe Abb. 7.93). Neuere Anwendungen nutzen Gammastrahlen, eine besonders durchdringende elektromagnetische Strahlung. Die radiografische Prüfung zeigt Veränderungen in der Materialdicke und -dicke an, z.B. Poren, Risse und Korrosion.

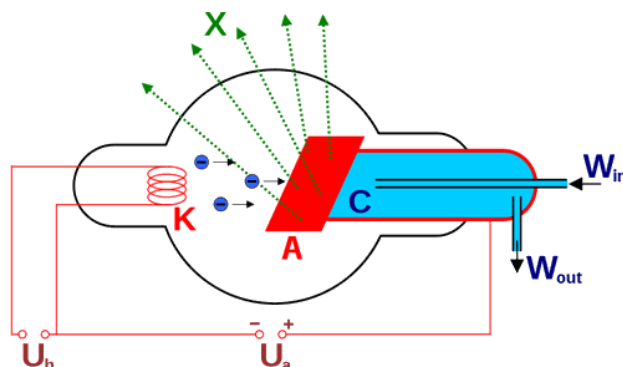


Abb. 7.93 Schematische Darstellung einer wassergekühlten Röntgenröhre für Durchstrahlungsprüfungen. Abbildung wiederverwendet aus [281]

Die Radiografie eignet sich vorrangig für die Prüfung von Schweißnähten, die von beiden Seiten zugänglich sind (siehe Abb. 7.94). Bei Rohren, sowie zur Erkennung von inneren Fehlern in Gussteilen und zur Überprüfung von Fehlkonstruktionen in Baugruppen, werden auch Doppelwand-Signalbildtechniken (Doppelfilmtechnik) verwendet. Obwohl es sich um

eine langsame und teure ZfP-Methode handelt, ermöglicht die Radiographie eine zuverlässige Erkennung von Porosität, Einschlüssen, Rissen und Hohlräumen im Inneren von Schweissnähten.

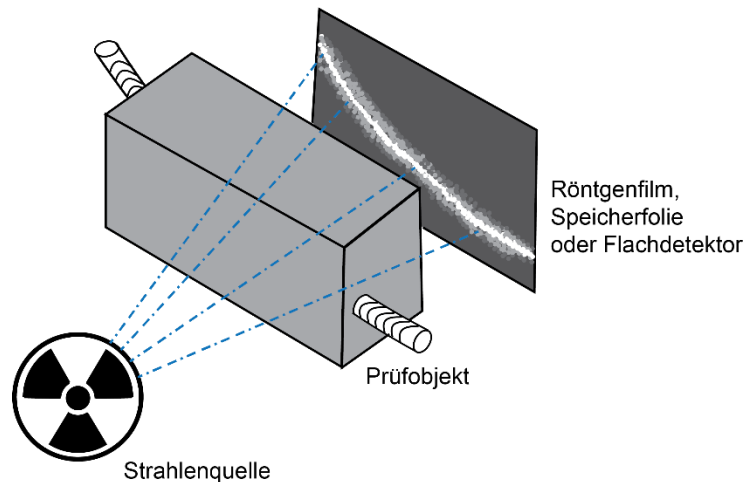


Abb. 7.94 Schematische Darstellung der Durchleuchtung eines Bauwerkselements

Bei der Gammagrafie werden Gammastrahlen zur Durchstrahlungsprüfung von Bauwerksteilen eingesetzt. Dieses Prüfverfahren ist sehr zuverlässig und oftmals mobiler als die Anwendung mit Röntgenstrahlung. Die Gammagrafie ermöglicht es die Qualität der Injektion von im Stahlbeton eingebetteten Vorspannkabeln zu überprüfen. Die Gammastrahlen (zum Beispiel aus Cobalt60, Selen75 oder Iridium192) durchdringen dabei grosse Betontiefen (bis zu 30 cm mit tragbaren Geräten und bis zu 60 cm mit schweren Geräten) und erlauben die Kontrolle der Verpressungsqualität von eingebetteten Vorspannkabeln, mit Kunststoff- und Wellblechhüllen, und die Detektion von gerissenen Vorspannlitzen.

Die radiografischen Methoden beruhen auf demselben Prinzip wie die medizinische Radiographie in einem Krankenhaus. Ein Stück Röntgenfilm oder Speicherfolie wird auf der abgewandten Seite des zu untersuchenden Elements angebracht, und die Strahlung wird dann von einer Seite des Prüfkörpers auf die abgewandte Seite übertragen, auf der sich der Röntgenfilm befindet. Der Röntgenfilm detektiert die Strahlung und bildet die verschiedenen Strahlungsmengen ab, die über die gesamte Oberfläche des Films aufgenommen werden und gibt so die innere Struktur des Prüfkörpers wieder.

Unregelmässigkeiten im Material beeinträchtigen die Strahlungsmenge, die der Film in dieser bestimmten Ebene des Materials empfängt. Bereiche des Objekts, deren Dicke durch Diskontinuitäten, wie Porosität oder Risse, verändert wurde, erscheinen als dunkle Umrisse auf dem Film. Einschlüsse mit geringer Dichte, wie z. B. Schlacke, erscheinen als dunkle Bereiche auf dem Film, während Einschlüsse mit hoher Dichte, wie z. B. Wolfram, als helle Bereiche erscheinen. Qualifizierte Prüfer können die resultierenden Bilder interpretieren und den Ort und die Art des Defekts im Bauwerksteil bestimmen. Die Durchstrahlungsprüfung kann bei den meisten Materialien und Produktformen eingesetzt werden, z. B. bei Schweissnähten, Gussteilen, Verbundwerkstoffen, Vorspannkabeln. Die Durchstrahlungsprüfung liefert eine dauerhafte Aufzeichnung in Form eines Röntgenbildes und liefert ein hochempfindliches Bild der inneren Struktur des Materials.

7.44.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

- Erkennung von Schweissnahtfehlern in Stahlbrücken, wie Risse, Porositäten und Hinterschneidungen.
- Überwachen der Korrosionstiefe von Stahlbauteilen und Brückenkabeln.
- Schadenserkenkung an Spannbetondrähnen und ungefüllten Mantelrohren. Mit Gammastrahlen kann die Injektionsqualität von in Stahlbeton eingebetteten Vorspannkabeln überprüft werden (siehe Abb. 7.95).
- Berechnung des Korrosionsabfalls in Spannbetondrähnen.

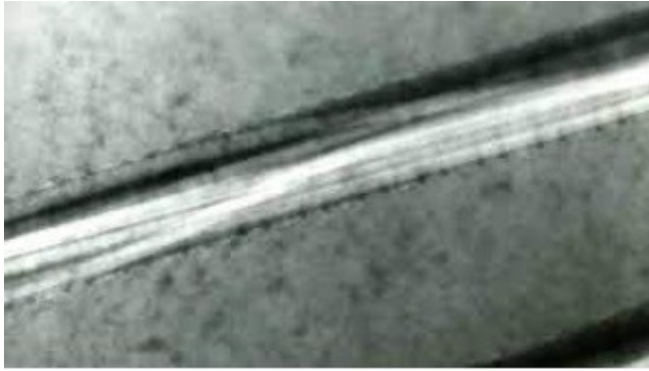


Abb. 7.95 Einzelne Spanndrähte in einem schlecht verfüllten Vorspannkabel (Quelle: [282])

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Wie im Fall von akustischen Messungen erleichtert diese Technologie die Entdeckung von lokalen Defekten, die auf korrosionsbedingte Verschlechterungsprozesse zurückzuführen sind, wie z. B.:

- Alkali-Kieselsäure-Reaktion
- Korrosive Umgebungen

7.44.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Röntgenprüfung ist für Materialien mit einer maximalen Dicke von 50 mm und die Gammastrahlenprüfung für Schweißnähte mit einer Dicke von 10 bis 120 mm möglich. Bei der Anwendung zur zerstörungsfreien Prüfung des Zustands von eingebetteten Vorspannkabeln kann die Gammastrahlung Elemente von bis zu 600mm durchleuchten.

Die Methode ist völlig zerstörungsfrei und eine Oberflächenvorbereitung des Prüfstücks ist in der Regel nicht erforderlich. Die Strahlungsquelle ist entweder eine Röntgenröhre oder ein Pellet aus radioaktivem Material, das Gammastrahlung aussendet. Röntgengeräte werden in der Regel durch die elektrische Spannung an der Röntgenröhre beschrieben: also 300 kV Röntgenstrahlung. Je höher die Spannung, desto grösser ist die Durchschlagskraft der Strahlung; industrielle Röntgengeräte reichen von etwa 20 kV bis 20 MV, und mit den leistungsstärksten Geräten kann man bis zu 500 mm Stahl durchleuchten. Die Auflösung der Bilder hängt vom Durchmesser der Strahlenquellen ab, der typischerweise im Bereich von 1 bis 4 mm Durchmesser liegt und eine grundlegende räumliche Auflösung von 25 µm erreicht.

7.44.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Diese Überwachungstechnologie wurde in der Vergangenheit als sehr vielversprechend eingestuft, zeigten jedoch schnell zahlreiche Nachteile (u.a. die Notwendigkeit der Evakuierung des Geländes), was sie für den Einsatz ausserhalb abgeschirmter Labore unpraktisch macht. Zu den relevanten praktischen Einschränkungen gehören:

- Die Ausrüstung kann sperrig und schwer sein.
- Der Zugang zum Prüfbereich muss kontrolliert werden, und der Zugang kann zu beiden Seiten des Prüfobjekts erforderlich sein.
- Die Ausrüstung ist relativ teuer und kann kritische Fehler nicht immer erkennen.
- Der Inspektionsprozess ist zeitaufwändig, und die Ergebnisse müssen von einem erfahrenen Benutzer interpretiert werden.
- Die Inspektion ist potenziell gesundheitsgefährdend, weshalb äusserste Vorsicht benötigt wird.

7.44.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu erwähnen sind die Anforderungen an die Strahlensicherheit und die Dauer der zu erwartenden Sperrung des Bauwerks. Zusätzlich können Anforderungen an die

Auflösung gestellt werden. Die Dicke des zu durchleuchtenden Bauwerksteils sollte angegeben werden, um die passende Strahlenquelle zu definieren.

7.44.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[279] <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn324/idn324.htm>

[280] <https://www.intechopen.com/chapters/64545>

[281] <https://s4sscienceforstudents.wordpress.com/category/radiation/>

[282] <https://www.cerema.fr/fr/activites/services/gammaographie-visualiser-interieur-du-beton-precontraint>

7.45 Computertomographie

7.45.1 Beschrieb der Technologie

Radiografische Prüfverfahren sind ein wesentlicher Bestandteil der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) bestehender Strukturen, die bei der Überwachung des Strukturzustands (SHM) eingesetzt werden. Insbesondere die Röntgen-Computertomographie (CT) hat in den letzten zehn Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, eine Entwicklung, die in erster Linie auf die jüngsten Errungenschaften bei der Reduzierung der Aufnahmezeit, die zunehmende Verfügbarkeit von Röntgenstrahlen und die erhebliche Verbesserung der räumlichen Auflösung zurückzuführen ist [283]. Daher gilt sie bereits als etablierte ZfP-Methode, die in einer Vielzahl von Fallstudien eingesetzt wird, z. B. bei der Untersuchung von Betonbrückenpfeilern [284], der Erkennung von Zug- oder Druckversagen in Verbundwerkstoffen [285], der Bewertung von Fertigungsprozessen [286] oder sogar zur quantitativen Bewertung von Wabenbildung (Vorhandensein von Hohlräumen) und Korrosion in Beton [287].

Der Röntgen-CT-Ansatz beruht auf der Rekonstruktion einer Reihe von Röntgenbildern einer zu untersuchenden Struktur, die unter verschiedenen Projektionswinkeln aufgenommen wurden, wobei der Kontrast in den abgebildeten Bildern die unterschiedlichen Abschwächungsgrade der jeweiligen Röntgenstrahlen beim Durchgang durch das Objekt widerspiegelt [286]. Dieser Ansatz eignet sich hervorragend für die Untersuchung von dreidimensionalen Schädigungsphänomenen oder Effekten, bei denen die Entwicklung und Akkumulation von kritischen Schadensmerkmalen von Interesse sind. Mit dieser Technik lassen sich einzigartige Einblicke in die Phänomene gewinnen, denen eine Struktur und ihr(e) Material(e) unterliegen. So werden beispielsweise zeitabhängige Studien durch die wiederholte Aufnahme von dreidimensionalen Röntgen-CT-3D-Bildern im Zeitraffer ermöglicht, um Informationen über die Degradation oder Schadensakkumulation während des Betriebs zu gewinnen [288]. Darüber hinaus könnten hochpräzise dreidimensionale Inspektionen, bei denen mehrere Röntgen-CT-Scanner gleichzeitig zum Einsatz kommen, Informationen über verschiedene Materiallängenbereiche liefern (von einem Bauteil bis hin zu einer einzelnen Faser oder einem Stahlstab) [289]. Röntgen-CT-Systeme haben auch bewiesen, dass sie die Erfassung von Prozessen sowohl in einer In-situ-Umgebung als auch in Echtzeit ermöglichen [285].

Physikalisch gesehen werden die Röntgenstrahlen beim Durchgang durch ein Objekt mit zunehmender Ordnungszahl des jeweiligen Materials immer stärker abgeschwächt. Der Grad der Abschwächung wird durch den linearen Koeffizienten μ charakterisiert, eine Eigenschaft, die mit der für jedes Experiment charakteristischen Röntgenenergie zusammenhängt. Gleichzeitig bestimmt das Beer-Lambert-Gesetz die nach der Wechselwirkung erhaltene Strahlungsintensität auf der Grundlage von $I = I_0 e^{-\mu L}$, wobei I und I_0 die transmittierte bzw. die einfallende Strahlung bezeichnen und L die Weglänge ist, die die Röntgenstrahlung im Material durchläuft.

7.45.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Röntgen-CT ist besonders nützlich für die Erkennung von Strukturmerkmalen. Durch Scannen von zweidimensionalen Schnitten oder segmentierten und gerenderten dreidimensionalen Bildern können mit dem CT-Verfahren interessante Merkmale lokalisiert und quantifiziert werden. Neben dem im vorigen Abschnitt beschriebenen Aufnahmeprozess erfordert die Umsetzung der Röntgen-CT-Bilder in quantitative Informationen geeignete Bildverarbeitungstechniken (z. B. Filterung) und eine weitere Segmentierung. Unter Segmentierung versteht man die Einteilung von Pixeln in Gruppen, oft auf der Grundlage ihrer Graustufenintensität. Im Gegenzug können Aufgaben der Morphologiequantifizierung, des Volumenanteils oder der Konnektivität von Phasenprozessen durchgeführt werden. Da es sich bei der Segmentierung jedoch um ein ungenaues Verfahren handelt, werden bei der Darstellung der Ergebnisse aus Gründen der Robustheit in der Regel auch unsegmentierte Ansichten einbezogen. Derzeit findet dieser Ansatz noch recht wenig Anwendung, vor allem in Forschungsprojekten (z. B. Feststellung des Verschmutzungsgrads vor-nach HDW-Reinigung bei offenporigen Asphalten anhand von Bohrkernen).

7.45.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Ursprünglich aus medizinischen Anwendungen in den frühen 1970er Jahren stammend, wurde die Röntgen-CT in verschiedenen Bereichen eingesetzt, darunter in der Materialwissenschaft und der Überwachung von Strukturen [288].

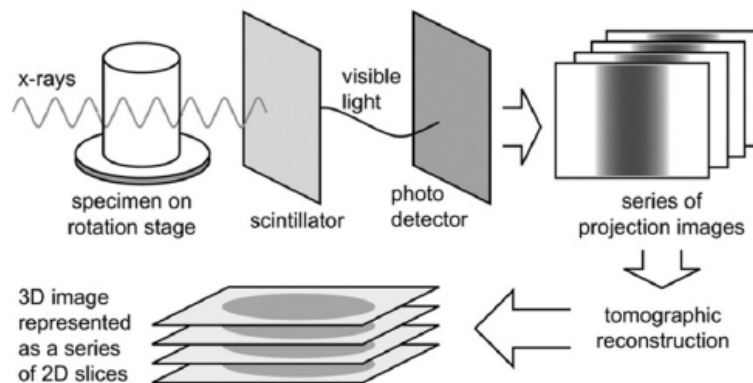


Abb. 7.96 Schematische Darstellung des Aufnahmeprozesses von Röntgenprojektionen. Adaptiert von [290]

Zur ordnungsgemässen Durchführung der Inspektion muss das zu untersuchende Objekt auf einer rotierenden Plattform platziert werden, oder die Strahlungsquelle und der Detektor werden in Bezug auf das Objekt gedreht. Auf diese Weise können mehrere Röntgenbilder (Projektionen) mit unterschiedlichen Winkeln über 180 (oder sogar 360) Grad aufgenommen werden. Die Breite des Detektors n , ausgedrückt in Pixeln, bestimmt die optimale Anzahl der für ein genaues CT-Bild erforderlichen Projektionen ($\sim \pi n/2$). Ein dreidimensionales Objekt wird rechnerisch rekonstruiert, indem die aufgenommenen zweidimensionalen Schichten kombiniert werden. Was die Kapazität betrifft, so können moderne Geräte in der Regel ca. 2000 x 2000 Pixel aufnehmen, was etwa 3000 erforderlichen Projektionen entspricht. Eine schematische Darstellung des entsprechenden Prozesses findet sich in Abb. 7.96 dargestellt, wo jeder Erfassungsschritt im Detail beschrieben wird. Dieses Verfahren wird in der Regel an Materialkernen angewandt, die aus der betreffenden Struktur entnommen wurden. Abb. 7.97 zeigt eine Skizze einer möglichen Vor-Ort-Inspektion des gesamten Systems mit einer Röntgen-CT-Ausrüstung. Abb. 7.98 veranschaulicht die erhaltenen Rekonstruktionen eines Beispiels für ein progressives Zugversagen.

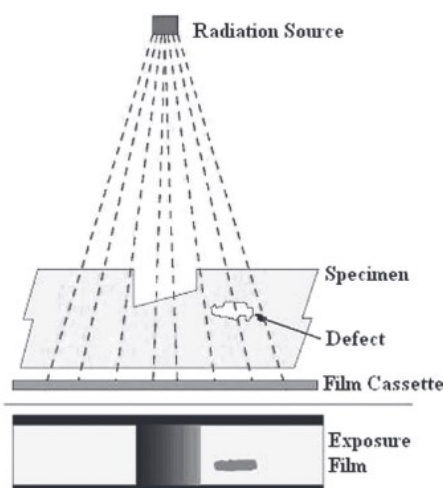


Abb. 7.97 Beispielschema für eine Durchstrahlungsprüfung. Adaptiert von [289]

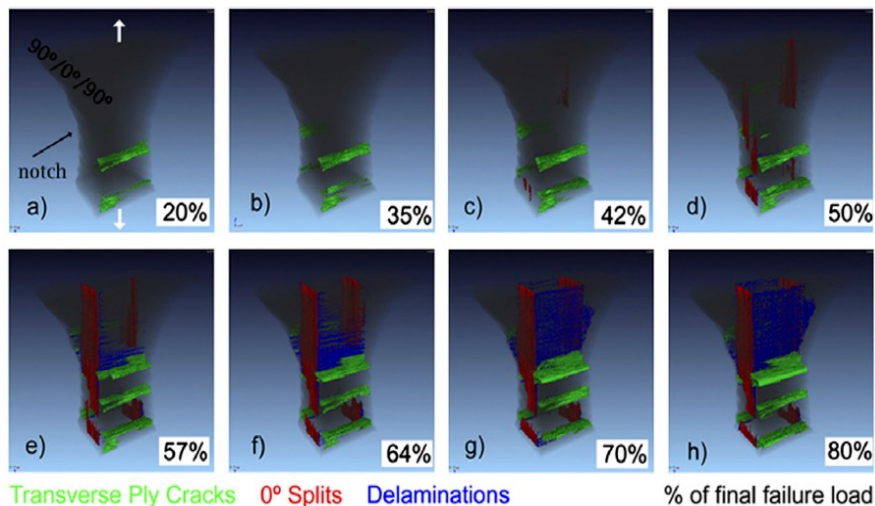


Abb. 7.98 Fortschreitende Schadensakkumulation im CFK-Verbundwerkstoff unter Zugbelastung. Adaptiert von [291]

Die folgenden Parameter bestimmen die Effizienz und Genauigkeit des gesamten Prozesses:

- **Räumliche Auflösung:** Diese bestimmt die minimale Grösse des beobachtbaren Merkmals. In der Regel gehen Rekonstruktionsalgorithmen davon aus, dass sich das untersuchte Objekt vollständig innerhalb des Sichtfelds (FOV) befindet. Daher ist die Grösse des Objekts auch direkt an die Auflösung gekoppelt.
- **Phasenkontrast:** Aufgrund möglicher Unterschiede im linearen Abschwächungskoeffizienten entsteht bei der Absorption ein Kontrast zwischen verschiedenen Komponenten. Folglich ist der Kontrast bei der Untersuchung von Materialien mit geringer Dichte und niedriger Ordnungszahl gering, und der Nachweis gelingt selbst bei hoher Auflösung nicht. Um dieses Problem der Nachweisbarkeit zu überwinden, wurde die Phasenkontrast-Bildgebung und -Anfärbung beschädigter Proben vorgeschlagen [285].
- **Färbung:** Die Verwendung von Kontrastmitteln und Medien, die Elemente mit hoher Ordnungszahl enthalten, um gewünschte Merkmale «einzufärben», so dass sie Röntgenstrahlen mit erhöhter Intensität abschwächen können.
- **Bildgebung im unbelasteten/belasteten Zustand:** Die Erkennbarkeit von lokalisierten Merkmalen kann auch durch die Bildgebung mit einer angemessenen Anregung erhöht werden, die die Merkmalsdauer maximiert. Im Falle von Rissen würde eine solche Anregung zum Beispiel Belastungen bedeuten, die die Risse offenhalten.
- **Die Begriffe CT und microCT werden oft synonym verwendet, aber im Allgemeinen verwenden beide Techniken Röntgenstrahlung.** CT wird typischerweise verwendet, wenn Scans mit medizinischen Scannern mit einer Auflösung von etwa 0,5 mm durchgeführt werden, während microCT sich typischerweise auf Kegelstrahlscanner im Labor bezieht, bei denen die Auflösung von 0,3 mm bis hinunter zu typischerweise 0,005 mm (5 µm) oder weniger variiert [292].

7.45.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Trotz der beträchtlichen Zunahme der Anwendungskapazitäten von Röntgen-CTs gibt es weiterhin Herausforderungen. Diese werden ausführlich in [286] diskutiert, ebenso wie mögliche Strategien zur Überwindung der verbleibenden Probleme bei praktischen Anwendungen. Eine der Haupteinschränkungen besteht darin, dass relativ kleine Proben (im Millimeterbereich) mit hoher Auflösung untersucht und bewertet werden müssen. Potenzielle Verbesserungen bei den Detektoren könnten jedoch dazu beitragen, das verfügbare Sichtfeld zu erweitern, so dass Röntgen-CT-Experimente mit mehreren Skalen ohne Einbussen bei der Auflösung möglich sind. Die Kosten für Röntgen-CT-Scanner belaufen sich auf mehrere hunderttausend CHF. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die erforderliche Ausrüstung zu mieten oder einen externen Experten zu beauftragen, der die Bildgebung an Proben der Struktur vornimmt. Die Kosten für beide Alternativen hängen

von der gewünschten Auflösung, der Verfügbarkeit der Geräte und der Anzahl der Proben ab. Sie bewegen sich in der Regel in der Grössenordnung von mehreren tausend CHF für eine einzige Anwendung.

7.45.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.45.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

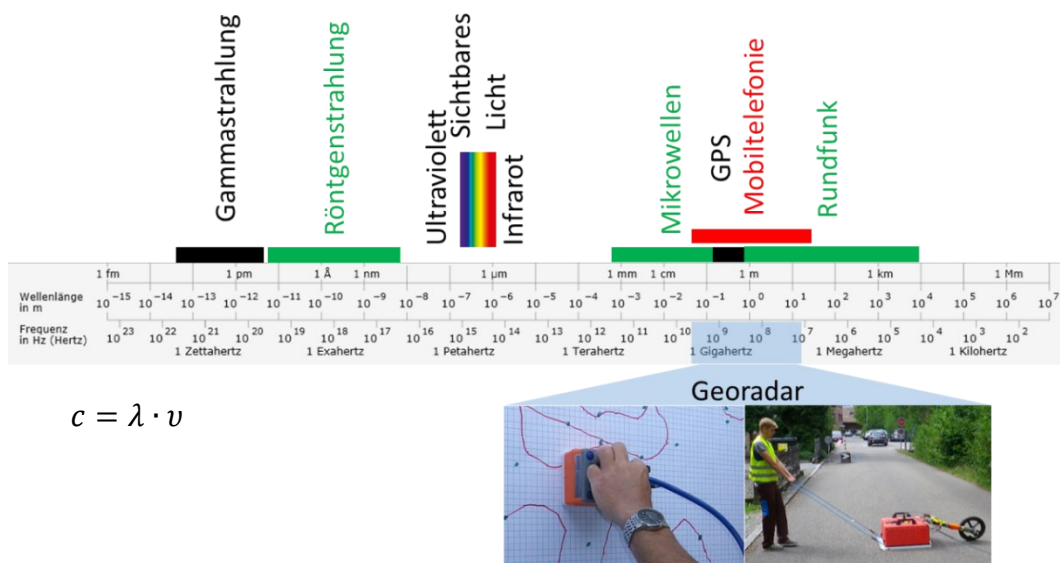
- [283] Rehman, S. K. (2016). Nondestructive test methods for concrete bridges: A review. *Construction and building materials* 107, 58-86.
 - [284] Liu, L. a. (2005). Seismic non-destructive testing on a reinforced concrete bridge column using tomographic imaging techniques. *Journal of geophysics and engineering* 2, 23-31.
 - [285] Ying Wang, S. C. (2018). Computed Tomography of Composites. *Comprehensive Composite Materials II*, Volume 7, 101-118.
 - [286] Garcea, S. C. (2018). X-ray computed tomography of polymer composites. *Composites Science and Technology* 156, 305-319.
 - [287] Farhangdoust, S. a. (2019). Health monitoring of closure joints in accelerated bridge construction: a review of non-destructive testing application. *Journal of Advanced Concrete Technology* 17, no. 7, 381-404.
 - [288] Márquez, F. P. (2020). A review of non-destructive testing on wind turbines blades. *Renewable Energy* 161, 998-1010.
 - [289] Mustafa Taskin, U. C. (2011). X-Ray Tests of AISI 430 and 304 Stainless Steels and AISI 1010 Low Carbon Steel Welded by CO2 Laser beam welding. *Radiography* 53, 741-747.
 - [290] Eric N.Landis, D. T. (2010). X-ray microtomography. *Materials Characterization*, 1305-1316.
 - [291] A.E. Scott, M. M. (2011). In situ fibre fracture measurement in carbon–epoxy laminates using high resolution computed tomography. *Composites Science and Technology* 71 (12), 1471.
 - [292] Anton du Plessis, William P. Boshoff, A review of X-ray computed tomography of concrete and asphalt construction materials, *Construction and Building Materials*, 199, 2019, pp. 637-651,
-

7.46 Georadar (Ground-Penetrating-Radar)

7.46.1 Beschrieb der Technologie

Georadar, auch als Bodenradar, Ground-Penetrating-Radar (GPR) oder einfach Radar (Radio Detection and Ranging) bezeichnet, ist ein elektromagnetisches Untersuchungsverfahren. Ein elektromagnetischer Impuls wird von einer Antenne abgestrahlt, an Inhomogenitäten reflektiert und via Antenne wieder registriert. Aus der Laufzeit des reflektierten Signals können, ähnlich wie beim akustischen Echo, Rückschlüsse auf die Existenz und den Abstand eines allfälligen Reflektors gezogen werden.

Georadare arbeiten mit elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich von einigen Megahertz bis einigen Gigahertz. Wie in Abb. 7.99 dargestellt, wird dieser Bereich auch von anderen Technologien intensiv genutzt. Aus diesem Grunde müssen Geräte und Nutzer Regeln einhalten, um Störungen anderer Nutzer zu vermeiden. Elektromagnetische Wellen breiten sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) aus. In gängigen Baustoffen wie Asphalt oder Beton beträgt die Geschwindigkeit etwa ein Drittel der Lichtgeschwindigkeit. Die Beziehung zwischen Wellenlänge und Frequenz lautet $c = \lambda \cdot \nu$ (Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich Wellenlänge mal Frequenz). Dies bedeutet, dass tiefere Frequenzen grössere Wellenlängen aufweisen und somit (ähnlich wie in der Akustik) grössere Antennen (Instrumente) benötigen. Die Abb. 7.99 zeigt eine hochfrequente (2,6 GHz, links) und eine tieffrequente (200 MHz, rechts) Antenne.



$$c = \lambda \cdot \nu$$

Abb. 7.99 Elektromagnetisches Spektrum

7.46.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Georadare sind äusserst vielseitig einsetzbar. Einige Beispiele aus dem Bereich der Verkehrsinfrastruktur:

- Dicke von Asphaltbelägen und Betonstrukturen
- Ortung von Bewehrung, Durchstanzbewehrung, Vorspannung und anderen Einbauteilen
- Lokalisierung von chloridbelasteten Bereichen auf Brückenplatten.
- Das Verfahren kann für eine Erstbeurteilung des Korrosionsrisikos in Stahlbetonbauten, für Laboruntersuchungen und für die Planung von Massnahmen im Rahmen des kathodischen Korrosionsschutzes nützlich sein.
- Ortung von Hohlräumen und Verbundstörungen
- Leitungsortung

Georadare können grundsätzlich im Transmissions- und Reflexionsmodus betrieben werden. Da der Reflexionsmodus die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Methode ist, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf diesen. Ein elektromagnetischer Impuls wird, wie in Abb. 7.100 dargestellt, von einem Sender abgestrahlt. Ein Teil der Energie wird bereits an der Oberfläche des Untersuchungsobjektes reflektiert, ein anderer Teil dringt in das Objekt ein und wird, beispielsweise an der Unterseite des Objekts, reflektiert. Die reflektierte Energie wird mittels Empfänger aufgezeichnet und zur Speicherung, Darstellung oder Weiterverarbeitung an die Zentraleinheit übertragen. Eine Messung an einem Punkt liefert also eine Zeitreihe mit variierender Signalstärke, welche als Scan bezeichnet wird (Abb. 7.100). Da das Verfahren aus der Geophysik kommt, wo meist der Untergrund untersucht wird, wird das Signal meist mit der Zeitachse nach unten und vielfach in Graustufen codiert dargestellt (Abb. 7.85). Die Zeitachse hat eine Länge von lediglich einigen Nanosekunden, da sich das Signal mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

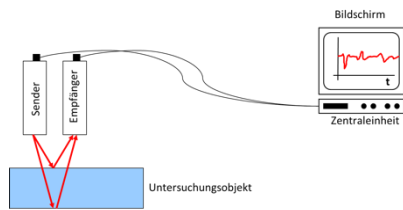


Abb. 7.100 Reflexionsmodus

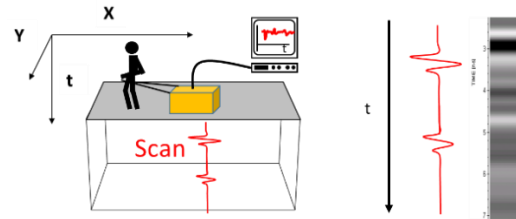


Abb. 7.85 Prinzip Scan

Da die Aufzeichnung eines Scans lediglich einige Nanosekunden in Anspruch nimmt, handelt es sich um ein sehr schnelles Verfahren, bei dem pro Zeiteinheit eine grosse Zahl von Messungen (Scans) möglich sind. Somit werden Messungen meist nicht an einzelnen Punkten, sondern entlang von Linien durchgeführt. Das Prinzip zeigt die Abb. 7.102 (links). Die Antenne wird nun entlang einer Linie (grüner Pfeil) bewegt und es entsteht eine quasi-kontinuierliche Aufzeichnung, welche als Radargramm bezeichnet wird. Ein Beispiel zeigt die Abb. 7.102 (rechts). Die horizontale Achse weist nun in die X-Richtung, die vertikale ist nach wie vor eine Zeitachse, welche via $d = c \cdot t/2$ in eine Tiefe umgerechnet werden kann.

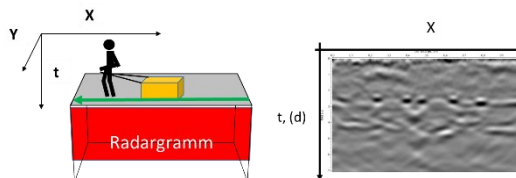


Abb. 7.102 Prinzip Radargramm

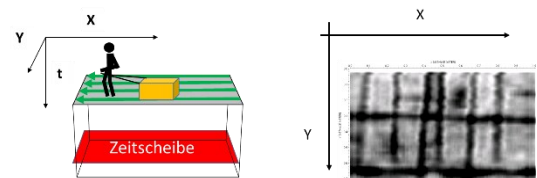


Abb. 7.103 Prinzip Zeitscheibe

Werden Daten entlang vieler paralleler Linien aufgezeichnet (Abb. 7.103, links), eine Oberfläche also flächendeckend gemessen, so kann ein Datenkubus konstruiert werden, aus welchem anschliessend sogenannte Zeitscheiben dargestellt werden können (Abb. 7.103, rechts). Da bei konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit eine bestimmte Zeit auch einer bestimmten Tiefe entspricht, können solche Darstellungen sehr nützlich sein. Das Beispiel in Abb. 7.103 (rechts) zeigt den Bewehrungsverlauf in einem Fussboden, die Achsen X und Y entsprechen nun den horizontalen Dimensionen.

Schnittstellen mit Naturgefahren (Kapitel 2.1.3)

GPR wird zur Detektion von Hohlräumen innerhalb von Rutschungen und Absenkungen eingesetzt. Damit können potenziell instabile Fels- und Rutschkörper abgegrenzt werden. Je nach geologischen Bedingungen können auch Schichtgrenzen und Gleithorizonte detektiert werden.

Fallbeispiel - Vorspannkabel in einem Brückenträger

Auf der Vorderseite eines Trägers einer ehemaligen Autobahnbrücke (Abb. 7.104) wurden flächig Georadardaten aufgezeichnet und verarbeitet. Eine Zeitscheibe aus dem Datensatz

zeigt die Abb. 7.105. Deutlich sind zwei Vorspannkabel und ein Entlüftungsröhrchen erkennbar.

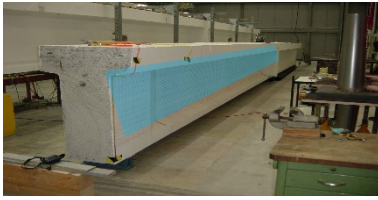


Abb. 7.104 Träger einer Autobahnbrücke mit Untersuchungsfläche (blau)

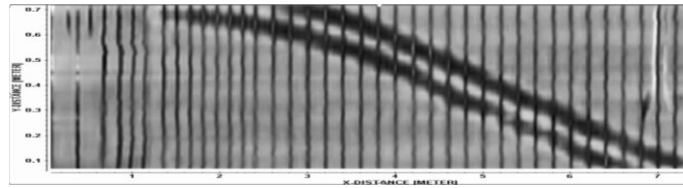


Abb. 7.105 Zeitscheibe mit zwei Vorspannkabeln und Entlüftungsröhrchen

Fallbeispiel - Chloridbelastung auf einer Brücke

Im Jahr 2011 wurden beide Richtungsfahrbahnen des Viaduc de Colombier (Länge etwa 400 m, A5, Neuenburgersee) mittels Georadars untersucht und die Ergebnisse dem ASTRA übergeben. Zwei Jahre später wurde der Asphalt auf einer Richtungsfahrbahn entfernt, um Potentialmessungen durchzuführen (Durchführung TFB). Somit stehen mit zwei verschiedenen Methoden erzielte Ergebnisse für einen direkten Vergleich zur Verfügung.

Die Abb. 7.106 und die Abb. 7.107 zeigen die Ergebnisse der Georadaruntersuchung und der Potentialmessung. Beim Georadar wurde die Dämpfung des Signals durch eine durch Chloride und Feuchtigkeit verursachte erhöhte elektrische Leitfähigkeit analysiert und in der Abbildung rot dargestellt. Bei der Potentialmessung wurden Bereiche mit stark negativem Potential dargestellt. Die beiden Ergebnisse sind zwar nicht identisch, was aufgrund der verschiedenen physikalischen Grundlagen auch erstaunlich wäre, sie weisen aber erhebliche Ähnlichkeiten, wie beispielsweise eine Konzentration der Problemzonen am östlichen Rand der Fahrbahn, auf.

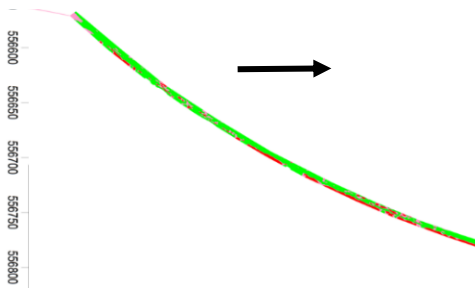


Abb. 7.106 Chloridbelastete Zonen gemäss Georadar

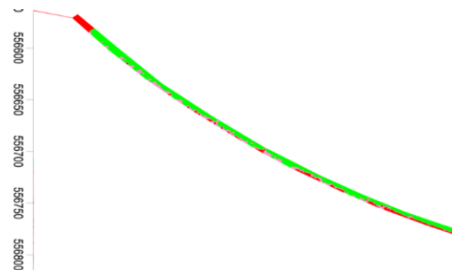


Abb. 7.107 Zonen mit erhöhtem Korrosionspotential gemäss Potentialmessung

Fallbeispiel - Asphaltbelag auf einer Brücke

Um die Belagsdicke auf einer Brücke zu bestimmen wurde diese mit einem mobilen Radarsystem entlang mehrerer Messlinien befahren. Als Ergebnis wurde eine Karte mit Belagsdicken erstellt (Abb. 7.108).

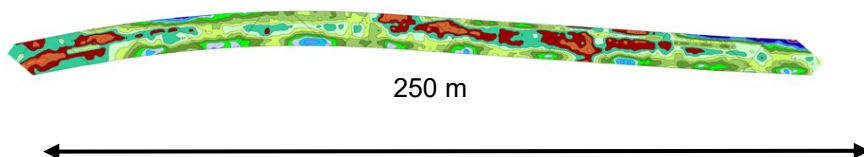


Abb. 7.108 Dicke des Asphaltbelags auf einer Brücke

7.46.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Eine geeignete Datenverarbeitung kann die Qualität der aufgezeichneten Daten stark verbessern und ist vielfach eine Voraussetzung für ein sinnvolles Untersuchungsergebnis. Ziele der Datenverarbeitung sind beispielsweise eine Verbesserung des Verhältnisses zwischen Signal und Rauschen, die Eliminierung von Störsignalen oder die Replatzierung von seitlich reflektierter Energie. Bei einfachen Untersuchungen kann eine Datenverarbeitung direkt während der Messung erfolgen, bei anspruchsvollen Fragestellungen wird die Datenverarbeitung im Anschluss an die Messung vorgenommen.

Die Interpretation ordnet in den Datensätzen erkennbaren Reflexionen gesuchte Strukturen zu. Die Differenzierung zwischen verschiedenen Einbauteilen (z.B. Leitungen oder Bewehrungen) und Schadstellen ist nicht immer zweifelsfrei möglich und erfordert in jedem Fall die Auswertung von erfahrenen Fachleuten [271]. Hierfür ist Zusatzinformation, z. B. durch Bohrungen immer nützlich und häufig erforderlich. Ein Beispiel zeigt die Abb. 7.109, wo den erkennbaren Reflexionen in der Zeitscheibe Bewehrungsstäbe zugeordnet werden.

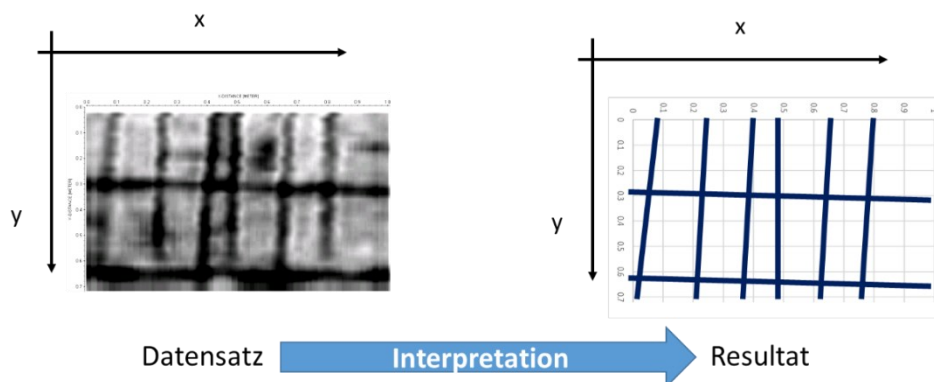


Abb. 7.109 Interpretation führt vom Datensatz zum gewünschten Resultat

Heute gibt es eine Vielzahl von Geräten für verschiedene Anwendungen und Nutzer auf dem Markt. Für Bewehrungsortung existieren Geräte in der Grösse eines Bügeleisens (Abb. 7.110), welche in hohem Masse automatisiert sind und auch von Nicht-Spezialisten bedient werden können. Geräte bei denen die Aufzeichnungsparameter frei wählbar sind eröffnen vielfältige Möglichkeiten und benötigen vertieftes Fachwissen sowie ein Verständnis der physikalischen Grundlagen. Die Abb. 7.111 zeigt eine Anordnung zur Leitungssuche unter einer Asphaltstrasse. Das mobile Georadarsystem der OST zeigt die Abb. 7.112. Hiermit können Messungen ohne Verkehrsbehinderung mit Geschwindigkeiten von bis zu 80 km/h vorgenommen werden.

In der Regel beträgt die Auflösung (dünnste erkennbare Schicht) und Genauigkeit bestenfalls 1 cm.



Abb. 7.110 Georadar Gerät zur Bewehrungssuche



Abb. 7.111 System zur Untersuchung des Untergrundes



Abb. 7.112 Mobiles Georadarsystem der OST

7.46.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Array Systeme verfügen über eine Vielzahl nebeneinander angeordneter Antennen und eignen sich für flächige Untersuchungen. Ein Beispiel für eine Messkampagne auf einer Brücke zeigt die Abb. 7.113. Die Vor- und Nachteile von Arrays liegen auf der Hand, einerseits können mehrere Messlinien gleichzeitig aufgezeichnet werden, andererseits ist ein derartiges Gerät wenig handlich, kaum universell einsetzbar und die Qualität der Daten entspricht nicht immer der einer Einzelantenne.

Georadargeräte sind kommerziell erhältlich und kosten je nach Genauigkeit und Grösse zwischen 5'000 bis 200'000 CHF. Automatisierte Auswertesoftwareanwendungen sind oft kommerziell über Lizenzvereinbarungen verfügbar und werden in der Praxis eingesetzt. Die Kosten bei Messungen als Dienstleistung variieren je nach den Anforderungen. Eine charakteristische Kostenschätzung liegt bei 200 bis 250 CHF pro Mess-Stunde oder, unter den untenstehenden Annahmen bei 7500 CHF für die Anwendung an einer Brücke.

Annahmen: Anfahrt 1h pro Weg • Autobahnbrücke 50 m lang und 20 m breit • Messung mit mobilem System (Abbildung 1), 20 Linien im Abstand von einem Meter • Auswertung nur für Belagsdicke • Erstellung eines Plans mit Belagsdicken aber kein ausführlicher Untersuchungsbericht

Anwendungsgrenzen: Die Eindringtiefe ist je nach Antennenfrequenz, Material und Feuchte begrenzt. Die Fähigkeit zur Materialidentifikation ist begrenzt (Mehrdeutigkeit). Die Fähigkeit zur Schichterkennung ist begrenzt (dünne Ablösungen, Asphaltsschichten).



Abb. 7.113 Array System zur Untersuchung einer Brückenplatte

7.46.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Insbesondere sind die Anforderungen an die notwendige Untersuchungstiefe, die notwendige Genauigkeit bei der Schichtmächtigkeit und der Bewehrung, die erforderliche Auflösung in der Ausschreibung zu definieren, da er die grundsätzliche Eignung des Verfahrens und Auswahl von Gerät und Messparametern bestimmt.

Ähnlich wie bei anderen ZfP-Methoden, sollten die ausführenden und auswertenden Personen durch eine nach EN ISO/IEC 17024 anerkannte Stelle als Experten zertifiziert sein.

7.46.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [293] Carrick Utsi E. (2017) Ground Penetrating Radar, Theory and Practice, Elsevier Science & Techn.
- [294] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (2008) Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Februar 2008, überarbeitete Fassung
- [295] Hugenschmidt J. (2010) Ground penetrating radar for the evaluation of reinforced concrete structures, In: Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited 2010, Chapter 15, edited by C. Maierhofer, H-W Reinhardt and G. Dobmann: 317-333, ISBN 978-1-84569-950-5

7.47 Wirbelstromprüfung - Eddy Current Testing

7.47.1 Beschrieb der Technologie

Die Wirbelstromprüfung, auch bekannt als Eddy Current Testing (ECT), ist eine zerstörungsfreie Technologie, die auf elektromagnetischer Induktion beruht [296]. Eine Spule wird mit Wechselstrom erregt, der einen Strom mit kreisförmigen Bahnen (Wirbelstrom) induziert. Die erregte Spule wird in die Nähe der Oberfläche eines leitenden Prüfmaterials gebracht. Beschädigungen, Defekte oder Unstetigkeiten werden als Störungen des Wirbelstroms erkannt. Wirbelstromsonden können hauptsächlich als Impedanz-Sonden und Erreger-Empfänger-Sonden klassifiziert werden.

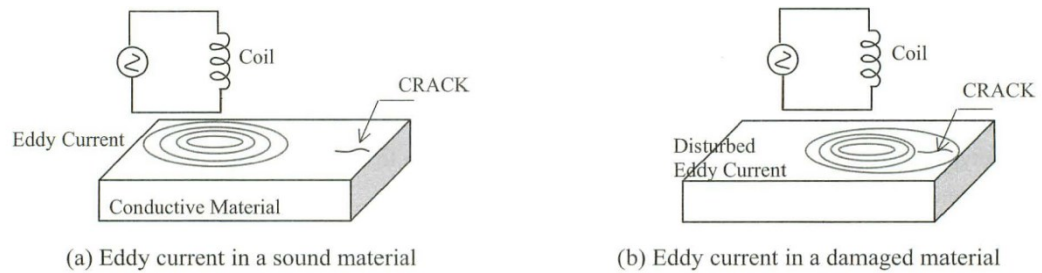


Abb. 7.114 Wirbelstromprüfung. Bild wiederverwendet aus [296].

7.47.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

ECT-Techniken sind bei der Erkennung von Rissen im Schweißsgut von Stahlbrücken weit verbreitet. Einer der grössten Vorteile der ECT ist, dass sie die meisten Beschichtungen von Kunstbauten durchdringen kann. Daher sind Inspektionen möglich, ohne dass die Brückenbeschichtungen entfernt werden müssen. ECT kann auch Risse in Schweißnähten mit unregelmässiger Oberfläche und komplexer Form aufspüren, indem die Grösse der Sonde minimiert wird.

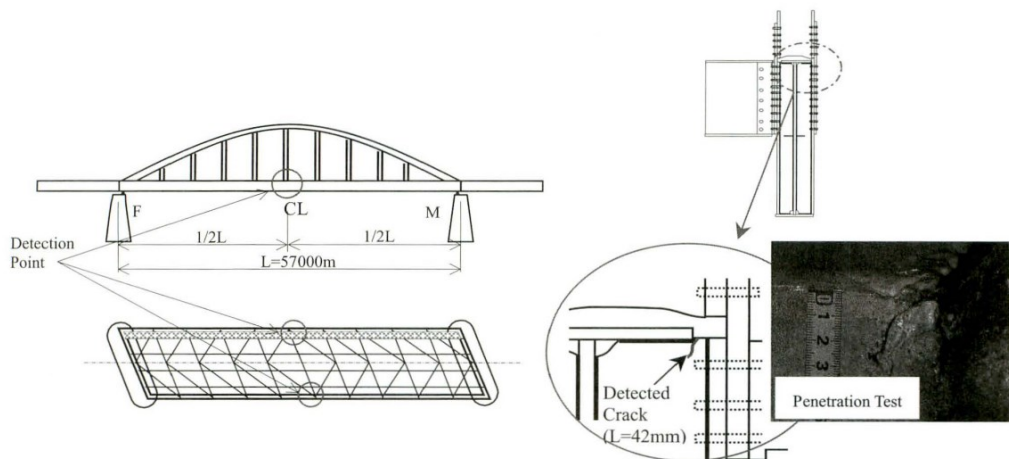


Abb. 7.115 Beispiel eines durch ECT entdeckten Risses an der Verbindung zwischen Hänger und Träger. Die Prüfung wurde an einer Bogenbrücke mit 57 m Spannweite durchgeführt. Bild wiederverwendet aus [296]

Ein Wirbelstromsystem bietet die folgenden Vorteile:

- Erkennung von Rissen in Schweißnähten mit und ohne Beschichtung.
- Messungen der Dicke der nichtleitenden Beschichtung und der Leitfähigkeit.
- Hochgeschwindigkeitsprüfung mit bis zu 150 m/s unter rauen Betriebsbedingungen.
- Messung der Lage, des Diameters und der Bewehrungsabdeckung in Stahlbetonelementen.

7.47.1 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Ergebnisse der Wirbelstromprüfung liegen praktisch sofort vor.
- Phase, Frequenz und Amplitude müssen für die Prüfmateriale optimiert werden.
- Moderne Wirbelstromgeräte haben in der Regel digitale Eingänge.
- Das extrahierte Defektsignal zeigt eine Änderung der Impedanz, die durch das Auftreten eines Risses verursacht wird.
- Die Ausgänge sind Signale auf der X-Achse (Realteil) und der Y-Achse (Imaginärteil), die in einem XY-Diagramm dargestellt werden können.
- Die meisten Wirbelstromsysteme können mit Alarmen auf einem XY-Diagramm konfiguriert werden, um zwischen fehlerhaften und nicht fehlerhaften Prüfstücken zu unterscheiden.
- Alarmereignisse können analoge oder digitale Ausgänge aktivieren.
- Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

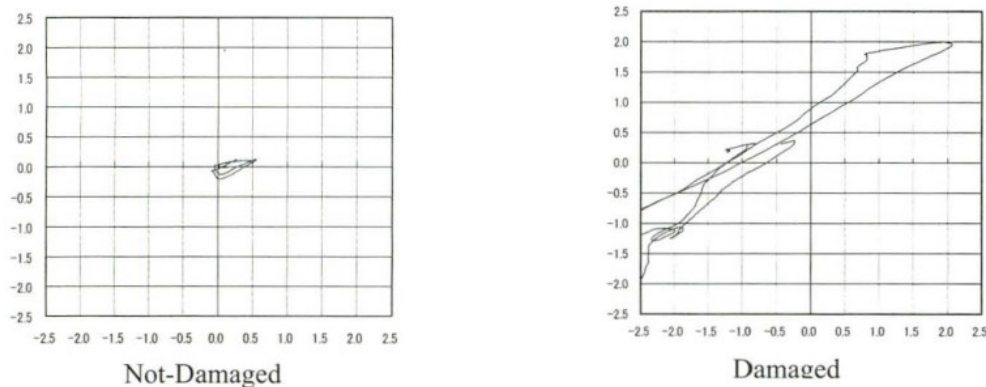


Abb. 7.116 Signalproben an unbeschädigten (links) und beschädigten (rechts) Stellen. Wiederverwendetes Bild aus [296]

Je nach Sonde kann ECT Oberflächen- und oberflächennahe Risse mit einer Grösse von 0,5 mm (Spulensonden-Array) bis hinunter zu 0,05 mm (Pfannkuchensonden) erkennen. Umlaufende Sonden ermöglichen Messungen bei Hochgeschwindigkeitsprüfungen von bis zu 150 m/s. Minisonden eignen sich gut für die Risserkennung in Schweißnähten mit komplexen Formen. Die Eindringtiefe hängt vom Frequenzparameter ab - je niedriger die Frequenz, desto grösser die Tiefe.

7.47.2 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

ECT ist eine Technologie, die im Allgemeinen in der Lage ist, Risse in Stahlbrücken zuverlässig zu erkennen, selbst unter schwierigen Betriebsbedingungen, einschliesslich Hochtemperatur- und Unterwasseroberflächen. Es handelt sich um ein schnelles, zerstörungsfreies Verfahren mit leichter Ausrüstung, das keine Oberflächenvorbereitung erfordert und sofortige Rückmeldung liefert. Die Genauigkeit hängt jedoch stark von der Konstruktion und Grösse der Sonde ab, die sorgfältig ausgewählt werden muss. Die Sondenparameter müssen für die jeweilige Aufgabe optimiert werden, was eine gute Kenntnis des zu prüfenden Materials voraussetzt. Darüber hinaus muss sich die Sonde in unmittelbarer Nähe der Oberfläche des Prüfteils befinden.

ECT-Systeme sind relativ kostengünstige Lösungen. Die Kosten für die Instrumente liegen in der Regel bei rund 2'000 bis 5'000 CHF. Dienstleistungen mit ECT-Systemen kosten ungefähr 200 CHF pro Stunde.

7.47.3 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

7.47.4 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [296] Ichinose, L. H., Kohno, Y., Kitada, T., & Matsumura, M. (2007). Applications of eddy current test to fatigue crack inspection of steel bridges. MEMOIRS-FACULTY OF ENGINEERING OSAKA CITY UNIVERSITY, 48, 57.
-
- [297] García-Martín, J., Gómez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-destructive techniques based on eddy current testing. Sensors, 11(3), 2525-2565.
-
- [298] Khedmatgozar Dolati, S. S., Caluk, N., Mehrabi, A., & Khedmatgozar Dolati, S. S. (2021). Non-Destructive Testing Applications for Steel Bridges. Applied Sciences, 11(20), 9757.
-
- [299] Lamtenzan, D., Lozev, M., & Washer, G. (2000). Detection and sizing of cracks in structural steel using the eddy current method (No. FHWA-RD-00-018). Turner-Fairbank Highway Research Center.
-
- [300] Rifai, D., Abdalla, A. N., Ali, K., & Razali, R. (2016). Giant magnetoresistance sensors: A review on structures and non-destructive eddy current testing applications. Sensors, 16(3), 298.
-

7.48 Magnetische Streufeldmethode

7.48.1 Beschrieb der Technologie

Die magnetische Streufeldmethode ist ein magnetisches Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung, das zum Nachweis von Fehlstellen in Stahlkonstruktionen wie Pipelines oder Kabeln eingesetzt wird. Dabei wird ein starkes Magnetfeld verwendet, um den Stahl zu magnetisieren. Materialfehler stören den magnetischen Fluss im Stahl. Infolgedessen bildet sich in der Umgebung ein Streufeld aus. Dieses Streufeld kann durch Hall-Sensoren, die zwischen den Polen des Magnetjoches angeordnet sind (Abb. 7.117) detektiert werden. Die Auswertung der möglichen Schadenssignale erfolgt in der Regel durch geschulte Experten mit Unterstützung durch geeignete Algorithmen.

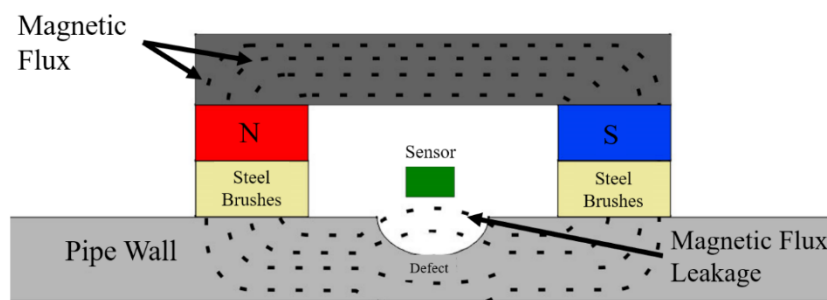


Abb. 7.117 Schematische Darstellung der magnetischen Streufeldmethode an einer Pipeline-Wand [301]

7.48.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Im Bereich Kunstbauten kommt das Verfahren an den Seilen von Schrägseilbrücken zur Anwendung. In Spezialfällen kommt das Verfahren auch für die Detektion von Schäden der schlaffen Bewehrung oder Vorspannung von Stahlbetonkonstruktionen zur Anwendung. Dabei können Materialverluste infolge Lochfrass und Brüche einzelner Drähte der Vorspannkabel oder schlaffer Bewehrungsseile infolge Ermüdung, Korrosion oder Überbeanspruchung detektiert werden.



Abb. 7.118 Anwendung der magnetischen Streufeldmethode am Modell einer Schrägseilbrücken [303] (links); Laborversuch repräsentativ für Spannbeton [302] (rechts)

- Defekterkennung in Schrägseilen [303]
- Detektion bei vorgespannten Hohlkastenträgern [302]
- Erkennung von Defekten in Rohren oder Rohrleitungen aufgrund von Materialverlust infolge Korrosion

7.48.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Bei der Anwendung auf Betonbauteile kann die Magnetisierung und die Messung für kleinere Flächen mit einem Handgerät erfolgen. Je nach erforderlicher Messtiefe sind schwere Permanent- oder Elektromagnete für die Magnetisierung erforderlich, weshalb

das Gerät entweder auf einem Fahrzeug oder auf einem eigens für die Messung errichteten Schienensystem geführt werden muss.

Geräte für die Messung von Kabeln, die nicht einbetoniert sind, sind tendenziell leichter, da sie näher am zu prüfenden Bauteil geführt werden können. Für die Messung von Kabeln wird eine Rolleinheit verwendet, um das Gerät zu befestigen und zu führen.

Einige Geräte ermöglichen eine integrierte Echtzeit-Visualisierung der Messwerte für die Auswertung vor Ort. Andere Geräte erfordern eine angeschlossene Computereinheit für die Speicherung und Auswertung.

Der Messwert ist die magnetische Flussdichte, wobei das Signal einer relativen Feldänderung infolge des Schadens visualisiert und interpretiert wird. Absolute Messwerte sind besonders beim Einsatz an Stahlbetonbauteilen nicht von Belang. Die Detektierbarkeit von Schäden ist hier weniger eine Frage der Sensorempfindlichkeit, sondern hängt vielmehr von der Stärke des eingesetzten Magneten ab.

Potenzielle Störungen gehen von ferromagnetischen Materialien im Bauteil aus.

Das Messverfahren ist zerstörungsfrei.

Eine vom US-Verkehrsministerium im Frühjahr 2021 durchgeführte Studie hat gezeigt, dass die magnetische Flussmethode die Erkennung von Querschnittsverlusten von 15,3% oder mehr bei einem Sensorabstand von 15 cm für vorgespannte Betonplatten ermöglicht [304].

In den vom ASTRA beauftragten Forschungsarbeiten [305] und [306] konnte die Eignung der Methode zur Detektion von Ermüdungsbrüchen und Korrosionsschäden in der schlaffen Bewehrung gezeigt werden.

In [302] wird ein Prototyp für die Detektion von Schadstellen an Spannkabeln konzipiert und im Labor- und Feldversuch getestet. Die Magnetflussdetektion hat sich als geeignet erwiesen, den gleichmässigen korrosionsbedingten Metallflächenverlust auf Schrägseilbrücken zu erkennen [303].

7.48.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Diese Technologie hat ähnliche Vor- und Nachteile wie andere elektromagnetische Verfahren. Sie ermöglicht eine zerstörungsfreie Detektion von Schäden in ferromagnetischen Bauteilen, wie z. B. der Seile von Schrägseilbrücken sowie schlaffe Bewehrung und Vorspannkabel in Betonbauteilen. Detektierbar sind Materialverluste und Brüche. Die Messtiefe ist vom verwendeten Magneten abhängig, wobei die Geräte bei hohen Anforderungen an die Messtiefe sehr schwer werden. Geht es um die Detektion von Schäden in der schlaffen Bewehrung sind nur die oberen Lagen der Messung zugänglich. Es gibt keinen Hersteller, der Geräte zur Prüfung von Betonbauteilen in Serie herstellt und vertreibt, jedoch konnte die Eignung der vorhandenen Prototypen in Praxisbeispielen gezeigt werden [307]. Bei Vorspannkabeln mit Wellstahl-Hüllrohren können Schäden nicht oder nur schwer erkannt werden.

Für die Inspektion von Schrägseilbrücken bietet Cable Scan ein auf der Magnetflussmethode basierendes Inspektionssystem an (<https://www.infrastructurepc.com/>). Es wird zur Lokalisierung von Materialverlusten in externen Spanngliedern von Brücken verwendet [308], wobei die Messeinheit automatisch von einem Robotergehäuse gezogen wird und die Daten automatisch an eine Software zur Auswertung übermittelt.

7.48.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend sollten die Abstände des Messrasters definiert werden.

Ähnlich wie bei anderen ZfP-Methoden, sollten die ausführenden Personen durch eine nach EN ISO/IEC 17024 anerkannte Stelle als Experten zertifiziert sein.

7.48.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [301] Bernal-Morales, J. (2020). A Method for Defect Detection and Characterisation through Magnetic Flux Leakage Signals Using 3D Magnetoresistive Sensors (Master thesis). . Durham University.

- [302] Steven Chase, S. B. (2020). Magnetic Flux Leakage: Device for Evaluation of Prestressed Concrete Box Bridges. Virginia Transportation Research Council, p. 35.

- [303] Xin, Y. N. (2021). Magnetic flux detection and identification of bridge cable metal area loss damage. Measurement, p. 108443.

- [304] Lee, H. A.-K. (2021). Magnetic Flux Methods: Detecting Corrosion in Post-Tensioned Bridges. Public Roads, Vol. 85 No. 1.

- [305] Wolf, T. (2013). Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode. Forschungsauftrag AGB 2009/006

- [306] Diederich, H. (2016). Zerstörungsfreie Prüfung der Bewehrung von Betonbauteilen mithilfe der magnetischen Streufeldmethode. Forschungsprojekt AGB 2013/004

- [307] Walther, A. (2011). Ortung von Brüchen der Spannbewehrung in Spannbetonbauteilen - schnell, innovativ und in hoher Qualität, Informationstag Moderne Bauwerksprüfung 2010 - Vortrag 11

- [308] Thaler, D. (2020). Cable Stay Bridge Inspection Service Using Magnetic Flux Leakage. Récupéré sur <https://www.infrastructurepc.com/cable-stay-bridge-inspection-service-using-magnetic-flux-leakage/>

7.49 Widerstandsmessverfahren

Der spezifische elektrische Widerstand eines Körpers wird insbesondere durch Material, metallische Einbauteile, Porosität, Chloridgehalt und Feuchtigkeit beeinflusst. Die Messung dieser Grösse erfolgt meist mit einer Vierpunktanordnung auf Beton.

7.49.1 Beschrieb der Technologie

Die elektrische Stromdichte (j) und das elektrische Feld (E) bezieht sich mit der elektrischen Leitfähigkeit σ via $j = \sigma \cdot E$. Die Grösse $\rho = 1/\sigma$ wird als spezifischer elektrischer Widerstand bezeichnet. Der spezifische elektrische Widerstand ist eine Materialeigenschaft und damit unabhängig von Form oder Grösse des geprüften Objektes. Es unterscheidet sich vom elektrischen Widerstand, der charakteristische Eigenschaft des geprüften Objektes ist. Die physikalische Einheit des spezifischen elektrischen Widerstands ist $\Omega \cdot m$. Den Zusammenhang zwischen Widerstand und spezifischem Widerstand zeigt die Abb. 7.103. Ein Objekt mit einer Länge l und einer Querschnittsfläche A , das aus einem Material mit dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ besteht, hat einen Widerstand von $R = \rho \cdot \frac{l}{A}$.

Grundsätzlich ist es möglich den elektrischen Widerstand (R) durch Anlegen einer bekannten Spannung zwischen zwei Elektroden (Zweipunktanordnung) und Messung des fliessenden Stroms mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes via $I = U/R$ zu ermitteln und anschliessend in den spezifischen elektrischen Widerstand umzuwandeln. Hierbei besteht in der Praxis jedoch das Problem, dass der Messwert vor allem vom Übergangswiderstand zwischen der Elektrode und dem Untersuchungsobjekt beeinflusst wird. Somit werden Zweipunktanordnungen vor allem bei Laboruntersuchungen an Bohrkernen angewendet, wo dieser Übergangswiderstand durch eine geeignete Ankopplung, z. B. durch angefeuchtete Schwämme, gering bzw. konstant gehalten werden kann (Abb. 7.120).

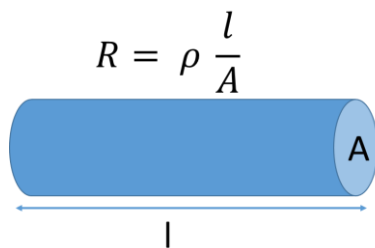


Abb. 7.103 Widerstand und spezifischer Widerstand

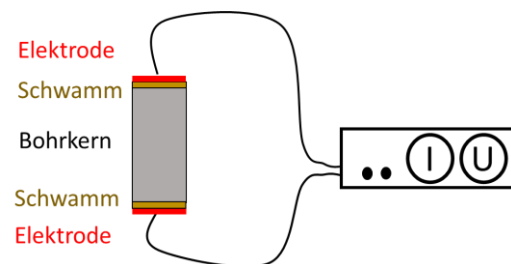


Abb. 7.120 Messung des elektrischen Widerstandes an einem Bohrkern

Ausserhalb des Labors werden meist Vierpunktanordnungen verwendet, wobei über zwei Elektroden ein Strom eingespeist wird und bei zwei weiteren Elektroden die Spannung gemessen wird. Das Prinzip ist in Abb. 7.121 dargestellt. Der von den zwei äusseren Elektroden eingespeiste Strom fliesst entlang der roten Linien und die darauf senkrecht stehenden Linien, die das gleiche Potential aufweisen, können an der Oberfläche mit den zwei inneren Elektroden abgegriffen werden.

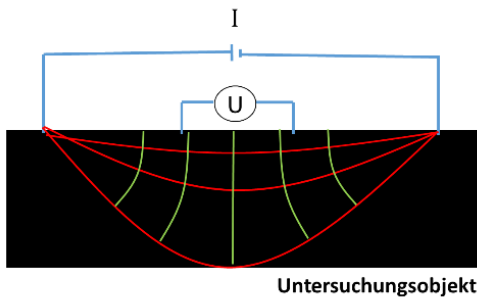


Abb. 7.121 Messungsprinzip:
Vierpunktanordnung



Abb. 7.122 Gerät zur Widerstandsmessung
mit Vierpunktanordnung

7.49.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Der spezifische elektrische Widerstand eines Materials ist abhängig vom Material, der Feuchtigkeit, dem Chloridgehalt sowie weiterer Einflussgrößen [309], [310]. Da Feuchtigkeit und Chloride für die Korrosion eine wichtige Rolle spielen, kann die Kenntnis des spezifischen elektrischen Widerstandes für eine Abschätzung des Risikos nützlich sein. Ausserdem setzen Korrosionsprozesse eine elektrische Leitfähigkeit voraus. Die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes wird im Rahmen der Planung von Massnahmen des kathodischen Korrosionsschutzes routinemässig durchgeführt. In einer Anwendung, die sich auf Kunstbauten bezieht [311], wurde die Eigenschaft des spezifischen Widerstands von Forschern der University of Nevada Reno und der US Federal Highway Administration genutzt. Sie entwickeln

7.49.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

Die Abb. 7.122 zeigt ein kompaktes Gerät zur Messung des elektrischen Widerstandes von Beton mit einer Vierpunktanordnung. Da die Messtiefe wesentlich vom Abstand zwischen den Elektroden beeinflusst wird, sind auch Geräte mit variablen oder anderen fixen Abständen erhältlich. Bei der Messung ist zu berücksichtigen, dass metallische Einbauteile, insbesondere Bewehrung, das Ergebnis in hohem Masse beeinflussen. Weiterhin ist eine hinreichende Ankopplung der Elektroden an das Untersuchungsobjekt zu gewährleisten. Zwar wird durch die Vierpunktanordnung die Bedeutung des Übergangswiderstandes theoretisch eliminiert, in der Praxis erhöhen allerdings sehr geringe Ströme und Spannungen jedoch den Einfluss zufälliger Einflussfaktoren. Hier können beispielsweise in der Umgebung bestehende elektromagnetische Wechselfelder, den Messbereich der eingesetzten Geräte oder Korrosionsvorgänge beeinflussen.

7.49.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Vierpunktanordnung wird in der Geophysik seit über 100 Jahren für die Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstands eingesetzt. Bei der Anwendung des Verfahrens auf Beton verhindert die Existenz der Bewehrung eine Vergrößerung des Abstandes zwischen den Elektroden und damit eine Bestimmung des spezifischen elektrischen Widerstandes in grösseren Tiefen. Da es sich um ein einfaches Verfahren handelt, sind die Kosten für Geräte und Durchführung eher gering. Die Widerstandsmessung als Dienstleistung kostet ungefähr 200 CHF pro Stunde.

7.49.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend sollten die Abstände des Messrasters definiert werden.

Ähnlich wie bei anderen ZfP-Methoden, sollten die ausführenden Personen durch eine nach EN ISO/IEC 17024 anerkannte Stelle als Experten zertifiziert sein.

7.49.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[309] J.F. Lataste, Electrical resistivity for the evaluation of reinforced concrete structures, 2010.

[310] F. Wenner, A method of measuring earth resistivity. No. 258. US Government Printing Office. In: Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Woodhead Publishing Limited 2010, Chapter 15, edited by C. Maierhofer, H-W Reinhardt and G. Dobmann: 317-333, ISBN 978-1-84569-950-5

[311] <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/ear/17046/17046.pdf>

7.50 Potentialfeldmessung

7.50.1 Beschreibung der Technologie

Für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen und für die Abschätzung der Lebensdauer ist die Bestimmung des Korrosionszustandes der Stahlbewehrung notwendig. Seit der Entwicklung der Grundlagen für die Potentialfeldmessung hat sich diese Methode bewährt [312]. Durch Messung der Spannungsdifferenz zwischen einer Referenzelektrode, die auf der Betonoberfläche angebracht wird, und der Bewehrung kann deren Potential bestimmt werden. Anhand dieses Bewehrungspotentials lassen sich Rückschlüsse auf die Lage und das Ausmass von Korrosionsherden ziehen. Im Allgemeinen können negativere Potentiale als Korrosionsstellen interpretiert werden, während positivere Potentiale auf eine passive Bewehrung hinweisen [313]. Abb.7.123 zeigt schematisch den Messaufbau der elektrischen Potentialmessung.

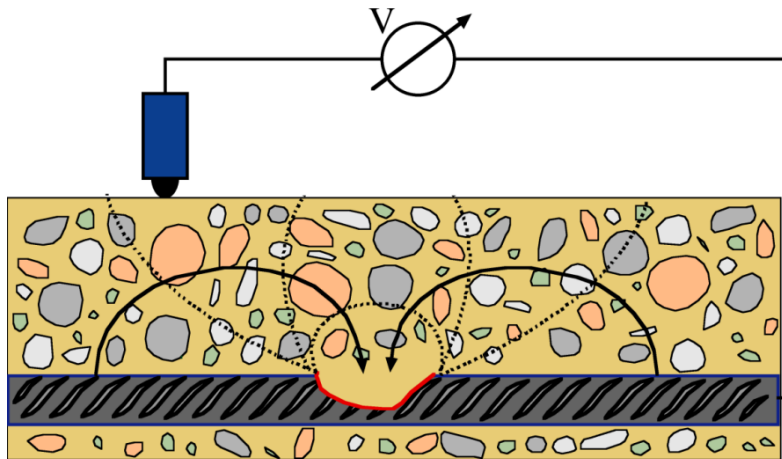


Abb. 7.124 Messaufbau zur Bestimmung des Bewehrungspotentials. Der Ionenstrom im Beton (durchgezogene Linie) führt zu einem Spannungsabfall (gestrichelte Linie), der an der Betonoberfläche gemessen werden kann [314].

7.50.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Potentialfeldmessung wird in erster Linie eingesetzt, um den Zustand der Stahlbewehrung der Fahrbahnplatte zu beurteilen. Mit dieser Methode können Orte mit unterschiedlichem elektrischem Potential auf einer Betonplatte bestimmt werden. Abb. 7.125 zeigt die Ergebnisse einer Potenzialmessung an einer Brückenplatte. Veränderungen des elektrischen Potentials sind häufig auf Korrosion der Stahlbewehrung zurückzuführen, können aber auch durch lokale Feuchtigkeitsansammlungen verursacht werden.

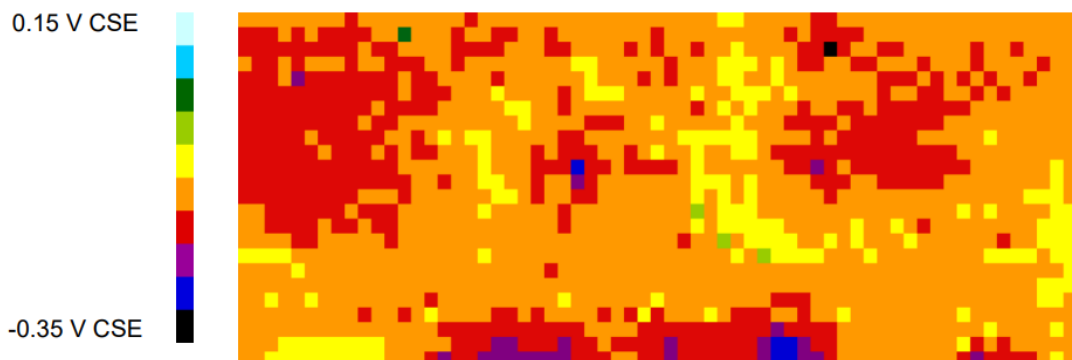


Abb. 7.125 Ergebnis einer Potentialfeldmessung auf einer Brückenplatte. Die gemessene Fläche ist 16 m lang und 6 m breit [314].

7.50.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Die Potenzialmessung wird mit einem Gerät durchgeführt, das entweder in der Hand gehalten oder über die zu messende Oberfläche gerollt wird.
- Die Korrosion von Stahl im Beton ist ein elektrochemischer Prozess.
- Wenn die Bewehrungsseisen im Beton korrodiert sind, kann mit einer Elektrode ein kleiner Stromfluss an der Betonoberfläche gemessen werden.
- Mit der Potentialmessung kann zwischen korrodiert und nicht korrodiert Bewehrung unterschieden werden. Stark negative Potentialwerte deuten auf Korrosion hin.
- Zur Kalibrierung der potenziellen Feldmessung (Korrosionsgrade) und zur Messung des Chloridgehalts können Betonproben entnommen werden.



Abb. 7.126 Potentialfeldmessung auf einer Parkplatte (Quelle: mt-qualitest.ch)

7.50.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Ergebnisse der Messung des elektrischen Potentials werden von mehreren Faktoren beeinflusst [314]. Die elektrische Leitfähigkeit des Betons hat einen direkten Einfluss auf die Ausdehnung des Makroelements und die Grösse des Spannungsabfalls. Betonfeuchte, Temperatur und Porosität beeinflussen die elektrische Leitfähigkeit in hohem Masse und wirken sich somit auch direkt auf die Interpretation der Potentialfeldmessung aus. Eine grundlegende Untersuchung hat gezeigt, dass die wahrscheinliche Lage von Korrosions-Hotspots in Kombination mit statistischen Methoden bestimmt werden kann [312].

Die Erkennbarkeit lokaler Korrosionsstellen hängt von ihrer Grösse, der Betonüberdeckung, der Grösse des Probengitters und der Korrosionsgeschwindigkeit ab. Anodengrössen im Bereich von einem Zentimeter können nicht direkt erkannt werden.

Eine heterogene Verteilung von pH-Wert, Feuchtigkeit und Chloridgehalt kann auch zu Spannungsverteilungen auf der Betonoberfläche führen, die fälschlicherweise als Korrosionsquelle interpretiert werden können.

Bei der Potentialfeldmessung führen eine hohe Betonfeuchte und eine hohe Streusalzbelastung des Betons zu einer lokalen Potentialminderung. Da in den meisten praktischen Fällen neben der Bewehrungskorrosion auch diese beiden Effekte vorhanden sind, werden in der praktischen Anwendung sehr gute Ergebnisse erzielt.

Wenn die lokale Chloridverschmutzung und die nassen Stellen durch eine Reparatur entfernt werden, kann die lokale Korrosionsquelle schwieriger oder sogar unmöglich zu erkennen sein, da diese Beiträge zur potenziellen Feldmessung entfernt werden.

Auf dem Schweizer Markt gibt es mehrere kommerzielle Anbieter von Messlösungen (mt-qualitest.ch, <https://www.tfb.ch/>, IMP Bautest AG) und die Kosten der Messmethode als Dienstleistung liegt im Bereich von 250 - 280 CHF pro Stunde.

7.50.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend sollten die notwendigen baulichen Massnahmen (z.B. zur Freilegung der Bewehrungsstäbe) beschrieben werden.

7.50.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [312] F. Hunkeler, Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten. VSS, Zürich, Bericht Nr. 510, 1994.
-
- [313] ASTM, C. Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM C876-91, 1991.
-
- [314] M.B. Schiegg, Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Forschungsauftrag AGB2002/007, 2008.
-

7.51 Thermografie

7.51.1 Beschrieb der Technologie

Die Infrarot-Thermografie beruht auf dem Prinzip der unterschiedlichen Wärmeübertragungsraten verschiedener Materialien und Aggregatzustände. Bei dem Messverfahren wird eine infrarotempfindliche Kamera verwendet. Die Kamera misst die thermale Infrarotstrahlung (Wellenlänge von 8 bis 15 Mikrometer), die von der Oberfläche einer zu untersuchenden Struktur nach einer künstlich herbeigeführten oder umweltbedingten Temperaturänderung der Struktur abgegeben wird. Defekte können auf der Grundlage einer unterschiedlichen Wärmeübertragungsrate im Vergleich zum Nennmaterial identifiziert und lokalisiert werden.

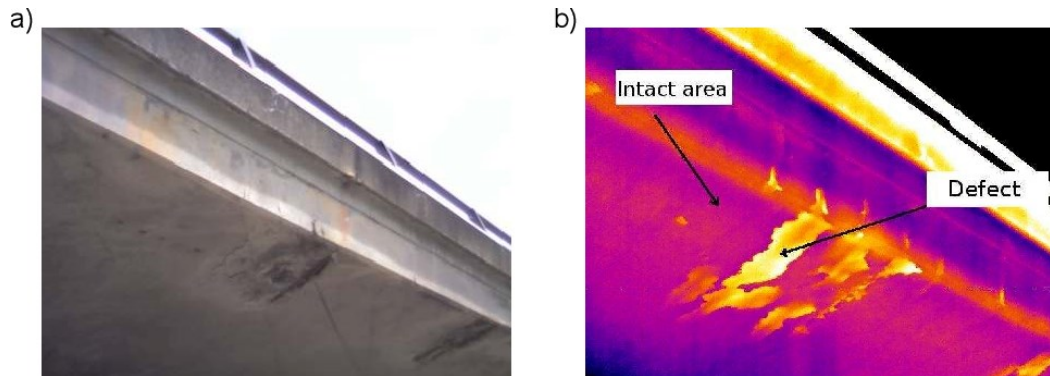


Abb. 7.127 Erscheinungsbild eines Mangels in der Fahrbahnplatte in der Infrarotaufnahme [315]

Die Infrarot-Thermografie eignet sich im Allgemeinen für die Untersuchung von Bauteilen, bei denen davon ausgegangen wird, dass sie relativ homogene und gut charakterisierte Eigenschaften aufweisen. Die Infrarot-Thermografie erfordert einen möglichst grossen Temperaturgradienten in den zu untersuchenden Bereichen. In Bereichen, die nicht im Schatten liegen, kann starkes Sonnenlicht eine solche Erwärmung bewirken, so dass die Messung ohne künstliche Erwärmung möglich ist; in schattigen Bereichen oder bei unbeständigen Wetterbedingungen können jedoch bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn die Erwärmung durch eine externe Quelle künstlich herbeigeführt wird.

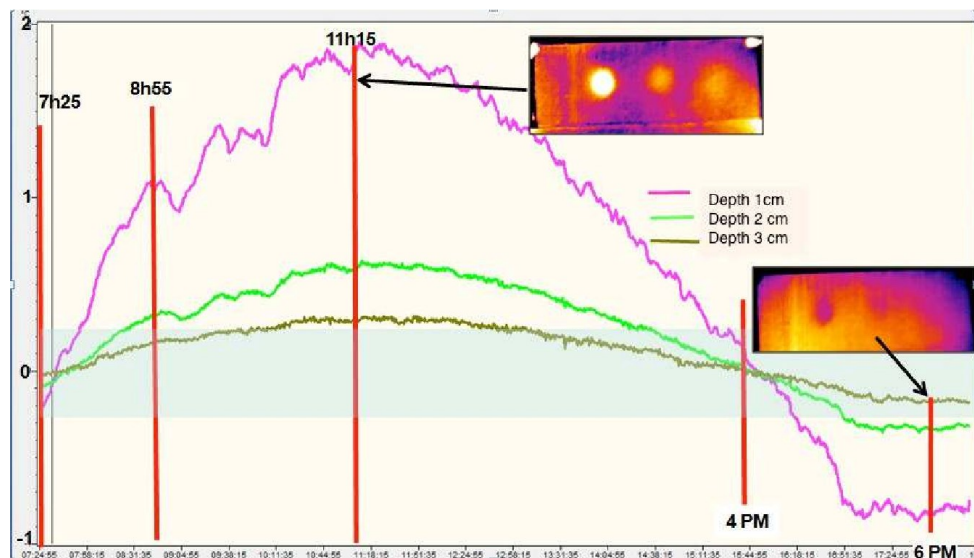
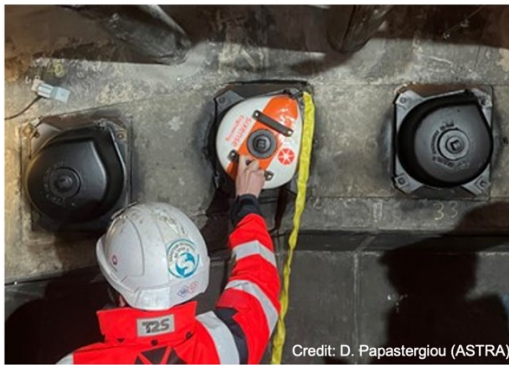


Abb. 7.128 Temperaturabweichung vom Mittelwert von drei verschiedenen Defekten in drei verschiedenen Tiefen über einen Messtag [315]

Infrarot-Thermografie kann auch dazu eingesetzt werden, Hohlräume in Vorspannkabeln in der Nähe zum Ankerkopf zu erkennen, wie in Abb. 7.129 gezeigt.

a) Vorheizen der Ankerköpfe



Credit: D. Papastergiou (ASTRA)

b) Infrarot Thermografie



Credit: D. Papastergiou (ASTRA)

Abb. 7.129 Vorheizen der Ankerköpfe und Erkennung von Hohlräumen im Kabel mittels Infrarot-Thermografie (violette Region)

7.51.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

- Erkennung von Delaminationen und Hohlräumen im Untergrund von Stahlbeton.
- Erkennung von Feuchtstellen unter Abdichtungen.
- Nachweis der Korrosion von Bewehrungsstäben [317].
- Erkennung von Hohlräumen nahe der Spannanker bei Vorspannkabeln und Schrägseilbrücken.
- Scannen von grossen Oberflächenbereichen.
- Bereiche, die der Sonne ausgesetzt sind, können bei stabiler Witterung nur durch Erwärmung aus der Umgebung geprüft werden.
- Der Einsatz der Methode im Schatten ist aufgrund des geringeren Temperaturgefälles schwieriger.

7.51.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrössen und Genauigkeit

- Bei modernen Infrarotkameras erfolgt die Datenerfassung überwiegend digital, wobei die Daten in gängigen Bildformaten gespeichert werden.
- Die Datenerfassung erfolgt traditionell mit einer stationären Kamera auf einem Stativ, aber auch innovative Methoden wie der Einsatz von Drohnen wurden untersucht.
- Der gemessene Wert ist die Oberflächentemperatur eines Bereichs einer Struktur im Laufe der Zeit.
- Die Messungen erfolgen zerstörungsfrei aus der Ferne, direkter Zugang zur Oberfläche ist nicht erforderlich, nur visuell.
- Messungen über eine grosse Fläche der Struktur werden sehr schnell durchgeführt, so schnell wie die Daten erfasst werden können.
- Studien haben gezeigt, dass Defekte bis zu einer Grösse von 5 x 5 cm erkannt werden können, obwohl die Erkennbarkeit von Defekten stark von ihrer Tiefe und der Amplitude des Temperaturgradienten abhängt. Kleinere und tiefere Defekte (weniger als 10 cm) sind schwieriger zu erkennen, obwohl die Anwendung einer künstlichen Heizung zur Verstärkung des Temperaturgradienten die Ergebnisse verbessern kann. Defekte können hinsichtlich ihrer Form und Fläche in der Ebene der gemessenen Oberfläche gut gemessen werden, ihre Tiefe wird jedoch im Allgemeinen nicht erfasst [316].

7.51.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Technologie befindet sich noch in der Entwicklungsphase, vielversprechende Forschungsergebnisse haben ihr Potenzial gezeigt, aber eine breite industrielle Nutzung steht noch aus. Es sind noch Fragen hinsichtlich der Tiefe und Grösse von Fehlern zu klären, die zuverlässig erkannt werden können, und auch die besten Praktiken in Bezug auf die Messdauer und die optimalen Umgebungsbedingungen müssen weiter untersucht werden. Interessante Entwicklungen sind die Montage von Infrarotkameras auf ULFe für die schnelle Abtastung grosser Bereiche der Struktur. Allerdings sind in der Regel lange Messzeiträume erforderlich, was dazu führen kann, dass die Brücken für den Verkehr

gesperrt werden müssen, wenn dies den visuellen Zugang behindert. Auch die optimale Dauer und Tageszeit der Messungen ist ein noch zu lösendes Forschungsproblem. Die Technologie scheint das Potenzial zu haben, grosse Bereiche von Bauwerken zu scannen, und die Kombination mit gezielteren Methoden wie dem Bodenradar könnte die Methode mit mehr Informationen über die Fehllertiefe ergänzen.

Die Kosten der Methode hängen davon ab, ob eine passive oder aktive Heizstrategie verwendet wird. Im passiven Fall besteht die erforderliche Ausrüstung aus der IR-Kamera selbst, für die ein wissenschaftliches Modell im Bereich von 5'000 bis 20'000 CHF kostet, und einem PC/Laptop zum Betrachten, Speichern und Verarbeiten der Bilder. Im Falle einer aktiven Heizung müssen jedoch die zusätzlichen Kosten für die Heizung selbst und die Energie zu deren Betrieb berücksichtigt werden. Weitere Kosten sind die Arbeitskosten für die bis zu einem Tag dauernden Tests und die Kosten für die Sperrung von Strassen für den Verkehr. Für die Durchführung der Thermografie einer Brücke fallen, abhängig der Grösse der Brücke, zwischen 500 und 1000 CHF an.

7.51.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend ist zu definieren ob eine aktive Heizquelle benötigt wird.

7.51.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [315] H. Cannard, M.W. Mahrez, T. Perrin, V. Muzet, D. Prybyla, und J. Mentelin, The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges, 2014.

- [316] J.H.A. Rocha und Y.V. Póvoas, Infrared thermography as a non-destructive test for the inspection of reinforced concrete bridges: A review of the state of the art. Revista ALCONPAT, 7(3):200-214, 2017.

- [317] K. Kobayashi und N. Banthia, Corrosion detection in reinforced concrete using induction heating and infrared thermography. J Civil Struct Health Monitoring, 1:25–35, 2011, <https://doi.org/10.1007/s13349-010-0002-4>

- [318] International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria), Guidebook on non-destructive testing of concrete structures (IAEA-TCS--17). International Atomic Energy Agency (IAEA) 2002.

C4 Sonstige Methoden

Tab. 7.42 C4 Sonstige Methoden - Übersicht

Titel Einsatzzweck		Sonstige Methoden	
Kurzbeschreibung		Hier werden weitere nicht klassifizierte Methoden für ZaP/ZfP zur Materialcharakterisierung und Schadenserkennung aufgeführt.	
Überwachungstechnologie		Sklerometrie	Chloridgehaltmessungen
"ID"		SKL_	CHL_
Typisierung	a. Messprinzip	2 indirekt	1 direkt
	b. Datenerfassung	1 mechanisch	11 (hydro)chemisch
	c. Datenspeicher	1 digital	1 digital
	d. Lokalisation	1 punktuell	1 punktuell
	e. Raumbezug		
	f. Zustand	3 zerstörungsfrei	1 zerstörend
Messgrößen	Größen	Materialfestigkeit	Chloridgehalt
	Messungsbereich	10-50 MPa (Beton)	
	Auflösung		
	Genauigkeit		
	Bemerkungen	erfordert direkten Zugang zur Prüfoberfläche	
Kunstbauten		1	0
Naturgefahren		0	0
Umwelt		0	2
Einsatzzeitpunkt		N	N
Entwicklungsstand		●	●
Kosten	initial / einmalig	●	●
	wiederkehrend	●	●

7.52 Sklerometrie/Rückprallhammer

7.52.1 Beschrieb der Technologie

Die Sklerometrie ist ein Verfahren zur Prüfung der Oberflächenhärte von Beton als Indikator für die Betonfestigkeit. Es gibt empirische Beziehungen, die die geprüfte Oberflächenhärte mit der Druckfestigkeit des Betons in Beziehung setzen. Im Handel sind verschiedene Sklerometriergeräte erhältlich, die jedoch meist ähnlich funktionieren: ein Kolben wird senkrecht auf die Oberfläche der zu prüfenden Fläche gedrückt, dann wird eine Masse entweder fallen gelassen oder gegen den Kolben geschleudert, so dass sie auf die Oberfläche aufprallt, die von der Masse zurückgeworfene Strecke wird dann gemessen, um eine "Rückprallzahl" und damit anhand empirischer Beziehungen einen Schätzwert für die Betonfestigkeit zu erhalten.

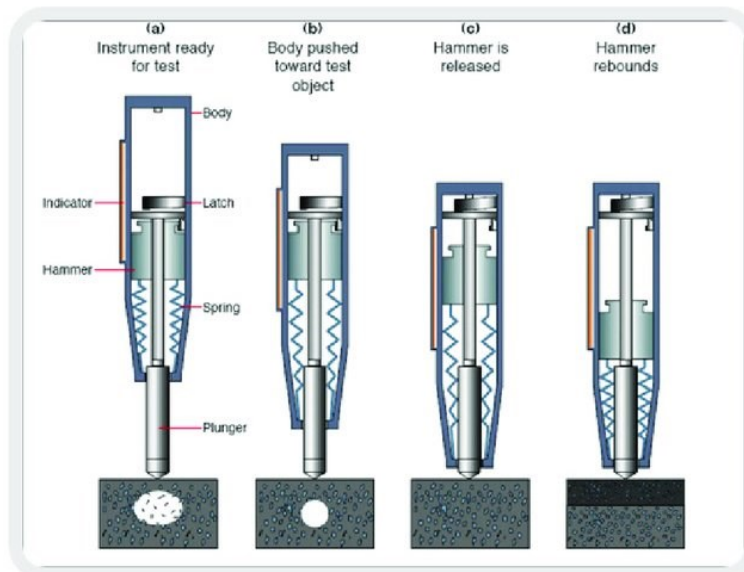


Abb. 7.130 Schnittdarstellung der Schmidt-Hammerprüfeinrichtung [319]

7.52.2 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Sklerometrie ist für die zerstörungsfreie In-situ-Messung der Druckfestigkeit von Betonstrukturen vorgesehen. Es gibt relativ strenge Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung, bevor die Messungen durchgeführt werden können. Die zu prüfende Oberfläche muss glatt sein, andernfalls muss sie zunächst vorbereitet werden. Ausserdem sollte die Oberfläche frei von Feuchtigkeit und Ablagerungen sein, und die Prüfung sollte senkrecht zur Oberfläche durchgeführt werden. Die Prüfung kann in jeder beliebigen Ausrichtung durchgeführt werden, aber auch die Geometrie der Oberfläche hat Einfluss auf die Wiederholbarkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Flache Oberflächen sind zu bevorzugen. Bei den Messungen handelt es sich um Punktmessungen; um eine ganze Struktur zu prüfen, werden viele Punkte benötigt.

Anwendung bei Brückenarbeiten:

- Messung von punktuellen Schätzungen der Druckfestigkeit von Betonstrukturen. Messung der Gleichmässigkeit der Druckfestigkeit oder Bereiche mit geringerer Festigkeit im Vergleich zum Durchschnitt.

7.52.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und Genauigkeit

- Erhebliche Oberflächenvorbereitung und Kalibrierung des Hammers auf den zu prüfenden Beton erforderlich
- Datenerfassung von Hand, geschulter Bediener muss den Prüfhammer benutzen und an jedem Prüfpunkt wiederholte Messungen vornehmen, empfohlen werden 10.
- Die Daten können lokal auf dem Prüfhammer in einem digitalen Format aufgezeichnet werden, können aber auch manuell vom Bediener notiert werden
- Die Messungen werden an jedem Punkt wiederholt und auf Wiederholbarkeit geprüft.
- Der gemessene Wert entspricht der Oberflächenhärte, die durch empirische Beziehungen mit der Materialfestigkeit verknüpft ist.
- Die Messungen sind zerstörungsfrei und erfordern einen direkten Zugang zur Prüfoberfläche.
- Die Genauigkeit der gemessenen Druckfestigkeit hängt stark von der Kalibrierung des Hammers auf die genaue Zusammensetzung und Alterung des geprüften Betons ab.
- Die Gleichmässigkeit der Materialfestigkeit kann zuverlässiger gemessen werden als die absoluten Werte; Bereiche mit deutlich verringerter Oberflächenhärte haben wahrscheinlich eine geringere Festigkeit.

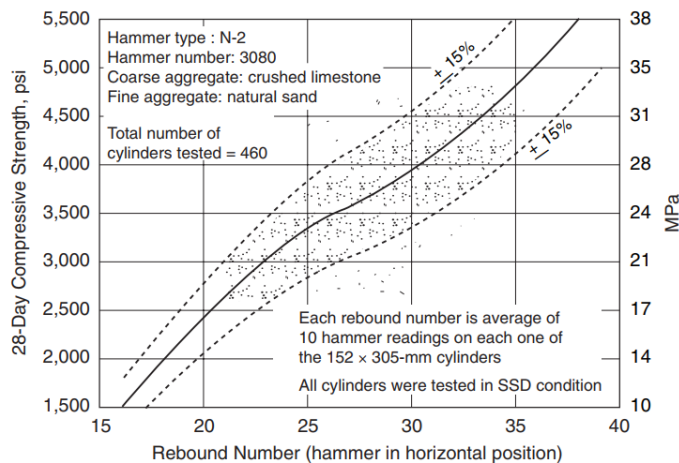


Abb. 7.131 Korrelation der mit einem Schmidt-Hammer ermittelten Rückprallzahlen mit der Druckfestigkeit einer bestimmten Betonzusammensetzung und eines bestimmten Alters des Betons [320].

7.52.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Sklerometrie ist eine gut etablierte Technik, die seit vielen Jahren weit verbreitet ist. Ihr Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung von Beton ist jedoch aufgrund der Schwierigkeiten bei der korrekten Korrelation von Härtemessungen mit der Druckfestigkeit weniger gut etabliert. Mit geschulten Bedienern und gut vorbereiteten Prüfflächen sind wiederholbare Messungen der Oberflächenhärte möglich, doch die Verwendung dieser Messungen zur Ableitung der Druckfestigkeit erfordert eine sorgfältige Kalibrierung. Um die Druckfestigkeit zuverlässig voraussagen zu können, müssen Kalibrierkurven für genau den geprüften Beton erstellt werden. Dies erfordert die Entnahme von Betonkernen aus dem betreffenden Bauwerk, die zerstörend auf ihre Druckfestigkeit geprüft werden müssen. Ausserdem wirkt sich der Alterungsprozess auf die Korrelationsbeziehung aus, so dass eine wiederholte Entnahme von Bohrkernen erforderlich sein kann, um das Verfahren neu zu kalibrieren. Ein alternativer Anwendungsfall für die Sklerometrie bei der zerstörungsfreien Prüfung von Beton in situ wäre die Prüfung der Gleichmässigkeit des Gefüges, d. h. die Ermittlung von Bereichen mit einer geringeren Oberflächenhärte im Vergleich zum Durchschnitt. Bereiche mit einer geringeren Oberflächenhärte, die mit der Sklerometrie gemessen werden, haben wahrscheinlich eine geringere Druckfestigkeit.

Die Ausrüstungskosten für die Sklerometrie sind relativ gering, ein Prüfhammer kostet etwa 1'000 CHF. Wenn zuverlässige Schätzungen der Druckfestigkeit erforderlich sind, müssen zusätzliche Kosten für die Entnahme von Bohrkernen und die Druckfestigkeitsprüfung berücksichtigt werden, und diese Prüfungen müssen möglicherweise während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks wiederholt werden. Weitere Kosten wären die Arbeitskosten, die relativ hoch sein können, da für die Prüfung einer grossen Fläche mit Punktschätzungen eine beträchtliche Prüfzeit erforderlich ist.

7.52.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.7.5

Ergänzend zu definieren ist die Anzahl an Messpunkten.

7.52.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [319] M. Jedidi, Evaluation of the Quality of Concrete Structures by the Rebound Hammer Method. *Current Trends in Civil & Structural Engineering*, 5, 2020, 10.33552/CTCSE.2020.05.000621.
- [320] N.G. Zoldners, Calibration and use of impact test hammer, *ACI J. Proc.*, 54(2):161, 1957.
- [321] A. Brencich, R. Bovolenta, V. Ghiggi, D. Pera, und P. Redaelli, Rebound Hammer Test: An Investigation into Its Reliability in Applications on Concrete Structures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 6450183, 2020, doi:10.1155/2020/6450183

[322] International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria) (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures (IAEA-TCS--17). International Atomic Energy Agency (IAEA)

7.53 Chloridgehaltsmessungen

7.53.1 Beschreibung der Technologie

Der Chloridgehalt in einem Betonbauteil kann durch unterschiedliche Methoden bestimmt werden.

Titration

Laboruntersuchung von Beton/Bohrmehl mittels unterschiedlicher Lösungen. Dabei wird das Chlorid als schwerlösliches Silberchlorid vollständig ausgefällt. Aus der Menge der dazu nötigen Nitratlösung wird der Chloridgehalt der Lösung berechnet [324].

Photometrie

Laboruntersuchung von Beton/Bohrmehl mittels unterschiedlicher Lösungen. Eine chloridhaltige Lösung wird umgesetzt und die Lichtabsorption des Umsetzprodukts wird gemessen. Mittels Eichkurven lässt sich die Chloridkonzentration bestimmen [324].

Ionensensitive Elektrode

Sensor für die Bestimmung der Konzentration/Aktivität von bestimmten gelösten Ionen. Der Chloridgehalt von gelösten Proben von Beton/Bohrmehl wird über die Messung des elektrochemischen Potenzials der Elektroden und mittels Eichkurven bestimmt [324].

Ionenchromatographie

Die Ionenchromatographie ist eine analytische Methode zur Trennung von geladenen Teilchen. Je nach spezifischen Methoden können Anionen (Chlorid, Nitrat, Sulfat, ...) oder Kationen (Calcium, Magnesium, Natrium, ...) getrennt werden [323]. Mit der Ionenchromatographie kann die Ionenkonzentration einer gelösten Probe durch einen Leitfähigkeitsdetektor bestimmt werden [324].

Röntgenfluoreszenzanalyse

Die gemahlene Betonprobe / Bohrmehl wird direkt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht. Dabei wird die Probe mittels Röntgenstrahlen angeregt und gibt von sich aus eine Fluoreszenzröntgenstrahlung ab. Aus dem aufgezeichneten Spektrum kann zusammen mittels Kalibrationskurven oder Referenzmessungen der Chloridgehalt bestimmt werden [324].

7.53.2 Fragestellung in den Fachbereichen

Fragestellung im Fachbereich Kunstbauten

Die Bestimmung des Chloridgehalts wird verwendet, um den Zustand von bewehrten Betonbauteilen (z. B. Zwischendecke, Verkleidung) zu beurteilen. Dabei kann die Auswirkungen auf die Stahlbewehrung durch z. B. Chlorid durch ein Tiefenprofil beurteilt werden.

Schnittstellen mit Umwelt (Kapitel 2.1.4)

Diese Messung ist indirekt mit einer Bewertung des Vorhandenseins von korrosiven Stoffen in der Umwelt verbunden.

7.53.3 Datenerfassung, Raumbezug, Messgrößen und – Genauigkeit

- Die Bestimmung des Chloridgehaltes wird an Proben im Labor durchgeführt.
- Der Zustand der Bewehrung/Bewehrungskorrosion kann nur indirekt über den Chloridgehalt im Betonbauwerks abgeschätzt werden.
- Es erfolgt jeweils nur eine punktuelle Bestimmung des Chloridgehalts im Bauteil durch die entnommene Probe.
- Für die Bestimmung des Chloridgehalts müssen Proben am Bauwerk entnommen werden (zerstörend).

7.53.4 Entwicklungsstand, Anwendungsgrenzen, Kosten

Die Verteilung von Chlorid in einem Bauteil ist heterogen und kann durch die punktuelle Probenentnahme und deren Testung nur bedingt abgebildet werden.

7.53.5 Ausschreibungsanforderungen

Siehe Kapitel 7.1.5 des Teilberichts Tunnel

7.53.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[323] Goethe Universität Frankfurt am Main, Ionenchromatographie – Versuchsanleitung, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, https://www.uni-frankfurt.de/61963184/Praktikumsskript_Ionenchromatographie.pdf?bcs-agent-scanner=ccf4b09b-6640-644f-8d38-46096dafd940, Zugriff 08.09.2022

[324] F. Hunkeler, H. Ungricht, und F. Deillon TFB, Untersuchungen zur chloridbestimmung im Beton und Durchführung eines 2-stufigen Ringversuches, TFB im Auftrag von Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Strassen, FA 88/97, Bericht VSS Nr. 546, 2000.

8 Aufstrebende Technologien

In diesem Abschnitt werden Technologien beschrieben, die neu sind oder sich noch in der Testphase befinden. Die Kapitelstruktur ist dementsprechend abgeändert, um den Fokus auf das Potenzial dieser Technologien legen und Pilotanwendungen aufzuzeigen.

8.1 (interferometrische) Synthetische Apertur-Radar

8.1.1 Beschreibung der Technologie

Satellitengestützte Radarinterferometrie (auch InSAR für 'interferometric synthetic aperture radar' genannt) stützt sich auf ein synthetisches Apertur-Radar (*Synthetic Aperture Radar*, SAR). Das SAR ist ein kontaktloses Messinstrument, das auf einer beweglichen Plattform, wie einem Flugzeug oder einem Satelliten, montiert ist und dadurch Messungen aus weiter Ferne erlaubt. Sein Funktionsprinzip entspricht dem eines herkömmlichen Radars: elektromagnetische Wellen werden ausgesendet und die rückgestreuten Echos von der Antenne aufgezeichnet. Im Falle von SAR verändern sich die Positionen aufgrund der sich bewegenden Messplattform. Durch eine kohärente Kombination der reflektierten Signale wird die Konstruktion einer virtuellen Apertur möglich. Diese Eigenschaft gibt der Technik den Namen "synthetische Apertur", die auf ein abbildendes Radar hinweist [325]. Um das Bild korrekt zusammenzusetzen, verwendet die Technik zwei Merkmale, die in jedem empfangenen Signal enthalten sind: Amplitude und Phase der reflektierten Welle. Erstere charakterisiert die Signalintensität und bestimmt die Zusammensetzung und Ausrichtung der reflektierenden Oberfläche. Die Phase wird indirekt genutzt, wenn das Radar dieselbe Region erneut abbildet, um die topografischen Konturen der zu untersuchenden Oberfläche zu verfolgen. Wenn die zusammengesetzten Radarbilder nicht identisch sind, können differentielle Bewegungen nachvollzogen werden. Dieses Prinzip ist in Abb. 8. dargestellt und eine Zusammenstellung der SAR-Merkmale befindet sich in [325]. InSAR-Ansätze (siehe Abb. 8. rechts) gehen noch einen Schritt weiter, indem sie SAR-Techniken mit Interferometrie verbinden und damit eine Abbildung in der dritten Dimension ermöglichen. Eine potenzielle Höhenänderung auf der Oberfläche (Δh), wird über die Schrägentfernungsdifferenz (Δr) erfasst [328].

Alles in allem stellen InSAR-Techniken ein nicht-invasives, kostengünstiges Instrument zur Erkennung und Überwachung von Deformationstrends und Geschwindigkeitskarten aus der Ferne dar, selbst für viele Messpunkte oder über lange Untersuchungszeiträume.

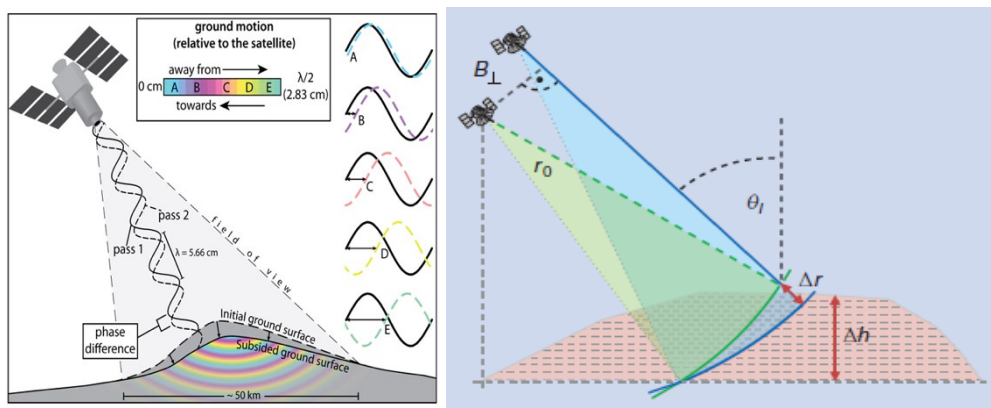


Abb. 8.132 Funktionsweise des synthetischen Apertur-Radars (SAR) aus Satellitenbasis (links, Abbildung von [327] übernommen) und der Höhenmessung mittels InSAR (rechts, Abbildung von [328] übernommen)

8.1.2 Aktueller Stand der Forschung, Potenzial und Grenzen

Die InSAR Technologie wird bereits erfolgreich in geotechnischen Anwendungen eingesetzt um großflächige Hang- oder Gletscherinstabilitäten zu überwachen [329]. Dank der Kommerzialisierung der Satellitentechnologie und der InSAR-basierte Höhenmessung

stehen mehr als ein Dutzend weltraum- oder luftgestützte Interferometer zur Verfügung [330]. Der Einsatz von InSAR-Techniken für die Überwachung des baulichen Zustands bietet im Vergleich zu aktuellen Überwachungsansätzen ein grosses Potenzial, da ganze Infrastrukturnetze in einem relativ kurzen Zeitfenster untersucht werden könnten.

Darüber hinaus brauchen InSAR-basierte Verfahren keine lokale Installation von Referenzpunkten an Kunstbauten, welches Interaktionen oder Störungen des Infrastrukturbetriebs minimiert. Die Robustheit der verfügbaren Techniken aufgrund der Wiederholbarkeit der Messungen und die relativ hohe Präzision sind zusätzliche Vorteile, die allerdings von der Erfahrung der Vermesser und der Verfügbarkeit von Satelliten- oder Luftbildsensoren abhängen. Im Vergleich zu verfügbaren bodengestützten Sensoren wie GPS-Stationen zeichnen sich InSAR-Techniken ausserdem dadurch aus, dass sie zusätzlich die innovative Eigenschaft bieten, historische Zeitreihen von Verschiebungen zu rekonstruieren, welches einen wertvolle Datensatz ermöglicht. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass die Zuverlässigkeit dieser Messtechnik bei der Bereitstellung dokumentierter Deformationsreihen nur in Bezug auf den spezifischen zeitlichen und räumlichen Bezugspunkt gegeben ist. Das Potenzial von InSAR-Ansätzen für die Infrastrukturüberwachung wird durch die folgenden Vorteile gespeist [336]:

- Hohe Produktivität und Überwachung mit mehreren Grössenordnungen
- Hohe Auflösung und Präzision
- Robustheit durch Wiederholbarkeit
- Minimale Störung des Betriebs und keine Interaktion mit der Infrastruktur
- Zeitreihen für den Deformationstrend
- Etablierte Technik für Bodenbewegungen und andere Umweltüberwachungen [328]

Dem gegenüber stehen die folgenden Begrenzungen für Anwendungen:

- Relativ hohe Anforderungen an die Rechenkapazität
- Erfordert erfahrenes Personal
- Verfügbarkeit von Ausrüstung und Sensoren (z.B. Satelliten) ist begrenzt und erlaubt typischerweise nicht mehr als maximal einen täglichen Messwert
- Begrenzte Fähigkeit Bilder mit hoher Auflösung zu erzeugen welche ein weiträumiges Messareal, wie zum Beispiel eine lange Brücke, abdecken
- Die Bewegung eines Brückenelementes kann nur in Blickrichtung des Sensors genau bestimmt werden (d.h. Ost-West Richtung bei satellitenbasierten Systemen).
- Schnee- oder Regenbedeckung der Kunstbauten beeinflussen die Messung und können die Messung unmöglich machen
- Interferenzen mit zivilen und militärischen Kommunikationssystemen welche bei einer reduzierten Frequenzbandbreite stärker ausgeprägt sind [335]

Neue Fortschritte betreffen bi- und multistatische Ansätze, bei denen jede Sende- und Empfangsradarantenne an Bord einer anderen beweglichen Plattform platziert ist. Somit können mehrere InSAR-Interferometrieconfigurationen erreicht werden, die eine höhere Abbildungspräzision und Robustheit bieten. An einer ähnlichen Entwicklungsfront wurden SAR-Systeme mit mehreren Eingängen und mehreren Ausgängen (MIMO) vorgeschlagen, bei denen die Vorteile des Einsatzes mehrerer Sender in der Vergrösserung des Abdeckungsbereichs und der Unterdrückung von Azimuth-Mehrdeutigkeiten bestehen.

Für die Erfassung von Zeitreihen durch häufige Wiederbegehungen desselben Gebiets wurden fortschrittliche Differential-InSAR-Ansätze vorgeschlagen. Diese Klasse von Techniken stützt sich auf Aufnahmesequenzen über grosse Zeitfenster, um potenzielle räumliche und zeitliche Muster der untersuchten Verformungen durch die Erzeugung von Zeitreihen zu erfassen [330]. In diesem Zusammenhang werden die Sensorinformationen in der Regel mit multitemporalen algorithmischen Techniken gekoppelt, um Zeitreihen der Bodenverformung zu erzeugen. Eine der bekanntesten Techniken ist der Small Baseline Subset (SBAS)-Algorithmus, der keine Vorabinformationen über die Deformationsphänomene des Zielgebiets erfordert und zwei räumliche Auflösungsstufen

ermöglicht: eine lokale mit voller Auflösung und eine regionale Analyse mit geringer Auflösung.

8.1.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die InSAR-Messtechnik ermöglicht saisonale Verformungsmessungen von Infrastrukturnetzen, die sich über Hunderte von Kilometern erstrecken können, und das zu geringen Kosten und mit einer Genauigkeit von bis zu 1 mm/Jahr. Mit Blick auf die Überwachung des Zustands von Kunstbauten könnte dies einen Beitrag zur Entwicklung wirksamer Warnsysteme leisten.

InSAR-Instrumente können beispielsweise eingesetzt werden zur:

- Durchführung von Schwingungsanalysen sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich;
- Erkennung und Messung von Fundamentsetzungen oder differentiellen Setzungen auf dem benachbarten geologischen Profil einer Brücke;
- Überwachung von Widerlagern und möglichen Absenkungen;
- Erkennung von thermischen Dilatationseffekten
- Lokalisierung von thermischen Fugen als Risskandidaten.

Um die Zuverlässigkeit und Robustheit der Zustandsüberwachung weiter zu verbessern, können InSAR-Techniken als Komponenten hybrider Ansätze eingesetzt werden, durch Kombination mit GPR-Sensoren, Beschleunigungsmessern oder anderen lokalen und kontaktbasierten Überwachungsinstrumenten.

Bei Kunstbauten, die mit hochauflösenden SAR-Techniken überwacht werden, müssen jedoch die folgenden Schlüsselkomponenten berücksichtigt werden, welche die SAR-Phase erheblich beeinflussen: die lineare Verformung, die das Ziel aufweist, der Höhenunterschied und der Effekt der Wärmeausdehnung. Bei stabilen Strukturen aus Stahl oder Stahlbeton kann der Effekt der thermischen Ausdehnung die beiden anderen Komponenten dominieren. Um diese Aspekte richtig zu unterscheiden und zu berücksichtigen, muss der SAR-Datensatz genügend Messpunkte enthalten, keine der oben genannten Komponenten sollte Ausreisser oder Extremwerte aufweisen und die Korrelation zwischen den zeitlichen, räumlichen und temperaturbasierten Basislinienvektoren sollte vernachlässigbar sein.

Jeder Einsatz von InSAR-Techniken braucht geeignetes Personal und Instrumentenbediener sowie eine fallspezifische Behandlung um diese Kriterien zu erfüllen. Dies bedeutet, dass jeder Fall von InSAR-basierter Dauerüberwachung von Kunstbauten eine fallspezifische Anwendbarkeitsstudie erfordert, die Faktoren wie die Datensatzempfindlichkeit für die Höhenschätzung [331], die Genauigkeit der erhaltenen Bilder auf der Grundlage der statistischen Merkmale der Höhenresiduen [332], die zeitlichen Kohärenzen [333] oder die Grösse des thermischen Ausdehnungseffekts [334].

Die nichtlineare Natur der zeitlichen und räumlichen Bewegungen von Brücken in den ersten Monaten nach dem Bau oder auch der starken Erschütterungen aufgrund von starkem Verkehr oder Wind könnte eine höhere zeitliche Auflösung erfordern, als es die SAR-Technologie hergibt. Die Messung von Infrastrukturschwingungen mit InSAR-Techniken sowohl für Dämme als auch für Brücken hat sich jedoch als möglich erwiesen [337], wie an den Anwendungsbeispielen (siehe Unterkapitel 8.1.5) erkenntlich.

8.1.4 Datenerfassung, Messgrößen und Präzision

Für die Überwachung des Zustands von Infrastrukturen mit Hilfe von SAR-Techniken ist in der Regel ein SAR-Datensatz erforderlich, der lange Sequenzen von SAR-Satellitenbildern enthält, die idealerweise sowohl aus absteigenden als auch aus aufsteigenden Umlaufbahnen aufgenommen wurden. Die gewonnenen Datensätze sind in der Regel geokodiert, wobei jedes kohärente Pixel Deformationszeitreihen in voller Auflösung und mittlere Deformationsgeschwindigkeitskarten darstellt. Darüber hinaus enthält jedes Pixel zusätzliche eindeutige Kennungen, die Informationen über mehrere Parameter liefern, nämlich: Breitengrad, Längengrad, Topografie, mittlere Deformationsgeschwindigkeit,

zeitliche Kohärenz, Komponenten des Einheitsvektors der Sichtlinie und Zeitreihen der Verschiebung. Es erfordert erfahrenes Personal, um den Gesamtprozess zu überwachen und die Anwendbarkeit von InSAR-gestützten Techniken für jede Fallstudie zu bewerten.

Was die Präzision betrifft, so liegt die Genauigkeit von Verschiebungsmessungen je nach Verfügbarkeit der Ausrüstung und der Datensatzinformationen typischerweise im Zentimeter- bis Millimeterbereich und die Wiederholungszeit beträgt einige Tage. Ausführlichere Informationen zu den Eigenschaften der einzelnen SAR-Sensoren finden sich in [326]. Jedes Pixel eines SAR-Bildes entspricht einer Entfernungsinformation, die auf einen Bruchteil der Wellenlänge des Radars genau ist. Dies bedeutet, dass die Beobachtung und Messung von Weglängenunterschieden in der Grössenordnung von Zentimetern oder sogar Millimetern möglich ist und nicht von der relativen Entfernung zwischen dem Sensor und dem Ziel abhängt. Darüber hinaus wurden viele grundlegende Probleme, wie die Mehrdeutigkeit der gemessenen Entfernungsdifferenz mit der Wellenlänge, durch die Verwendung externer Informationen und geeigneter Techniken und Regelmässigkeitsannahmen, wie z. B. die Phasenablösung, gelöst. Erwähnenswert sind beispielsweise die «*Persistent Scatterer Interferometry*» (PSI), die es ermöglicht, gleichmässige Verformungen bei relativ niedrigen Raten genau zu bewerten, und die frequenzmodulierte Dauerstrich-SAR, die nachweislich zu einer Verringerung der Sendeleistung und zu Kosteneinsparungen führt. Diese Art von Daten ist typischerweise artfremd in dem Sinne, dass sie im Besitz einer dritten Partei sind und für ihre Verwendung eine Genehmigung erforderlich sein kann.

8.1.5 Anwendungsbeispiele

Das Potenzial von InSAR-Geräten für die Überwachung des baulichen Zustands von Kunstbauten wurde in mehreren Anwendungen erforscht, darunter die Bewertung der strukturellen Integrität oder die Messung von Gründungssetzungen, welche speziell bei integralen Brücken von Bedeutung ist.

InSAR wurde als Bestandteil eines vollständigen Strukturüberwachungssystems für die Schadensfrüherkennung eingesetzt [337]. Diese Fallstudie stellt einen innovativen Ansatz der Strukturüberwachung dar, da sie die Leistungsfähigkeit von SAR-Techniken in geografisch ausgedehnten Gebieten unter wechselhaften und schwierigen Witterungsbedingungen demonstriert. Darüber hinaus wird die Analyse modaler Eigenschaften genutzt und Mikrobewegungsschätzungen für kritische Brückenbereiche durchgeführt, wodurch neue Genauigkeitswerte für solche Ansätze festgelegt werden. Eine SAR-basierte Schwingungskarte, welche als Basis zur Schadenserkennung genutzt wird, wird beispielsweise in Abb. 8.133 gezeigt.



Abb. 8.133 Foto und optische Darstellung der Schwingungskarte der 'Italia'-Brücke.
Quelle: [337]

Ein gekoppeltes System zur Strukturüberwachung, welches DInSAR-Ergebnisse mit experimentell ermittelten dynamischen Merkmalen aus Schwingungsmessungen (basierend auf Umgebungerschütterungen) verbindet, wird in [338] beschrieben. Die abgeleitete DInSAR-Raumkarte wird für die Analyse der Verformung auf lokaler Ebene und die Rekonstruktion von Zeitreihen sowohl für die Strukturkomponenten der Brücke als auch für den Baugrund verwendet. Die zusätzliche Versuchskampagne mit Schwingungsmessungen hat die satellitengestützten Ergebnisse bestätigt, sodass diese Fallstudie den Nutzen, den die Integration von In-situ-Überwachung mit Fernsensoren bieten kann, aufzeigt.

Auch ein Rahmenwerk zur Datenfusion von GPR-Daten und SAR-Bildern wurde vorgeschlagen um einen robusteren und zuverlässigeren Überwachungsansatz für Kunstbauten zu ermöglichen [339] welches die lokale Zuverlässigkeit des GPR mit dem ausgedehnten Messbereich des InSAR kombiniert um mögliche Senkungen in einer kilometerlangen Eisenbahnlinie zu erkennen.

Ein weiteres Fallbeispiel veranschaulicht die Möglichkeit zur Nutzung historischer Daten. Mithilfe von InSAR Daten und einer probabilistischen Analyse, wurde die Verformung der Morandibrücke (Genua) anhand historischer Satellitendaten (COSMO-SkyMed und Sentinel) bestimmt [340]. Exzessive Verschiebungen wurden Monate vor dem Teileinsturz hervorgehoben, welche als frühzeitige Warnung hätten dienen können. Allerdings hat eine zweite unabhängige Studie [341] diese Resultate nicht bestätigt, was die Abhängigkeit der Resultate von der benutzten Methode unterstreicht. Deswegen ist eine zuverlässige Anwendung der Methode zur Dauerüberwachung von Kunstbauten noch nicht möglich und sollte nicht unabhängig von anderen Messsystemen eingesetzt werden. Auch die Analyse der Vibrationsmoden der Morandibrücke mithilfe von Satellitendaten hat das Potenzial zur Schadenserkennung angedeutet [337].

8.1.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [325] Rosen, P. A. (2000). Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 333-382.
-
- [326] Sansosti E, B. P. (2014). How second generation SAR systems are impacting the analysis of ground deformation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.*, 28:1-1.
-
- [327] Global Volcanism Program (Smithsonian Institution), 2012. doi:10.5479/si.GVP.BGVN201205-332020
-
- [328] Moreira, Alberto, Pau Prats-Iraola, Marwan Younis, Gerhard Krieger, Irena Hajnsek, and Konstantinos P. Papathanassiou. "A tutorial on synthetic aperture radar." *IEEE Geoscience and remote sensing magazine* 1, no. 1 (2013): 6-43.
-
- [329] Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Präsentationsunterlagen 'Radarinterferometrie für die Schweiz, 27.04.2018.
-
- [330] Pepe, A., & Calò, F. (2017). A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. *Applied Sciences* 7.12, 1264.
-
- [331] R. Bamler, M. E. (2009). Interferometric potential of high resolution spaceborne SAR. *Photogrammetrie-Fernerkundung – Geoinf.*, 407-419.
-
- [332] T. Wang, D. P. (2010). Three gorges dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis. *Sci. China Earth Sci.*, 720-732.
-
- [333] J. J. Sousa, M. L. (2015). Satellite SAR interferometry for monitoring dam deformations in Portugal. *Dam World*.
-
- [334] Lazecky M, H. I. (2016). Bridge displacements monitoring using space-borne X-band SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 205-210.
-
- [335] Meyer FJ, N. J. (2013). Correction and characterization of radio frequency interference signatures in L-band synthetic aperture radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(10):4961-72.
-
- [336] Tosti, F. V. (2020). Transport infrastructure monitoring by data fusion of GPR and SAR imagery information. *Transportation Research Procedia*, 45, 771-778.
-
- [337] Filippo Biondi, P. A. (2020). Perspectives on the Structural Health Monitoring of Bridges by Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing*, 12(23):3852.
-
- [338] Felice Carlo Ponzio, C. I. (2021). Transport Infrastructure SHM Using Integrated SAR Data and On-Site Vibrational Acquisitions: "Ponte Della Musica–Armando Trovajoli" Case Study. *Study. Appl. Sci.*, 6504.
-
- [339] Tosti, F. V. (2020). Transport infrastructure monitoring by data fusion of GPR and SAR imagery information. *Transportation Research Procedia*, 45, 771-778.
-
- [340] Milillo, Pietro, Giorgia Giardina, Daniele Perissin, Giovanni Milillo, Alessandro Coletta, and Carlo Terranova. "Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi Bridge, Genoa, Italy." *Remote Sensing* 11, no. 12 (2019): 1403.
-
- [341] Lanari, Riccardo, Diego Reale, Manuela Bonano, Simona Verde, Yasir Muhammad, Gianfranco Fornaro, Francesco Casu, and Michele Manunta. "Comment on "pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the morandi bridge, Genoa, Italy" by Milillo et al.(2019)." *Remote Sensing* 12, no. 24 (2020): 4011.
-

8.2 Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV)

8.2.1 Beschreibung der Technologie

Das LDV ist ein berührungsloser Geschwindigkeitsaufnehmer, der nach dem Prinzip der Messung der Doppler-Frequenzverschiebung eines Laserstrahls arbeitet, der von einem sich bewegenden Ziel mit Hilfe eines Interferometers gestreut wird. Die eingebaute Elektronik wandelt das Dopplersignal in eine analoge Spannung um, die proportional zur momentanen Geschwindigkeit des Ziels ist [342].

Die wesentlichen Bestandteile eines LDVs für Einzelpunktmessungen sind in Abb. 8.134 dargestellt. Ein Laserstrahl trifft auf die Oberfläche einer schwingenden Probe und eine Welle wird von der Oberfläche reflektiert. Die Oberflächenschwingungen bewirken eine Dopplerfrequenzverschiebung der reflektierten Welle, die linear mit der Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung zusammenhängt, d.h.,

$$f_D = 2 \frac{v}{\lambda}$$

wobei λ die Wellenlänge der auftreffenden Welle ist. Ein LDV misst also f_D und bestimmt dann die Schwingungsgeschwindigkeit. Da Doppler-Verschiebungen im Vergleich zur Laser-Grundfrequenz in der Regel sehr klein sind (typische Verhältnisse liegen bei etwa 1/100), wird die Interferometrie eingesetzt, um hochfrequente Schwingungen zu kombinieren und auf Werte zu reduzieren, die mit Standardelektronik gelesen werden können.

Mit Bezug auf [342] wird der Strahl eines Lasers durch einen Strahlteiler (BS I) in einen Referenzstrahl und einen Messstrahl geteilt. Nach Durchlaufen eines zweiten Strahlteilers (BS II) wird der Messstrahl auf die Probe fokussiert und von dieser reflektiert. Dieser reflektierte Strahl wird nun durch den BS II nach unten abgelenkt und gelangt dann zusammen mit dem Referenzstrahl auf den Detektor. Da der optische Weg des Referenzstrahls über die Zeit konstant ist, erzeugt eine Bewegung der vibrierenden Probe ein Hell-Dunkel-Muster auf dem Detektor. Ein vollständiger Hell-Dunkel-Zyklus auf dem Detektor entspricht einer Objektverschiebung von genau der halben Wellenlänge des verwendeten Lichts.

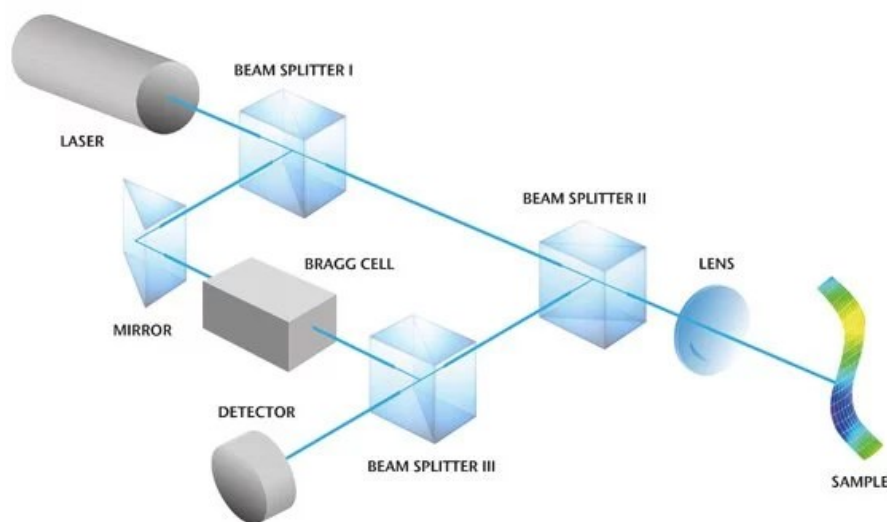


Abb. 8.134 Grundlegende Komponenten eines Ein-Punkt-LDV [342]

Die Änderung der optischen Weglänge pro Zeiteinheit manifestiert sich als Dopplerfrequenzverschiebung des Messstrahls. In messtechnischer Hinsicht bedeutet dies, dass die Modulationsfrequenz des ermittelten Interferometerpatterns direkt proportional zur Geschwindigkeit der Probe ist. Da die Bewegung des Objekts vom Interferometer weg dasselbe Modulationsmuster (und dieselben Modulationsfrequenzen)

erzeugt wie die Bewegung des Objekts auf das Interferometer zu, kann mit dieser Anordnung allein nicht eindeutig bestimmt werden, in welche Richtung sich das Objekt bewegt. Zu diesem Zweck wird ein akusto-optischer Modulator (Bragg-Zelle), der die Lichtfrequenz typischerweise um 40 MHz verschiebt, in den Referenzstrahl eingebracht (zum Vergleich: die Frequenz des Laserlichts beträgt $4,74 \cdot 10^{14}$ Hz). Dadurch entsteht ein typisches Interferenzmuster mit einer Modulationsfrequenz von 40 MHz, wenn sich die Probe im Stillstand befindet. Bewegt sich das Objekt dann auf das Interferometer zu, erhöht sich diese Modulationsfrequenz, und wenn es sich vom Interferometer wegbewegt, empfängt der Detektor eine Frequenz von weniger als 40 MHz. Damit ist es nun möglich, nicht nur die Weglänge, sondern auch die Bewegungsrichtung eindeutig zu erkennen.

Die soeben beschriebenen Grundprinzipien wurden erweitert, um verschiedene Messfälle abzudecken, wie z. B.:

- Ein-Punkt-Vibrometrie: Messung der Schwingungen eines Objekts in Richtung des Laserstrahls.
- Differentialvibrometrie: Messung von Schwingungen an zwei Punkten, die relativ zueinander schwingen.
- Scanning-Vibrometrie: misst die gesamte Oberfläche der Probe mit einer Reihe von Einzelpunktmessungen. Diese Methode führt zu Übertragungsfunktionen zwischen den Messorten, die im Frequenzbereich als Betriebsablenkungsformen dargestellt werden.
- Rotationsvibrometrie: Messung der Winkelgeschwindigkeit und der Winkelverschiebung von Rotationsschwingungen an einer beliebigen Form einer rotierenden Struktur.
- In-plane-Vibrometrie: misst Schwingungen und Bewegungen senkrecht zur Messachse

8.2.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Der aktuelle Stand der Forschung zu LDVs konzentriert sich auf die Entwicklung von Methoden zur Kompensation von Rauschen und Umwelteinflüssen, um die Robustheit des Sensors und seinen Anwendungsbereich zu erhöhen. Eine kürzlich erschienene Sonderausgabe über LDV gibt einen Überblick über die neuesten wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen auf diesem Gebiet [343], [411]. Ein zunehmender Trend ist die Anwendung von LDVs in biologischen Systemen. Auch Miniatur-LDVs sind Gegenstand aktiver Forschung [344].

Zu den positiven Eigenschaften der LVD-Sensoren zählen ihre erhöhte Genauigkeit, Haltbarkeit und Tragbarkeit. Zu den Einschränkungen gehören die Tatsache, dass solche Sensoren nicht für Langzeitüberwachungsmessungen verwendet werden können, sowie die damit verbundenen Kosten für die Instrumentierung, die von etwa 50'000 CHF für ein Einzelpunktgerät bis zu 600'000 bis 800'000 CHF für scannende LDVs reichen.

8.2.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Derzeit gibt es LDV-Sensoren, die speziell für Messungen an grossen und weit entfernten Strukturen, wie z. B. Brücken, entwickelt wurden. Diese bieten berührungslose Messungen aus Arbeitsabständen von mehr als 300 m und sind in der Lage, auf einer Vielzahl von Oberflächen zu messen. Ein typischer Aufbau besteht aus einem starren Stativ, auf dem der Sensor befestigt ist und das weit vom Zielpunkt entfernt ist. Die Hersteller behaupten, dass Messungen über grosse Entfernungen unter allen Lichtverhältnissen möglich sind.

8.2.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

Die erfassten Daten liegen in Form von Spannung vor, die auf Weg- oder Geschwindigkeitseinheiten skaliert ist. Bei Mehrpunktmessungen (d. h. 3D-LDV) wird die gesamte räumlich-zeitliche Schwingungsantwort der Probe erfasst. In einem solchen Fall können je nach dem interessierenden Bereich Rainflow-Diagramme oder Frequenz-Wellenzahl-Diagramme im Zeit- bzw. Frequenzbereich formuliert werden.

Typische Spezifikationen für LDV-Sensoren sind:

- Räumliche Auflösung: 7,5 mm auf 100 m

- Schärfentiefe: 28,7 m bei 100 m
- Empfindlichkeitsbereiche (Geschwindigkeit): von 0,4 mm/s/V bis 2500 mm/s/V
- Auflösung (Geschwindigkeit): von 10 nm/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bei 2,5 kHz bis 150 nm/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ bei 50 kHz
- Empfindlichkeitsbereiche (Verschiebung): von 0,1 $\mu\text{m/V}$ bis 1,0 $\mu\text{m/V}$
- Auflösung (Verschiebung): von 0,04 nm bis 0,30 nm
- Frequenzbandbreite (bereichsabhängig): von 0 Hz bis 2 MHz

8.2.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Einer der ersten Versuche, LDVs für die Brückenüberwachung einzusetzen, wurde von Nassif et al. [345] unternommen. In dieser Arbeit messen die Autoren die Durchbiegungen und Schwingungen von Brückenträgern mit Hilfe von LDVs und vergleichen sie mit herkömmlichen Sensoren wie LVDTs und Geophonen. Sie argumentieren, dass die LDVs eine grössere Vielseitigkeit bieten, da ein System sowohl die Verschiebung als auch die Geschwindigkeit messen kann, während es im Gegensatz zu Kontaktsensoren mit festem Punkt einfacher ist, viele Positionen einzurichten und zu messen.

Zu den negativen Aspekten von LDVs wird die Unfähigkeit des Systems, in einem Langzeitmodus zu arbeiten, angeführt. Miyashita et al. [346] setzen LDVs zur Verfolgung der durch Züge verursachten Belastungen auf einer Stahlkastenträgerbrücke ein. Ihr Messsystem besteht aus drei scannenden LDVs und einem Einzelpunkt-LDV und ist in der Lage, die Schwingungsmoden der Brücke zu identifizieren und gleichzeitig Einblicke in lokale Phänomene zu geben, wie z. B. die Schäden, die am unteren Flansch des Hauptträgers entstehen. In jüngerer Zeit haben Malekjafarian et al. [347] die Machbarkeit der Anwendung von LDV-Messungen von kreuzenden Fahrzeugen zur Erkennung von Brückenschäden nachgewiesen. Ihre Studie ist jedoch rein theoretisch und muss noch in der Praxis getestet und validiert werden.

8.2.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [342] Polytec - Laser Doppler Vibrometry. <https://www.polytec.com/eu/vibrometry/technology/laser-doppler-vibrometry> (Letzter Zugriff: 14.10.2022).
-
- [343] Vanlanduit, S., & Dirckx, J. (2017). Redaktionelle Sonderausgabe zum Thema "Laser-Doppler-Vibrometrie". Optics and Lasers in Engineering, 99, 1-2.
-
- [344] Li, Y., Dieussaert, E., & Baets, R. (2022). Miniaturisierung von Laser-Doppler-Vibrometern - ein Überblick. Sensors, 22(13), #4735.
-
- [345] Nassif, H.H., Gindy, M., & Davis, J. (2005). Vergleich von Laser-Doppler-Vibrometern mit Kontaktsensoren zur Überwachung von Brückendurchbiegung und Vibration. NDT & E International, 38(3), 213-218.
-
- [346] Miyashita, T., Ishii, H., Fujino, Y., Shoji, T., & Seki, M. (2006). Klärung der Auswirkung von Hochgeschwindigkeitszug-induzierten Schwingungen auf eine Eisenbahn-Stahlhohlkastenbrücke mit Hilfe von Laser-Doppler-Vibrometern. In Proceedings of the Third International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 16-19 July 2006, Porto, Portugal.
-
- [347] Malekjafarian, A., Martinez, D., & O'Brien, E. J., (2018). The Feasibility of Using Laser Doppler Vibrometer Measurements from a Passing Vehicle for Bridge Damage Detection. Shock & Vibration, Vol. 2018, #9385171.
-

8.3 On-Board Monitoring

8.3.1 Beschreibung der Technologie

Direkte Messungen der Strassenrauhigkeit werden typischerweise mit laserbasierten Systemen (Lidar) durchgeführt. Indirekte SHM-Ansätze können mit Hilfe von Fahrzeugen durchgeführt werden, im Rahmen des sogenannten On-Board-Monitoring (OBM) Paradigmas. OBM-Messungen werden durch Sensoren (z. B. Beschleunigungsmessern) die auf Fahrzeugen eingesetzt werden und die während der Überquerung über die betreffende Struktur Schwingungsdaten erfassen (vgl. Abb. 8.135). Im Rahmen von OBM-Messungen kann es sich entweder um spezielle Fahrzeuge handeln, die ausschliesslich Daten für die Überwachung sammeln, oder um Fahrzeuge, die während des normalen Betriebs Daten sammeln. Die Überwachung der Infrastruktur mittels On Board Monitoring (OBM) umfasst drei Schritte: i) Datenerfassung, ii) Datenverarbeitung und iii) Datenanalyse. Für die Datenerfassung müssen Sensoren an bestimmten Stellen auf Fahrzeugen installiert werden, die über die Struktur fahren. Die Daten werden dann gefiltert oder zerlegt, um Rauschen und unerwünschte Frequenzen zu eliminieren oder um nützliche Informationen über die Frequenzkomponenten der Struktur zu erhalten. Schliesslich werden die verarbeiteten Daten analysiert, um modale Parameter, Schadensindizes usw. zu erhalten.



Abb. 8.135 An der Fahrzeugkarosserie montierter PCB-Beschleunigungsmesser (links), adaptiert von [348], und Smartphone (MEMS)-basierte Beschleunigungsmessung (rechts), adaptiert von [348]

8.3.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Bei Strassenbrücken zielt die OBM-Forschung in erster Linie darauf ab, die modalen Eigenschaften der Brücke auf der Grundlage von Schwingungsdaten (in der Regel Beschleunigungsdaten) von überfahrenden Fahrzeugen zu ermitteln. Die modalen Eigenschaften helfen dabei Schäden zu erkennen (siehe Abb. 8.136).

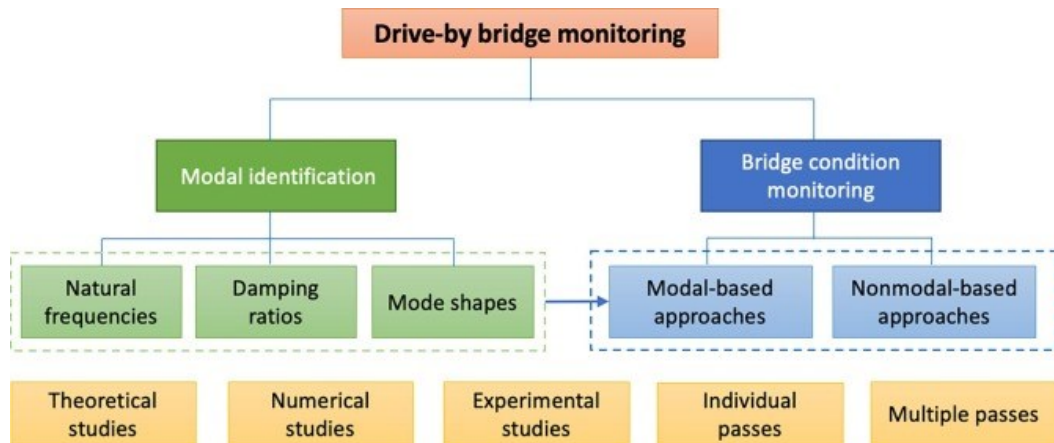


Abb. 8.136 Zusammenfassung des aktuellen Stands der Technik bei der Drive-by-Brückenüberwachung [349]

Ein sehr häufig verwendeter modaler Index ist die Brückenfrequenz. Ein einfacher Ansatz zur Schätzung von Frequenzen aus Schwingungsdaten besteht in der Verwendung einer Fourier-Transformation [350]. Obwohl dieser Ansatz einfach ist, leidet er darunter, dass die relevanten Frequenzen durch die Interferenz mit den Frequenzen des überfahrenden Fahrzeugs überlagert werden. Empirische Modenzerlegung, Bandpassfilter und Singulärspektralanalyse werden dazu eingesetzt, um die Frequenzen des Fahrzeugs zu filtern und höhere Brückenmoden zu identifizieren [349],[351] (Abb. 8.137). Seit neuestem werden Verfahren zur Systemidentifizierung, wie die stochastische Unterraumidentifizierung (SSI) [352] (Abb. 8.137) und der multivariable Ausgangsfehler-Zustandsraum [353] verwendet, um Brückenfrequenzen von überfahrenden Fahrzeugen zu extrahieren. Ein anderer Ansatz extrahiert die dynamischen Eigenschaften der Brücke anhand von Daten, die von mehreren mobilen Sensoren mit Hilfe einer Matrixvervollständigungsmethode (MIMC) [354] gewonnen werden. Schliesslich haben sich mehrere Studien auf die Identifizierung von Schäden anhand der Eigenformen der Brücke konzentriert. Der am häufigsten verwendete Ansatz zur Rekonstruktion der Eigenformen von Brücken besteht in der Verwendung der Hilbert-Transformation, um die momentane Amplitude der gefilterten Antwort des Fahrzeugs zu erhalten [349].

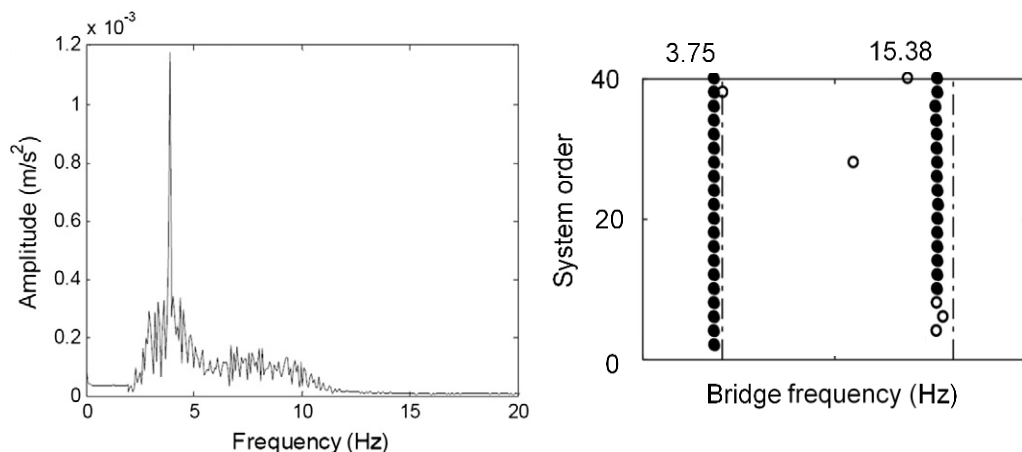


Abb. 8.137 Mit Singulärspektralanalyse und Bandpassfilter bearbeitete Spektren (links), adaptiert aus [351] und Stabilisierungsdiagramm für die Frequenzidentifikation nach einem stochastischen Unterraumidentifikationsansatz (rechts), in Anlehnung an [352]

Für die Schadenserkenkung wurden auch nichtmodale, auf Parametern basierende Methoden entwickelt, die auf Signalverarbeitung beruhen. So wird beispielsweise die Theorie der Moving Force Identification (MFI) angewandt, um dynamische Fahrzeugkräfte aus Fahrzeugbeschleunigungen zu ermitteln und Schäden anhand von Änderungen der ermittelten Kräfte anzuzeigen [355]. Unterschiede zwischen den gemessenen Beschleunigungssignalen für den gesunden und den beschädigten Zustand können

ebenfalls die Lokalisierung von Schäden erleichtern [356]. Die Erkennung von Brückenschäden kann auch auf dem Vergleich der gemessenen Fahrzeugbeschleunigung mit der durch ein scheinbares Profil (AP) verursachten Reaktion beruhen [357].

Alternative Methoden führen eine strukturelle Modalidentifizierung mittels Crowd-Sensing von mehreren Fahrzeugfahrten und Daten von Mobiltelefonen durch. Diese Methoden verwenden modale oder nicht-modale Indizes, um Schäden zu erkennen. Auf der Grundlage von Daten aus einer Reihe von instrumentierten Fahrzeuge und unter Anwendung eines Algorithmus zur Second Order Blind Identification (SOBI) können die Frequenzen, Modenformen und Dämpfungsverhältnisse der durchfahrenen Struktur abgeleitet werden [358]. Andere modal-basierte Methoden verwenden Crowdsourced Modal Identification with Continuous Wavelets (CMICW), um strukturelle Modalparameter auf der Grundlage der räumlich-zeitlichen Reaktionen der Brücke zu extrahieren [359]. Nicht-modale Methoden verwenden Schadensmerkmale wie den euklidischen Abstand der Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCCs) (Cepstrum wird durch die inverse Fourier-Transformation des Logarithmus des Spektrums eines Signals erhalten) in Kombination mit einer Hauptkomponentenanalyse, so dass Daten von vielen Fahrzeugen verwendet werden können [360].

Algorithmen des maschinellen Lernens haben in den letzten Jahren ebenfalls viel Aufmerksamkeit als vielversprechende Methoden für das indirekte SHM von Brücken erhalten. Solche Algorithmen können auf der Grundlage von Vorbeifahrtmessungen an Brücken trainiert werden, so dass Muster im Brückenverhalten erkannt und auch die Auswirkungen von Betriebs- und Umweltfaktoren gelernt werden können. Beispiele für solche Algorithmen sind überwachte Klassifizierungsalgorithmen mit Support Vector Machine (SVM) [361], Künstliche Neuronale Netze (ANN) [362] und Faltungsneuronale Netze (CNN) [363].

Die Anwendung der OBM-Methoden und ihre Wirksamkeit bei der Erkennung von Schäden sind mit mehreren Herausforderungen verbunden. Erstens besteht eine grosse Unsicherheit hinsichtlich des Standorts der Sensoren und folglich des Standorts der Messdaten, weshalb eine sorgfältige Verarbeitung erforderlich ist. In der Regel wird ein globales Satellitennavigationssystem (GNSS), dessen Genauigkeit weitgehend von der ungehinderten Sicht auf den Himmel abhängt, in Kombination mit odometrischen Daten verwendet, um die Fahrzeugposition zu ermitteln. Eine weitere grosse Herausforderung bei der indirekten Überwachung von Brücken mittels OBM ist die verschleiende Wirkung der Oberflächenrauigkeit, die häufig die Identifizierung von Brückenfrequenzen erschwert und die Geschwindigkeit der überfahrenden Fahrzeuge begrenzt. Die meisten indirekten Überwachungsmethoden gehen entweder von bekannten Rauheitsprofilen aus oder eliminieren den Effekt der Oberflächenrauheit. Ein gängiger Ansatz zur Eliminierung des Rauheitseffekts ist die Verwendung des Residualspektrums von zwei Überfahrten des gleichen Fahrzeugs [352], während neuere Studien auch Methoden der blinden Identifizierung zweiter Ordnung anwenden [358]. Die erfolgreiche Anwendung dieser Methoden hängt von der Qualität der Rauheit und der Verfahrensgeschwindigkeit der Überwachungsfahrzeuge ab. In den meisten Fällen ist das Rauheitsprofil jedoch nicht bekannt, und die Geschwindigkeit der durchfahrenen Fahrzeuge kann nicht begrenzt werden (z. B. bei im Betrieb befindlichen Hochgeschwindigkeitszügen). Schliesslich erfordert die Quantifizierung von Schäden immer noch geeignete Indizes, insbesondere für Schäden mit begrenztem Einfluss auf das Gesamtverhalten der Struktur. Die Bewältigung dieser Herausforderungen kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von OBM-Methoden bei der Erkennung von Brückenschäden erheblich verbessern und das Potenzial für die Automatisierung der Bewertung von kilometerlangen Infrastrukturen, z. B. von mehreren Brücken, durch den Einsatz von Fahrzeugen mit begrenzter Instrumentierung erhöhen. In dieser Richtung müssen weitere Feldtests durchgeführt werden, um die betrieblichen Herausforderungen und Grenzen zu ermitteln.

Eine wichtige Einschränkung der OBM-Ansätze liegt in der korrekten Interpretation der erzielten Ergebnisse. Oftmals kann eine ermittelte Frequenz keinen eindeutigen Hinweis auf Schäden an einer Brücke geben, da kleine Schwankungen der Frequenzen auf Betriebs- oder Umweltfaktoren (z. B. Temperaturunterschiede) zurückzuführen sein können [349]. Darüber hinaus funktionieren die meisten der vorgeschlagenen Ansätze gut

bei Brücken mit grosser Spannweite, da bei Brücken mit kurzer Spannweite oder steifen Brücken keine Schwingungen auftreten, die von Fahrzeugen erfasst werden können. Schliesslich müssen die für die Überwachung verwendeten Fahrzeuge in der Regel ausreichend schwer sein, z. B. Lkw und Busse, um die Brücke ausreichend anzuregen.

Die Kosten der derzeitigen indirekten Verfahren zur Feststellung von Brückenschäden hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, darunter die gewählte Überwachungsmethode, die Art der verwendeten Sensoren, die Installations- und Wartungskosten, die Kosten für die Erfassungseinheit und die Datenübertragung, die Frage, ob spezielle oder in Betrieb befindliche Fahrzeuge eingesetzt werden, usw. Daher können die Kosten für die indirekte Überwachung von Strassenbrücken mit Hilfe von Überführungsfahrzeugen von Fall zu Fall erheblich variieren.

8.3.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

OBM kann für die Überwachung verschiedener Teile von Brückenstrukturen und die Identifizierung verschiedener Arten von Schäden eingesetzt werden. Je nach den gewünschten Informationen werden die gewonnenen Schwingungsdaten unterschiedlich verarbeitet, um Beschleunigungen, Verschiebungen, Dehnungen, Frequenzen, Dämpfungsverhältnisse usw. zu exportieren. Daraus ergeben sich verschiedene Anwendungen:

- Identifizierung der modalen Eigenschaften (Frequenzen, Dämpfungsgrad, Modenformen) von Brücken und damit verallgemeinerter Schäden an der Brückenstruktur.
- Identifizierung von Strassenrauhigkeitsprofilen durch den Einsatz fortgeschrittener Filtermethoden. Diese Methoden umfassen Signalzerlegungstechniken, wie die Wavelet-Transformation [364] oder gemischte Filteransätze, einschliesslich Kalman-, Bandpass- und Kompensationsfilter [365].
- Überwachung von Übergangszonen vor und nach der Brückenkonstruktion durch Inertialmessungen, die Aufschluss über lokale Steifigkeitsschwankungen geben.
- Erkennung von Rissen auf Strassen.
- Erkennung von Brückenkolken durch eine lokale Verringerung der Steifigkeit eines bestimmten Pfeilers.

8.3.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

- Die Datenerfassung erfolgt über Beschleunigungssensoren, Dehnungsmessstreifen usw. Die Verwendung von Sensoren der Spitzentechnologie, wie z. B. MEMS-Sensoren (Micro-Electro-Mechanical System), ermöglicht hohe Abtastfrequenzen und damit eine höhere Qualität der gewonnenen Daten.
- Bei den erfassten Daten handelt es sich um Beschleunigungen, Dehnungen und in einigen Fällen auch um Kontaktkräfte. Die Daten werden dann mit Hilfe von Filter- oder Systemidentifikationstechniken verarbeitet, um die gewünschten Ergebnisse zu erhalten. Diese Verarbeitung kann entweder während der Erfassung der Daten online oder nach der Erfassung offline erfolgen.
- Die indirekte Überwachung mit Hilfe von fahrenden Fahrzeugen ermöglicht eine kontinuierliche Versorgung mit Daten. Dadurch entstehen grosse Datensätze, die für maschinelle Lernverfahren zur strukturellen Identifizierung und somit Zustandsbewertung genutzt werden können.
- Die Temperatur ist eine zusätzliche Messgrösse, die für die Charakterisierung des Brückenzustands wichtig ist, da die Brückeneigenschaften saisonal mit der Temperatur schwanken.

Die Genauigkeit des Messsystems hängt von der Art des Sensortyps, der Anordnung der Sensoren an den Fahrzeugen sowie von der Erfahrung des Bedieners ab. Piezoelektrische Sensoren haben eine hohe Messgenauigkeit und ein geringes Rauschen über grosse Bandbreiten, sind aber im Vergleich zu MEMS-Sensoren teurer. Je nach gewählter Anwendung können die erforderliche Auflösung und das Rauschen des Sensors festgelegt werden.

8.3.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die Anwendung indirekter Überwachungstechniken ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden, weshalb die meisten Anwendungen für Forschungsstudien bestimmt sind. Einige der grössten Herausforderungen betreffen die Positionierung der Sensoren am Fahrzeug, die Erfassung und Verarbeitung der Daten sowie die Datenanalyse und -interpretation. Diese Herausforderungen führen dazu, dass die indirekte Überwachung der Strasseninfrastruktur ein hohes Mass an Fachwissen erfordert. Die meisten Anwendungen vor Ort konzentrieren sich auf die Ermittlung der modalen Parameter der Brücke.

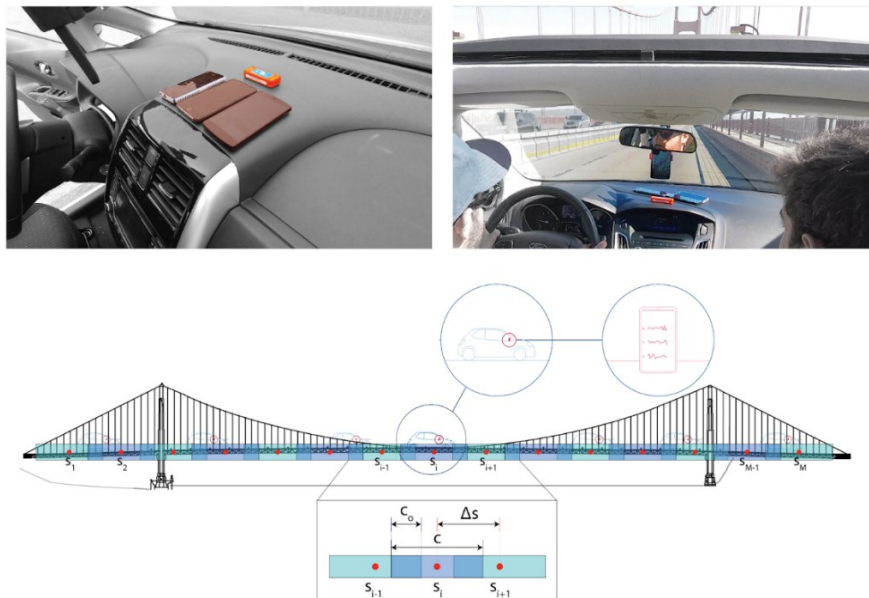


Abb. 8.138 Aufbau für die Datenerfassung von kontrollierten Fahrzeugen, die über die Golden Gate Bridge fahren (oben) und Segmentierung der Brücke für die Überwachung (unten), angepasst aus [366].

Eine Anwendung auf der Golden Gate Bridge wurde auf der Grundlage von Daten durchgeführt, die von mit Smartphones ausgestatteten UBER-Fahrzeugen ermittelt wurden [366]. Der Versuch umfasste 102 Fahrten über die Brücke. Während dieser Fahrten wurden die Daten von zwei Smartphones erfasst. Darüber hinaus wurden weitere 72 UBER-Fahrten ausgewertet. Auf der Grundlage dieser Fahrten wurden die modalen Frequenzen der Brücke exportiert. Die Ergebnisse wurden mit denen von 240 auf der Brücke montierten Beschleunigungsmessern verglichen. Der Vergleich zeigte, dass der vorgeschlagene Rahmen für die indirekte Überwachung die ersten beiden Brückenmodi mit sehr hoher Genauigkeit identifizieren konnte (weniger als 2% Fehler in einem Bereich unter 0,2 Hz).



Abb. 8.139 Experimentelle Fallstudie an einer Brücke der Universität Chongqing zur Bewertung der Fahrbahnoberfläche (links) und der Brückeneigenschaften, Seitenansicht (rechts) [367],[368]

In einer anderen Studie wurde ein spezielles Fahrzeug mit einem individuell ausgestatteten Anhänger sowohl im bewegten als auch im unbewegten Zustand verwendet, um die modalen Eigenschaften der Turtle Mountain Bridge auf dem Campus der Chongqing-Universität in China zu ermitteln. Der Anhänger (Abb. 8.140, links) wurde so konzipiert, dass er sich an einfache Modelle anlehnt, die in theoretischen Studien verwendet werden [367]. Die Extraktion der Modalparameter basiert auf Beschleunigungsmessungen, die sowohl an der Karosserie als auch am Kontaktpunkt mit der Brücke vorgenommen wurden. Dieselbe Brücke wurde auch mit Hilfe eines Fahrzeugs in geparktem Zustand getestet (Abb. 8.140, rechts) [368]. Im Falle des nicht fahrenden Fahrzeugs wurde eine grössere Anzahl Frequenzen ermittelt, darunter auch Torsionsmoden. Das verwendete System ist quasi frequenzfrei, da seine Frequenzen dank der Polyurethanräder höher sind als die relevanten Frequenzen der Brücke. Die ermittelten Brückenfrequenzen zeigen eine gute Übereinstimmung mit denen, die durch direkte Messungen ermittelt wurden.



Abb. 8.140 Selbstentwickeltes Testfahrzeug (links), adaptiert von [367] und frequenzfreies Fahrzeug (rechts), adaptiert aus [368]

Im Rahmen des MITICA-Projekts wurde ein 9 m langer Brückenträger in Originalgrösse gebaut, um die Überwachung von Brücken mittels Überfahrt zu testen. Der Träger befindet sich auf einem speziellen Testgelände der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission in Ispra, Italien. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts wurden jedoch noch keine Ergebnisse veröffentlicht [369].

Schliesslich gibt es Anwendungen von Ansätzen, die auf der Eliminierung des Einflusses der Oberflächenrauheit durch die Verwendung von zwei Überfahrten des gleichen Fahrzeugs beruhen, allerdings nur im Labormassstab. Der Versuchsaufbau, wie er in [370] dargestellt wird umfasst ein Modellbrückensystem, ein Modellversuchsfahrzeug, eine Fahrzeugbewegungsführung, und Kontrollsystem, Oberflächenrauigkeitsprofile, die durch eine Sammlung von dünnen Sperrholzstreifen simuliert werden, sowie ein Datenerfassungs- und -verarbeitungssystem, das Sensoren, Datenlogger und die zugehörige Hard- und Software umfasst [370]. In den Experimenten besteht die Modellbrücke aus drei separaten, einfach gelagerten Aluminiumkanalträgern: dem vorderen Träger für die Beschleunigung des Modellfahrzeugs, dem Hauptträger für die eigentlichen Tests, bei denen die Geschwindigkeit des Modellfahrzeugs annähernd konstant ist, und dem hinteren Träger für die Verzögerung des Modellfahrzeugs. Anhand der Differenz der Kontaktpunktverschiebung, die aus den Fahrzeugreaktionen bei Tests mit unterschiedlichen Fahrzeuggeschwindigkeiten ermittelt wird, werden die ersten drei Frequenzen und die Modenformen des Hauptträgers bestimmt. Die Ergebnisse scheinen gut mit den theoretisch geschätzten Frequenzen und Moden übereinzustimmen.

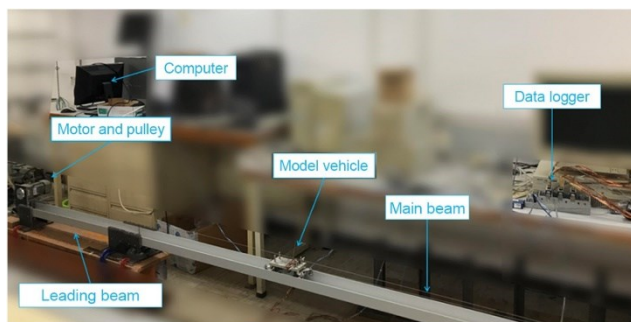


Abb. 8.141 Aufbau eines Laborexperiments zur indirekten Überwachung mit zwei Fahrten eines Fahrzeugs, angepasst aus [370].

8.3.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [348] Di Matteo A., Fiandaca D., Pirrotta A. (2022) Smartphone-based bridge monitoring through vehicle–bridge interaction: analysis and experimental assessment. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, im Druck
-
- [349] Malekjafarian A., Corbally R., Gong E. (2022) A review of mobile sensing of bridges using moving vehicles: Bisherige Fortschritte, Herausforderungen und zukünftige Trends. *Structures*, 44: 1466-1489
-
- [350] An Y., Chatzi E.N., Sim S.H., Laflamme S., Blachowski B., Ou J. (2019) Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(10): e2416
-
- [351] Yang Y.B., Chang K.C., Li Y.C. (2013) Filtertechniken zur Extraktion von Brückenfrequenzen aus einem Testfahrzeug, das sich über die Brücke bewegt. *Engineering Structure*, 48: 353-362
-
- [352] Jin N., Yang Y.B., Dimitrakopoulos E.G., Paraskeva T.S., Katafygiotis L.S. (2021) Application of short-time stochastic subspace identification to estimate bridge frequencies from a traversing vehicle. *Engineering Structures*, 230: 111688 .
-
- [353] Jin N., Dertimanis V.K., Chatzi E.N., Dimitrakopoulos E.G., Katafygiotis L.S. (2022) Subspace identification of bridge dynamics via traversing vehicle measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 523: 116690
-
- [354] Eshkevari S.S., Pakzad S.N., Takac M., Matarazzo T.J. (2020) Modal identification of bridges using mobile sensors with sparse vibration data. *Zeitschrift für Technische Mechanik*, 146
-
- [355] OBrien E.J., McGetrick P., González A. (2014) A drive-by inspection system via vehicle moving force identification. *Smart Structures and Systems*, 13: 821-848
-
- [356] Carnevale M. , Collina A. , Peirlinck T. (2019) A feasibility study of the drive-by method for damage detection in railway bridges. *Applied Sciences*, 9
-
- [357] Elhattab A., Uddin N., OBrien E. (2016) Drive-by bridge damage monitoring using bridge displacement profile difference. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6: 839-850
-
- [358] Eshkevari S.S., Matarazzo T.J., Pakzad S.N. (2020) Bridge modal identification using acceleration measurements within moving vehicles. *Mechanische Systeme und Signalverarbeitung*, 141: 106733
-
- [359] Eshkevari S. S. , Cronin L. , Pakzad S. N. , Matarazzo T. J. (2020) Wavelet platform for crowdsensed modal identification of bridges. *arXiv preprint arXiv:200709249*
-
- [360] Mei Q., Gül M., Boay M. (2019) Indirect health monitoring of bridges using Mel-frequency cepstral coefficients and principal component analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 119:523-546
-
- [361] Cerda F. , Chen S. , Bielak J. , Garrett J. H. , Rizzo P. , Kovačević J. (2014) Indirect structural health monitoring of a simplified laboratory-scale bridge model. *Smart Structures and Systems*, 13: 849-868
-
- [362] Malekjafarian A. , Golpayegani F. , Moloney C. , Clarke S. (2019) A machine learning approach to bridge-damage detection using responses measured on a passing vehicle. *Sensors*, 19
-
- [363] Locke W. , Sybrandt J. , Redmond L. , Safro I. , Atamturktur S. (2020) Using drive-by health monitoring to detect bridge damage considering environmental and operational effects. *Zeitschrift für Schall und Schwingungen*, 468
-
- [364] Bocciolone M., Caprioli A., Cigada A., Collina A. (2007) Ein Messsystem für eine schnelle Schieneninspektion und eine effektive Strategie für die Gleiswartung. *Mechanische Systeme und Signalverarbeitung*, 21(3):1242-1254
-
- [365] Lee J.S., Choi S., Kim S.S., Park C., Kim Y.G. (2012) A mixed filtering approach for track condition monitoring using accelerometers on the axle box and bogie. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61(3):749-758
-
- [366] Matarazzo T.J., Kondor D., Milardo S., Eshkevari S.S., Santi P., Pakzad S.N., Buehler M.J., Ratti C. (2022) Crowdsourcing Bridge Vital Signs with Smartphone Vehicle Trips. *arXiv preprint, arXiv:2010.07026v4*
-
- [367] Yang Y.B., Xu H., Zhang B., Xiong F., Wang Z.L. (2020) Measuring bridge frequencies by a test vehicle in non-moving and moving states. *Engineering Structures*, 203: 109859
-
- [368] Yang Y.B., Li Z., Wang Z.L., Shi K., Xu H., Qiu F.Q., Zhu J.F. (2022) A novel frequency-free movable test vehicle for retrieving modal parameters of bridges: Theory and experiment. *Mechanische Systeme und Signalverarbeitung*, 170: 108854
-
- [369] Galassi M.C., Bono F., Gkoktsi K., Tirelli D., Gkoumas K., Anthoine A. (2020) Monitoring Transport Infrastructures with Connected and Automated Vehicles. *Ispra, Italien: Gemeinsame Forschungsstelle der EUROPÄISCHEN KOMMISSION*
-
- [370] Zhan Y., Au F.T.K., Zhang J. (2021) Bridge identification and damage detection using contact point response difference of moving vehicle. *Structural Control Health Monitoring*, 28(12): e2837
-

8.4 Vision-based Motion Amplification

8.4.1 Beschreibung der Technologie

Fortschritte bei optischen Bildgebungsgeräten und Computer-Vision-Algorithmen ermöglichen die Erforschung neuartiger Techniken zur Überwachung von Bauwerken, wie z. B. die berührungslose Aufzeichnung der Schwingungsreaktion von Bauwerken oder ihrer Verschiebung unter externen Lasten, was Messungen mit hoher räumlicher Dichte und ohne den mit herkömmlichen Technologien verbundenen hohen Verkabelungsaufwand ermöglicht. Typische Brücken zeichnen sich jedoch durch eine hohe Steifigkeit aus, die zu kleinen Verschiebungen und geringen Schwingungsamplituden führt, so dass eine videobasierte Verfolgung keine einfache Aufgabe ist.

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist eine Technik, die ursprünglich für die Messung von Geschwindigkeitsfeldern in der experimentellen Strömungsdynamik entwickelt wurde und die zur Bewertung des gesamten Verschiebungsfeldes von Bauwerken eingesetzt werden kann [378], [379]. Bei der PIV-Analyse wird der Verschiebungsvektor durch Auffinden der Spitze der Autokorrelationsfunktion jedes Flecks ermittelt. Eine der Eigenschaften von PIV ist, dass es grosse Verschiebungen gut verfolgen kann [379]. Zwar werden die PIV-Ergebnisse potenziell durch Messfehler beeinträchtigt, z. B. durch Bildverzerrungen aufgrund des Mediums zwischen dem Kameraobjektiv und der Probe sowie durch die fehlende Koplanarität von Kamera und Objektebene, doch wirken sich diese Fehler nur geringfügig auf die ermittelten Verschiebungsvektoren aus, da kontinuierliche Verfolgungsreihen gleichermassen von solchen Fehlerquellen betroffen sind [378], [382]. Allerdings ist die Anwendung von PIV auf strukturelle Verschiebungsmessungen in der bebauten Umwelt bisher noch sehr begrenzt. Hosseini et al. [378] überwachten in Laborexperimenten die Vollfeldverschiebung von Stahl- und RC-Trägern mit PIV.

Die Particle Tracking Velocimetry (PTV) wurde im Zusammenhang mit der dreidimensionalen Strukturüberwachung vorgeschlagen [372]. PTV, eine optische Messtechnik mit offenem Quellcode [246], [373] wird seit Jahrzehnten in verschiedenen technischen Anwendungen vom Makro- bis zum Mikrobereich eingesetzt, vor allem aber in der Strömungsdynamik. Wie viele optische Tracking-Algorithmen war PTV jedoch bisher auf die Bewertung von Verschiebungen mit grossen Amplituden beschränkt, was nicht dem Amplitudenbereich vieler Bauwerke entspricht.

Magnified Tracking (MT) wurde von Harmanci et al. [246] vorgeschlagen, um die begrenzte Anwendung der videobasierten Überwachung bei sehr kleinen Bewegungsamplituden zu überwinden, wie sie typischerweise bei steifen Strukturen auftreten. MT beruht auf dem synergetischen Einsatz zweier Computer-Vision-Techniken: (i) phasenbasierte Bewegungsvergrößerung (PBMM) zur Verstärkung der Bewegung in einem Video innerhalb eines definierten Frequenzbandes, gekoppelt mit (ii) Bewegungsverfolgung mittels Partikelverfolgungs-Velocimetrie (PTV). Wenn MT für die Verfolgung von «nicht wahrnehmbaren» strukturellen Reaktionen (d. h. unterhalb der PTV-Empfindlichkeit) eingesetzt wird, offenbart die verstärkte Bewegung durch den Einsatz von PBMM um die Resonanzfrequenzen der Struktur herum die operativen Ablenkungsformen, die ansonsten nicht zu erkennen sind. PBMM ermöglicht es, kleine Bewegungen ohne übermässiges Rauschen oder übermässige Rechenkosten zu erkennen und Bewegungen zu entfernen, die von den zugrundeliegenden Phänomenen von Interesse ablenken könnten [381].

8.4.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Es gibt kommerzielle Anwendungen von Software zur Bewegungsvergrößerung, wie DragonVision oder Iris CM. Die Software DragonVision Motion Magnification Technology [375] verfolgt sehr kleine Bewegungen in gewöhnlichen Videoaufnahmen, die z. B. mit Smartphones oder Tablets gemacht wurden, und vergleicht jedes Einzelbild des Videos auf der Suche nach mikroskopisch kleinen Bewegungen an bestimmten Punkten. Anschliessend werden die gemessenen Bilder in Vibrationssignale umgewandelt, indem bis zu Tausende von Vibrationspunkten in einem einzigen Video erkannt werden.

Eine weitere kommerzielle Software zur Durchführung videobasierter Schwingungsmessungen, die eine Bewegungsverstärkung beinhaltet, um auch Bewegungen mit geringer Amplitude zu verfolgen, ist Iris CM [374] mit der eine grosse Anzahl von Kameras vernetzt werden kann, um gleichzeitig Daten zu erfassen und mehrere Ansichten einer Struktur zu bieten. Iris CM bietet Echtzeit-Bewegungsverstärkung und die Möglichkeit der berührungslosen Quantifizierung von Schwingungen, Amplitude, Phase und Frequenz für alles, was im aufgezeichneten Video sichtbar ist.

Die Particle Image Velocimetry (PIV) hat in allen Bereichen des Bauingenieurwesens grosses Interesse geweckt. PIV ist ein leistungsfähiges bildbasiertes Verfahren zur Auswertung von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern durch die Analyse aufeinanderfolgender digitaler Bilder eines Feldes, das sich verformt. Trotz des grossen Potenzials gibt es jedoch nur wenige Studien, in denen PIV zur Ermittlung von Verformungen bei Bauwerksprüfungen eingesetzt wird, insbesondere zur Bewertung von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern in einem herkömmlichen Biegeversuch [380].

Auch die Bewegungsverstärkung wurde bisher nur in begrenztem Umfang auf Brückensysteme in Originalgrösse angewandt, so dass die praktischen Grenzen noch nicht beschrieben sind. Grosse Datenmengen und die Forderung nach phasenbasierter Verstärkung erfordern jedoch die Kenntnis des Frequenzbandes der globalen Moden. Darüber hinaus ist die Genauigkeit der videobasierten Überwachung durch wechselnde Lichtverhältnisse und Umwelteinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit und Nebel eingeschränkt. [384]. Harmanci et al. testeten einen vollflächigen Strahl ohne künstlich eingeführte Merkmale und in einer unregelmässigen Vorder- und Hintergrundumgebung. [383]. Die Aufprallreaktion wurde mit dem PBMM-Tool um die erste Eigenfrequenz herum vergrössert, und die strukturellen Merkmale wurden mit einem Algorithmus zur Verfolgung des optischen Flusses verfolgt. Die Langzeitstabilität des Messsystems wurde jedoch nicht getestet.

8.4.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Bewegungsverstärkung und Partikelverfolgungstechniken bieten eine räumlich dichte Definition von Schwingungsmoden und Verschiebungsfeldern unter bewegten Lasten. Dreidimensionale Modenformen mit hoher räumlicher Dichte bieten Einblicke in höhere Moden, deren Identifizierung mit einer begrenzten Anzahl von diskreten Beschleunigungsaufnehmern oft eine Herausforderung darstellt.

Die wichtigsten möglichen Anwendungen im Bereich der Brückenüberwachung sind daher:

- Dynamische und Vibrationsmessungen.
- Modale Identifikation von Eigenfrequenzen und räumlich dichten Modenformen
- Verschiebung von Brücken unter bewegter Last
- Schadenserkennung mit schadenssensitiven Merkmalen, die auf der Grundlage räumlich dichter Modenformen formuliert werden, wie z. B. Änderungen der Modenformkrümmung, möglicherweise von lokalen Moden höherer Ordnung
- Kalibrierung und Aktualisierung eines Finite-Elemente-Modells

8.4.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

- Bei den erfassten Daten handelt es sich um digitale Bilder, die später nachbearbeitet werden, um die Bewegung in bestimmten Frequenzbereichen zu vergrössern und anschliessend die Verschiebung von Markern oder unterscheidbaren Merkmalen, wie z. B. Kanten, der Struktur zu berechnen.
- Diese Technik liefert eine räumlich dichte Darstellung des Verschiebungsfeldes einer Struktur.
- Bei der Bewegungsverstärkung handelt es sich um eine phasenbasierte Vergrösserung, die vor allem bei dynamischen Verschiebungen Anwendung findet.
- Die Datenerfassung erzeugt einen sehr grossen Datensatz, der mit der Kameraauflösung und der Anzahl der gespeicherten Bilder (d. h. der Häufigkeit) zunimmt.

- Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten.

Die Anwendung auf ein gut kontrolliertes Exemplar reduzierter Ordnung (siehe Abb. 8.142) ergab eine minimale Diskrepanz bei der Frequenzbestimmung von weniger als 0,05 Hz (relativer Fehler von 0,5%) [246].

Bei der Anwendung von PIV ohne Verstärkung in einem quasi-statischen Labortest an einem Stahlträger haben Hosseini et al. [378] einen Unterschied von 0,020 (mit einer 10-Megapixel-Kamera) und 0,018 mm (mit einer 21-Megapixel-Kamera) zwischen den PIV-Ergebnissen und den LVDT-Daten gemessen.

Die Diskrepanz in der Korrelation zwischen der bildverarbeitungsbasierten Verschiebungsverfolgung, die mit Kalman-Filtertechniken verbessert wurde, und den Laser-Vibrometer-Verschiebungssignalen liegt unter 0,04% [380]. Da von einem Video gemessene Verschiebungen zwar recht genau sind, aber ein höheres Rauschen aufweisen als herkömmliche Messungen mit Beschleunigungssensoren, wurde ein Filter verwendet, um die per Video gemessene Verschiebung zu entrauschen.

8.4.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die Anwendungen beschränken sich bisher auf Laborumgebungen [246], [378] oder Maschinen mit relativ grossem Hubraum [374], [375]. Die Anwendung auf ein gut kontrolliertes Modell reduzierter Ordnung mit homogenem Hintergrund ist auf der linken Seite von Abb. 8.142 dargestellt, während ein realistischerer Aufbau mit heterogenem Vorder- und Hintergrund und einem Balken in Originalgrösse auf der rechten Seite zu sehen ist. Es fehlen jedoch noch Anwendungen mit dynamischen Hintergründen und sich ändernden Umgebungsbedingungen.

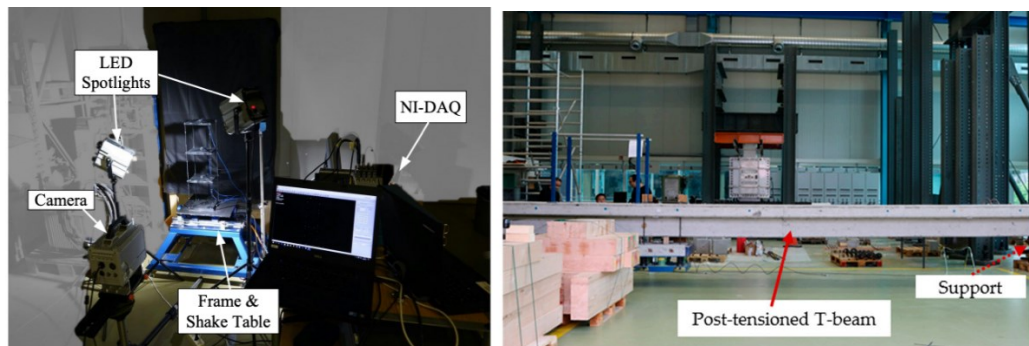


Abb. 8.142 Versuchsaufbau für die vergrösserte Nachführung eines verkleinerten Probekörpers mit mehreren Freiheitsgraden (links, entnommen aus [246]) und eines massstabsgetreuen Spannbetonträgers (rechts, entnommen aus [383]).

8.4.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [371] Harmanci YE, Gülan U, Holzner M, Chatzi E. A Novel Approach for 3D-Structural Identification through Video Recording: Magnified Tracking. *Sensors* (Basel). 2019 Mar 11;19(5):1229. doi: 10.3390/s19051229.
-
- [372] Harmanci, Yunus Emre, Utku Gülan, Manuel Zimmermann, Markus Holzner, und Eleni Chatzi. "High spatial density vibrational measurements via 3D-particle tracking velocimetry". In *Proceedings of the 4th Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures (SMAR 2017)*, Zürich, Switzerland, pp. 27-29. 2017.
-
- [373] Maas, H. G., A. Gruen, und D. Papantoniou. "Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows". *Experiments in fluids* 15, no. 2 (1993): 133-146.
-
- [374] IRIS CM-Webseite: <https://vib-tech.com/product-category/motion-amplification/>
-
- [375] Webseite von Dragon Vision: https://www.erbesd-instruments.com/dragon-vision/?gclid=CjwKCAjws--ZBhAXEiwAv-RNlyklbuFj3rvuQ4yNpjJXHk-CxK9df9MNpKYFikeJRdiipYKPto3CDBoC54QQAuD_BwE
-
- [376] Niezrecki C et al. (2020) DIC and Photogrammetry for Structural Dynamic Analysis and High-Speed Testing. In Allemang R., Avitable P. (eds.) *Handbook of Experimental Structural Dynamics*, Society of Experimental Mechanics. DOI:10.1007/978-1-4939-6503-8_3-1
-
- [377] Xu, Y., Brownjohn, J.M.W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. *J Civil Struct Health Monit* 8, 91-110 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
-
- [378] Hosseini, Ardalan, Davood Mostofinejad, und Masoud Hajialilue-Bonab. "Messung der Verschiebung und des Dehnungsfeldes in Stahl- und RC-Trägern mittels Particle Image Velocimetry". *J. Eng. Mech* 10 (2014).
-
- [379] Dong, Chuan-Zhi, und F. Necati Catbas. "A review of computer vision-based structural health monitoring at local and global levels". *Structural Health Monitoring* 20, Nr. 2 (2021): 692-743.
-
- [380] Cha, Y-J., Justin G. Chen, und Oral Büyükoztürk. "Output-only computer vision based damage detection using phase-based optical flow and unscented Kalman filters." *Engineering Structures* 132 (2017): 300-313.
-
- [381] Wadhwa, Neal, Michael Rubinstein, Frédo Durand, und William T. Freeman. "Phasenbasierte Video-Bewegungsverarbeitung". *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 32, no. 4 (2013): 1-10.
-
- [382] Slominski, Cezary, Maciej Niedostatkiwicz, und Jacek Teichman. "Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow". *Powder Technology* 173, no. 1 (2007): 1-18.
-
- [383] Harmanci, Yunus Emre, Zhilu Lai, Utku Gülan, Markus Holzner, und Eleni Chatzi. "Computervision-gestützte Strukturidentifikation: Feature Tracking using particle tracking velocimetry versus optical flow". *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* 4, no. 1 (2018): 33.
-
- [384] Jolley, Martin J., Andrew J. Russell, Paul F. Quinn, und Matthew T. Perks. "Considerations When Applying Large-Scale PIV and PTV for Determining River Flow Velocity". *Frontiers in Water* (2021).
-

8.5 Kamera-basierte Schadenserkenennung

8.5.1 Beschreibung der Technologie

Die Entwicklung zuverlässiger und aus der Ferne zugänglicher Digitalkameras und Computer-Vision-Algorithmen hat in den letzten Jahren eine kamerabasierte Infrastrukturüberwachung ermöglicht. Bildverarbeitungs-basierte Systeme bieten vielversprechende Werkzeuge für die kontinuierliche Messung von Verschiebungen in Bauwerken. Sie haben gegenüber herkömmlichen Verschiebungssensoren Vorteile bei den Gerätekosten, dem Installationsaufwand und der Messkapazität in Bezug auf die räumliche Auflösung.

Die Anwendung eines bildverarbeitungs-basierten Systems zur Überwachung von Strukturverschiebungen erfordert die Aufstellung einer oder mehrerer Kameras an einem stabilen Ort, die Beobachtung des Ziels in einer Struktur und die Ableitung der Strukturverschiebung durch Zielverfolgung. Dabei kann das Ziel entweder künstlich sein (z. B. eine vorinstallierte Markierung, eine LED-Lampe oder eine ebene Platte mit speziellen Mustern) oder ein vorhandenes Strukturmerkmal (z. B. Bolzen oder Löcher). Die Videoverarbeitungssoftware ist von entscheidender Bedeutung: Sie hat die Aufgabe, die Videobilder zu erfassen, die den Zielbereich abdecken, die Zielpositionen in den Bildsequenzen zu verfolgen und schliesslich die Zielposition im Bild in den Zeitverlauf der strukturellen Verschiebung zu transformieren [385].

Zu den ersten Anwendungen der kontinuierlichen Überwachung von Bauwerksverformungen mit Hilfe von CCD-Arrays (Charge-Coupled Device) gehörten die Humber Bridge und die Severn Bridge im Vereinigten Königreich [385], [386]. Kamerabasierte Systeme ermöglichen auch die berührungslose Anwendung von Brückenwägungen (siehe entsprechender Abschnitt) und die vorausschauende Verfolgung der Bewegung mehrerer unabhängiger Objekte mit einer Videobildrate [387].

Ein auf Bildverarbeitung basierendes Messsystem, das besonders für Anwendungen in der Bauwerksüberwachung interessant ist, ist die Kombination von CCD mit herkömmlichen Totalstationen, wodurch bildgestützte Totalstationen (IATS) entstehen [389]. Die Genauigkeit der Winkelmessungen des Tachymeters wird mit der Photogrammetrie und der damit verbundenen einfachen Zielmarkenbestimmung kombiniert. Durch den Einsatz von Fernrohlinsen kann der Abstand zum Bauwerk auf über 50 m vergrössert werden. Das Anbringen von Zielmarken am Objekt kann durch die photogrammetrische Auswertung von bauwerksspezifischen Markierungen entfallen, wenn solche Unterscheidungsmerkmale am Bauwerk vorhanden sind. Durch die kontinuierliche Verfolgung und Identifizierung eines Ziels auf der Struktur wird die Strukturverschiebung durch eine Kreuzkorrelationsanalyse zwischen dem vordefinierten Muster und den aufgenommenen digitalen Bildern mit Hilfe eines Mustervergleichsalgorithmus abgeleitet [388].

Das Daedalus-System

DAEDALUS bezeichnet ein Messsystem, das am Labor für Geodäsie und Geodynamik (GGL) der ETH Zürich konzipiert und entwickelt wurde. Während das Daedalus-System in erster Linie entwickelt wurde, um das Problem der persönlichen Beeinflussung im Zusammenhang mit zeitrelevanten Beobachtungen in der geodätischen Astronomie zu überwinden, machen die Eigenschaften des Systems es für die Infrastrukturüberwachung interessant [391]. Das Daedalus-System besteht aus einer CCD-Kamera, die auf eine Totalstation aufgesteckt wird, wie in Abb. 8.143, einer aufsteckbaren Frontlinse und einer Verbindung zu einem Computer, der die Kamera auslöst und die Bilder speichert und nachbearbeitet. Die Verwendung eines GPS-Timers mit der CCD-Kamera ermöglicht eine präzise Zeitmessung und Synchronisierung zwischen mehreren Totalstationen.



Abb. 8.143 Das Herzstück des Daedalus-Systems besteht aus digitalen Kameras, die auf herkömmlichen Totalstationen montiert sind. Abbildung entnommen aus [390]

Das System bietet neue Möglichkeiten für vollautomatische, hochpräzise digitale Winkelmessungen im Freien, die nicht durch menschliche Eingriffe beeinträchtigt werden. Darüber hinaus ist die Software in der Lage, eine optische Zielerkennung unter Verwendung verschiedener Bildverarbeitungsalgorithmen wie Least-Squares-Template-Matching, Kreiserkennung oder Center-of-Mass-Operatoren durchzuführen. Das Daedalus-System bietet vollautomatische und hochpräzise Messungen von Strukturverschiebungen an diskreten Stellen, ohne die Verwendung von Eckwürfelzielen, die bei der standardmässigen automatischen Objekterkennung verwendet werden. Elektronische Schnittstellen zur Hardwaresynchronisation mehrerer Daedalus-Systeme ermöglichen berührungslose dreidimensionale Messungen an mehreren Punkten der Struktur [390]. Das Messprinzip ist in Abb. 8.144 dargestellt, wobei die Verfolgung des LED-Ziels mittels optischer Zielerkennung (OTR) erfolgt [391].

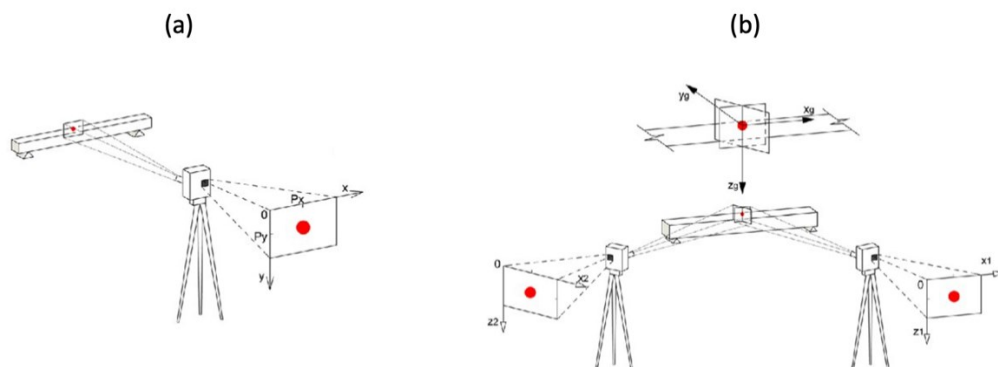


Abb. 8.144 Skizze des Überwachungsprinzips des Daedalus-Systems: Die Pixelposition der LED (roter Kreis) wird in einem zweidimensionalen lokalen Koordinatensystem abgerufen (a). Unter Verwendung von zwei Daedalus-Systemen in verschiedenen Kontrollpunkten kann die dreidimensionale Verschiebung des LED-Targets aus den beiden lokalen, planaren Koordinatensystemen rekonstruiert werden (b).

8.5.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

IATS und insbesondere das Daedalus-System wurden an realen Bauwerken unter Aussenbedingungen eingesetzt (siehe Abschnitt 8.5.5), was ihr Potenzial für die Überwachung von Bauwerken zeigt. Das praktische Potenzial dieser Technologie für die Anwendung bei der Brückenbewertung ist jedoch begrenzt durch

- die Kosten für Totalstationen, insbesondere wenn räumlich dicht beieinander liegende Messpunkte erforderlich sind,
- die Exposition des Messsystems, das für Langzeitüberwachungsanwendungen einen vor rauen Umgebungsbedingungen geschützten Standort benötigt, da es nicht wasserdicht ist und die Kompatibilität mit Temperaturen unter 0 °C nicht getestet wurde und
- schliesslich beansprucht die Datenmenge, die das System produziert, viel Kapazität für das Streaming von Daten.

Der Vorteil der Montage von Kameras auf hochpräzisen Totalstationen liegt in der höheren Messgenauigkeit (Sub-Millimeter-Bereich) [392] im Vergleich zu anderen bildverarbeitungs-basierten Methoden.

Ein Vergleich der Frequenzspektren des Daedalus-Systems mit kommerziellen Beschleunigungsmessern hat gezeigt, dass das Daedalus-System eine bessere Empfindlichkeit bei der Messung von Verschiebungen und Beschleunigungen bis zu einer Frequenz von etwa 3 Hz aufweist [390]. Ein Vergleich dieses automatisierten Systems mit Messungen von swisstopo an einem Staudamm hat gezeigt, dass die Genauigkeit von Daedalus mehr als 2-mal besser ist und die Erfassungsgeschwindigkeit für einen Satz Messungen von Daedalus 4-mal schneller ist. Die Vorbereitungszeit für die Einrichtung von Daedalus ist jedoch immer noch höher als die von swisstopo benötigte Zeit, was die Anwendung in Notsituationen einschränkt.

8.5.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Wichtigste mögliche Anwendungen in der Brückenüberwachung:

- Kontinuierliche Verlagerungsüberwachung (z. B. in Kombination mit einem WIM-System)
- Überwachung der Verschiebung bei Belastungstests
- Schwingungsüberwachung und Modalererkennung
- Modellkalibrierung und -aktualisierung

8.5.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

Die folgenden Merkmale beziehen sich auf das Daedalus-System.

- Bei den erfassten Daten handelt es sich um digitale Bilder, die von einer auf einer Totalstation montierten Kamera aufgenommen werden.
- Diese Technik liefert relative und absolute Verschiebungen an Zielpunkten, die entweder aus Markern, wie LED-Zeigern, oder aus charakteristischen Objekten bestehen können, die auf der Brückenoberfläche deutlich zu erkennen sind.
- Mit Hilfe von externen Controllern können die Bilder zwischen mehreren Totalstationen synchronisiert werden, was dreidimensionale Verschiebungsmessungen und Messungen von mehreren Punkten ermöglicht.
- Bei der Datenerfassung entsteht ein sehr grosser Datensatz, der mit der Kameraauflösung und der Anzahl der gespeicherten Bilder (d. h. der Frequenzrate) zunimmt. Ausserdem begrenzt die Grösse der Datenproben (Bilder) die Abtastfrequenz, die mit typischen Laptops erreicht werden kann, auf etwa 30 Hz [392].
- Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten.

Die Genauigkeit des Daedalus-Systems hängt von der Kameraauflösung, dem Abstand zwischen Kamera und Struktur und, in geringerem Masse, von der maximal zu messenden Verschiebung ab. Bei Aussenanwendungen ermöglicht die Synchronisierung mehrerer Daedalus-Systeme die berührungslose Messung dreidimensionaler Verschiebungen mit einer Genauigkeit von 0,01 mm bei einer Abtastrate von 60 Hz in drei Dimensionen [390].

8.5.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Die Überwachung starrer Strukturen mit Modalfrequenzen von mehr als 5 Hz, wie sie bei vielen zivilen Infrastruktursystemen vorkommen, mit Verschiebungen im Sub-Millimeter-Bereich wurde vom Labor für Geodäsie & Photogrammetrie der ETH Zürich in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustatik & Konstruktion der ETH Zürich und der EMPA getestet. Das Daedalus-System wurde zur Überwachung der Verschiebung eines starren Balkenprototyps und zur Schätzung seiner modalen Frequenzen bis zu 30 Hz eingesetzt (siehe Abb. 8.145 rechts). Die Ergebnisse der Daedalus-Datenanalyse wurden mit denen von Beschleunigungsmessern verglichen und erwiesen sich als ausreichend genau und als geeignete Ergänzung zu den bestehenden Überwachungstechniken [392].

Darüber hinaus wurde das System auf einer Stahlbrücke über die Rhone getestet, die von Lastwagen befahren wird (siehe Abb. 8.145 links). Die Messungen wurden von der Fachhochschule Yverdon-les-Bains mit einem Leica TCA 2003, ausgestattet mit Daedalus, geplant und durchgeführt. Das Ziel war eine Standardtaschenlampe (siehe Abb. 8.145 links), die in der Mitte der Brücke befestigt wurde. Der Abstand zwischen der Totalstation und der Lampe betrug 40 Meter [391]. Die robuste Verfolgung des Lichts der Fackel wurde bei Tageslicht durch Anwendung eines angepassten Schwellenwerts für die Hintergrundsubtraktion erreicht. Die vertikalen Bewegungen der Brücke konnten verfolgt werden und ermöglichten die Extraktion der vertikalen Auslenkung und der gedämpften Schwingung bei der Eigenfrequenz (2,59 Hz).

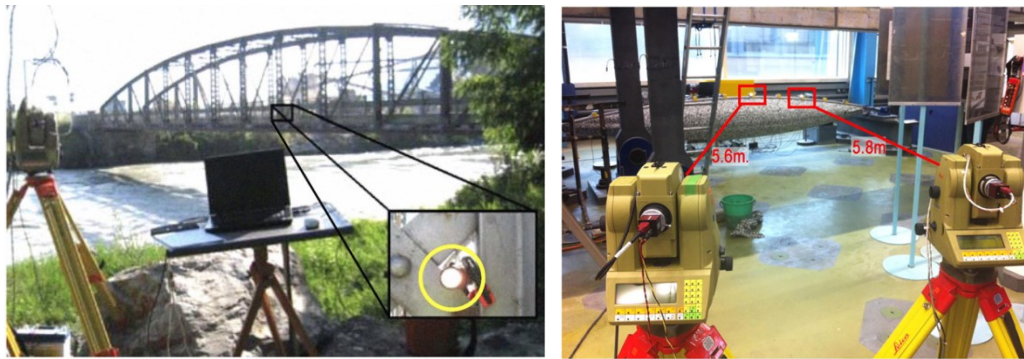


Abb. 8.145 Anwendung des Daedalus-Systems auf einer Stahlbrücke über die Rhone im Kanton Wallis (links, entnommen aus [392]) und an einem starren Prototyp-Träger in den ETH-Versuchsanlagen (rechts, entnommen aus [391])

8.5.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [385] Xu, Y., Brownjohn, J.M.W. Review of machine-vision based methodologies for displacement measurement in civil structures. J Civil Struct Health Monit 8, 91-110 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0261-4>
- [386] Stephen, G. A., J. M. W. Brownjohn, und C. A. Taylor. "Messungen der statischen und dynamischen Verschiebung durch visuelle Überwachung der Humber-Brücke". Engineering Structures 15, no. 3 (1993): 197-208.
- [387] Ojio, T., C. H. Carey, Eugene J. OBrien, C. Doherty, und Su E. Taylor. "Contactless bridge weigh-in-motion." Journal of Bridge Engineering 21, no. 7 (2016): 04016032.
- [388] Ye, X. W., Y. Q. Ni, T. T. Wai, K. Y. Wong, X. M. Zhang, und F. Xu. "Ein bildverarbeitungs-basiertes System zur dynamischen Messung der Verschiebung von Brücken mit großer Spannweite: Algorithmus und Verifizierung". Smart Structures and Systems 12, no. 3_4 (2013): 363-379.
- [389] Zschiesche, Kira. "Image Assisted Total Stations for Structural Health Monitoring-A Review". Geomatics 2, no. 1 (2021): 1-16.
- [390] Guillaume, Sébastien, Jonas Clerc, Claude Leyder, Jérôme Ray, und Matthias Kistler. "Contribution of the image-assisted theodolite system QDaedalus to geodetic static and dynamic deformation monitoring." (2016) In 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM).
- [391] Bürki, B., Guillaume, S., Sorber, P. und Oesch, H.P., 2010, September. DAEDALUS: Ein vielseitig einsetzbares digitales Aufsteckmesssystem für Totalstationen. In 2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (S. 1-10). IEEE.
- [392] Charalampous, E., Psimoulis, P., Guillaume, S., Spiridonakos, M., Klis, R., Bürki, B., Rothacher, M., Chatzi, E., Luchsinger, R. und Feltrin, G., 2015. Messung von Strukturverschiebungen im Sub-mm-Bereich mit QDaedalus: ein für Totalstationen entwickeltes digitales Clip-On-Messsystem. Applied Geomatics, 7(2), pp.91-101.

8.6 Drahtlose Sensornetze

8.6.1 Beschrieb der Technologie

Drahtlose Sensornetze sind Netze aus vielen kleinen, miteinander kommunizierenden, autonomen Computern, die mit einem oder mehreren Sensoren ausgerüstet sind. Jeder Computer stellt einen Knoten (Sensorknoten) des Netzes dar. Die Kommunikation innerhalb des Netzes erfolgt über Funk. Die Sensorknoten sind die grundlegenden Komponenten eines drahtlosen Sensornetzes und bieten folgende Funktionen an:

- Autonomer Aufbau und Unterhalt des Netzes
- Empfang, Übertragung und Weiterleitung von Daten
- Signalkonditionierung und Datenerfassung für verschiedene Sensoren
- Zeitplanung und Ausführung der Messaufgaben
- Zwischenspeicherung der erfassten Daten
- Verarbeitung der Daten
- Verwaltung der Konfiguration des Sensorknotens (z. B. Änderung der Abtastrate, Neuprogrammierung der Datenverarbeitungsalgorithmen)
- Analyse der verarbeiteten Daten zur Diagnose und möglicherweise zur Erzeugung von Warnmeldungen
- Selbstüberwachung (z. B. der Versorgungsspannung)

Um die oben beschriebene Funktionalität bereitzustellen, besteht ein Sensorknoten aus einem oder mehreren Sensoren, einer Signalaufbereitungseinheit, einem Analog-Digital-Wandler (ADC), einer Datenverarbeitungseinheit (Prozessor) mit Speicher, einem Funkmodul (Senden und Empfangen) und einer Energieversorgung (Batterie) (Abb. 8.146a). Die Hardware für die Grundfunktionalität wird oft vollständig auf einer Elektronikplatine realisiert, die drahtlose Sensorplattform genannt wird (Abb. 8.146b). Für die Signalkonditionierung der Sensoren werden Sensorknoten auch mit spezifischen Platinen ausgerüstet (Abb. 8.146b). Da die Energieversorgung mit Batterien erfolgt, werden Hardwarekomponenten mit sehr kleinem Energieverbrauch (low power hardware) eingesetzt, um möglichst lange Laufzeiten zu erreichen. Auch für die Datenübertragung werden spezielle Protokolle mit geringem Energieverbrauch verwendet. Der durchschnittliche Energieverbrauch eines Sensorknotens kann je nach Anwendung sehr stark variieren. Er sollte jedoch deutlich kleiner sein als 50 mW. Der geringe Energieverbrauch wird zum Preis einer starken Leistungsbegrenzung der Sensorknoten erkauft [393]. Die typische Taktrate des Prozessors (CPU) ist kleiner als 100 MHz. Sein Speicher (RAM) beträgt höchstens 512 KB und ist oft deutlich kleiner. Der externe Speicher (Flash) ist in der Regel kleiner als 1 MB. Die Übertragungsrate des Funkmoduls beträgt einige hundert kbit/s. Wenn die Sensorknoten im Feld eingesetzt werden, insbesondere in rauen Umgebungen wie Baustellen, werden sie mit einer Hülle vor Feuchtigkeit sowie chemischen und mechanischen Einflüssen geschützt (Abb. 8.146b).

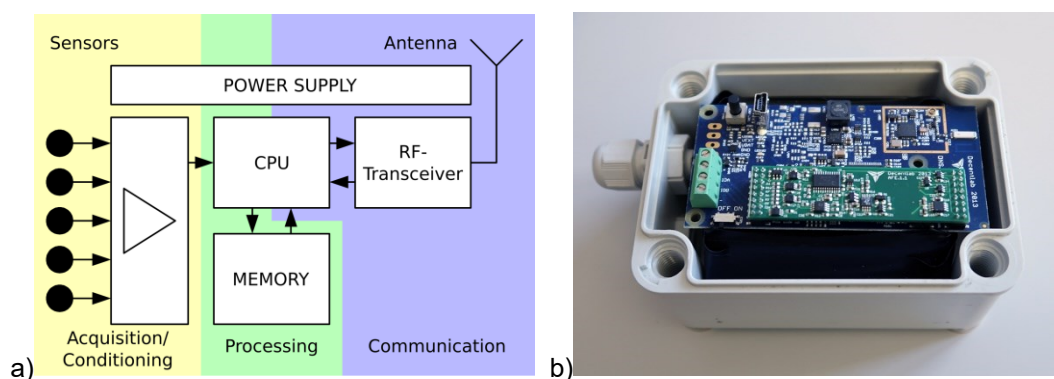


Abb. 8.146 a) Komponenten eines Sensorknotens [394]. b) Drahtloser Sensorknoten mit Plattform (blau) und Sensorelektronik (grün)

Drahtlose Sensornetze können als lokale Netzwerke (Größenordnung bis 1 km²) betrieben werden. In der Regel bilden sie dann ein Multi-Hop-Netzwerk, indem sie Kommunikationsverbindungen zu den Nachbarknoten herstellen. Die Sensorknoten fungieren als Datenquellen und als Relaisstationen, die Daten von benachbarten Knoten empfangen und weiterleiten. Ein oder mehrere Sensorknoten arbeiten als sogenannte Basisstation und stellen die Datensinken im Netz dar. Basisstationen aggregieren alle Daten, die innerhalb des Sensornetzes anfallen und stellen eine Kommunikationsverbindung zu einem übergeordneten Datennetz (z.B. Mobiltelefonnetz) her, um die anfallenden Daten auf einen zentralen Server zu übertragen. Multi-Hop-Netzwerke sind für Monitoringanwendungen attraktiv, da sie wegen den kurzen Distanzen zwischen den Sensorknoten weniger Energie für die Datenübertragung benötigen und die Datenübertragung auch bei einem Ausfall einzelner Sensorknoten weiterhin gewährleistet wird. Je nach dem eingesetzten Frequenzband (900 MHz oder 2.4 GHz) beträgt die maximale Datenübertragungsrate (brutto) höchstens einige hundert kbit/s. Dies ist massiv weniger als die Datenübertragungsrate heutiger drahtloser Computernetze (WLAN), die eine Datenübertragungsrate von mindestens einigen 100 Mbit/s erreichen.

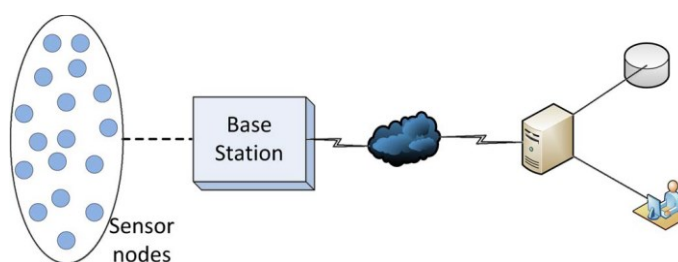


Abb. 8.147 Struktur eines lokalen, drahtlosen Sensornetzes mit Basisstation [395]

Sensorknoten können aber auch direkt an ein übergeordnetes Datenübertragungsnetz verbunden werden. LoRaWAN-Netzwerke (Long Range Wide Area Network) sind solche Netze, die grossflächig eine Datenübertragung über Funk für das Internet of Things bereitstellen [396]. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen lokalen Netzwerken sind LoRaWAN-Netzwerke sternförmig. Ein Sensorknoten kommuniziert immer direkt mit einem oder mehreren LoRaWAN-Gateways. Die Distanz zwischen einem Sensorknoten und einem LoRaWAN-Gateway kann von einigen km in Stadtgebieten bis zu 40 km in ländlichen Gebieten betragen. Das verwendete Datenübertragungsprotokoll erlaubt auch bei diesen Distanzen einen geringen Energieverbrauch. Je nach der eingesetzten Bandbreite beträgt die Übertragungsrate höchstens etwa 20 kbit/s. In der Schweiz betreibt die Swisscom ein LoRaWAN-Netzwerk, das 97.0% der Bevölkerung abdeckt.

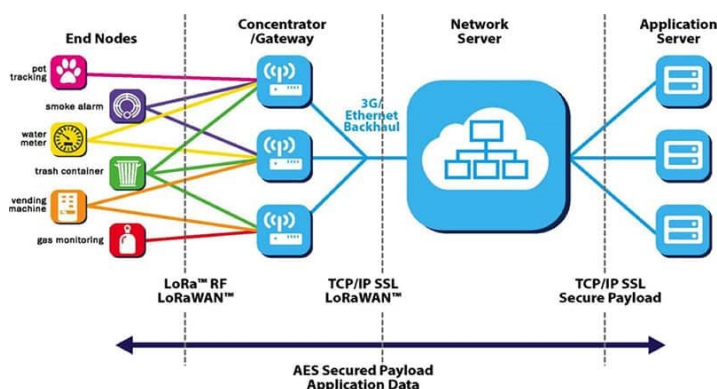


Abb. 8.148 Struktur eines LoRaWAN-Netzwerk mit drahtlosen Sensorknoten [396]

Drahtloses Sensornetze können mit einer grossen Vielfalt von Sensoren ausgerüstet werden, welche neben Temperatur, Feuchtigkeit, Gehalt von Gasen wie CO₂, NO₂, NO usw. auch wichtige mechanische Grössen wie Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Dehnung und Kraft erfassen. Sensoren mit einer kleinen, konstanten Speisespannung, einem Spannungssignal als Ausgang oder einen digitalen Ausgang und einer räumlich sehr kompakten Signalaufbereitung werden bevorzugt eingesetzt. Zur Messung von Verschiebungen werden in der Regel Potentiometer eingesetzt, da z.B.

Differentialtransformatoren (LVDT) für ihren Betrieb eine hochfrequente Wechselspannung erfordern. Zur Messung von Beschleunigungen werden oft MEMS-Sensoren verwendet, da sie sehr wenig Energie benötigen und in einem kleinen Elektronikbaustein integriert werden. Dehnungen werden typischerweise mit elektrischen Dehnmessstreifen erfasst, da eine Wheatstone'sche Messbrücke sich einfach kompakt auf einer kleinen Elektronikplatine implementieren lässt.

8.6.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Drahtlose Sensornetze werden seit einigen Jahren vermehrt in der Überwachung der Luftqualität in Gebäuden und Städten, in der Wasserbewirtschaftung, in der Landwirtschaft und allgemein im Erfassen von umweltrelevanten Grössen auf grossen Flächen eingesetzt. Auf diesen Flächen bieten drahtlose Sensornetze den Vorteil einer auch für Laien schnellen Einrichtung und einfachen Inbetriebnahme. Nationale und internationale Firmen, wie z.B. die Schweizer Firmen Decentlab GmbH (www.decentlab.com), Altecno AG (www.altecno.ch) und Mageda sa (www.mageda-group.com), bieten Geräte und Dienstleistungen an, damit Unternehmen, Behörden und Hochschulen Sensornetze lösungsorientiert und effizient aufbauen und betreiben können. Die typischen Anwendungen der heutigen Praxis sind gekennzeichnet durch periodische Messungen mit kleinen Datenraten. Dadurch sind lange Laufzeiten der Sensornetze (bis zu mehreren Jahren) ohne Batteriewechsel möglich, die einen kostengünstigen Unterhalt erlauben. Die Daten werden auf Servern gespeichert und können über webbasierte Werkzeuge eingesehen und für die Weiterverarbeitung heruntergeladen werden.

Die heutige Forschung im Fachbereich drahtlose Sensornetze ist sehr vielfältig. Zum einen wird weiterhin daran gearbeitet, die Energieeffizienz, Zuverlässigkeit und Flexibilität von Sensornetzen zu verbessern, indem neue Konzepte und Algorithmen für das Routing, die Datenstaukontrolle, die Lokalisierung bei mobilen Sensornetzen, die Interoperabilität mit RFID-Technologien usw. entwickelt und getestet werden. Zum anderen werden drahtlose Sensornetze für immer neue Anwendungen in sehr unterschiedlichen Fachgebieten (Umwelt, Präzisionslandwirtschaft, Infrastrukturüberwachung, Unterwassermonitoring, Verkehrsmanagement, Medizin usw.) ausgetestet und spezialisiert. Da die Literatur dazu ausufernd ist, beschränken wir uns hier mit Monitoringanwendungen im Baubereich, wobei die potentielle Tauglichkeit für den praktischen Einsatz berücksichtigt wird.

Die strukturellen Schwachstellen von drahtlosen Sensornetzen in der praktischen Anwendung sind Laufzeit und Datenverlust. Diese Schwachstellen nehmen mit zunehmender Datenintensität zu. Hohe Datenübertragungsraten können zu Datenstau an einigen Knoten des Netzes führen und dadurch eine mehrfache Wiederholung der Datenübertragung von Sensorknoten erzwingen. Da die Wiederholungen in der Regel begrenzt werden (Energiesparen), kann dadurch Datenverlust eintreten. Darüber hinaus ist die Datenübertragung sehr energieintensiv. Werden viele Daten übertragen und muss ein Teil davon auch noch wiederholt gesendet werden, so kann dadurch die Laufzeit eines Netzwerks stark verkürzt werden. Die Folge ist ein hoher Unterhaltsaufwand, da die Batterien oft erneuert werden müssen. Diese Problematik ist ein wichtiger Grund, dass der heutige kommerzielle Einsatz von drahtlosen Sensornetzen sich auf Anwendungen beschränkt, die nicht datenintensiv sind. Anwendungen, die zur Datenübertragung ein LoRaWAN-Netzwerk verwenden, sind hinsichtlich der Datenraten stärker eingeschränkt als lokale Netzwerke, die über eine Basisstation mit dem Mobiltelefonnetz oder das Internet verbunden sind.

Es werden im wesentlichen drei Lösungsansätze untersucht, um die Laufzeit und den Datenverlust zu verbessern. Der erste Ansatz benutzt das sogenannte "Energy Harvesting", um batterieelose Sensorknoten direkt mit Energie zu versorgen oder Batterien von Sensorknoten wieder aufzuladen [397]. Mit Energy Harvesting bezeichnet man die Gewinnung von elektrischer Energie aus Quellen wie Umgebungstemperatur, Vibrationen, Druckwellen, Luftströmungen und Lichtstrahlung mittels in der Regel kleinen Generatoren. Das weitaus leistungsfähigste Energy Harvesting-Verfahren, um Sensorknoten mit Energie zu versorgen, sind Solarzellen [398]. Dieses Verfahren ist technisch ausgereift, kommerziell erhältlich, einfach und allgemein einsetzbar. Falls die Solarpaneele im freien aufgestellt werden können, liefern sie in der Regel ausreichend Energie, um auch

datenintensive Monitoringanwendungen zu betreiben. Alle andere Energy Harvesting-Verfahren liefern deutlich weniger Energie (Faktor 10 und mehr). Für den Einsatz bei Kunstbauten könnten piezoelektrischen Generatoren, die mechanische Energie aus Vibrationen oder Druckwellen (z.B. Schallwellen) in elektrische Energie umgewandelt, eine mögliche Alternative zu Solarpaneele sein. Ausgenutzt werden dabei z.B. Brückenschwingungen, die durch Verkehr oder Wind ausgelöst werden, oder Verkehrslärm. Die typische Leistung dieser Generatoren beträgt höchstens mehrere mW, sodass die Versorgung von datenintensiven Anwendungen eher zweifelhaft ist.



Abb. 8.149 Sensorknoten mit eingebautem und externem Solarpanel [397]

Der zweite Ansatz beruht darin, die gemessenen Rohdaten in den Knoten zu verarbeiten, mit dem Ziel, die Datenmenge, die über Funk übertragen wird, zu minimieren. Je nach Anwendung können Rohdaten eine hohe Redundanz aufweisen, sodass dadurch die zu übertragende Datenmenge sehr effektiv reduziert werden kann. Da die Speicherkapazität und die Verarbeitungsgeschwindigkeit von Sensorknoten stark beschränkt ist, setzt dies Grenzen an die Komplexität der Algorithmen. Ausserdem müssen diese auch effizient implementiert werden, um Ausführungsdauer und Speicherverbrauch zu minimieren. Mehrere Arbeiten, teils mit praxisnahen Feldversuchen, haben aufgezeigt, dass der Ansatz vielversprechend ist, und mit geringen Datenverlusten Laufzeiten von mehreren Monaten erlauben. Typische Anwendungen bei Brücken sind die Schwingungsüberwachung [401], die Überwachung von Dehnungen [402], die Erfassung von Dehnungszyklen an ermüdungsrelevanten Bauteilen [403] und auch die Überwachung der modalen Parametern (Schwingungsform, Eigenfrequenz, Dämpfung) [404].

Der dritte Ansatz besteht darin, Messungen nur dann auszuführen, wenn relevante Ereignisse auftreten (ereignisgesteuertes Monitoring). Solche Ereignisse sind z.B. die Überfahrt eines Zuges über eine Eisenbahnbrücke oder eines Lastwagens über eine Strassenbrücke. Dieser Ansatz erlaubt, die Dauer von energieintensiven Messvorgängen auf ein Minimum zu reduzieren. Dehnungsmessungen mit elektrischen Dehnmessstreifen sind im Vergleich mit anderen Sensoren sehr energieintensiv (20-50 mW, MEMS-Beschleunigungssensor 5 mW), sodass es sich lohnt, die Betriebsdauer der Sensoren zu minimieren. Ein ereignisgesteuertes Sensornetz verfügt neben den eigentlichen Messknoten über zusätzliche Sensorknoten (Wächterknoten), die zur Erkennung der Ereignisse spezialisiert sind. Da die Wächterknoten ständig im Betrieb sind, müssen sie viel energieeffizienter betrieben werden können als die Messknoten, die möglichst lange in einem energiesparsamen Standby-Zustand gehalten werden. Sobald diese Knoten ein Ereignis feststellen, senden sie Alarmmeldungen an die Messknoten, die daraufhin den Standby-Zustand verlassen, ihre Sensoren einschalten und die Messaufgabe durchführen. Nach Abschluss der Messung, der Verarbeitung der Rohdaten und der Kommunikation der verarbeiteten Daten gehen die Messknoten in den Standby-Zustand zurück. Auch dieser Ansatz ist vielversprechend und wurde mit praxisnahen Feldversuchen getestet, die aufzeigen, dass Laufzeiten von vielen Monaten mit geringen Datenverlusten realisierbar sind [405], [406], [407].

Die Anwendungsgrenzen werden hauptsächlich durch die Beschränkungen in der Energieversorgung gesetzt. Laufzeiten über mehrere Jahre ohne Unterhalt der Energieversorgung ist nur möglich, wenn die Datenmengen stark begrenzt werden

(Monitoring von langsam variierenden Prozessen) und die Elektronik des Messverfahrens eine Implementation auf einer Fläche von höchstens der Grössenordnung von 10 cm² erlaubt. Der Ausführung sehr genauer und netzweiten zeitsynchronisierter Messungen sind ebenfalls Grenzen gesetzt. In der Regel sollten Sensornetze jedoch die Anforderungen bei Monitoring-Anwendungen im Bereich Kunstbauten gut erfüllen können. Eine Ausnahme sind Anwendungen der Schadensidentifikation mittels Schwingungsdaten, da die geringe Sensitivität des Verfahrens eine hohe Genauigkeit und präzise Zeitsynchronisation der Messungen erfordert.

Drahtlose Sensornetze sind bei vielen Anwendungen eine vollwertige Alternative zu verkabelten Messsystemen. Der Vorteil drahtloser Sensornetze ist die rasche (und daher kostengünstige) Montage, die einfache Ergänzung eines Messnetzes mit neuen Messpunkten und die flexible Reorganisation eines Messnetzes. Voraussetzung dazu ist, dass auch die Sensoren rasch montiert werden können. Für das Monitoring von langsam variierenden Prozessen, die wenig Daten erzeugen, können drahtlose Sensornetze verkabelte Messsysteme in den meisten Fällen ohne weiteres ersetzen und können zudem kostengünstiger installiert und betrieben werden. Bei datenintensiven Anwendungen bieten Sensornetze Vorteile, solange die niedrigeren Montagekosten die höheren Unterhaltskosten infolge der Energieversorgung übertreffen. Dies ist sicherlich gegeben bei Anwendungen mit einer Laufzeit von einigen Wochen oder Monaten. Je nach Anwendung können Sensornetze für eine Laufzeit von ein bis zwei Jahren noch Vorteile gegenüber einem verkabelten Messsystem bringen. Bei längeren Laufzeiten haben Sensornetze weiterhin Vorteile, wenn ein Stromnetzanschluss nicht vorhanden oder mit hohen Kosten zu bewerkstelligen ist. Bei Monitoringaufgaben im Bereich von Baustellen können Sensornetze ebenfalls Vorteile bringen, da die fortschreitenden Bauarbeiten Verlegungen der Verkabelung erfordern können und Kabel im Bereich von Baustellen leicht beschädigt werden können. Dies erfordert zusätzliche Unterhaltsarbeiten und es können Datenverluste auftreten.

8.6.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Einsatzzwecke von Sensornetzen decken weitgehend die Fragestellungen ab, die auch konventionelle, verkabelte Messsysteme abdecken:

- Deformationsverhalten von Bauteilen,
- Dehnungen an kritischen Stellen (Spannungsanalyse, Ermüdung),
- Rissöffnungen,
- Schwingungsverhalten von Bauwerken,
- Datenerfassung zur Modellkalibration.

Wie bereits erwähnt, dürften die Schadensidentifikation und Schadenslokalisierung mittels Schwingungsdaten schwerlich mit drahtlosen Sensornetzen umzusetzen sein.

Tab. 8. vergleicht einige Merkmale verkabelter Messsysteme und drahtloser Sensornetze und erlaubt ein erste Beurteilung, ob drahtlose Sensornetze für einen vorgesehen Einsatz geeignet sind.

Tab. 8.43 Vergleich verkabelte Messsysteme und drahtlose Sensornetze		
Metrik	Verkabelte Messsysteme	Drahtlose Sensornetze
Kosten	Hoch (Messgeräte und Installation)	Klein (Sensorknoten ca. 1'000 CHF und rasche Installation)
Installation	Mehrere Tage bis Wochen	Mehrere Stunden bis wenige Tage
Laufzeit	Sehr lang (Begrenzung durch Lebensdauer der Geräte)	Begrenzt durch Batterielaufzeit oder Energy Harvesting, Monate (hohe Datenrate), Jahre (kleine Datenrate)
Sensoren	Keine Beschränkung	Mittlerer Energieverbrauch < 50 mW
Anzahl Sensoren	So wenig wie möglich, um Kosten zu sparen	Grösserer Spielraum, da zusätzliche Messpunkte

Tab. 8.43 Vergleich verkabelte Messsysteme und drahtlose Sensornetze

		kostengünstig sind. Begrenzt durch Datenübertragungsrate
Flexibilität	Beschränkt	Hoch
Datenrate	Sehr hoch	Beschränkt durch Hardware (ADC), oft kleiner als 250 Hz
Datenübertragungsrate	Sehr hoch (ohne Verluste)	Begrenzt (mit kleinen Verlusten)
Zeitsynchronisation	Sehr hoch	Höchstens etwa 1/100 s

8.6.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

Die von Sensornetzen erfassten Daten sind einzelne digitale Messwerte oder ganze Messreihen, die mit einem Zeitstempel versehen sind.

Messgrößen sind alle relevanten mechanischen Größen wie Verschiebung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Dehnung, Druck, Kraft und weitere für Kunstbauten relevante physikalische Größen wie Temperatur, Feuchtigkeit, elektrischer Widerstand usw. sein.

Die Genauigkeit der Daten von drahtlosen Sensornetzen ist im Allgemeinen vergleichbar oder etwas schlechter als jene von konventionellen, verkabelten Messsystemen. Oft werden Sensoren eingesetzt, die auch bei verkabelten Systemen im Einsatz sehen, sodass potentielle Ungenauigkeiten von der Signalkonditionierung, der Digitalisierung oder der Datenverarbeitung in den Knoten herrührt. Die Signalkonditionierung ist oft vergleichbar zu jener von verkabelten Messsystemen. Analog-Digital-Wandler mit 24bit Tiefe können problemlos auch bei drahtlosen Sensornetzen eingesetzt werden. Die Datenverarbeitung in den Knoten kann tendenziell zu ungenaueren Ergebnissen führen, weil aufgrund der Hardwarebeschränkungen die zu verarbeiteten Datenreihen kleiner sind als bei verkabelten Messsystemen. Da die Genauigkeitsanforderungen für die typischen Fragestellungen im Bereich Kunstbauten nicht hoch sind, oft reicht bereits eine Messunsicherheit von 5-10% aus, stellt die etwas geringere Genauigkeit der Daten von drahtlosen Sensornetzen keine Einschränkung ihres Einsatzes dar. Im Feldeinsatz beeinflussen oft die Auslegung des Messnetzes, die Montage der Sensoren, der Temperatur- und Feuchtigkeitseinfluss und elektromagnetische Störsignale die Genauigkeit der Daten stärker als die Eigenschaften des Messsystems.

8.6.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Monitoringanwendungen mit drahtlosen Sensornetzen und kleinen Datenraten sind Stand der Technik in vielen Fachbereichen, wobei im Umweltmonitoring, auch wegen des oft fehlenden Stromnetzanschlusses, die Technologie der Wahl ist. Der Einsatz drahtloser Sensornetze im Bauwerksmonitoring ist hingegen eher bescheiden, obwohl die Eignung im Rahmen von nachträglichen Verstärkungen bereits angewendet wurde [408]. Vielmehr dürfte fehlendes Wissen über den Stand der Technik, eine gewisse strukturelle Innovationsträgheit der Baubranche und die dominante Marktstellung von Unternehmen mit herkömmlichen Messsystemen sein.

Bei datenintensiven Monitoringanwendungen ist die Situation anders. Die Forschung hat die grundsätzliche Machbarkeit aufgezeigt, doch fehlt noch weitgehend die Weiterentwicklung zum kommerziellen Produkt. Obwohl mehrere Pilotanwendungen zum datenintensiven Monitoring über längere Betriebszeiten mit drahtlosen Sensornetzen ausgeführt worden sind ([409],[401],[405]), sind ergänzende Pilotprojekte erforderlich, um die Grenzen der Belastbarkeit grosser Sensornetze auszuloten. Insbesondere ist nicht geklärt, wie stark die Kopplung mit LoRaWAN-Netzwerke datenintensives Monitoring begrenzen. Auch das Konzept des ereignisgesteuerten Monitorings ist an Strassenbrücken noch wenig untersucht worden. Im Vergleich zu Eisenbahnbrücken ist die autonome Erkennung von Ereignissen (nahender Lastwagen) wesentlich komplexer.

Die Ausschreibung erfolgt grundsätzlich analog der eines verkabelten Messsystems. Darüber hinaus gehende Anforderungen betreffen den zu erwarteten Datenverlust und eventuell die Laufzeiten der Batterien und die Zeitsynchronisation des Netzwerks.

8.6.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [393] Karray, F., Jmal, M. W., Garcia-Ortiz, A., Abid, M., & Obeid, A. M. (2018). A comprehensive survey on wireless sensor node hardware platforms. *Computer Networks*, 144, 89-110.
-
- [394] Feltrin, G., Meyer, J., Bischoff, R., Flouri, K., & Jalsan, K. E. (2011) Monitoring mit drahtlosen Sensornetzen. 14. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, 17. Juni 2011, Dübendorf (<https://zcag.ch/wp-content/uploads/2022/02/2011-06-feltrin.pdf>).
-
- [395] Hodge, V. J., O'Keefe, S., Weeks, M., & Moulds, A. (2014). Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1088-1106.
-
- [396] LoRa Alliance 2022) LoRaWAN™ What is it? A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ (https://www.mouser.com/pdfdocs/LoRaWAN101_final.pdf).
-
- [397] Adu-Manu, K. S., Adam, N., Tapparello, C., Ayatollahi, H., & Heinzelman, W. (2018). Energy-harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs) A review. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 14(2), 1-50.
-
- [398] Sharma, H., Haque, A., & Jaffery, Z. A. (2018). Solar energy harvesting wireless sensor network nodes: A survey. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 10(2), 023704.
-
- [399] Safaei, M., Sodano, H. A., & Anton, S. R. (2019). A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018). *Smart Materials and Structures*, 28(11), 113001.
-
- [400] Winkler J., Hendy C (2017). Improved Structural Health Monitoring of the DLR Warton Road Bridge using Digital Image Correlation. Proceedings of SMAR conference. Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures.
-
- [401] Feltrin, G., Jalsan, K. E., & Flouri, K. (2013). Vibration monitoring of a footbridge with a wireless sensor network. *Journal of Vibration and Control*, 19(15), 2285-2300.
-
- [402] Jo, H., Park, J. W., Spencer, B. F., & Jung, H. J. (2013). Development of high-sensitivity wireless strain sensor for structural health monitoring. *Smart Structures and Systems*, 11(5), 477-496.
-
- [403] Feltrin, G., Popovic, N., Flouri, K., & Pietrzak, P. (2016). A wireless sensor network with enhanced power efficiency and embedded strain cycle identification for fatigue monitoring of railway bridges. *Journal of Sensors*, 2016.
-
- [404] Zimmerman, A. T., Shiraishi, M., Swartz, R. A., & Lynch, J. P. (2008). Automated modal parameter estimation by parallel processing within wireless monitoring systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 14(1), 102-113.
-
- [405] Popovic, N., Feltrin, G., Jalsan, K. E., & Wojtera, M. (2017). Event-driven strain cycle monitoring of railway bridges using a wireless sensor network with sentinel nodes. *Structural Control and Health Monitoring*, 24(7), e1934.
-
- [406] Feltrin, G., Popovic, N., & Wojtera, M. (2019). A sentinel node for event-driven structural monitoring of road bridges using wireless sensor networks. *Journal of Sensors*, 2019.
-
- [407] Liu, Y., Voigt, T., Wirström, N., & Höglund, J. (2018). Ecovibe: On-demand sensing for railway bridge structural health monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1), 1068-1078.
-
- [408] Ghafoori, E., Hosseini, A., Al-Mahaidi, R., Zhao, X. L., & Motavalli, M. (2018). Prestressed CFRP-strengthening and long-term wireless monitoring of an old roadway metallic bridge. *Engineering Structures*, 176, 585-605.
-
- [409] Peckens, C. A., Kane, M. B., Zhang, Y., & Lynch, J. P. (2022). Long-term wireless structural monitoring of operational bridges. In *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (pp. 555-586). Woodhead Publishing.
-

8.7 Brücken - Weigh In Motion (B-WIM)

8.7.1 Beschreibung der Technologie

Die B-WIM-Technologie (Bridge Weigh-in-Motion) wurde in den späten 1970er Jahren in den USA von Moses [410] den Weg bereitet. B-WIM unterscheidet sich von anderen Fahrzeugwägetechnologien, wie z. B. dem Wiegen auf der Grundlage statischer Waagen und der Fahrbahnwägung (WIM), da sie sich auf die Instrumentierung einer Brücke stützt und diese effektiv in eine Waage verwandelt, die in der Lage ist, das Brutto- und Achsgewicht der vorbeifahrenden Lkw zu messen.

Das Messprinzip, das der B-WIM zugrunde liegt, ist die Theorie der inversen Brückeneinflusslinie, die einen Leitfaden für die Identifizierung beweglicher Kräfte auf der Grundlage der kalibrierten Brückeneinflusslinien und der durch bewegliche Lasten hervorgerufenen Reaktionen der Brücke bietet. Der gängigste und praktischste Ansatz zur Umsetzung der B-WIM besteht in der Installation von Dehnungsmessstreifen an der Brückenkonstruktion. Moderne bzw. anspruchsvollere B-WIM-Systeme verwenden zusätzliche Sensoren, wie z. B. aufgeklebte Messstreifen oder Kameras, um Achsen zu erkennen und somit die Wiegegenauigkeit zu verbessern. Ähnlich wie bei anderen bestehenden Wägetechnologien umfasst die Implementierung von B-WIM im Allgemeinen zwei Schritte: Kalibrierung und Wägung. Bei der Kalibrierung wird die Einflusslinie der Brücke bestimmt, indem ein Lkw mit bekanntem Achsgewicht die instrumentierte Brücke überfährt. Anschliessend können die Dehnmessungen mit den so bestimmten Einflusslinien in die Messgrößen der Fahrzeugwägung umgerechnet werden.

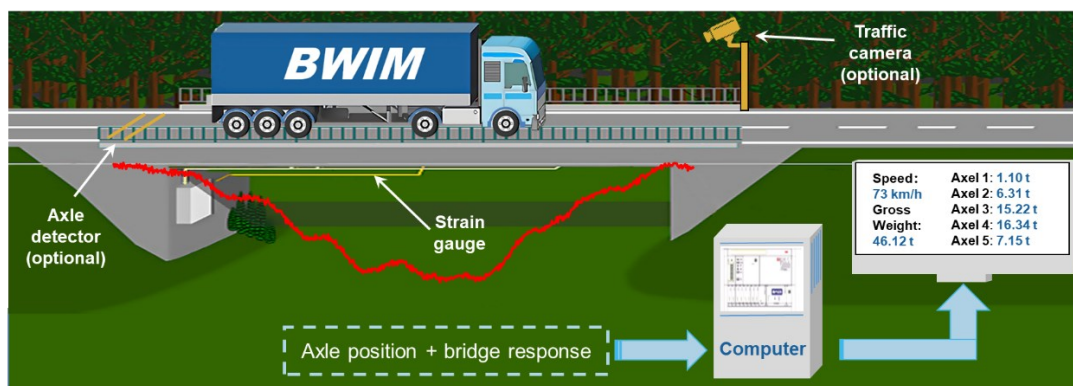


Abb. 8.150 Schema eines B-WIM-Systems (angepasst aus [411])

8.7.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

B-WIM-Systeme werden heute weltweit eingesetzt und weiterentwickelt. Ihre Ausgestaltung als verteilte Messsysteme macht sie jedoch noch immer zu einer nicht breit etablierten Technologie, weshalb wir diesen Teil AP1-B in diesen Übersichtsbericht aufnehmen. Auf der Grundlage von mehr als 40 Jahren Forschung und Praxis lassen sich die Vorzüge und Grenzen der B-WIM-Technologie wie folgt zusammenfassen [412]:

- **Genauigkeit:** Das B-WIM wiegt Lkw anhand von verteilten Messungen entlang der vom Test-Lkw zurückgelegten Strecke. Durch Mittelwertbildung können die Einflüsse der Fahrzeugdynamik bei der Ermittlung des Fahrzeuggewichts minimiert werden. Im Gegensatz dazu misst das herkömmliche Fahrbahn-WIM-System die dynamische Radkraft über einen sehr kurzen Zeitraum, was die Messgenauigkeit beeinträchtigt. Es ist jedoch zu beachten, dass sich die Genauigkeit des klassischen B-WIM-Ansatzes in komplizierten Verkehrsszenarien verschlechtert, wenn mehrere Fahrzeuge gleichzeitig auf der Brücke unterwegs sind oder wenn das Fahrzeug abrupt die Spur und die Geschwindigkeit wechselt. Empirisch wurde festgestellt, dass der klassische B-WIM-Algorithmus eine höhere Genauigkeit bei der Schätzung des Gesamtgewichts des Fahrzeugs (GVW) als bei der Schätzung der einzelnen Achsgewichte (AW) bietet; bei eng beieinanderliegenden Achsgruppen, wie Tandems und Dreiergruppen, können die Wägungsfehler bei den einzelnen Achsgewichten gross sein. Diese Einschränkungen

sind der Hauptgrund dafür, dass B-WIM bisher nicht anstelle von herkömmlichen WIM-Systemen eingesetzt wird.

- **Dauerhaftigkeit:** Die B-WIM-Sensoren, bei denen es sich in den meisten Fällen um Dehnungsmessstreifen handelt, werden hauptsächlich an der Brückenstruktur und unter der Fahrbahnoberfläche angebracht. Diese Sensoren sind fast frei von Radstößen und rauen Umgebungsbedingungen, was sich positiv auf die Haltbarkeit des Hardwaresystems auswirkt.
- **Objektivität:** Das Fahrerverhalten wird durch das B-WIM-System nicht beeinflusst, da es keine sichtbaren Geräte auf der Fahrbahnoberfläche gibt. Dies bedeutet, dass überladene Fahrzeuge nicht versuchen können, die Wiegestellen zu umgehen, was die Objektivität der Wiegeergebnisse erhöht.
- **Portabilität und Kosteneffizienz:** Die Instrumentierung und Wartung eines B-WIM-Systems sind einfacher und weniger aufdringlich als das WIM-Äquivalent. In den meisten Fällen werden keine Sensoren auf der Fahrbahnoberfläche benötigt, und folglich wird der Verkehr während der Installation und Wartung nicht unterbrochen. Die kostengünstige und tragbare Beschaffenheit des B-WIM-Hardwaresystems, das hauptsächlich aus wiederverwendbaren Dehnungsmessstreifen, Drähten und Erfassungsgeräten besteht, ermöglicht ein schnelles und einfaches Mittel zur Quantifizierung des Schwerlastverkehrs in mehreren Brückenbauwerken im gesamten Strassennetz.
- **Multifunktionalität:** Neben der Wägung kann ein B-WIM-System zusätzliche Informationen liefern, wie z. B. Messungen der Brückendehnung, Einflusslinien, Lastverteilungsfaktoren und dynamische Verstärkung der Belastung, die die Verfeinerung des Entwurfs und die strukturelle Bewertung von Brücken unterstützen.

Aufgrund der oben genannten Vorteile hat die B-WIM-Technologie zunehmendes Forschungsinteresse auf sich gezogen. Auf der Grundlage der inversen Theorie der Brückeneinflusslinien konzentrieren sich die vorhandenen Studien hauptsächlich auf die folgenden Aspekte:

- **Sensortechnologie für Brückenreaktionen:** Die meisten B-WIM-Studien beruhen auf Dehnungsmessungen, da diese einfacher zu messen sind als Neigungen und Verschiebungen, während die Beschleunigung in diesem Fall aufgrund ihrer geringeren Wirksamkeit für die Bewertung statischer Lasten weniger aussagekräftig ist. In einigen Studien werden fortschrittlichere faseroptische Sensoren eingesetzt, z. B. Bragg-Gitter-Dehnungssensoren (FBG). Zahlreiche Studien belegen jedoch, dass normale Dehnungsmessstreifen oder Messumformer die Anforderungen des B-WIM-Schemas angemessen erfüllen können. Eine weitere Forschungsrichtung in dieser Hinsicht ist die Erforschung verschiedener Arten von Brückenreaktionen, die die Flexibilität und Portabilität des B-WIM-Systems verbessern können. Es wurde ein vollständig berührungsloses B-WIM-System vorgeschlagen, bei dem eine Reihe von Kameras eingesetzt werden kann, um die Brückenverschiebungen und Achsabstände über Computer Vision ferngesteuert zu messen. In einigen Studien wird versucht, die Nutzung der kostengünstigeren und einfacher zu installierenden Beschleunigungssensoren für B-WIM zu verbessern. Es hat sich gezeigt, dass das auf Beschleunigungssensoren basierende B-WIM-System bei akzeptablen Genauigkeitseinbussen aufgrund seiner einfacheren Installation an Mobilität gewinnt.
- **Technologie zur Erfassung der Achspositionen:** Zusätzlich zur Brückenreaktion sind die Positionierungen der zu wiegenden Fahrzeuge für die Anwendung der inversen Theorie der Brückeneinflusslinien erforderlich. Frühe B-WIM-Projekte nutzten Verkehrssensoren, wie z. B. Strassenrohre oder in den Strassenbelag eingebettete Achsdetektoren, um diese Informationen zu gewinnen. Die Verwendung solcher zusätzlichen Sensoren schmälert jedoch die Vorteile von B-WIM gegenüber der herkömmlichen WIM-Technologie für Fahrbahnbeläge. Neuere Strategien, wie z. B. die Nothing-on-Road- (NOR) oder Free-of-Axis-Detector- (FAD) Ansätze, versuchen, Achsen durch Signalnachbearbeitung von Scherdehnungen und Einbeziehung von Deep-Learning-Verfahren zu lokalisieren. In jüngerer Zeit wird, wie in einem späteren Abschnitt erläutert, die Computer Vision genutzt, um die Identifizierung der Achspositionen zu verbessern.

- **B-WIM-Algorithmen:** Basierend auf den beiden Schritten der B-WIM-Implementierung werden die B-WIM-relevanten Algorithmen in Kalibrierungsalgorithmen und Abwägungsalgorithmen unterteilt.

Kalibrierungsalgorithmen beziehen sich auf Methoden, die zur Kalibrierung oder Identifizierung von Einflusslinien der instrumentierten Brücke verwendet werden. Frühe B-WIM-Systeme verwenden theoretische Brückeneinflusslinien, die das tatsächliche Verhalten einer Brücke nicht genau vorhersagen können. Um die Lücke zwischen den theoretischen und den tatsächlichen Einflusslinien zu verkleinern, werden in Folgestudien die gemessenen Brückenreaktionen, die durch vorbeifahrende Fahrzeuge verursacht werden, zur Kalibrierung der theoretischen Einflusslinien verwendet. Diese Methoden erfordern jedoch nach wie vor ein Brückenmodell, was in der Praxis unpraktisch sein kann. Um die Notwendigkeit eines Strukturmodells zu verringern, wurde ein vollständig datengesteuerter Kalibrierungsalgorithmus, nämlich die Matrixmethode, vorgeschlagen. Bei der Matrixmethode werden die Einflusslinien der Brücke durch Lösen einer Matrixgleichung ermittelt, die aus bekannten Achsgewichten und den entsprechenden Positionen gebildet wird, und die resultierende Brückenreaktion abgeleitet. Obwohl die Matrixmethode allgemein anerkannt ist, kann sie die Querbewegung, die Geschwindigkeitsschwankungen und die Spurbreite des Kalibrierfahrzeugs nicht berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Einflusslinie von Natur aus nicht in der Lage, die Querbelastungseffekte von Brückenstrukturen zu reproduzieren. Aus diesem Grund wird in neueren Studien die zweidimensionale Einflusslinie zur dreidimensionalen Einflussfläche erweitert [413] um die oben erwähnten Fehler, die bei einer 1D-Analyse auftreten, zu vermindern.

Wägealgorithmen berechnen das Gesamtgewicht des Fahrzeugs und das Achsgewicht durch Lösung der überbestimmten Matrixgleichung, die auf der Grundlage von Messungen der Brückenreaktion und der Einflusswerte der Achsen aufgestellt wird. Der gebräuchlichste Wägealgorithmus ist die Methode der kleinsten Quadrate, die die kleinste quadratische Lösung des zu ermittelnden Achsgewichts liefert. In mehreren Studien wurde empirisch festgestellt, dass der Kleinste-Quadrate-Algorithmus bei der Schätzung des Gesamtgewichts des Fahrzeugs genauer ist als beim Achsgewicht, wobei eng beieinander liegende Achsgruppen zu erheblichen Schätzfehlern führen. Um dieses Problem zu lösen, werden in neueren Studien Verfahren wie die Tikhonov-Regularisierung und die Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt, um die Leistung des B-WIM-Systems beim Wiegen einzelner Achsen zu verbessern, während Deep-Learning-Verfahren in der Regel eine geringere Robustheit aufweisen [414].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass trotz zahlreicher Fortschritte bei der Verbesserung der Genauigkeit und Anwendbarkeit von B-WIM die erforderliche Genauigkeit und Wiederholbarkeit für eine kommerzielle Anpassung dieser Lösung nicht leicht zu erreichen ist, insbesondere da sie von der Konfiguration jeder einzelnen Brücke abhängt. Die richtige Kombination dieses Ansatzes mit dem bereichsspezifischen Wissen von Ingenieuren, die für bestimmte Objekte zuständig sind, könnte seine Anwendung fördern und dazu beitragen, die Kosten für die Bewertung von Brücken und Lkw-Lasten zu senken. Weitere Studien sind erforderlich, um die Zuverlässigkeit der B-WIM-Technologie zu erhöhen, damit sie in grossem Massstab vermarktet werden kann.

8.7.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

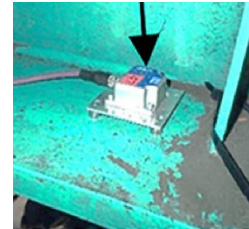
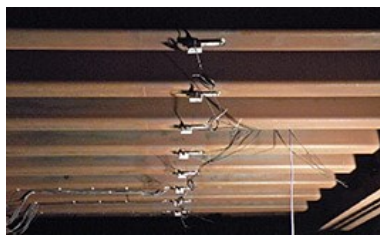
Die Hauptvorteile bei der Nutzung der derzeit verfügbaren B-WIM-Technologie liegen eher in der Übertragbarkeit, Kosteneffizienz und Multifunktionalität dieser Systeme als in ihrer Genauigkeit. Zu den möglichen Anwendungsfällen gehören die folgenden Situationen:

- Es werden nur wenige Tage oder Wochen mit Wägedaten von mehreren Strassenabschnitten benötigt,
- Interesse an der regelmässigen Erkennung von überladenen Fahrzeugen
- Die Bewertung des bestehenden Zustands und der Leistungsfähigkeit eines Brückenobjekts erfordert realistische Informationen über die Verkehrslasten

8.7.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

Wie bereits erwähnt, sind für die B-WIM-Technologie zwei Arten von Daten erforderlich: Daten zur Brückenreaktion und Informationen zur Achsenpositionierung.

Was die Reaktion der Brücke betrifft, so basieren die meisten praktischen B-WIM-Systeme auf Brückendehnungen, die mit gewöhnlichen Dehnungsmessstreifen und an der Brücke installierten Aufnehmern leicht gemessen werden können. Einige Studien verwenden weiter Brückenverschiebungs- und/oder Beschleunigungsmessungen, wobei Brückenverschiebungen in der Regel mit einer speziellen Kamera gemessen werden und die Beschleunigung über kostengünstige (MEMS-)Beschleunigungssensoren abgeleitet wird; der Nachteil ist der Verlust an Genauigkeit und die geringere Zuverlässigkeit der Messungen.



(a) Dehnungsmessstreifen [411] (b) Kamera [415] (c) Beschleunigungsmesser [416]

Abb. 8.151 Technologien zur Messung der Brückenreaktion

Es gibt verschiedene Ansätze zur Schätzung und Erfassung der Achsenpositionen. Frühe B-WIM-Systeme nutzten Sensoren auf der Fahrbahn, z. B. Strassenrohre und -streifen, um Achsen zu erfassen. Solche Sensoren werden in der oberen Fahrbahnschicht oder auf der Strassenoberfläche installiert, was eine Unterbrechung des Verkehrs während der Installation erfordert und somit die Übertragbarkeit von B-WIM-Systemen beeinträchtigt. Die neuesten Messverfahren "Nothing-on-Road (NOR) oder Free-of-Axle-Detector" (FAD) konzentrieren sich auf die Ortung von Achsen, ohne dass Sensoren auf der Fahrbahn angebracht werden. Die Zuverlässigkeit dieser Strategien ist jedoch in komplizierten Verkehrsszenarien begrenzt, da die Achsenpositionen indirekt aus Messungen des Brückenverhaltens, wie z. B. Scherdehnungen, abgeleitet werden müssen. Keine dieser Optionen ist jedoch in der Lage, die Position jeder Achse mit hoher Genauigkeit kontinuierlich zu verfolgen, wenn mehrere Fahrzeuge die Brücke überqueren. In den letzten Jahren haben die kontinuierlichen Fortschritte im Bereich der Computer-Vision-Techniken (CV) ein neues Licht auf das Problem der Achserkennung für B-WIM geworfen. Studien haben gezeigt, dass CV nicht nur Fahrzeugkonfigurationen einschliesslich Fahrzeugtyp, Anzahl und Abstand der Achsen kostengünstig erkennen kann, sondern auch den räumlich-zeitlichen Weg jedes Fahrzeugs und jeder Achse auf der Brücke genau bestimmen kann. Dieser Vorteil wird durch das Aufkommen von Deep Learning, das die Effizienz und Robustheit der visuellen Objekterkennung am Computer drastisch verbessert, noch weiter ausgebaut.



(a) Strassenstreifen [411] (b) Schersensor [417] (c) Computer Vision [418]

Abb. 8.152 Technologien zur Erfassung von Achspositionen

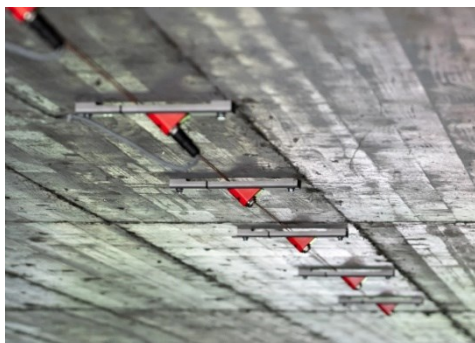
Was die Eignung bestimmter Brückentypen für B-WIM-Zwecke angeht, so wurden in den USA zunächst einfach gestützte Trägerbrücken vorgeschlagen. Im Laufe der Jahre wurde das B-WIM-Konzept auf fast alle Brückentypen ausgeweitet. Die verwendeten Bauwerke reichen von kurzen Durchlässen bis hin zu Platten-, Hohlkasten- und Plattenbalkenbrücken mittlerer Spannweite, wie z. B. das Viadukt von Millau in Frankreich, die höchste Brücke der Welt. In einigen wenigen Fällen wurden sogar gemauerte Bogenbrücken nach diesem Prinzip vermessen. Die Länge der instrumentierten Brückenspanne hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Wägegenauigkeit, die sich aufgrund der Nichtlinearität von Brücken mit grosser Spannweite und der Anwesenheit mehrerer Fahrzeuge verschlechtern kann. In der Praxis beeinflusst die spezifische Art und Geometrie der Brücken die Messgenauigkeit. Im Allgemeinen sollte die Länge der Einflusslinie, d. h. der Abstand zwischen den beiden am weitesten entfernten Punkten, die die Messung beeinflussen, weniger als 30 m betragen [2].

Insgesamt kann die moderne B-WIM-Technologie eine Genauigkeit der Klasse B(10) erreichen, die in dem Bericht für die COST 323 Action [419] und dem technischen Bericht WAVE [420] definiert ist, was für die Vorauswahl überladener Fahrzeuge ausreicht, aber für die unmittelbare rechtliche Durchsetzung nicht ausreicht. Sowohl die Industrie als auch die Forschung streben die Entwicklung von B-WIM-Systemen an, die eine Genauigkeit von $\pm 5\%$ für 95% der Messergebnisse für das Gesamtgewicht des Fahrzeugs und das Gewicht der einzelnen Achsen gewährleisten können [412].

8.7.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

SiWIM® ist das erste kommerzielle B-WIM-System, das in nur wenigen Stunden auf praktisch jeder Brücke installiert werden kann und eine Bewertung des Bauwerkszustands auf der Grundlage realer Verkehrslasten ermöglicht. Es ist besonders nützlich für die gross angelegte Bewertung mehrerer Brücken, da das System vollständig transportabel ist und nach einer erfolgreichen Messung schnell an einen anderen Ort gebracht werden kann. Die SiWIM-Brückenbewertung bietet Brückenexperten Informationen über die Einflusslinie einer Brücke, die realen Verkehrslasten, die auf das Bauwerk einwirken, den Verteilungsfaktor des Trägers und den dynamischen Verstärkungsfaktor. Auf der Grundlage dieser Daten wird ein Bewertungsfaktor der Brücke berechnet, auf dessen Basis der Eigentümer der Infrastruktur die Instandhaltungszyklen anpassen und die derzeitige Instandhaltungspolitik und Schutzmassnahmen neu bewerten kann.

Die Basishardware von SiWIM besteht aus zwei Gehäusen mit elektronischen Komponenten und Dehnungsmessstreifen-Sensoren. Die Hardware wurde unter extremen Witterungsbedingungen getestet und wird mit einem Gehäuseschutz gegen möglichen Vandalismus geliefert. Für Endkunden stehen verschiedene Softwarelösungen zur Verfügung. Die Online-Anwendungen SiWIM-M und SiWIM-S ermöglichen die Live-Überwachung des Verkehrs und verschiedener statistischer Daten; die Software SiWIM-F dient der Systemeinrichtung, während die Software SiWIM-D für die Datenverarbeitung verwendet wird. Die Plug-and-Play-Funktion von SiWIM ermöglicht die Integration von Fremdgeräten in das System. ANPR- und Übersichtskameras, IR-Strahler, Verkehrszähler und andere Geräte können an das System angeschlossen werden und es als Stromquelle nutzen. Für weitere Details wird der Leser auf die Webseite von SiWIM® verwiesen [421].



(a) Dehnungsmessstreifen



(b) Datenerfassungssystem

Abb. 8.153 Platzierung eines SiWIM-Hardwaresystems für B-WIM

8.7.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [410] Moses, F. (1979). Weigh-in-motion system using instrumented bridges. *Transportation Engineering Journal of ASCE*, 105(3), 233-249.

- [411] ISWIM - International Society for Weigh in Motion. (2015). Abgerufen am 13. September 2022, von <http://is-wim.org/index.php?nm=2&nsm=6&lg=en>

- [412] Lydon, M., Taylor, S. E., Robinson, D., Mufti, A., & Brien, E. J. O. (2016). Contactless bridge weigh-in-motion (B-WIM). *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1), 69-81.

- [413] Yu, Y., Cai, C. S., & Deng, L. (2016). State-of-the-art review on bridge weigh-in-motion technology. *Advances in Structural Engineering*, 19(9), 1514-1530.

- [414] Kawakatsu, T., Aihara, K., Takasu, A., & Adachi, J. (2018). Deep-Sensing-Ansatz für ein Fahrzeugwägesystem mit einem Sensor auf Brücken. *IEEE Sensors Journal*, 19(1), 243-256.

- [415] Ojio, T., Carey, C., O'Brien, E. J., Doherty, C., & Taylor, S. E. (2016). Kontaktlose Brückenwägung in Bewegung. *Journal of Bridge Engineering*, 21(7).

- [416] Sekiya, H., Kubota, K., & Miki, C. (2018). Simplified portable bridge weigh-in-motion system using accelerometers. *Journal of Bridge Engineering*, 23(1), 04017124.

- [417] Kalhori, H., Makki Alamdari, M., Zhu, X., & Samali, B. (2018). Strategien zur Erkennung von Nichts-auf-der-Straße-Achsen bei der Brückenwägung für eine Schrägseilbrücke: Fallstudie. *Journal of Bridge Engineering*.

- [418] Jian, X., Xia, Y., Lozano-Galant, J. A., & Sun, L. (2019). Traffic Sensing Methodology combining influence line theory and computer vision techniques for girder bridges. *Journal of Sensors*, 2019.

- [419] Jacob, B., OBrien, E. J., & Jehaes, S. (2002). Weigh-in-motion of road vehicles: Abschlussbericht der Aktion COST 323. LCPC, Paris.

- [420] O'Brien, E. J., Zhidarić, A., Baumgärtner, W., González, A., & McNulty, P. (2001). Weighing-In-Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE) WP1. 2: Bridge WIM Systems. University College Dublin.

- [421] <https://cestel.si/en/siwim/>, Zugriff am 06.09.2022

8.8 Verteilte faseroptische Sensoren für Vorspannsysteme

8.8.1 Beschreibung der Technologie

Optische Fasersensoren (OFS) sind dielektrische Geräte, die zur Begrenzung und Führung von Licht verwendet werden. Sie bestehen aus mehreren Schichten: Faserkern, Kabelmantel und gelegentlich eine äussere Umhüllung, die der Faser mechanische Festigkeit verleiht (Abb. 8.154 links). OFS sind in der Lage, mechanische und temperaturbedingte Dehnungen entlang der Faserlänge mittels Lichtstreuung zu messen. Wenn keine Dehnung oder Temperatur auf das System einwirkt, breitet sich das Licht aus und wird an den Fehlstellen mit einer bestimmten Signatur reflektiert, die eine Referenz darstellt. Wenn sich Dehnungs- oder Temperaturwerte ändern, verschiebt sich die Frequenz des zurückgestreuten Lichts, und diese Frequenzverschiebungen werden in gemessene Dehnungswerte umgesetzt. Durch die Einbettung von OFS in Spannstahllitzen ist es möglich, die Dehnungsverteilung entlang des Elements zu überwachen. Das kommerzielle Produkt SmART Strand [422] (Abb. 8.154 rechts) ist ein Beispiel für eine Spannstahllitze, die mit einer optischen Faser ausgestattet ist, um die Spannung entlang ihrer gesamten Länge genau zu messen.

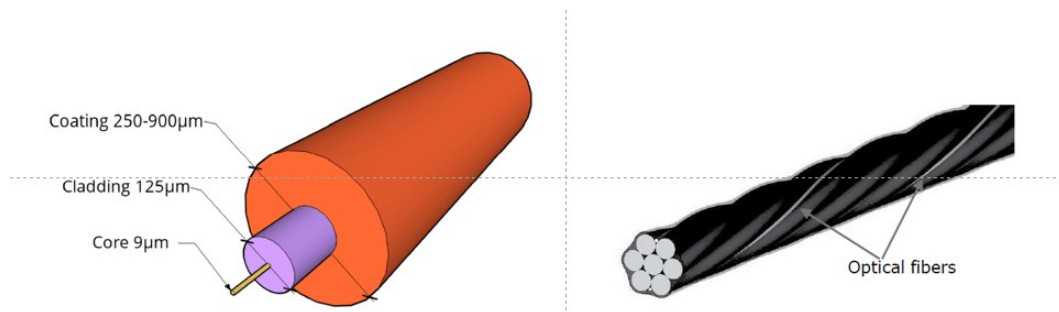


Abb. 8.154 Links: 3D-Darstellung des Querschnitts einer optischen Faser (adaptiert aus [423]); Rechts: Bild der eingebetteten optischen Fasern im SmART Strand System, adaptiert aus [422]

Bei dieser Messtechnik wird hauptsächlich die Methode des Brillouin Optical Time Domain Reflectometers (BOTDR) verwendet. Die BOTDR-Methode verwendet Streulicht, das sich entgegengesetzt zum einfallenden Licht ausbreitet und zu einem Messgerät zurückkehrt (rückgestreutes Licht, siehe Abb. 8.155a). Die rückgestreute Lichtkomponente, die als Brillouin-Streulicht bezeichnet wird, hat eine Spitzenfrequenz, die sich von der Frequenz des einfallenden Lichts unterscheidet. Der Betrag seiner Verschiebung hängt von der Höhe der Dehnung und der Temperatur an der Stelle ab, an der das Streulicht erzeugt wird (Abb. 8.155b). Die Zeit vom Eintritt des einfallenden Lichts am Ende eines Lichtwellenleiters bis zur Rückkehr des rückgestreuten Lichts zu einem Messgerät ist proportional zum Abstand zwischen dem Ende des Lichtwellenleiters und der Stelle, an der das rückgestreute Licht erzeugt wird. Die Dehnung an einer beliebigen Position kann gemessen werden, indem das kontinuierliche rückgestreute Licht nach dem Eintritt des einfallenden Lichts aufgezeichnet wird, die Frequenzcharakteristik zum Zeitpunkt der Rückkehr entsprechend der Länge einer optischen Faser zur Messzielposition analysiert wird und die durch die Temperaturabhängigkeit verursachte Frequenzverschiebung angemessen kompensiert wird.

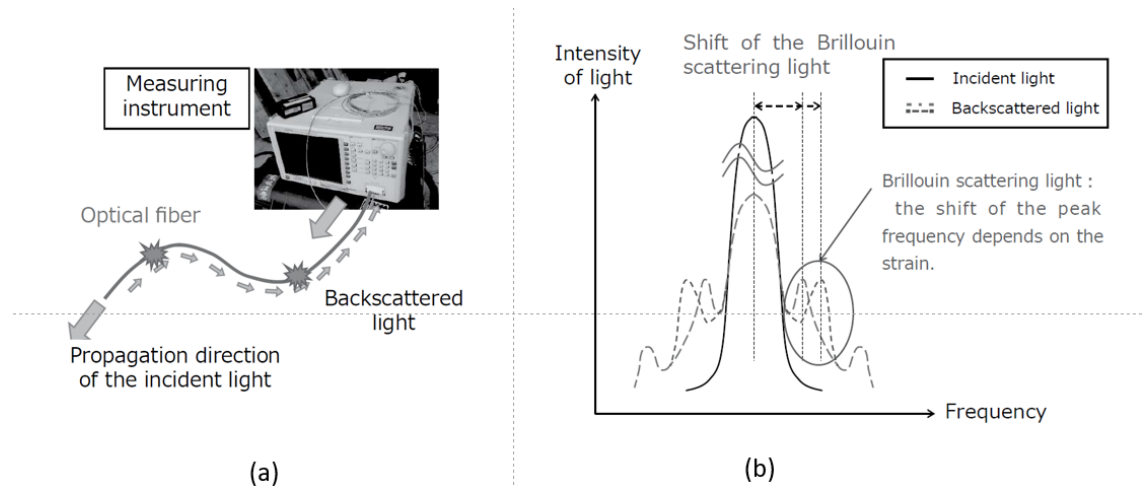


Abb. 8.155 Links: (a) Konzeptuelle Darstellung der Lichtausbreitung bei der BOTDR-Methode, (b) Prinzip der Dehnungsmessung mit einer optischen Faser, adaptiert aus [422]

8.8.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Seit der Demonstration des ersten erfolgreichen Faserherstellungsprozesses in den 1970er Jahren haben OFS grosse Aufmerksamkeit auf sich gezogen. In den letzten Jahrzehnten wurden Glasfasern in grossem Umfang für verschiedene Anwendungen in der Hochgeschwindigkeitstelekkommunikation über grosse Entfernungen, in der bildgebenden Optik, für Laserverstärkungsmedien und für Beleuchtungsanwendungen eingesetzt. Die Anwendbarkeit und Leistung verteilter OFS für das SHM in der bebauten Umwelt wurde in bahnbrechenden Veröffentlichungen getestet und als möglich erwiesen, z. B. von Regier und Hoult [424], Matta et al. [426] und andere. Glišić et al. [425] berichteten über die auf Brillouin-Streuung basierende verteilte OFS-Überwachung einer 1000 m langen Brücke (bestehend aus einer Betonplatte, die auf neun Stahlträger gegossen wurde, die wiederum von mehr als 50 Pfeilern gestützt werden), die derzeit noch im Gange ist, was sie zu einer der längsten verteilten OFS-Überwachungsimplementierungen an realen Strukturen macht.

Während verteilte OFS den Bereich der Dehnungsüberwachung in realen Strukturen massiv erweitern, bewerten sie Dehnungen an den Positionen, an denen sie angebracht sind. Infolgedessen erfassen verteilte OFS nicht den globalen Strukturzustand, der durch Änderungen der Randbedingungen oder Schäden in nicht überwachten Segmenten beeinflusst werden kann. Ausserdem erzeugen verteilte OFS grosse Datenmengen, deren Verwaltung und Auswertung nicht trivial ist. Die Installation verteilter OFS in bestehenden Strukturen ist eine grosse Herausforderung, da sie eine dichte Befestigung der Fasern an dem überwachten Objekt erfordert. Schliesslich sind die Kosten für faseroptische Abfragesysteme immer noch sehr hoch, was ihre breite Anwendung für mehrere kritische Infrastrukturen verhindert.

8.8.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Dank der Entwicklungen in der Optoelektronik und der faseroptischen Kommunikation konnte die OFS stetig reduziert werden, so dass eine breite Verfügbarkeit von kostengünstigen, langen Fasern den Einsatz in der Fern- und verteilten Sensorik ermöglicht. Derzeit basieren verteilte optische Fasersensoren hauptsächlich auf optischer Streuung wie Rayleigh-, Brillouin- oder Raman-Streuung. Systeme auf Brillouin-Basis sind aufgrund der grossen Entfernungen, die sie abfragen können, am weitesten verbreitet und finden in einer Vielzahl von Anwendungen Anwendung, wie z. B. bei der Überwachung des Zustands von Gebäuden, bei der chemischen Verarbeitung, bei Stromleitungen und vielen anderen. OFS weisen gegenüber ihren elektronischen Pendanten erhebliche Vorteile auf:

- Geringe Übertragungsverluste unterstützen die Fernerkundung mit minimaler Signalverschlechterung.
- Hohe Empfindlichkeit, die andere bestehende Techniken um zehn bis hundert Dezibel übertrifft.

- Immunität gegen elektromagnetische Störungen
- Beständigkeit gegen hohe Temperaturen und korrosive Substanzen ermöglichen den Einsatz in rauen Umgebungen.

Zu den möglichen Anwendungen bei Brücken gehören die Überwachung von Dehnungen in kritischen Abschnitten, die Verfolgung der Rissausbreitung und die verteilte Überwachung der Vorspannung in Spanngliedern. Aufgrund der Möglichkeit, grosse Entfernungen innerhalb eines Messkanals zu messen, und der relativ geringen Kosten von OFS eignen sie sich für die Überwachung grosser Infrastrukture Objekte.

8.8.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

Die verteilte faseroptische Dehnungsmessung auf der Grundlage der Brillouin-Streuung wurde erstmals 1989 demonstriert [427] und hat sich seitdem zu einem Hochleistungsinstrumentarium entwickelt, das eine räumliche Auflösung von 1 m über grosse Faserlängen von bis zu 30 km mit absoluten Dehnungsmessungen im Bereich von 50 Mikrodehnungen ($\mu\epsilon$) erreichen kann. Das Ergebnis einer Brillouin-Messeinheit ist die gemessene durchschnittliche Dehnung über die räumliche Auflösungslänge an diskreten Punkten entlang der Faser. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten ist das Abtastintervall, das normalerweise zwischen 0,1 und 1 m liegt. Die gemessene Dehnung ist eine Funktion der aufgezeichneten Brillouin-Frequenzverschiebung multipliziert mit den Kalibrierkoeffizienten der Faser. Die zentrale Brillouin-Frequenzverschiebung wird durch Anpassung einer Lorentz-Kurve über die Brillouin-Verstärkungsspektren bestimmt. Die Integration des Lichtwellenleiters in die Struktur impliziert jedoch häufig die Fixierung des Kabels an diskreten Punkten. Für die Kabelabschnitte zwischen diesen Punkten kann angenommen werden, dass sie eine konstante Dehnung entlang der Faser aufweisen.

8.8.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Um die Anwendbarkeit dieser Messtechnik auf reale Spannbetonkonstruktionen zu überprüfen, wurde SmART Strand [422] auf verschiedene Spannstahlseile angewandt, die für die Konstruktion des Überbaus von Spannbetonbrücken verwendet werden, und Messungen wurden durchgeführt. Die charakteristischen Messergebnisse sind dargestellt in Abb. 8.156. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse die im Entwurf geforderte Spannung über die gesamte Länge übertreffen. Nach 26 Monaten wurden erneut Messungen durchgeführt, die die Dauerhaftigkeit der Messeile bestätigten.

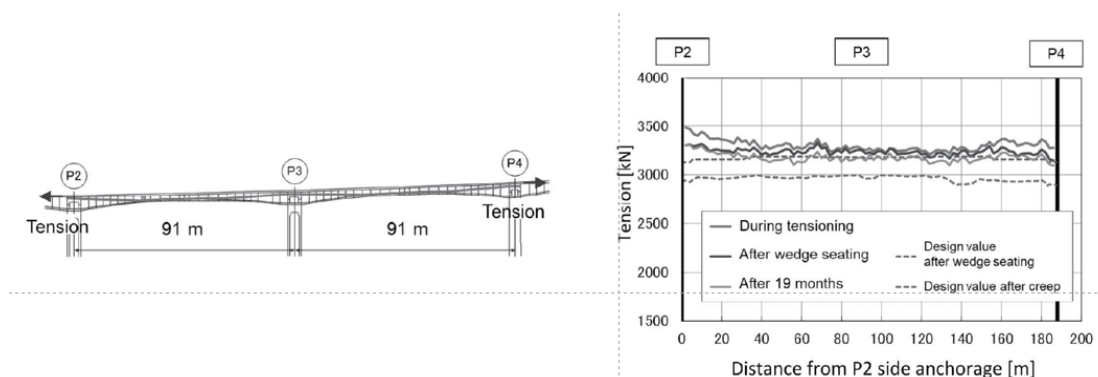


Abb. 8.156 Links: Gemessene Seile von Pfeiler 2 bis Pfeiler 4; Rechts: Spannungsmessergebnisse von vorgespannten Seilen in einer Brücke, angepasst aus [422]

Um die Anwendbarkeit dieser Messtechnik auf Bodenanker zu überprüfen, wurde die Technik beim Bau von Bodenankern zur Hangsicherung angewendet. Abb. 8.157 zeigt den Messaufbau und die charakteristischen Ergebnisse von Spannungsmessungen in Bodenankern. In diesem speziellen Fall wurde bestätigt, dass die Spannung über den freien Teil der Länge nahezu konstant war, wodurch die Spannung auf den Ankerkörper übertragen wurde, und dass die Spannungsverteilung mit dem Entwurf übereinstimmte. Ausserdem zeigte sich, dass die letzten zwei Meter des Ankerkörpers nicht unter Spannung standen. Weitere Messungen wurden 6 und 18 Monate nach dem Bau

durchgeführt und bestätigten, dass die Spannung in angemessener Höhe aufrechterhalten wurde.

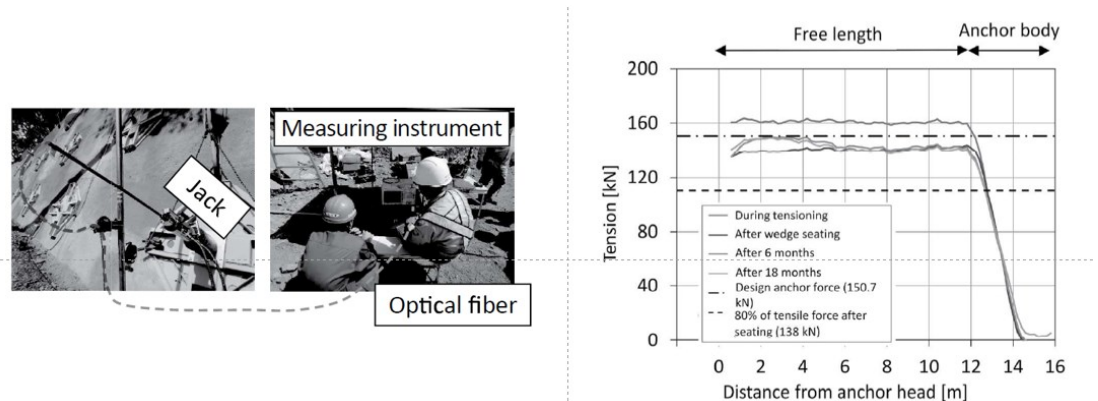


Abb. 8.157 Links: Spannungsmessungen beim Bau eines Bodenankers; Rechts: Spannungsmessergebnisse eines Bodenankers, adaptiert aus [422]

Die Kosten für den Einsatz von verteilten OFS können in vier Hauptkategorien unterteilt werden:

- Kosten der Hardware: Handelsübliche Abfragesysteme kosten je nach Anwendung 20'000 bis 100'000 CHF. Die Kosten für Glasfaserkabel (Sensoren) schwanken zwischen 5 und 10 CHF pro Laufmeter.
- Installation der Sensoren: Die Installation von OFS erfordert erfahrenes Personal und Zugang zu den überwachten Standorten. Je nach Grösse und Zugänglichkeit können die Installationskosten recht hoch sein.
- Softwarelizenz für die Datenerfassung: Je nach Anwendung kann die Lizenz für kommerzielle Software für die Datenerfassung zwischen 5'000 und 20'000 CHF pro Jahr liegen.
- Wartung von OFS: Obwohl OFS als robust in rauen Umgebungen gelten, ist eine regelmässige Wartung erforderlich, um den zuverlässigen Betrieb des Überwachungssystems zu gewährleisten.

8.8.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [422] Nakaue S, Oshima K, Oikawa M, Nishino M, Matsubara Y, Yamada M. SmART Strand" Prestressing Steel Strand with Optical Fiber for Tension Monitoring 2021; 92: 62-67.
- [423] Bado MF, Casas JR. Ein Überblick über die neuesten Anwendungen von verteilten optischen Fasersensoren für die Überwachung des Zustands von Bauwerken. Sensors 2021; 21(5): 1-83. DOI: 10.3390/s21051818
- [424] Regier R, Hoult NA. Distributed Strain Behavior of a Reinforced Concrete Bridge: Case Study. Journal of Bridge Engineering 2014; 19(12). DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000637
- [425] Glišić B, Posenato D, Inaudi D. Integritätsüberwachung einer alten Stahlbrücke mit faseroptischen verteilten Sensoren auf der Grundlage von Brillouin-Streuung. In: Wu HF, Diaz AA, Shull PJ, editors., 2007. DOI: 10.1117/12.716055.
- [426] Matta F, Bastianini F, Galati N, Casadei P, Nanni A. Verteilte Dehnungsmessung in Stahlbrücken mit faseroptischen Sensoren: Validierung durch diagnostischen Belastungstest. Journal of Performance of Constructed Facilities 2008; 22(4): 264-273. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:4(264).
- [427] Horiguchi T, Tateda M. Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave. Optics Letters 1989; 14(8): 408. DOI: 10.1364/OL.14.000408.

8.9 Computer Vision basierte Schadensdetektion

8.9.1 Beschreibung der Technologie

Computer Vision (CV) ist ein interdisziplinäres wissenschaftliches Gebiet, das sich mit der automatischen Extraktion nützlicher Informationen aus Bilddaten befasst, um die zugrundeliegende physikalische Welt zu verstehen oder darzustellen, entweder qualitativ oder quantitativ [428]. CV-Methoden können zur Automatisierung von Aufgaben des menschlichen visuellen Kortex eingesetzt werden. Die ersten Bemühungen um die Anwendung von Computer-Vision-Methoden begannen in den 1960er Jahren und zielten auf die Extraktion von Forminformationen über Objekte anhand von Kanten und primitiven Formen (z. B. Kästchen) ab [429]. Mit der Entwicklung verschiedener Darstellungen von Bildmustern begannen CV-Methoden, komplexere Wahrnehmungsprobleme zu berücksichtigen. CV-Techniken sind im Bauwesen als Schlüsselkomponente für eine verbesserte Inspektion und Überwachung anerkannt worden. Bilder und Videos sind zwei wichtige Arten von Daten, die mit Hilfe von Computer-Vision-Techniken analysiert werden. Bilder erfassen visuelle Informationen, die denen von menschlichen Inspektoren ähneln. Aufgrund dieser Ähnlichkeit ist eine Computerimplementierung der Bauwerksinspektion zu erwarten, die der visuellen Inspektion durch menschliche Inspektoren entspricht. Darüber hinaus können Bilder Informationen aus dem gesamten Sichtfeld berührungslos kodieren, wodurch die Herausforderungen der Überwachung mit Kontaktsensoren gelöst werden können.

Videos sind eine Abfolge von Bildern, bei denen die zusätzliche Zeitdimension wichtige Informationen sowohl für Inspektions- als auch für Überwachungsanwendungen liefert, angefangen bei der Erfassung des Kontexts, wenn Bilder aus mehreren Ansichten aufgenommen werden, bis hin zur dynamischen Reaktion der Struktur, wenn hohe Abstraten verwendet werden. Darüber hinaus bieten solche bildverarbeitungs-basierten Ansätze in Verbindung mit Kameras und unbemannten Luftfahrzeugen (UAVs) das Potenzial für eine schnelle und automatisierte Inspektion und Überwachung zur Zustandsbewertung ziviler Infrastrukturen. Die jüngsten Fortschritte im Bereich der Computer-Vision-Techniken wurden vor allem durch das End-to-End-Lernen mit künstlichen neuronalen Netzen (ANNs) und Faltungsneuronalen Netzen (CNNs) vorangetrieben. In ANNs und CNNs wird eine komplexe Input-Output-Beziehung von Daten durch eine parametrisierte nichtlineare Funktion angenähert, die mit Hilfe von als Knoten bezeichneten Einheiten definiert wird. Diese Algorithmen haben bemerkenswerte Erfolge bei der Entwicklung von Wahrnehmungssystemen für hochkomplexe visuelle Probleme erzielt. Ein Beispiel für eine CNN-Architektur zur semantischen Segmentierung in Bridge-Anwendungen wird in Abb. 8.158 dargestellt.

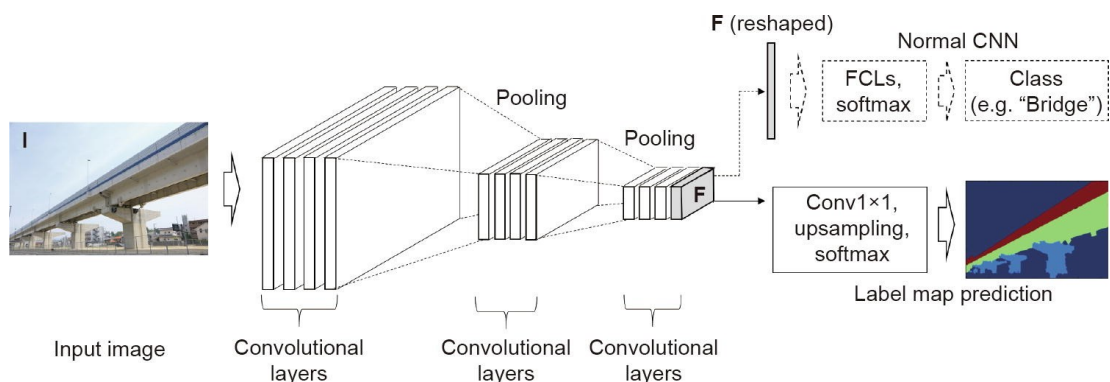


Abb. 8.158 Faltungsneuronalen Netz für semantische Segmentierung in Bridge-Anwendungen, adaptiert von [1]

8.9.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Der Einsatz von Computer-Vision-Techniken für die Erkennung von Strukturschäden ist in der wissenschaftlichen Literatur relativ gut untersucht. Deep-Learning-Modelle haben sich für diese Aufgabe als nützlich erwiesen [430]-[434]. Der Einsatz solcher Techniken in praktischen Anwendungen ist jedoch komplexer als der Nachweis ihrer Nützlichkeit anhand

eines sorgfältig ausgewählten Datensatzes. Die Achillesferse der überwachten Lerntechniken ist die Notwendigkeit qualitativ hochwertiger markierter Daten (d. h. Bilder, in denen die Objekte bereits identifiziert sind), die zu Trainingszwecken verwendet werden. Während viele Softwareanwendungen, die den Beschriftungsprozess erleichtern, entwickelt wurden (z. B. Refs. [435]), bleibt die manuelle Beschriftung immer noch eine sehr mühsame Aufgabe. Ein realistisches Inspektionsszenario beinhaltet eine sehr grosse Vielfalt an Bildgebungsbedingungen, Sensoren und dem Aussehen der untersuchten Strukturen und ihrer Schäden. Insgesamt ist die Fähigkeit, Bilder oder Videodaten automatisch und robust in verwertbare Informationen umzuwandeln, immer noch eine Herausforderung.

8.9.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Es gibt zwei Hauptverwendungen von CV in Brückenobjekten:

Schadenserkennung. Die automatische Erkennung von Schäden ist ein wesentlicher Bestandteil jedes automatischen oder halbautomatischen Inspektionssystems. Das Vorhandensein von Defekten in Bildern einer Struktur ist relativ selten, wenn man das Verhältnis von Pixeln, die Schäden darstellen, zu denen, die den unbeschädigten Teil der Strukturoberfläche darstellen, betrachtet. Daher ist die Erkennung visueller Defekte mit hoher Präzision und Wiedererkennbarkeit eine anspruchsvolle Aufgabe. Dieses Problem wird durch das Vorhandensein von schadensähnlichen Merkmalen weiter erschwert (z. B. können dunkle Kanten wie eine Rille fälschlicherweise für einen Riss gehalten werden). Abb. 8.159 zeigt ein charakteristisches Beispiel für die automatische Risserkennung auf CV-Basis bei der Brückeninspektion. Wie im Folgenden beschrieben, wurden zahlreiche Forschungsarbeiten zur Entwicklung von Methoden und Techniken zur zuverlässigen Erkennung verschiedener visueller Defekte durchgeführt, darunter Betonrisse, Betonabplatzungen und Delaminationen, Ermüdungsrisse, Stahlkorrosion und Asphaltrisse. Es werden drei verschiedene Ansätze zur Schadenserkennung unterschieden:

- **Heuristische Methoden der Merkmalsextraktion.** Im Prinzip funktionieren diese Methoden durch die Anwendung eines Schwellenwerts oder eines Klassifizierers für maschinelles Lernen auf die Ausgabe eines manuell erstellten Filters für die jeweilige Schadensart von Interesse: Betonrisse und Abplatzungen, Ermüdungsrisse in Stahlkonstruktionen [436].
- **Deep Learning-basierte Schadenserkennung.** Deep Learning hat die Möglichkeiten und die Robustheit der herkömmlichen bildverarbeitungs-basierten Schadenserkennung für eine Vielzahl von visuellen Defekten, von Rissen und Abplatzungen bis hin zu Korrosion, erheblich erweitert. Es wurden verschiedene Ansätze für die Erkennung untersucht, darunter Bildklassifizierung, Objekterkennung oder Methoden zur Erkennung von Regionen sowie semantische Segmentierungsmethoden.
- **Erkennung von Veränderungen.** Wenn ein Bauwerk regelmässig inspiziert werden muss, kann zunächst eine Basisdarstellung des Bauwerks erstellt werden. Diese Basislinie kann dann mit den Daten der nachfolgenden Inspektionen verglichen werden. Jede neue visuelle Beschädigung des Bauwerks wird beim Vergleich mit der Basislinie als Veränderung sichtbar. Die Erkennung und Lokalisierung von Veränderungen kann dazu beitragen, den Arbeitsaufwand für die Verarbeitung von Daten aus UAV-Inspektionen zu verringern. Es gibt zwei Hauptansätze für die Erkennung von Veränderungen: die punktwolkenbasierte Erkennung von Veränderungen und die bildbasierte Erkennung von Veränderungen.

Erkennung von Bauwerksteilen. Die Erkennung von Bauteilen ist ein Prozess zur Erkennung, Lokalisierung und Klassifizierung charakteristischer Teile eines Bauwerks, der ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur automatisierten Inspektion ziviler Infrastrukturen sein soll. Informationen über strukturelle Komponenten verleihen Rohbildern oder 3D-Punktwolkendaten eine gewisse Semantik. Diese Semantik hilft den Menschen, den aktuellen Zustand des Bauwerks zu verstehen, und verleiht den fehleranfälligen Daten aus der Feldumgebung Konsistenz. Die Erkennung von Bauteilen liefert auch wichtige Informationen für die automatisierte, visuell gestützte Schadensbewertung von Bauwerken. Ähnlich wie bei der Modellierung des Ist-

Zustandes können Informationen über Strukturkomponenten verwendet werden, um die Konsistenz der automatisierten Schadenserkenennungsmethoden zu verbessern, indem schadensähnliche Muster auf anderen Objekten als den interessierenden Strukturkomponenten entfernt werden. Auf dem Weg zu einer vollständig autonomen Inspektion wird die Erkennung von Strukturkomponenten voraussichtlich ein Baustein für autonome Navigations- und Datenerfassungsalgorithmen für Roboterplattformen (z. B. UAVs) sein. Auf der Grundlage der Arten und Positionen von Strukturkomponenten, die von der/den Bordkamera(s) erkannt werden, sollen autonome Roboter geeignete Navigationspfade und Datenerfassungsverhalten planen.

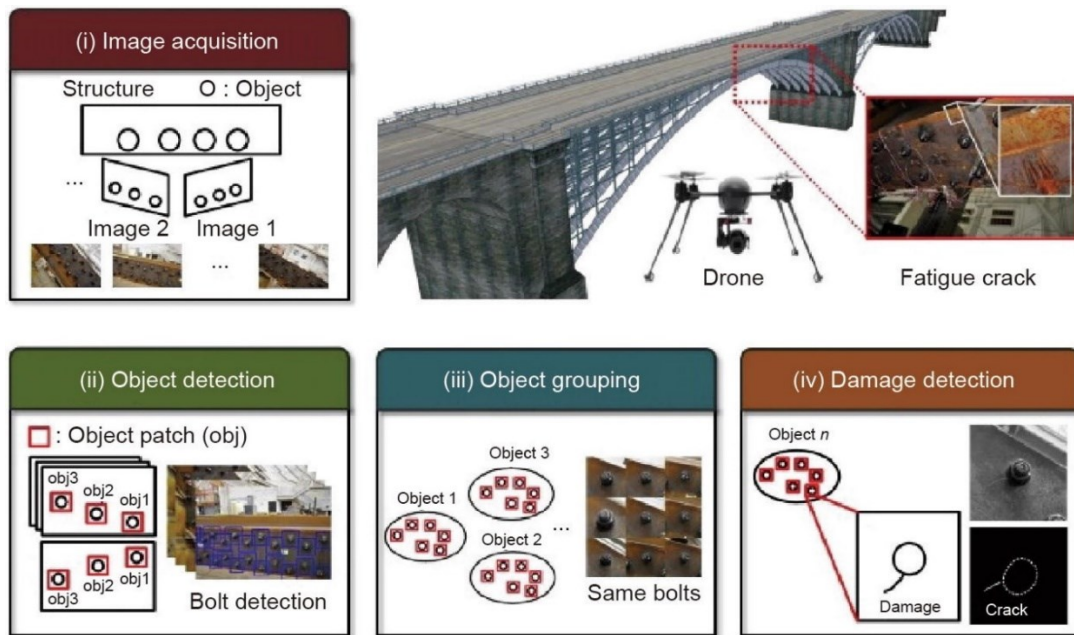


Abb. 8.159 Bildverarbeitungs-basierte automatische Risserkennung für die Brückeninspektion, adaptiert aus [428]

8.9.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

Automatisierte Inspektionssysteme bestehen aus zwei Hauptschritten: (a) Einsatz von UAVs für die automatische Datenerfassung aus der Ferne und (b) Datenverarbeitung und Inspektion mithilfe von Computer-Vision-Techniken. Intelligente UAVs sind keine Zukunftsmusik mehr, und das rasante Wachstum der Drohnenindustrie in den letzten Jahren hat UAVs zu einer praktikablen Option für die Datenerfassung gemacht. Bei den erfassten Daten handelt es sich um digitale Bilder und Videos. Die Nachbearbeitungsphase kann nach oder während der Datenerfassung durchgeführt werden. Die dynamische Überwachung von Strukturen erfordert spezielle Kameras und Steuerungen, die Bilder mit hoher Frequenz aufnehmen können. Die Datenerfassung erzeugt einen sehr grossen Datensatz, der mit der Kameraauflösung und der Anzahl der gespeicherten Bilder (d. h. der Frequenzrate) zunimmt. Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten. Die Genauigkeit der CV-Methoden hängt von der Art der Kameras und Objektive, der Grösse des Objekts und der Entfernung zum Objekt ab.

8.9.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

CV-basierte Methoden wurden zur Erkennung verschiedener Arten von Schäden in der zivilen Infrastruktur eingesetzt, z. B. Risse und Abplatzungen in Betonstrukturen, Ermüdungsrisse und Korrosion in Stahlelementen und Asphalt Schäden. Um die Effizienz solcher Methoden in einem realistischen Kontext zu überprüfen, wurden in den letzten Jahren mehrere Proof-of-Concept-Anwendungen durchgeführt.

Das Verkehrsministerium von Minnesota (USA) führte zwischen 2015 und 2017 eine mehrstufige Studie an mehreren realen Brücken durch [437], [438]. Es wurden verschiedene Bildgebungsgeräte getestet, darunter Standbild-, Video- und Infrarotkameras. Nach Abschluss der Datenerfassung wurden die Daten mit der Computersoftware Pix4D verarbeitet und durch andere Bildgebungssoftware ergänzt, um 3-D-Modelle und Karten zu erstellen. Das Ergebnis dieser Kampagne bestätigte, dass UAVs sicher und effektiv für Inspektionen auf echten Brücken unter schwierigen Bedingungen sowie in Umgebungen ohne GPS eingesetzt werden können. UAV-gestützte Inspektionen können nicht unabhängig durchgeführt werden, sondern dienen als Hilfsmittel für qualifizierte und erfahrene Brückeninspektoren. Zusätzlich zu Kameras können Wärmesensoren bei der Erkennung von Betonabplatzungen wirksam sein. Die wichtigsten Empfehlungen aus diesem umfassenden Konzeptnachweis sind in den folgenden Punkten zusammengefasst:

- Der Einsatz von UAVs zur Unterstützung von Brückeninspektionen sollte nur dann als Hilfsmittel für ein qualifiziertes Team in Betracht gezogen werden, wenn eine Inspektion vor Ort nicht erforderlich ist.
- Der Einsatz von UAVs zur Unterstützung von Brückeninspektionen sollte bei Routineinspektionen in Betracht gezogen werden, um die Qualität der Inspektion durch die Erfassung von Daten zu verbessern, die ohne teure Zugangsmethoden nicht ohne weiteres gewonnen werden können.
- UAVs sollten auch dann in Betracht gezogen werden, wenn die Sicherheit für das Kontrollpersonal und die Reisenden erhöht werden kann, ohne die Qualität der Kontrollen zu beeinträchtigen.

Die Kosten für den Einsatz von CV-basierten Inspektionen lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen:

- Hardware-Kosten: UAV ausgestattet mit Kameras und möglicherweise weiteren Sensoren.
- Inspektion: UAV-Betreiber, mögliche Aussetzung des Brückenbetriebs aus Gründen der Zugänglichkeit oder der Sicherheit.
- Expertenbewertung: Verwaltung und Bewertung der gesammelten visuellen Daten.

Da die Hardware für die Inspektionen vorübergehend gemietet werden kann, wird die CV-basierte Bewertung in der Regel als Beratungsdienstleistung angeboten, wobei die Preise von der Grösse und Komplexität des zu überwachenden Bauwerks abhängen.

8.9.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

-
- [428] Spencer BF, Hoskere V, Narazaki Y. Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering* 2019; 5(2): 199-222. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.030.
-
- [429] Roberts L. Machine perception of three-dimensional solids. Massachusetts Institute of Technology, 1963.
-
- [430] Pantoja-Rosero BG, Achanta R, Kozinski M, Fua P, Perez-Cruz F, Beyer K. Generating LOD3 building models from structure-from-motion and semantic segmentation. *Automatisierung im Bauwesen* 2022; 141: 104430. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104430.
-
- [431] Pantoja-Rosero BG, dos Santos KRM, Achanta R, Rezaie A, Beyer K. Determining crack kinematics from imaged crack patterns. *Konstruktion und Baumaterialien* 2022; 343: 128054. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128054.
-
- [432] Pantoja-Rosero BG, Oner D, Kozinski M, Achanta R, Fua P, Perez-Cruz F, et al. TOPO-Loss for continuity-preserving crack detection using deep learning. *Construction and Building Materials* 2022; 344: 128264. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128264.
-
- [433] Rezaie A, Godio M, Beyer K. Investigating the cracking of plastered stone masonry walls under shear-compression loading. *Konstruktion und Baumaterialien* 2021; 306: 124831. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124831.
-
- [434] Rezaie A, Achanta R, Godio M, Beyer K. Comparison of crack segmentation using digital image correlation measurements and deep learning. *Construction and Building Materials* 2020; 261: 120474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120474.
-

-
- [435] Hess MR, Petrovic V, Kuester F. Interactive classification of construction materials: feedback-gesteuertes framework für annotation und analyse von 3d-punktwolken. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2017; XLII-2/W5: 343-347. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W5-343-2017.
- [436] Quqa, S., Martakis, P., Movsessian, A. Pai, S., Reuland, Y., Chatzi, E.. Two-step approach for fatigue crack detection in steel bridges using convolutional neural networks. J Civil Struct Health Monit 12, 127–140 (2022).
-
- [437] Zink J, Lovelace B. Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project 2015(Juli): 214.
-
- [438] Wells J, Lovelace B. Unmanned Aircraft System Bridge Inspection Demonstration Project Phase II Final Report 2017(June): MN/RC 2017-18
-

8.10 Verteilte faseroptische Sensoren

Die Dehnung ist einer der am häufigsten überwachten Parameter sowohl bei der Überwachung der strukturellen Gesundheit (SHM) als auch bei der Überwachung der strukturellen Leistungsfähigkeit (SPM). Der Hauptvorteil besteht darin, dass die Dehnung in direktem Zusammenhang mit der Elementspannung und der strukturellen Verformung steht. Diese Sensoren können entweder zur Erkennung von Rissen auf der Elementoberfläche, zur Ableitung von Struktureigenschaften wie dem Elastizitätsmodul und der neutralen Achse oder zur Bestimmung thermischer Auswirkungen auf das Strukturverhalten verwendet werden.

Das früheste Konzept der Dehnungsmessung wurde im 19. Jahrhundert erforscht, und die ersten Dehnungssensoren wurden in den 1920er-Jahren entwickelt. Es wurden drei Generationen von Sensoren entwickelt, und diese Entwicklung wurde von Glisic umfassend dargestellt [439] (Abb. 8.160). Bei der ersten Generation handelt es sich um diskrete Sensoren mit kurzer Messlänge, während die zweite Generation lange eindimensionale Messgeräte umfasst, die dank faseroptischer Sensoren kontinuierliche Messungen ermöglichen. Die derzeitige Forschung konzentriert sich auf eine dritte Generation mit Sensorfolien, die eine verteilte Überwachung in zwei Dimensionen ermöglichen, befindet sich aber noch in der Entwicklungsphase [440].

Lichtwellenleiter der zweiten Generation werden häufig für die Brückenüberwachung eingesetzt [441], [442]. Seit ihrer Entwicklung in den 1960er Jahren wurden verschiedene Sensortypen vorgeschlagen, die auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien beruhen [443], [444]. Der häufigste ist das Faser-Bragg-Gitter (FBG) (Abb. 8.161). Kommerzielle Produkte waren in den 1990er Jahren verfügbar. In jüngster Zeit wurde eine neue faseroptische Technologie namens Distributed Acoustic Sensing (DAS) zur Messung der dynamischen Dehnung in einer optischen Faser eingesetzt. Diese Technologie wird im Folgenden beschrieben.

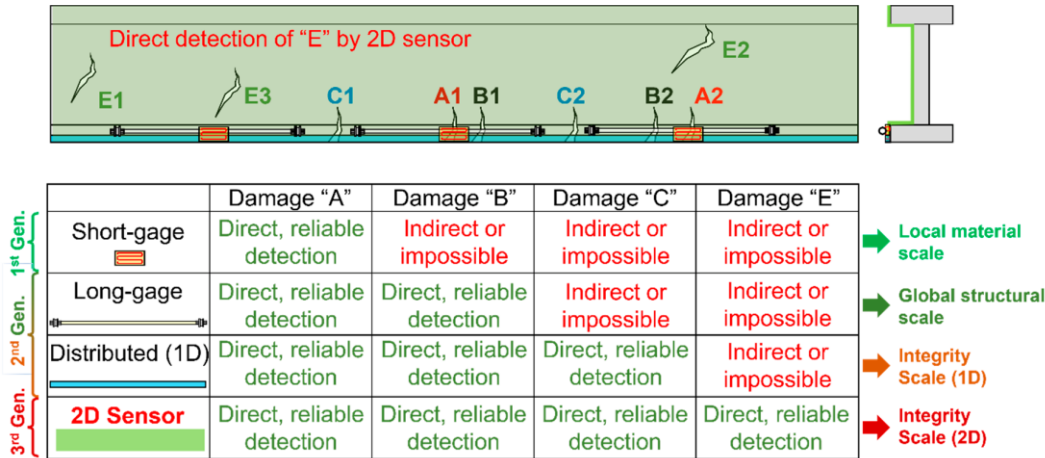


Abb. 8.160 Erzeugung von Dehnungsmessungen und ihre Anwendung zur Schadenserkenntung [439]

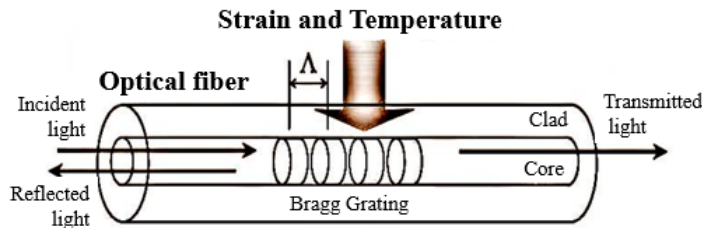


Abb. 8.161 Faseroptik mit Bragg-Gitter, angepasst aus [443]

8.10.1 Beschreibung der Technologie

DAS kombiniert die Standardvorteile der Faseroptik (verteilte Messungen, kleine Abmessungen, geringes Gewicht und hohe Präzision) mit der Möglichkeit, die mechanische Dehnung mit einem einzigen Sensor über Dutzende von Kilometern zu messen [445]. Die meisten DAS-Systeme basieren auf der optischen Zeitbereichsreflektometrie (OTDR) [446] (Abb. 8.162).

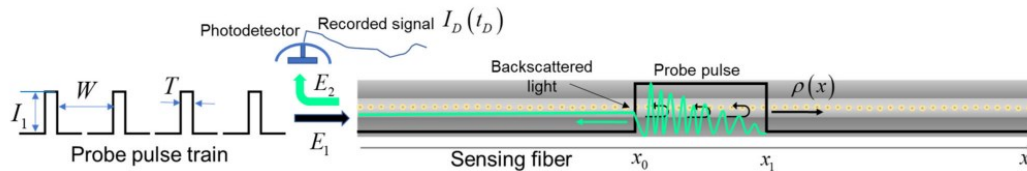


Abb. 8.162 Schema des Betriebs eines OTDR-Sensors. E_1 und E_2 sind die Amplituden des Sondenimpulses und des Rückstreuungsfeldes; I_1 , T und W sind die Spitzenleistung, die Dauer und die Periode des Pulses; x ist die Koordinate entlang der Sensorfaser, $\rho(x)$ ist das relative Reflexionsvermögen der Rayleigh-Rückstreuungszentren, die entlang der Faserlänge verteilt sind [447].

OTDR wurde 1976 eingeführt, um den Zustand der optischen Kommunikationsverbindung zu überwachen [448]. Bei dieser Technologie wird ein kurzer optischer Impuls in die Faser eingespeist und breitet sich vorwärts aus. Dann wird die Rayleigh-Rückstreuung (RBS) verwendet, um die Vibrationen entlang der Faser zu erkennen und zu lokalisieren [449], die mit der Messung der Dehnung in Verbindung gebracht werden können. Eine Änderung des OTDR-Signals entspricht einer lokalen Diskontinuität/Abnormalität der Glasfaser. Lokale dynamische Dehnungsänderungen können durch Messung der Signaländerungen zwischen aufeinanderfolgenden Impulsen von derselben Stelle der Faser bestimmt werden. Ein typisches DAS-System ist dargestellt in Abb. 8.163.

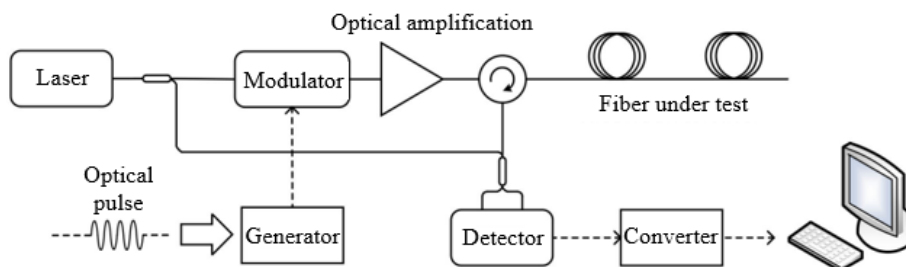


Abb. 8.163 Typisches DAS-System mit OTDR, angepasst von [446]

8.10.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

DAS wird allmählich für Anwendungen im Bauwesen eingesetzt [442], [450]. Da sich dieses Überwachungssystem noch in einem frühen Stadium befindet, gibt es derzeit mehrere konkurrierende Technologien. Zum Beispiel haben mehrere Forscher die optische Frequenzbereichsreflektometrie (OFDR) anstelle von OTDR [451], [452]. Diese Techniken unterscheiden sich jedoch meist in Bezug auf den Kompromiss zwischen der Sensorauflösung und den maximalen Messabständen [446]. Einige Forscher haben sich auf die Erkennung akustischer Emissionen mit Hilfe von Glasfasern konzentriert [453], [454], aber die Genauigkeit und Empfindlichkeit des Sensors sind derzeit unzureichend und erfordern möglicherweise ein neues Sensordesign [455], [456].

Die wichtigsten Vorteile von DAS-Systemen sind:

- Verteilte Sensortechnologien: Es ist möglich, viele komplexe strukturelle Verhaltensweisen zu erfassen, wie z. B. die Form der Durchbiegung, Knickpunkte sowie die Momentübertragung an den Stützen.
- Schadenserkenkung: Es ist möglich, Risse zu lokalisieren und Rissöffnungen zu bestimmen.

- Statische und dynamische Messungen: Statische und dynamische Dehnungen werden gemessen, und dynamische Eigenschaften wie Modalfrequenzen können extrahiert werden.
- Langfristige Stabilität und Haltbarkeit: Glasfasern wurden ursprünglich für die Telekommunikationsindustrie entwickelt und sind daher chemisch inert und haben langfristig stabile Materialeigenschaften.

Die allgemeinen Herausforderungen von DAS-Systemen sind:

- Kosten: Verteilte Sensortechnologien sind im Allgemeinen teurer als diskrete Sensortechniken (z. B. herkömmliche Dehnungsmessstreifen).
- Signal-Rausch-Verhältnis (SNR): Da das Signal mit der Länge der Faser abgeschwächt wird, hängt die maximale Reichweite von dem minimal akzeptablen SNR ab.
- Mühsame Reparatur von beschädigten Kabelverlängerungen: Der Anschluss von Glasfasern erfordert spezielle Geräte, die unter den Bedingungen vor Ort nicht einfach zu bedienen sind.
- Drahtlose Unfähigkeit: DAS kann nicht mit drahtlosen Knoten verbunden werden und muss daher verkabelt werden. Die faseroptische Dehnungssensor-Leseinheit kann jedoch drahtlos mit dem entfernten Büro kommunizieren.

8.10.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Neuere Studien haben gezeigt, dass es möglich ist, den Zustand von Brücken [445], [456]-[458], Windkraftanlagen [459] und Schiffsstrukturen [460] mit dieser Technik zu überwachen. Ein Vorteil ist, dass ein einziger Sensor bis zu 10 km eines Bauwerks abdecken kann, während herkömmliche, auf RBS basierende Glasfaserkabel nur bis zu 100 Meter abdecken können. Ein weiterer Vorteil ist die grosse Bandbreite an Überwachungsinformationen, die sowohl aus statischen als auch aus dynamischen Eigenschaften der Brücke gewonnen werden und die gleichzeitige Anwendung von SPM und SHM ermöglichen. Darüber hinaus kann das System für das Gewicht der Brücke in Bewegung und möglicherweise auch für die Schallemission verwendet werden.

Wichtigste mögliche Anwendungen in der Brückenüberwachung:

- Kontinuierliches (zeitliches, spezielles) Verformungsverhalten
- Risserkennung und Messung der Rissöffnungsweite
- Brücke Gewicht in Bewegung
- FE oder Modellvalidierung
- Berechnung der Dehnung
- Schallemission
- Dynamische und Schwingungsmessung

8.10.4 Datenerfassung, Messgrössen und Genauigkeiten

- Bei den erfassten Daten handelt es sich um Phasenmessungen, die später mit einer Software nachbearbeitet werden, um Dehnungen, Verschiebungen und modale Frequenzen zu berechnen. Die Nachbearbeitungsphase kann nach oder während der Erfassung durchgeführt werden.
- Diese Technik liefert verteilte Messungen über die Messstrecke (bis zu 100 m), die Verschiebungen, Verformungen und Dehnungen mit einer hohen Frequenzrate umfassen.
- Die Datenerfassung erzeugt einen sehr grossen Datensatz, der mit der Frequenzrate und dem Erfassungsabstand zunimmt.
- Da alle Daten digital vorliegen, ist es möglich, einen Fernzugriff auf die Daten einzurichten.

Die Genauigkeit des DAS-Systems hängt von der Art des verwendeten Lichtleiters, dem extrahierten Parameter (d. h. Dehnung oder modale Frequenzen) und dem Messabstand ab. Im Allgemeinen liegt die Genauigkeit der Dehnungsmessung in der Grössenordnung

von ± 10 bis 40 Mikrodehnungen und kann durch die Sensorlänge beeinflusst werden. Die Abtastrate liegt in der Regel zwischen 50 und 250 Hz.

8.10.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Ein Beispiel für die Anwendung des DAS-Systems für die Infrastrukturüberwachung wurde 2018 in den Niederlanden durchgeführt (Abb. 8.164) [445]. Die Stahlbetonbrücke wurde 1932 erbaut und hat eine Länge von 103 m mit sieben Feldern, die Fahrbahn hat eine Breite von 33,2 m (Abb. 8.164A). Die Fahrbahnplatte wird von V-förmigen Stahlbetonstützen getragen. Die Fahrbahn der Brücke besteht in beiden Richtungen aus zwei Fahrspuren und einem Gehweg auf einer Seite. Es wurde ein DAS-System mit einer Gesamtlänge von 244,6 m installiert (Abb. 8.164B). Es wurden mehrere dynamische Belastungstests mit und ohne Aufprall durchgeführt. Lokal (Abb. 8.164C) und verteilte (Abb. 8.164D) Dehnungsmessungen wurden aufgezeichnet. Die Modalfrequenzen der Brücke wurden extrahiert und sind mit denen vergleichbar, die von den numerischen Modellen vorhergesagt wurden. Die Autoren haben ihre Studie damit abgeschlossen, dass sie zeigen, dass DAS-Daten für Gewicht-in-Bewegung-Messungen an Brücken verwendet werden können.

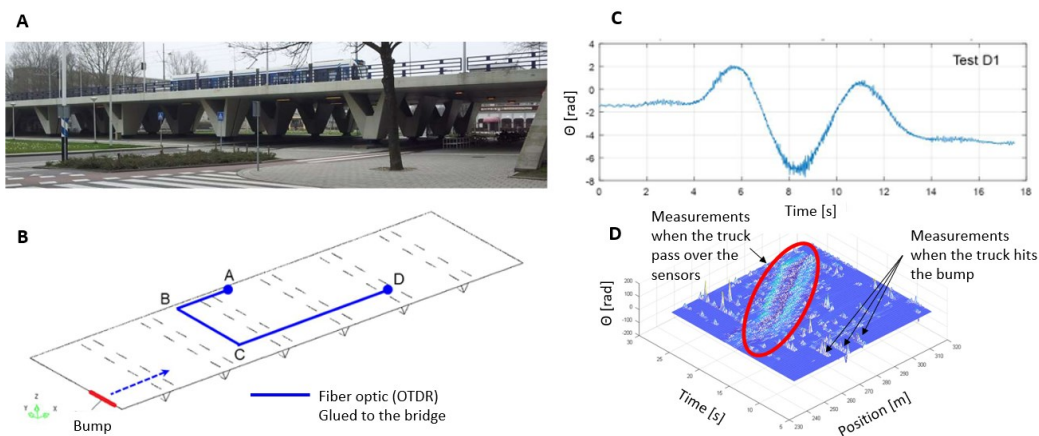


Abb. 8.164 Überwachung der Brücke 705 in den Niederlanden mit dem DAS-System. A) Brückenfoto; B) Sensorsystem; C) Lokale Phasenänderung (direkt mit der Dehnung verbunden), während ein LKW die Brücke mit 20 km/h passiert (ohne Bodenwelle); D) Verteilte Phasenänderung (3D-Diagramm) während der Vorbeifahrt eines Lastwagens mit 20 km/h (mit Bodenwelle), angepasst aus [445].

Die Anwendungsbeschränkungen beziehen sich hauptsächlich auf die Langzeitmessung. Eine wichtige Herausforderung für Dehnungssensoren aller Generationen ist die Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit. Während faseroptische Sensoren ihre hervorragende Langzeitstabilität und Zuverlässigkeit über mehrere Jahrzehnte hinweg unter Beweis gestellt haben, wurde manchmal eine Drift oder Fehlfunktion aufgrund der Verschlechterung der Sensorkomponenten durch verschiedene Umweltfaktoren (chemische Stoffe, elektromagnetische Störungen, Temperaturschwankungen usw.) beobachtet [439].

Die Sensorkosten hängen stark vom Sensortyp und dem Datenerfassungssystem, der Messentfernung in Metern und den Kosten für die Sensorinstallation ab, die je nach Fallstudie und Zugänglichkeit der Brücke erheblich variieren können.

8.10.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [439] Glisic B. Concise Historic Overview of Strain Sensors Used in the Monitoring of Civil Structures: The First One Hundred Years. *Sensors* 2022;22:2397. <https://doi.org/10.3390/s22062397>
- [440] Glisic B, Yao Y, Tung S-TE, Wagner S, Sturm J, Verma N. Strain Sensing Sheets for Structural Health Monitoring Based on Large-Area Electronics and Integrated Circuits. *Proceedings of the IEEE* 2016;104:1513-28. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2573238>.

-
- [441] Du C, Dutta S, Kurup P, Yu T, Wang X. A review of railway infrastructure monitoring using fiber optic sensors. *Sensors and Actuators A: Physical* 2020;303:111728. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111728>.
-
- [442] Bado MF, Casas JR. A Review of Recent Distributed Optical Fiber Sensors Applications for Civil Engineering Structural Health Monitoring. *Sensors* 2021;21:1818. <https://doi.org/10.3390/s21051818>.
-
- [443] Ramakrishnan M, Rajan G, Semenova Y, Farrell G. Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials. *Sensors* 2016;16:99. <https://doi.org/10.3390/s16010099>.
-
- [444] Barrias A, Casas JR, Villalba S. A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications. *Sensors* 2016;16:748. <https://doi.org/10.3390/s16050748>.
-
- [445] Cheng L-K, Jansen R, Burggraaf H, De Jong W, Toet P, Doppenberg E. Dynamic load monitoring of a concrete bridge using a fiber optic Distributed Acoustic Sensing (DAS) system, Potsdam, Germany: 2019, p. 1-8.
-
- [446] He Z, Liu Q. Optical Fiber Distributed Acoustic Sensors: A Review. *J Lightwave Technol*, JLT 2021;39:3671-86. <https://doi.org/10.1364/JLT.39.003671>.
-
- [447] Gorshkov BG, Yüksel K, Fotiadi AA, Wuilpart M, Korobko DA, Zhirnov AA, et al. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective. *Sensors* 2022;22:1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>.
-
- [448] Barnoski MK, Jensen SM. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. *Appl Opt* 1976;15:2112-5. <https://doi.org/10.1364/AO.15.002112>.
-
- [449] Masoudi A, Newson TP. Contributed Review: Distributed optical fibre dynamic strain sensing. *Review of Scientific Instruments* 2016;87:011501.
-
- [450] Sakiyama FIH, Lehmann F, Garrecht H. Structural health monitoring of concrete structures using fibre-optic-based sensors: a review. *Magazine of Concrete Research* 2021;73:174-94. <https://doi.org/10.1680/jmacr.19.00185>.
-
- [451] Li H, Liu Q, Chen D, Deng Y, He Z. High-spatial-resolution fiber-optic distributed acoustic sensor based on Φ -OFDR with enhanced crosstalk suppression. *Optics Letters* 2020;45:563-6.
-
- [452] Barrias A, Rodriguez G, Casas JR, Villalba S. Application of distributed optical fiber sensors for the health monitoring of two real structures in Barcelona. *Structure and Infrastructure Engineering* 2018;14:967-85. <https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1438479>.
-
- [453] Verstrynge E, De Wilder K, Drougkas A, Voet E, Van Balen K, Wevers M. Crack monitoring in historical masonry with distributed strain and acoustic emission sensing techniques. *Construction and Building Materials* 2018;162:898-907. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.103>.
-
- [454] Verstrynge E, Pfeiffer H, Wevers M. A novel technique for acoustic emission monitoring in civil structures with global fiber optic sensors. *Smart Mater Struct* 2014;23:065022
-
- [455] Wei P, Han X, Xia D, Liu T, Lang H. Novel Fiber-Optic Ring Acoustic Emission Sensor. *Sensors* 2018;18:215. <https://doi.org/10.3390/s18010215>.
-
- [456] Gillham J, Bentz EC, Hoult NA. Messung von Auflagerreaktionen und Schadenserkennung in Stahlträgern mit verteilter Dehnungserfassung. *Engineering Structures* 2022;262:114389. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114389>.
-
- [457] Gillham J, Hoult NA, Bentz EC. Praxistest eines Scherkraftmessverfahrens mit faseroptischer Abtastung unter LKW-Belastung mit variabler Geschwindigkeit. *Journal of Bridge Engineering* 2022;27:04022115.
-
- [458] Webb G. T., Vardanega P. J., Hoult N. A., Fidler P. R. A., Bennett P. J., Middleton C. R. Analysis of Fiber-Optic Strain-Monitoring Data from a Prestressed Concrete Bridge. *Journal of Bridge Engineering* 2017;22:05017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000996](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000996).
-
- [459] Hubbard PG, Xu J, Zhang S, Dejong M, Luo L, Soga K, et al. Dynamic structural health monitoring of a model wind turbine tower using distributed acoustic sensing (DAS). *J Civil Struct Health Monit* 2021;11:833-49. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00483-y>.
-
- [460] Min R, Liu Z, Pereira L, Yang C, Sui Q, Marques C. Optical fiber sensing for marine environment and marine structural health monitoring: A review. *Optics & Laser Technology* 2021;140:107082.
-

8.11 Neutronenradiographie

8.11.1 Beschrieb der Technologie

Atome setzen sich zusammen aus einer Hülle aus Elektronen (elektrisch negativ geladen) sowie einem Atomkern aus Protonen (elektrisch positiv geladen) und Neutronen (elektrisch neutral). Während Elektronen und Protonen aufgrund ihrer elektrischen Ladung bereits mit Atomhüllen interagieren, findet bei Neutronen lediglich eine Interaktion mit Atomkernen statt [461] [462]. Da der Atomkern lediglich einen sehr kleinen Teil des Atomvolumens beansprucht, können Neutronen erheblich tiefer in Materie eindringen, als die mit elektrisch geladenen Teilchen möglich wäre. Sind die Neutronen nicht in einem Atomkern gebunden, so werden sie als "frei" bezeichnet und sind instabil mit einer relativ langen Halbwertszeit von etwa 10 Sekunden. Neutronen weisen ein magnetisches Moment und eine Masse auf. Sie unterliegen der Gravitationskraft, der starken und schwachen Wechselwirkung sowie der elektromagnetischen Wechselwirkung.

Neutronenradiographie («neutron radiography») kann eine wertvolle Ergänzung/Alternative zu Röntgenverfahren darstellen, da beide Verfahren auf verschiedene Weise mit Materialien wechselwirken. Die Abb. 8.165 zeigt die Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit verschiedenen Elementen für beide Verfahren.

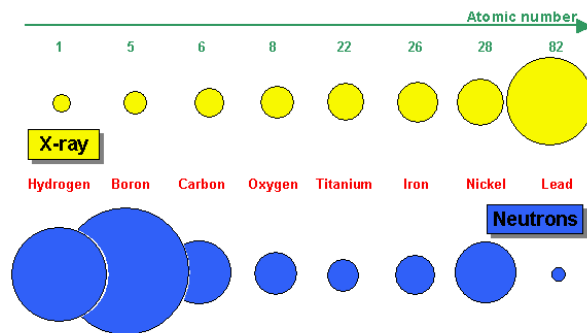


Abb. 8.165 Wahrscheinlichkeit der Wechselwirkung mit verschiedenen Elementen [462]

Freie Neutronen können unter anderem in Reaktoren und in Spallationsquellen erzeugt werden. Die Bedeutung letzterer nimmt zu. Grundsätzlich gibt es mehrere Arten Neutronen für die Untersuchung von Materialien und Objekten einzusetzen [463][463][464]:

- Neutron Imaging: Ein Objekt oder Material wird von Neutronen durchstrahlt, wodurch Informationen aus dessen Inneren gewonnen werden können. Der Einsatz tomographischer Verfahren ist möglich und vielfach zielführend.
- Small Angle Neutron Scattering (SANS): Ein Material wird einem Neutronenstrahl ausgesetzt, welcher elastisch gestreut wird. Das Diffraktionsmuster gibt Aufschluss über den Aufbau des Materials.
- Neutronen Reflektometrie (NREF): Eine Oberfläche wird einem Neutronenstrahl ausgesetzt und die reflektierten Intensitäten werden in Abhängigkeit von Reflektionswinkel aufgezeichnet und liefern Informationen über die Dicke und Dichte dünner Schichten sowie die Rauigkeit der Oberfläche.

8.11.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Neutronenradiographie, insbesondere Imaging, kann heute als etablierte Methode für diverse Fragestellungen bezeichnet werden [465]. Anwendungen ergeben sich in vielen Bereichen wie beispielsweise Energie, Erdwissenschaften, Medizin oder Materialwissenschaften. Zahlreiche Beispiele aus diesen Bereichen belegen den Nutzen und das Potential der Neutronenradiographie.

Begrenzt wird die Anwendung neben physikalischen Grenzen vor allem durch die Verfügbarkeit von Neutronenquellen. In der Schweiz ist hier vor allem die Spallationsquelle SINQ [466] am Paul Scherrer Institut zu nennen. Hier handelt es sich um eine stationäre Einrichtung, welche einen kontinuierlichen Neutronenfluss von 10^{14} n/cm²/s liefert, welche dann durch einen Deuteriummoderator auf niedere und verwertbare Energien gebracht werden. Weiterhin ist die Schweiz Partnerin der gepulsten European Spallation Source (ESS), welche in Lund/ Schweden realisiert wird. Dadurch werden Schweizer Wissenschaftler auch hier Zugang erhalten. Portable Neutronenquellen sind grundsätzlich möglich [467], spielen aber in der Praxis keine Rolle.

8.11.3 Einsatzzweck und Fragestellungen im Bereich Kunstbauten

Zwar sind portable Neutronenquellen prinzipiell möglich, aufgrund der Grösse der tatsächlich eingesetzten Reaktor- und Spallationsquellen sind Untersuchungsmethoden mit Neutronen in der Praxis laborgebunden und für den Einsatz im Feld nicht geeignet. Mögliche Fragestellungen im Bereich Kunstbauten liegen somit vor allem in den Bereichen Forschung und Entwicklung. Hier bieten sich jedoch vielfältige Möglichkeiten wie beispielsweise:

- Untersuchung von Verformungen durch Abbildung der Abstände in Kristallgittern [463]
- Abbildung von Poren in Prüfkörpern [461]
- Untersuchung von Delaminationen in dünnen Schichten [463]
- Transportprozesse von Wasser und Tausalz [462], [468]
- Lokalisierung von Rissen [461]
- Abbildung von Korrosionsprodukten in Stahlbeton [468], [469]

Beispielhaft sollen die Möglichkeiten an zwei Beispielen verdeutlicht werden. Abb. 8.166 zeigt die Abbildung von Korrosionsprodukten in einem Prüfkörper aus Stahlbeton während Abb. 8.167 die Ergebnisse von Röntgen- und Neutronentomographie an einem Prüfkörper aus Faserbeton vergleicht. Die Neutronentomographie zeigt die Anteile mit einem hohen Gehalt von Wasserstoff (Zement, Sand) und bildet die Stahlfasern nicht ab, während die Röntgentomographie vor allem diese zeigt. Dieses Beispiel zeigt, dass sich Röntgen- und Neutronenverfahren vielfach komplementär ergänzen und somit die Verwendung beider Verfahren sinnvoll sein kann.

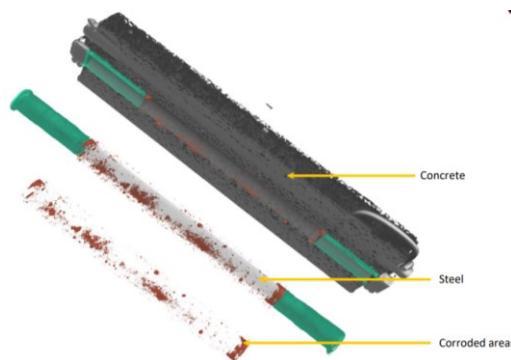


Abb. 8.166 Abbildung von Korrosionsprodukten in Stahlbeton [468], [469]

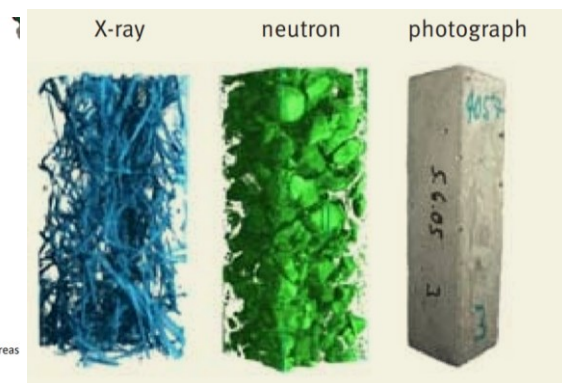


Abb. 8.167 Vergleich der Ergebnisse von Röntgen- und Neutronentomographie für Faserbeton [470]

Da eine allfällige Untersuchung mittels Neutronenradiographie eine Neutronenquelle und somit den Beizug von Spezialisten erfordert, sollte in diesem Zusammenhang die Machbarkeit betreffend der spezifischen Fragestellung vorgängig besprochen werden.

8.11.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeit

Eine Neutronenradiographie bedingt den Zugang zu einer Neutronenquelle und somit den Kontakt zu Spezialisten auf diesem Gebiet. Die Themen Datenerfassung, Raumbezug,

Messgrößen und Messgenauigkeit werden somit mit Vorteil mit diesen und betreffend die spezifische Fragestellung abgeklärt.

8.11.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Diese Überwachungstechnologie wurde in der Praxis noch nicht eingehend getestet. Abgesehen von wenigen Einzelfällen, wie [469], sind bisher keine weitere Pilotstudien bekannt.

8.11.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

- [461] Darve C. (2021) Neutron Sources as tools for innovation – 6th Edition of the African School on Fundamental Physics and Applications, YouTubevideo by Christine Darve (https://www.youtube.com/watch?v=x_3i_wYVzJA), Zugriff am 26. 10. 2022

- [462] PSI (2016) Neutron imaging at the spallation source SINQ, Information for potential users and customers

- [463] Apostolopoulos G., Mergia K. and Youtsos A.G. (2007) Neutron scattering techniques as a tool for non-destructive testing, 4th International conference on NDT, 11-14 October 2007, Chania, Greece

- [464] Boualem Hammouda (2016) PROBING NANOSCALE STRUCTURES – THE SANS TOOLBOX (http://www.ncnr.nist.gov/staff/hammouda/the_SANS_toolbox.pdf)

- [465] PSI (2018) Science with neutrons and muons, Research at the Paul Scherrer Institute

- [466] PSI Webseite (<https://www.psi.ch/de>), Zugriff am 26. 10. 2022

- [467] Naranjo B., Gimzewski J. K., Puttermann S. (2005) Observation of nuclear fusion driven by a pyroelectric crystal, Nature 434, 1115 (2005)

- [468] Woracek R. (2021) Non-destructive testing with neutrons: Engineering materials and components revealed, 5th Edition of the African School on Fundamental Physics and Application

- [469] Peng Z., Wittmann F. H., Rongxun L., Xin A., Tiejun Z. (2016) Visualisation of corrosion products on steel reinforcement in concrete by neutron tomography, Proc. National Conference on Sustainability of Concrete, Tongji University, Shanghai, China

- [470] PSI (2011) Neutron imaging at the spallation source SINQ, Information for potential users and customers

8.12 Myonentomographie

8.12.1 Beschreibung der Technologie

Die Myonentomographie (MT) hat das Potential, die Röntgentechnologie (RT) in einigen Anwendungsfällen zu ersetzen. Anders als in der RT werden keine künstlichen, potentiell gesundheitsschädlichen Quellen verwendet, sondern ohnehin natürlich vorhandene Strahlung verwendet. Myonen sind sehr kleine geladene Elementarteilchen, die in der oberen Atmosphäre durch kosmische Strahlung entstehen und tief in Materie eindringen. Dabei werden sie abhängig von Material absorbiert oder abgelenkt. Dies kann man nutzen um aus Messdaten eines oder mehrerer Detektoren die Materialstruktur zu rekonstruieren. Dies geschieht entweder mit einem einzelnen Detektor hinter dem Objekt (Bestimmung der Absorption, Myographie, Abb. 8.168 , links) oder von doppelten Detektoren vor und hinter dem Objekt (Bestimmung der Ablenkung, Myonentomographie, Abb. 8.168, links).

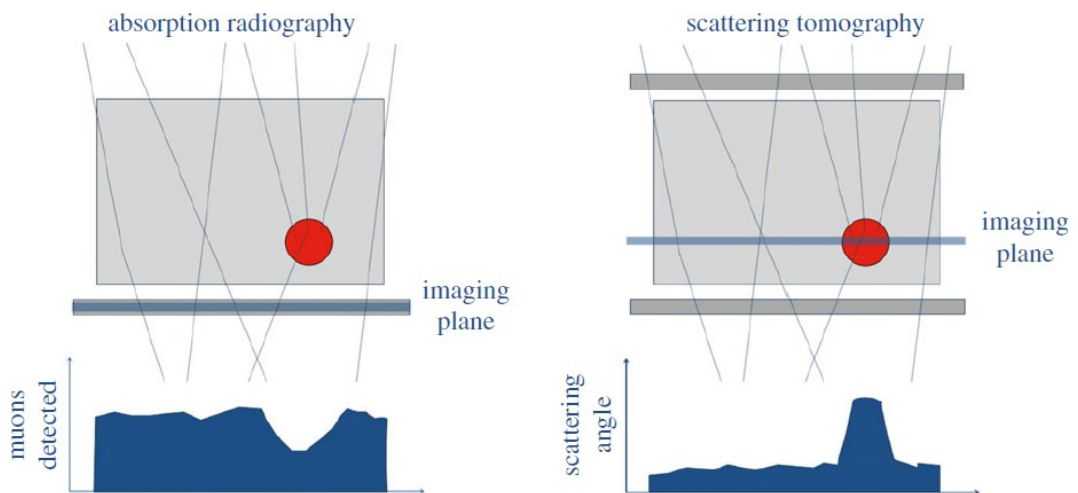


Abb. 8.168 Prinzip der Myographie (links) und der Myonentomographie (rechts), aus [471]

Die Technologie wurde bereits in den 1950er Jahren entwickelt und erstmals wissenschaftlich eingesetzt. Doch erst seit etwa 10 Jahren sind Detektoren auch kommerziell verfügbar, allerdings nur stationäre Modelle und noch zu sehr hohen Preisen. Daher ist sind die bisher einzig bekannten praktischen Anwendungen im Sicherheitsbereich (z. B. Durchleuchten von Containern) und Nuklearbereich (Durchleuchten von Behältern mit nuklearem Abfall). Abb. 8.169 zeigt ein Beispiel. Mobile, preiswertere Detektoren sind noch in einer Frühphase der Entwicklung.

Die Anwendung der Myonentomographie (die Myographie verfügt nicht über ausreichende Auflösung) für baupraktische Anwendungen wurden z. B. in [472] in Simulationen nachgewiesen. Das erste dokumentierte Experiment zum Nachweis von Bewehrung, eines Spannkans und einer künstlichen Hohlstelle gelang in [473].



Abb. 8.169 Oben: Myonendetektionssystem MIS der Fa. Lynkeos, UK 284. Rechts: Referenz-Betonplatte der BAM im Detektor der Universität Glasgow [473]

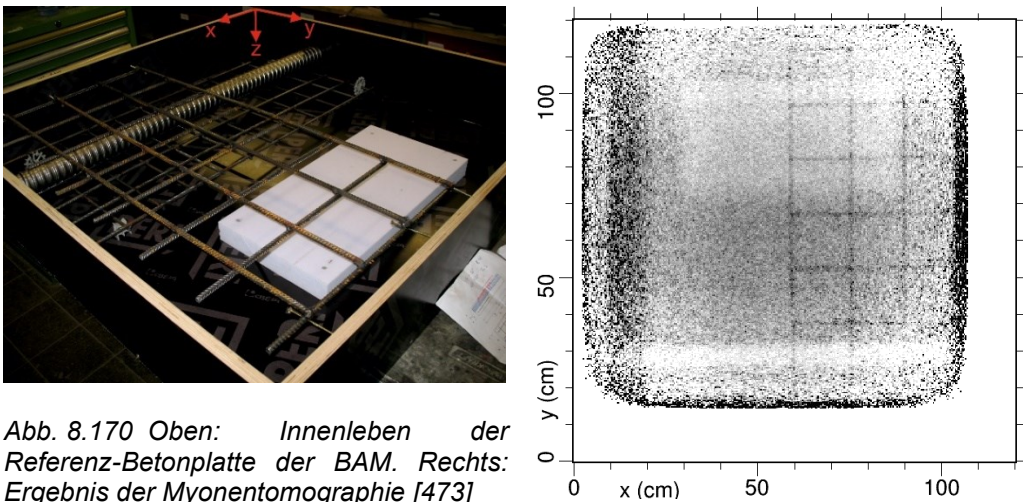


Abb. 8.170 Oben: Innenleben der Referenz-Betonplatte der BAM. Rechts: Ergebnis der Myonentomographie [473]

8.12.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Die prinzipielle Eignung der Myonentomographie für die Erkundung der inneren Struktur wurde in [472] und [473] nachgewiesen. Die Pilotstudie mit Referenzobjekten in stationären Detektoren stellt gleichzeitig den Stand der Forschung dar.

Anwendungsgrenzen ergeben sich derzeit aus einem Mangel an mobilen Detektoren. Prototypen werden kaum vor 2024 zur Verfügung stehen, kommerzielle Modell wohl nicht vor 2025. Eine weitere Limitation ergibt sich dadurch, dass Detektoren beiderseits des Objekts angebracht werden und dort für mehrere Tage verbleiben müssen. Dies bedeutet, dass auch in Zukunft nur an ausgewählten Positionen mit vertretbarem Aufwand gemessen werden kann. Potential wird in der Entwicklung von mobilen, schnelleren, leichten und preiswerteren Detektionssystem gesehen. Hierfür sind Forschungsprojekte in Beantragung.

8.12.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Aufgrund des derzeit und wohl auch in Zukunft hohen Aufwands beim Einsatz der Methode wird der hauptsächliche Einsatzzweck in Bereichen gesehen, die sich mit konventionellen Methoden nicht untersuchen lassen. Prominentestes Beispiel ist die Detektion von

Verpressfehlern in Spannkälen. Die einzige zuverlässige, zerstörungsfrei Alternative ist hier das Röntgenverfahren, dass aber aus Strahlenschutzgründen in der Praxis kaum noch zum Einsatz kommt.

8.12.4 Datenerfassung, Messgrößen und Genauigkeiten

Die Datenerfassung erfolgt bei der Myonentomographie mit Detektoren, die entweder auf Gasentladung oder Szintillationsfasern beruhen. Diese sind noch sehr aufwändig und teuer und bisher nur stationär einsetzbar. Jeweils zwei Detektoren vor und hinter dem Objekt erfassen die Flugbahn jedes einzelnen Myons und bestimmen so die jeweilige Ablenkung durch das Material im Objekt. Aus den Flugbahnen wird durch eine ebenfalls recht aufwändige Rekonstruktionsrechnung die Dichtestruktur des Objekts abgeleitet (die Ablenkung ist abhängig von der Elementarzahl des Material). Die Messungen dauern sehr lange (mehrere Tage), da nicht viele Myonen die Erdoberfläche erreichen. Zudem ist durch die Flugrichtung der Myonen (meist $\pm 30^\circ$ von der Senkrechten) die Auflösung in horizontaler Richtung (derzeit 5-10 mm) besser als in vertikaler Richtung (einige cm). Dies führt in der Abb. 8.170 (rechts) dazu, dass zwar die 8 mm starke Bewehrung scharf erkennbar ist, gleichzeitig aber eigentlich tieferliegende Objekte (Spannkanal und Hohlstelle) im Bild auftauchen.

8.12.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Ausser dem in [473] publizierten Fall sind bisher keine Pilotstudien bekannt. In Simulationen wurde das Potential zur Detektion von Hohlstellen in Spannkälen nachgewiesen. Weitere Labormessungen und die Entwicklung eines mobilen Detektionssystems ist für den Zeitraum ab 2023 geplant (Ernst Niederleithinger, persönliche Information).

8.12.6 Literaturverzeichnis

Sonstige Literatur / Forschungsberichte

[471] Kaiser, R. (2019). Myography: Overview and future directions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 377(2137), 20180049. <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0049>

[472] Dobrowolska, M., Velthuis, J., Kopp, A., Perry, M., & Pearson, P. (2020). Towards an application of muon scattering tomography as a technique for detecting rebars in concrete. *Smart Materials and Structures*, 29(5), 055015. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab7a3f>

[473] Niederleithinger, E., Gardner, S., Kind, T., Kaiser, R., Grunwald, M., Yang, G., Redmer, B., Waske, A., Mielentz, F., Effner, U., Köpp, C., Clarkson, A., Thomson, F., Ryan, M., & Mahon, D. (2021). Muon Tomography of the Interior of a Reinforced Concrete Block: First Experimental Proof of Concept. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 40(3), 65. <https://doi.org/10.1007/s10921-021-00797-3>

8.13 Korrosionsüberwachung

8.13.1 Beschreibung der Technologie

Stahlbeton ist ein bei grossen Kunstbauten weit verbreitetes Material. Die Lebensdauer von Stahlbetonkonstruktionen ist jedoch häufig durch die Korrosion der Stahlbewehrung begrenzt. Betonkonstruktionen, die Korrosionsschäden aufweisen, müssen repariert werden, um ihre geplante Lebensdauer zu erreichen oder zu verlängern. Der Stand der Technik bei der Korrosionsüberwachung von Betonstrukturen basiert auf einbettbaren multifunktionalen Sensoren, die an ausgewählten repräsentativen Stellen in Betonstrukturen installiert werden können [474]. Die Sensoren bestehen aus einem Elektrodensystem, das aus mehreren verschiedenen potentiometrischen Sensoren sowie einem Verfahren zur Datenauswertung besteht [477].

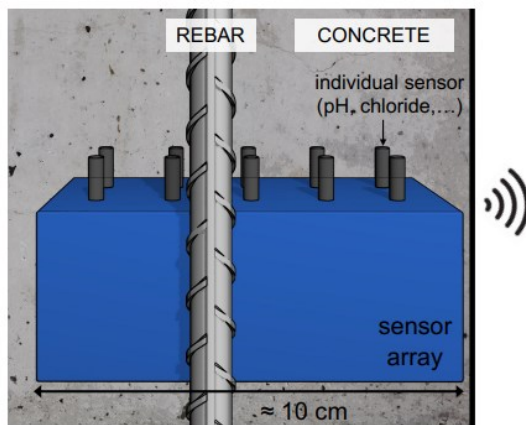


Abb. 8.171 Illustration eingebetteter multifunktionaler Sensoren für die Korrosionsüberwachung. (Quelle: [475])

Jeder eingebettete Multifunktionssensor, der in Abb. 8.171 schematisch dargestellt ist, besteht aus einzelnen Sensoren, die auf unterschiedliche Parameter reagieren und so die kontinuierliche Langzeitüberwachung (in unterschiedlichen Tiefen von der Betonoberfläche) aller für Korrosion und Dauerhaftigkeit relevanten Parameter ermöglichen: pH-Wert, Chloridkonzentration, Temperatur, elektrischer Widerstand des Betons/Stahl. Der Sensor ist mit einer Messeinheit gekoppelt, um die erforderlichen Messungen durchzuführen, und überträgt die Daten drahtlos.

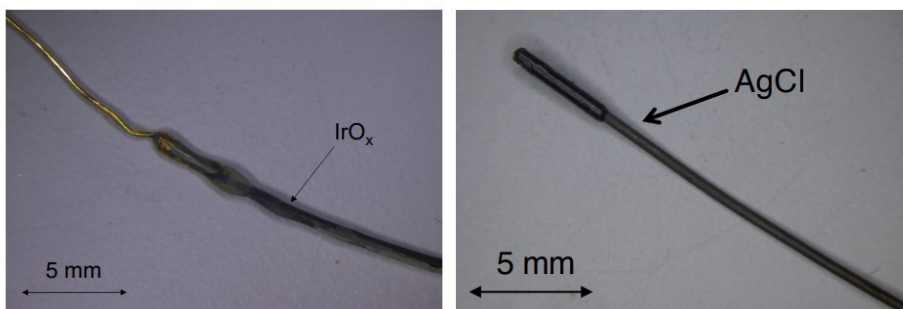


Abb. 8.172 Sensoren zur pH- und Chloridmessung. (Quelle: [478])

Eine ganzheitliche Interpretation der übertragenen Sensordaten kann unter Berücksichtigung des Zusammenspiels aller gemessenen Parameter durchgeführt werden, um eine zuverlässige Korrosionsdiagnose und -prognose zu erstellen. Hierzu werden Profile aller Parameter, die mit Korrosion und Dauerhaftigkeit zusammenhängen, wie pH-Wert, Chloridkonzentration, Temperatur, elektrischer Widerstand des Betons und Stahlpotential, sowie Prognosen dieser Parameter, erstellt.

Die Analyse kann kontinuierlich verfeinert werden, wenn mehr Daten zur Verfügung stehen, um immer genauere Ergebnisse zu erhalten. Das Ergebnis einer solchen Analyse

erstreckt sich auf Empfehlungen zur Dringlichkeit von Reparaturen an den verschiedenen Stellen der Betonstruktur, in die Sensoren eingebettet sind.

8.13.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Die Korrosionsüberwachung mit Multifunktionssensoren identifiziert, wenn eine kritische Korrosionsschwelle überschritten wird, lange bevor die Karbonatisierung mit herkömmlichen Indikatorsprühtests nachgewiesen werden kann [477].

Mit einem geeigneten Algorithmus zur Auswertung der Sensoren können die Einschränkungen, die im Allgemeinen mit kommerziell erhältlichen einbettbaren Referenzelektroden verbunden sind, überwunden werden [474]. Dies ermöglicht genaue und zuverlässige Daten über Chloridprofile (Chloridkonzentration in verschiedenen Betontiefen) in Beton zu erhalten, wie in gezeigt.

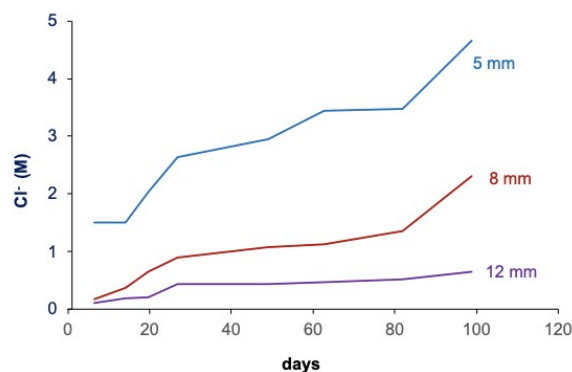


Abb. 8.173 Beispiel der Chloridgehaltentwicklung mit fortschreitender Zeit in unterschiedlichen Tiefen (Quelle: [478])

Die Korrosionsüberwachung ist eine relativ neue Technologie, weshalb die Langzeitstabilität der Sensoren noch unbekannt ist. Aktuelle Messungen unter realen Bedingungen, haben eine Mindestdauer von 2 Jahren ergeben (die Tests sind noch fortlaufend) [476].

8.13.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Aufgrund ihrer Vielseitigkeit können Korrosionsüberwachungssensoren sowohl in frischen als auch in ausgehärteten Betonstrukturen installiert werden und eignen sich daher sowohl für bestehende als auch für neu gebaute Brücken. Solche Messungen ermöglichen die Bestimmung des pH-Wertes und der Konzentration an freiem Chlorid, diese zwei Bedingungen können die Korrosion von Bewehrungsstahl auslösen. Auch die elektrische Empfindlichkeit des Betons, das Stahlpotenzial und die Temperatur können gemessen werden und geben wichtige Informationen über die Korrosionsausbreitung.



Abb. 8.174 Beispiel für die Korrosionsüberwachung an Betonstrukturen. (Quelle: [476])

Wichtigste mögliche Anwendungen in der Brückenüberwachung:

- Korrosionsüberwachung von Bewehrungsstäben in Betonbrücken
- Überprüfung der Haltbarkeit und Wirksamkeit von Reparaturlösungen
- Vorhersage des Korrosionszustands für die Instandhaltungsplanung
- Empfehlungen zur Dringlichkeit von Reparaturen in Betonstrukturen
- Empfehlungen zu Reparaturstellen in Betonstrukturen

8.13.4 Datenerfassung, Messgrößen und Präzision

- Die erfassten Daten werden über drahtlose Kommunikation übertragen, um den Korrosionszustand von Stahlbauteilen zu bewerten und zu prognostizieren.
- Ein multisensorischer Ansatz zur Korrosionsüberwachung besteht aus einem 15x15x15 cm grossen Sensorsystem, während die einzelnen pH- und Chloridsensoren einen Durchmesser von 0,5 mm und eine Länge von 1-3 cm haben.
- Chloridsensoren ermöglichen eine zuverlässige Überwachung der Konzentration von freiem Chlorid in hochalkalischem Beton mit einer Genauigkeit von $\pm 0,001$ M und einer Nachweisgrenze von $>0,02$ M. Basierend auf Laborexperimenten zeigen die Sensoren eine driftfreie Reaktion für mehr als 4 Jahre.
- Die Messung des pH-Wertes in Beton erfolgt mit einem maximalen Fehler von 0,5 pH-Einheiten in einem pH-Bereich von 9 bis 13,5. Auf der Grundlage von Laborexperimenten zeigen die Sensoren eine driftfreie Reaktion für mehr als 3 Jahre.
- Auf der Grundlage bestehender Implementierungen stellen Korrosionsüberwachungssysteme langfristige, dauerhafte Lösungen dar (derzeit mehr als 2 Jahre unter Feldbedingungen, während die Messungen noch fortlaufend sind).

8.13.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Korrosionsüberwachungssysteme für Betonbauwerke wurden mit Erfolg in einer Reihe von verschiedenen Anwendungen, darunter auch Brücken, eingesetzt. Ein charakteristisches Beispiel in dieser Hinsicht ist die Überwachung der Dauerhaftigkeit und die Vorhersage der Lebensdauer neuartiger Bindemittel unter Feldbedingungen [476].

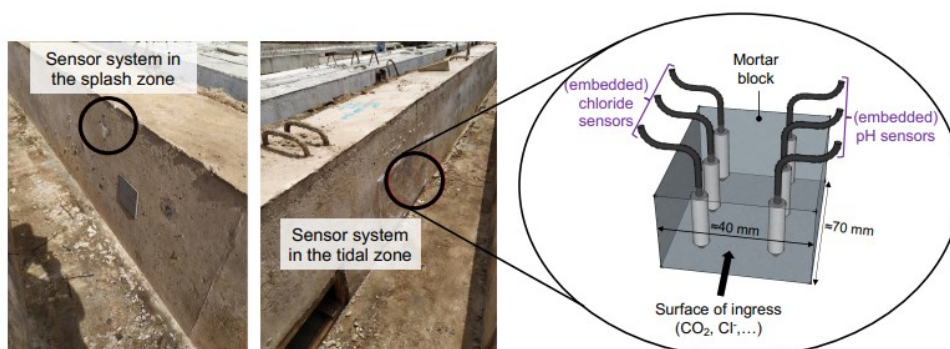


Abb. 8.175 Eingebettete Korrosionssensoren zur Überwachung der Karbonatisierung und des Chlorideinbruchs in einer Brückenkonstruktion vor der Küste Kubas. (Quelle: [476])

Anhand der von den Korrosionsüberwachungssensoren gewonnenen Daten lässt sich feststellen, wie sich verschiedene Zementarten in Bezug auf das Eindringen von Chloriden und die Ausbreitung der Karbonatisierung unter verschiedenen Umweltbedingungen verhalten. Ein weiteres Ergebnis ist die Quantifizierung der Menge freigesetzter Chloride bei der Karbonatisierung des Zementsteins. Die erzielten Ergebnisse können Aufschluss über künftige Konstruktionsprotokolle geben.

8.13.6 Literaturverzeichnis

Andere Literatur / Forschungsberichte

[474] Duramon-Webseite : <https://duramon.ch/> Letzter Zugriff: 15.05.2023

-
- [475] Duramon Sensor Datenblatt: <https://duramon.ch/wp-content/uploads/2022/02/Multisensor-Datasheet.pdf>
Letzter Zugriff: 28.02.2024
-
- [476] Duramon Fallstudien : <https://duramon.ch/wp-content/uploads/2022/02/Application-note-Santa-Clara.pdf>
Letzter Zugriff: 13.10.2022
-
- [477] Femenias, Y.S., Angst, U., Moro, F. and Elsener, B., 2018. Development of a novel methodology to assess the corrosion threshold in concrete based on simultaneous monitoring of pH and free chloride concentration. *Sensors*, 18(9), p.3101.
-
- [478] Duramon Datenblatt : <https://duramon.ch/wp-content/uploads/2022/02/Chloride-sensor-Datasheet.pdf>
Letzter Zugriff: 13.10.2022
-

8.14 Intelligente Betonaggregate

8.14.1 Beschreibung der Technologie

Ein intelligentes Betonaggregat bezeichnet einen Sensor, der aus einer piezoelektrischen Platte besteht, die zwischen zwei Marmorschichten eingebettet ist (siehe Abb. 8.176), und die für die Überwachung des baulichen Zustands durch Einbetten in Beton vorgesehen sind. In einer rezenten Anwendung wurden solche intelligenten Betonaggregate für Coda-Wellen-Interferometrie eingesetzt [481]. Die Coda-Wellen-Interferometrie ist eine Technik aus dem Bereich der Seismologie, die den späteren Teil eines Wellensignals (Coda) nutzt, um subtile Veränderungen in einem Medium zu erkennen. In den letzten Jahren wurde die Anwendung der Coda-Wellen-Interferometrie auf Betonstrukturen für die Überwachung des baulichen Zustands untersucht.

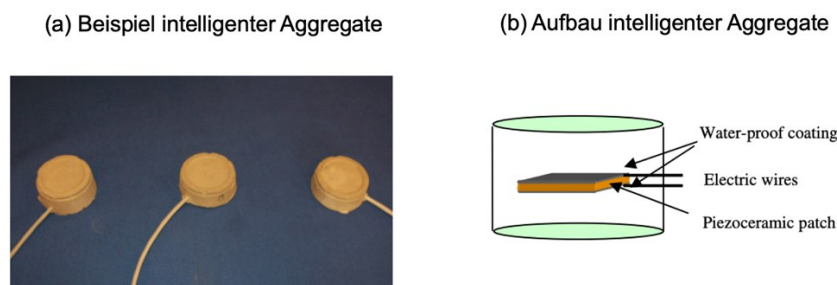


Abb. 8.176 Beispiel und Aufbau intelligenter Aggregate zur Einbettung in Betonelemente (Quelle: [480])

Mithilfe von multiplen eingebetteten Sensoren entsteht die Möglichkeit einer Anwendung der Coda-Wellen-Interferometrie zur Überwachung des Elastizitätsmoduls von Betonelementen. Des weiteren ist die Wellengeschwindigkeit im Beton ein Indikator der Druck- und Biegebeanspruchung [481]. Der Korrelationskoeffizient wird für einen Satz von Wellengeschwindigkeitsänderungen berechnet; der höchste Korrelationskoeffizient entspricht der Wellengeschwindigkeitsänderung zwischen der Coda der "gestressten" Welle und der Referenz coda [479].

Darüber hinaus ist es möglich, mit Hilfe der Coda-Wellen-Interferometrie grössere Rissbildungen zu erkennen, wobei die Empfindlichkeit durch die Lage der Risse im Verhältnis zur Nähe der Quelle-Empfänger-Sensoren bestimmt wird. Ändert sich der Weg der Coda deutlich, ist eine deutliche Verringerung der Korrelationskoeffizienten zu erwarten. Eine solche Situation tritt auf, wenn sich ein neuer Riss im Medium bildet. Daher kann der Wert des Korrelationskoeffizienten der der Coda zur Untersuchung der Rissbildung in der Struktur verwendet werden [481].

8.14.2 Aktueller Forschungsstand, Möglichkeiten und Grenzen

Die Forschung an intelligenten Betonaggregaten ist noch recht neu und die Anwendung der Coda-Wellen-Interferometrie mit Hilfe von intelligenten Aggregaten ist auf eine Fallstudie limitiert (siehe Abschnitt 8.14.5). Die Anwendung der Coda-Wellen-Interferometrie bringt jedoch viele Möglichkeiten in der Dauerüberwachung von Betonelementen, zum Beispiel die Überwachung einer möglichen Alkali-Aggregat-Reaktion [481][482].

Da intelligente Aggregate in Betonelemente eingegossen werden, sind sie nur bedingt geeignet für bestehende Brücken. Da eingebettete Sensoren zuverlässigere Resultate bei der Entdeckung von Rissbildung ergeben, ist die Anwendung bei bestehenden Kunstbauten noch zu definieren. Jedoch liefert die Coda-Wellen-Interferometrie nur Informationen über neu-entstehende Risse, weshalb die zerstörungsfreie Prüfung bestehender Bauten auf Risse nicht möglich ist.

Des Weiteren sind die bisherigen Anwendungen im Testlabor durchgeführt worden und dementsprechend ist der Einfluss von Feuchte und Temperaturschwankungen noch nicht bestimmt.

8.14.3 Einsatzzweck und Fragestellung im Bereich Kunstbauten

Die Dauerüberwachung von Kunstbauten mit Hilfe der Coda-Wellen-Interferometrie, welche auf smarten eingebetteten Betonaggregaten aufbaut, kann bei den folgenden Schadensfällen helfen:

- Erkennung von Alkali-Aggregat-Reaktionen.
- Überwachung der maximalen Spannung in Betonelementen und des einhergehenden Risikos von Schäden.
- Alarm bei neuentstehenden Rissen und die damit verbundene Auslösung einer detaillierten Untersuchung.
- Überwachung des Elastizitätsmoduls und der Betonhydratation kurz nach der Bauphase.

8.14.4 Datenerfassung, Messgrößen und Präzision

- Die erfassten Daten werden über Kabel übertragen. Die piezoelektrischen Sensoren die den Kern der smarten Aggregate darstellen, brauchen eine kontinuierliche Stromzufuhr.
- Die smarten Aggregate messen elastische Wellen, die ohne weitere Bearbeitung wenig Information enthalten.
- Mithilfe der Coda-Wellen-Interferometrie, welche auf mehreren Messpunkten beruht, kann die Wellengeschwindigkeit bestimmt werden, welche mit dem dynamischen Elastizitätsmodul korreliert.
- Nachdem der Grundwert der Wellengeschwindigkeit bestimmt ist, werden Korrelationskoeffizienten für einen grossen Satz an Wellengeschwindigkeitsänderungen bestimmt. Der Korrelationswert hilft bei der Aufdeckung neuer Rissbildung. Die Wellengeschwindigkeitsänderung, welche den Korrelationswert maximiert, gibt Aufschluss über die aktuelle Spannung/Druck in dem Betonelement.

8.14.5 Anwendungsbeispiele, Pilotanwendungen

Bisherige Pilotstudien wurden ausschliesslich im Labor durchgeführt. Tests in zwei verschiedenen Massstäben wurden erfolgreich ausgeführt: ein 0,5-m-Betonzylinder und einem 10 m langen Betonbalken in Originalgrösse. An beiden Testelementen wurden Druck- und Scherversuche durchgeführt.

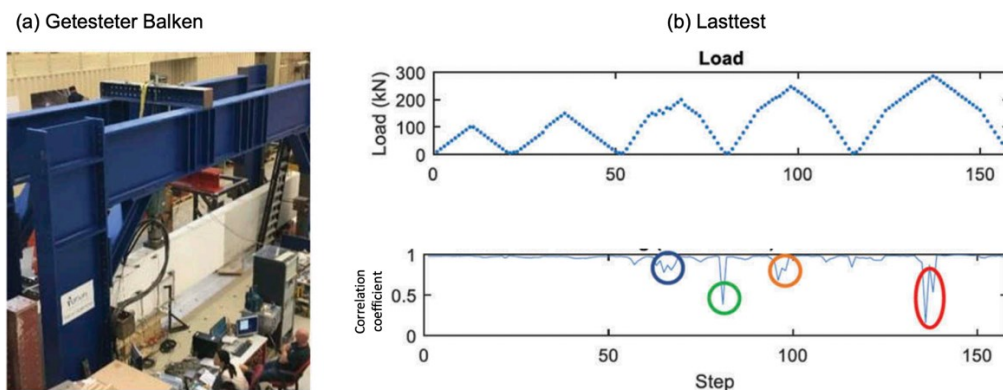


Abb. 8.177 Pilotstudie an einem massstabgetreuen Betonbalken (a) unter zyklischer Last (b). Deutliche Verringerungen des Wertes des Korrelationskoeffizienten (c) deuten auf Rissbildung hin. Beobachtete Rissentstehungen sind farblich eingekreist. Angepasst von [479]

Die Pilotstudie legt nahe, dass der Wert des Korrelationskoeffizienten der Coda-Wellen-Interferometrie ein empfindlicher Indikator für die Bildung von Rissen in der Betonstruktur ist. Vor der Anwendung fortgeschrittener und modellgestützter Inversionstechniken ist es jedoch nicht möglich, die tatsächliche Position der Risse zu lokalisieren.

8.14.6 Literaturverzeichnis

Andere Literatur / Forschungsberichte

-
- [479] Kevinly, C., Zhang, F., Yang, Y., Draganov, D. and Weemstra, C., 2021. A study on monitoring multi-scale concrete members with coda-wave interferometry using embedded transducers. In Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations (pp. 2413-2418). CRC Press.
-
- [480] Song, G., Gu, H. and Mo, Y.L., 2008. Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review. Smart materials and structures, 17(3), p.033001.
-
- [481] Kevinly, C., 2018. Application of coda-wave interferometry on concrete structures by utilizing smart aggregates. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:c0f1b195-4592-4cc8-b7a0-127b7fcb57a1?collection=education>
-
- [482] Schurr, D.P., Kim, J.Y., Sabra, K.G. and Jacobs, L.J., 2011. Damage detection in concrete using coda wave interferometry. Ndt & E International, 44(8), pp.728-735.
-

9 Technologiebewertung

Während in den Kapiteln 7 und 8 gängige und neuartige Messtechniken beschrieben wurden, werden relevante Technologien in diesem Kapitel anhand des Nutzens der gemessenen Information und der Kosten der Messtechnik bewertet. Hierfür wird die Methodik, wie in Kapitel 5 beschrieben, benutzt. Die Methodik geht vom Ansatz des Werts einer Information [483][484] aus, welche eine Technologie im Rahmen einer Strukturüberwachung liefern kann. Als Überwachungskonzept wird in diesem Kontext der Einsatz einer bzw. mehrerer Technologien zur Abdeckung eines Informationsbedürfnisses an einem Infrastrukturobjekt bezeichnet.

In einem ersten Schritt erfolgt eine grobe Klassifizierung der für Kunstbauten relevanten Teilsysteme. Dabei wird gemäss des Konzepts (siehe Kapitel 5) die Kritikalität der Infrastrukturobjekte sowie ihrer Teile abgeleitet.

9.1 Relevante Gefährdungen im Teilsystem

Tab. 9.44 Relevante Gefährdungen

<i>Gefährdungen</i>	<i>Bauwerksteile</i>
I Aussergewöhnliche Einwirkungen	
I.1 Überlastung	
Wenn Einwirkungen die Bemessungslasten überschreiten kann es zu Schäden an der Struktur kommen, z.B. Risse und Plastifizierung von Bauwerksteilen und daraus resultierende bleibende Verformungen. Aussergewöhnliche Einwirkungen, wie Aufpralllasten, können auch zu solchen Überlastungen führen.	Alle
I.2 Naturgefahren	
Naturgefahren, wie zum Beispiel Steinschlag, Erdbeben und Baugrundverschiebungen, stellen oft einen speziellen Fall der Überlastung dar und können Bauwerke dauerhaft beschädigen.	Alle, zusätzlich Galerien
II Langsam fortschreitende Schäden	
II.1 Korrosion	
Theoretisch sind alle Bauwerksteile, welche aus Metall sind, oder niedrig vergütete metallische Bewehrung enthalten, korrosionsanfällig. Bei Brücken ist aber vor allem die Korrosion von Bewehrungsstahl und vorgespannten Kabeln/Drähten relevant, da diese sich unter der Oberfläche befinden und deshalb Schäden zu spät oder nicht sichtbar sind und eine nachträgliche, präventive, Behandlung (mit kathodischem Korrosionsschutz) aller Kunstbauten ökonomisch unhaltbar ist.	Brückendeck (Betonkonstruktion, Verbundkonstruktion); Vorspannung und Kabel; Winkelstützmauer
II.2 Alkali-Aggregat Reaktion (AAR)	
Die AAR führt zu Rissbildungen im Beton, welche die Betoneigenschaften beeinträchtigt, insbesondere die mechanischen Festigkeiten (grösstenteils die Zugfestigkeit und den E-Modul) und die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton beeinträchtigt.	Brückendeck (Betonkonstruktion); Leitmauer; Stützmauer
II.3 Rissbildung	
Heterogene Baustoffe, wie Beton oder Mauerwerk, sind oftmals anfällig für Rissbildung, welche aus hohen Temperaturunterschieden, Lastzyklen, Alterung und Frost entstehen können. Bei Betonbauteilen können sich auch Schwindrisse und Betonierungsfugen zeigen.	Brückendeck (Betonkonstruktion, Mauerwerk, Verbund); Pfeiler; Leitmauer; Stützmauer
II.4 Materialermüdung	
Zyklische Beanspruchung von Bauwerksteilen führt zu Materialermüdung, welche bis zum Versagen führen kann. Speziell Bewehrungsstahl und Spannkabel können unter Schwerverkehr für Materialermüdung anfällig sein. Geschweisste Bewehrungsstäbe verstärken die Anfälligkeit für Ermüdung zusätzlich.	Brückendeck (Stahlkonstruktion, Betonkonstruktion, Verbundkonstruktion); Kabel
II.5 Verlust von Vorspannung (Drahtbrüche)	

Drahtbrüche bei Vorspannkabel reduzieren die Querschnittsfläche des Spannglieds und führen schlussendlich zum Verlust von Vorspannung: bei Vorspannung im Verbund punktuell und bei Vorspannung ohne Verbund auf die gesamte Länge des Spannglieds. Sie können eine Konsequenz aus der Korrosion der Vorspannkabel sein. Ein Verlust der Vorspannung kann auch durch Deformationen, Kriechen und Relaxation erfolgen.	Vorspannung
III Beeinträchtigung der Funktionalität	
III.1 Fehlerhafte Auflager	
Korrosion und Alterung können dazu führen, dass sich Brückenlager nicht so verhalten wie angenommen. Bei Rollenlagern können Korrosion, Temperaturschwankungen, Baugrundbewegungen und Erdbeben dazu führen, dass die Kräfte und/oder Bewegungswege grösser sind als bei der Bemessung angenommen. Gewisse Legierungen können zu Rissen bis hin zum Bruch des Rollenkörpers führen.	Auflager
III.2 Übermässige Verformung/Vibration kritischer Bauwerksteile	
Aufgrund von Rissen, Verlust von Vorspannkraft oder Korrosion von Kabeln kann es zu übermässigen Verformungen von Bauwerksteilen kommen. Dies beeinträchtigt die Gebrauchstauglichkeit, zum Beispiel die Befahrbarkeit oder die Begehrbarkeit bei Brücken für den Langsamverkehr.	Brückendeck (alle Materialien)

Robustheit

Der konkrete Nutzen von Messungen hängt von der Robustheit des Tragwerks ab: bei robusteren Bauwerken ist ein (Teil-)Versagen unwahrscheinlicher, weshalb das Messsystem möglicherweise viele Daten produziert ohne einen realen Nutzen, in Form einer Schadensdetektion, zu generieren.

In diesem Kapitel werden die Messtechnologien generell für alle Arten (wenig robust bis sehr robust) von Bauwerken abgebildet. Eine beispielhafte Ableitung der Robustheit für C2 – Verlust von Vorspannung in Stahlbetonbrücken wird in Abb. 9.178 gezeigt. Die Robustheit eines Bauwerks hängt von zusätzlichen Parametern ab, zum Beispiel die Redundanz der Spannkabel und die Kapazität der Umverteilung der Kräfte bei einem statisch unbestimmten Bauwerk.

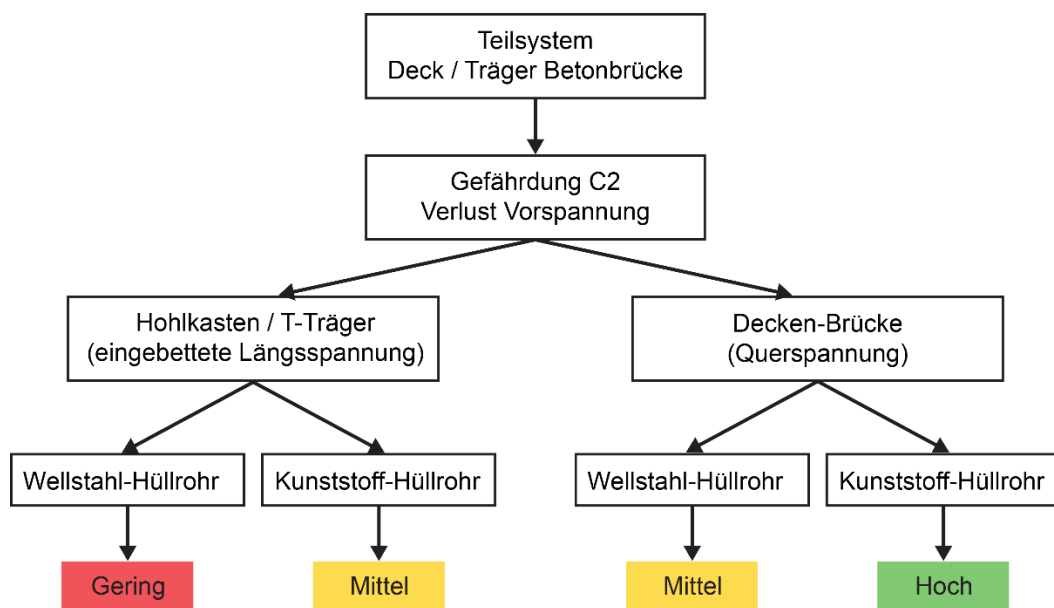


Abb. 9.178 Beispiel für die Herleitung der Robustheit von Brückentragwerken oder Brückenelementen in Abhängigkeit der Spannsystem-Typs. Dies ist für den Fall, dass die Robustheit nicht durch redundante Spannkabel gesichert wird.

Durch die Kombination der Robustheit mit dem Netzbezugs in einer groben Risikomatrix kann die Kritikalität eines Bauwerkteils bestimmt werden (siehe Kapitel 5). In der Einzelbewertung am Infrastrukturobjekt sollte für die Bestimmung des Nutzens in diesem Rahmen eine quantitative Risikobewertung durchgeführt werden. Wie schon aufgezeigt, bieten Computermodelle hierbei die Möglichkeit für eine quantitative Risikobewertung.

9.2 Bewertung von einzelnen Technologien

Der Wert der Information wird als ein relativer (zusätzlicher) Nutzen des Vorhandenseins der gemessenen Information definiert. Der Wert der Information an einem Infrastrukturobjekt ist jedoch nicht unabhängig von den Gefährdungen und deren Konsequenzen ermittelbar. Die langfristigen Kosten setzen sich aus den gesamtwirtschaftlich erwarteten Kosten inklusive monetarisierter Risiken für alle Anspruchsgruppen, d.h. Betreiber (Ausfall der Infrastruktur), Nutzer (Zeitverlust wegen Umfahrung), Dritter und Umwelt zusammen. Wie in Kapitel 5 beschrieben, ist es oftmals schwer möglich, gesamtwirtschaftlich eine Monetarisierung umfassend für alle Anspruchsgruppen im Verkehrswesen zu ermitteln, weshalb eine einfache qualitative Bewertung mittels Expertenwissen vorgenommen wird. Diese allgemeine Bewertung ersetzt eine bauwerkspezifische Analyse nicht. Die Bewertungsmethode, wie sie hier benutzt wird, kann jedoch auch benutzt werden um eine bauwerks(teil)spezifische Analyse vorzunehmen. Eine genauere Kosten-Nutzen-Analyse zur Entscheidungsfindung vor der Installation von Sensoren bedarf einer pre-posterior Analyse [485][486] welche anhand eines Computermodells der Struktur und Annahmen der Alterung und Gefährdungen den Nutzen der Strukturüberwachung bestimmt bevor Sensoren angebracht werden und dementsprechend das reale Verhalten des Bauwerks gemessen werden kann.

Des weiteren sollte beachtet werden, dass die Auswertung der Messtechniken eine Momentaufnahme darstellt. Sowohl der Reifegrad einer Technologie als auch die Aussagekraft der Messungen (in Form der Wahrscheinlichkeit einer Schadensdetektion) können sich mit Weiterentwicklungen und Anwendungen schnell verbessern, weswegen eine periodische Überprüfung der Bewertung empfohlen wird.

Die Anwendung von permanenter Bauwerksüberwachungstechniken (SHM) zur Erkennung von Schäden (Kategorien B und C) benötigt generell auch die Messung der Temperatur um den Einfluss der Temperaturschwankungen von Schadensszenarien zu unterscheiden. Des weiteren braucht es oftmals eine anfängliche Kalibrierungsphase, um die Temperatureinflüsse auf die gemessenen Werte bei intaktem Bauwerk zu bestimmen.

Die Kosten der gemessenen Information wird, ähnlich wie der Nutzen, grob geschätzt. Um die Bandbreite der zu erwartenden Kosten abzuschätzen, werden zwei fiktive Bauwerke definiert:

- Ein kleines Bauwerk mit einer Fahrbahnfläche von 200m² und einer Länge von 25m.
 - Ein grosses Bauwerk mit einer Fahrbahnfläche von 3000m² und einer Länge von 200m.
- Diese fiktiven Bauwerke sollen den Grossteil der üblichen Schweizer Autobahnbrücken abzudecken.

Basierend auf der Kostenschätzung, werden fünf Kostenkategorien (siehe Tab. 9.45) definiert. In den Tabellen für die Technologiebewertung der folgenden Kapiteln wird jeweils der Mittelwert der Kostenspanne angegeben.

Tab. 9.45 Abgrenzung der Kostenklassen	
Kategorie	Kosten [CHF]
1	<37'500
2	≥37'500
3	≥75'000
4	≥125'000
5	≥175'000

Erläuterung Berechnungsmethode und Darstellung in den Diagrammen

Die Berechnungsmethode und Darstellung mittels Diagrammen wird im Folgenden schrittweise am Beispiel der Messtechnologie «Dehnmessstreifen» für die Gefährdung «Ermüdung der Bewehrungsstäbe im Brückendeck» gezeigt.

Der Nutzen der Messungen wird als Produkt $ZV1 * ZV2$ bestimmt, wobei $ZV1$ die Zuverlässigkeit einer Messtechnologie und $ZV2$ die Aussagekraft einer Messtechnologie darstellen. Der zusätzliche Nutzen bei grossem Ausmass wird zu diesem Produkt dazu addiert, gemäss der in Kapitel 5.5.1 beschriebenen Formel zur qualitativen Technologiebewertung:

$$\text{Nutzen} = ZV1 * ZV2 * \text{Kritikalität} + zN$$

Der zusätzliche Nutzen resultiert aus der Eignung einer Messtechnologie für eine flächige Anwendung, welche ein grosses Ausmass eines Bauwerks abdeckt und dementsprechend eine höhere Wahrscheinlichkeit der Schadensdetektion ermöglicht, speziell bei einer nicht lokalisierten Gefährdung.

Die Bewertung einer Technologie wird anhand von Kosten-Nutzen-Ellipsen grafisch dargestellt. Die Bandbreite des Nutzens der abgebildeten Ellipsen umfasst den Nutzen ($ZV1 * ZV2 * \text{Kritikalität}$) und den zusätzlichen Nutzen bei grossem Ausmass ($\text{Nutzen} = ZV1 * ZV2 * \text{Kritikalität} + zN$). Die Kostenspanne leitet sich aus den Kostenklassen für ein kleines und ein grosses Bauwerk ab.

Die Ellipsen bilden hierbei nur zwei mögliche Fälle ab: kleines Bauwerk ohne zusätzlicher Nutzen für grosses Ausmass und grosses Bauwerk mit zusätzlichem Nutzen für grosses Ausmass. Andere Kombinationen – wie zum Beispiel einen grosses Bauwerk mit einer Gefährdung von kleinem Ausmass – sind auch möglich, werden aber nicht abgebildet um die Lesbarkeit zu verbessern. Wie in Abb. 9.179 dargestellt, werden diese Ellipsen für die zwei Extremwerte der Kritikalität abgebildet: ein unkritisches Bauwerk (untere Grenze) entspricht einem Wert von $\text{Kritikalität} = 1$ und ein kritisches Bauwerk (obere Grenze) entspricht einem Wert von $\text{Kritikalität} = 3$.

Technologie	Objektbezogener Nutzen					Objektbezogene Kosten	
	Zuverlässigkeit (ZV1)	Aussagekraft (ZV2)	Untere Grenze	Obere Grenze	Zusätzlicher Nutzen (zN)	Kosten (kleines Bauwerk)	Kosten (großes Bauwerk)
Dehnmessstreifen	3	2	6	18	2	2.00	3.25
Erläuterung Objektbezogener Nutzen							
Zuverlässigkeit:		Die Technologie ist erprobt in der Anwendung und funktioniert zuverlässig. → Kategorie 3					
Aussagekraft:		Die Technologie liefert aussagekräftige Resultate, wenn die Sensoren direkt an den Bewehrungsstäben angebracht werden. Die Sensoren sind jedoch lokal und liefern nur indirekte Aussagen über die Lastzyklen an einem spezifischen Punkt einer Kunstbaute.					
Untere Grenze / Obere Grenze:		Wie in der allgemeinen Beschreibung erläutert wird die Kritikalität mit einer unteren Grenze (Faktor 1) und einer oberen Grenze (Faktor 3) einbezogen. Die Kritikalität ist jeweils objektspezifisch zu bestimmen.					
Objektbezogener Nutzen Untere Grenze:		Zuverlässigkeit x Aussagekraft x Faktor Untere Grenze = $3 \times 2 \times 1 = 6$					
Objektbezogener Nutzen Obere Grenze:		Zuverlässigkeit x Aussagekraft x Faktor Obere Grenze = $3 \times 2 \times 3 = 18$					
Zusätzlicher Nutzen:		Die Technologie liefert bei einem zusätzlichen Ausmass nur einen kleinen Zusatznutzen, da die Messungen einen sehr lokalen Charakter besitzen → Kategorie 2					
Objektbezogener Gesamtnutzen:		Untere Grenze: $3 \times 2 \times 1 + 2 = 8$ Obere Grenze: $3 \times 2 \times 3 + 2 = 20$					
Erläuterung Objektbezogene Kosten							
Kosten		Die Kosten wurden über alle Technologien bei dieser Fragestellung verglichen und zwischen 1 (sehr klein) und 5 (sehr gross) bewertet (siehe Tabelle Tab. 9.45) → Bewertung bei einem Bauwerk von kleinem Ausmass 1.25					
Kosten zusätzliches Ausmass		Die Kosten bei einem zusätzlichen Ausmass steigen trotz des kleinen Zusatznutzens spürbar an, weil proportional mehr Sensoren angebracht werden müssen → Bewertung 2.50					

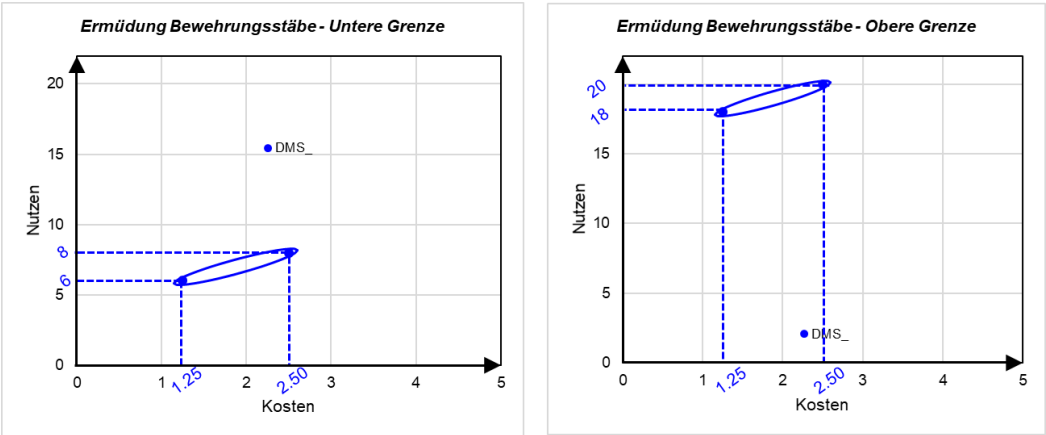


Abb. 9.179 Erläuterung der Darstellung der Kosten-Nutzen-Ellipsen, beispielhaft für Dehnmessstreifen für Ermüdung der Bewehrung von Stahlbetonbrücken

9.2.1 Aussergewöhnliche Einwirkungen

9.2.1.1 Überlastung

Die Überwachung von Einwirkungen auf Kunstbauten mit dem Ziel, Überlastungen durch überhöhte Einwirkungen zu erkennen benötigt einen permanenten Ansatz, wie ihn SHM bietet. ZfP ist hierfür nicht geeignet. Die folgenden Messtechniken können für die Überwachung von Überlastungen sinnvoll eingesetzt werden :

- Weigh-In-Motion (WIM) Messungen, wie im Kapitel 7.11 beschrieben, erlauben es die Verkehrslasten zu messen. Es handelt sich um eine Technologie die bei mehreren Anbietern erhältlich ist und bereits grossflächig eingesetzt wird ($ZV1 = 3$). Die Aussagekraft der Messungen ist sehr hoch für Verkehrslasten (überladene Lastwagen), jedoch gibt diese Messtechnik keine Auskunft über andere Arten der Überlastung, wie zum Beispiel Erdbeben und Anpralllasten ($ZV2 = 2$). Es handelt sich hierbei um eine teure Messtechnik, welche für einen langfristigen Einsatz (Annahme: 10 Jahre) über 112'000 CHF kostet ($KK = 5$). Der zusätzliche Nutzen bei grossem Ausmass ist sehr gross ($zN = 4$), da sich die Verkehrslasten über ein grosses Bauwerk nicht verändern und eine Messung ausreicht (eventuell sogar für mehrere Bauwerke, wenn dazwischen keine Auf- oder Abfahrten sind). Für die wirklich genaue Erfassung der kritischen Fahrzeuge wie Pneuکرane wird in der Regel für eine kurze Messperiode ergänzend eine Videokamera-basierte Fahrzeugerkennung eingesetzt.
- Die indirekte Erkennung der Verkehrslasten mittels B-WIM (siehe Kapitel 8.7) stellt eine kosteneffizientere Alternative zum WIM dar. Die Lasten werden nicht direkt auf der Strasse, sondern indirekt mittels Dehnungen des Bauwerks erfasst. Die Technologie wird kommerziell angeboten und hat sich als zuverlässig erwiesen ($ZV1 = 2$). Die Aussagekraft der Messungen ist hoch für Verkehrslasten, insbesondere überladene Lastwagen, und die eingesetzten Sensoren (Dehnmessstreifen) geben auch Auskunft über andere Einwirkungsarten, wie zum Beispiel Verformungen aufgrund von Temperaturdifferenzen oder Baugrundabsenkungen ($ZV2 = 3$). Jedoch sind Rückschlüsse auf einzelne Fahrzeuge, speziell bei mehreren Fahrstreifen pro Richtung und in Querrichtung steifem Tragwerk, nicht immer möglich. Die Sensortechnik ist relativ kostengünstig, jedoch benötigt B-WIM eine Kalibrierungsphase und ein Rechenmodell ($KK = 3$). Da die Methode eine Mittelung der Werte über mehrere Sensoren beinhalten, wird der zusätzliche Nutzen bei grossem Ausmass als mittel eingestuft ($zN = 3$).
- Die indirekte Erkennung der Verkehrslasten kann auch mithilfe von Beschleunigungssensoren angestrebt werden – zum Beispiel durch die Approximation der Verschiebungen oder durch digitale Signalverarbeitung [459]. Dieser alternative B-WIM Ansatz benötigt noch weitere Forschung um die Genauigkeit zu bestimmen ($ZV1 = 1$). Die Aussagekraft der Messungen für schwere Lastwagen wird als hoch eingeschätzt und die Messung des strukturellen Verhaltens mit Beschleunigungssensoren (siehe Kapitel 7.36) geben auch Auskunft über andere Arten der Überlastung, wie zum Beispiel Erdbeben, Wind und Aufpralllasten ($ZV2 = 3$). Da die Methode eine Mittelung der Werte über mehrere Sensoren beinhalten, wird der zusätzliche Nutzen bei grossem Ausmass als mittel eingestuft ($zN = 2$).
- Stationäre Wiegestationen sind eine zuverlässige Methode um überladene Lastwagen zu erkennen. Diese Messtechnik ist sehr zuverlässig und wird seit langem eingesetzt ($ZV1 = 3$). Die Aussagekraft der Messungen ist sehr hoch für überladene Lastwagen, jedoch gibt diese Messtechnik keine Auskunft über andere Arten der Überlastung, wie Erdbeben oder Anpralllasten. Überdies könnten stationäre Wiegestationen, welche eine spezielle Ausfahrt benötigen, eventuell umfahren werden ($ZV2 = 2$). Ein weiterer Nutzen dieser stationären Anlagen ist die sicherheitstechnische Überprüfung der Fahrzeuge. Es handelt sich hierbei jedoch um eine sehr teure und wartungsintensive Messtechnik, welche einen grossen Bauaufwand voraussetzen mit einer Aus- und Einfahrt ($KK = 5$). Der zusätzliche Nutzen bei grossem Ausmass ist gross ($zN = 4$), da die Verkehrslasten sich über ein grosses Bauwerk nicht verändern und eine Messung ausreicht (eventuell sogar für mehrere Bauwerke, wenn dazwischen keine Auf- oder Abfahrten sind).

Die Übersicht über die Messtechnologiebewertung für die Gefährdung I.1 Überlastungen sind in der Tab. 9.46 und in Abb. 9. gegeben.

Tab. 9.46 Technologiebewertung Überlastung wegen ausserordentlichen Einwirkungen					
Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Weigh-in-Motion Messung	WIM_	3	2	4	4
Brücken Weigh-In-Motion	BWIM_	2	3	3	3
Beschleunigungssensoren	MEM_	1	3	3	2
Wiegestationen	WGS_	3	2	5	4

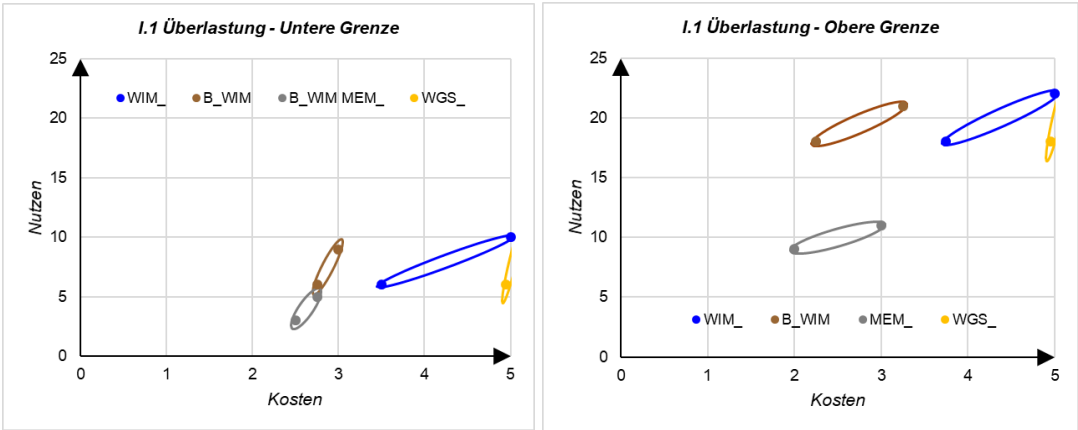


Abb. 9.180 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für Überlastungen. Oben die untere Grenze des Nutzens (resultierend aus einer Kritikalität von 1) und unten die obere Grenze des Nutzens (resultierend aus einer Kritikalität von 3)

9.2.2 Langsam fortschreitende Schäden

9.2.2.1 Korrosion

Das Korrosionsrisiko und die Zugänglichkeit zur Überwachung unterscheidet sich je nach Bauwerksteilen, weshalb die Analyse separat nach Bauwerksteilen geführt wird:

- Brückendeck (Stahl- und Spannbetonbrücken, Verbundbrücken);
- Vorspannkabel (im Verbund);
- Winkelstützmauern.

Brückendeck

Tab. 9.47 Technologiebewertung Korrosion der schlaffen Bewehrung des Brückendecks (Stahlbeton)					
Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Magnetische Streufeldmethode	MFL_	2	2	3	3
Eingebettete Korrosionsrisikobestimmung	EKR_	2	3	4	1
Potentialfeldmessung	ELP_	3	2	3	3
Georadar	GPR_	2	2	3	3
Widerstandssmessverfahren	WSM_	2	2	2	2

Tab. 9.47 Technologiebewertung Korrosion der schlaffen Bewehrung des Brückendecks (Stahlbeton)

Infrarot Thermografie	IRT_	2	2	1	3
Impulsantwort	IMP_	3	1	3	2

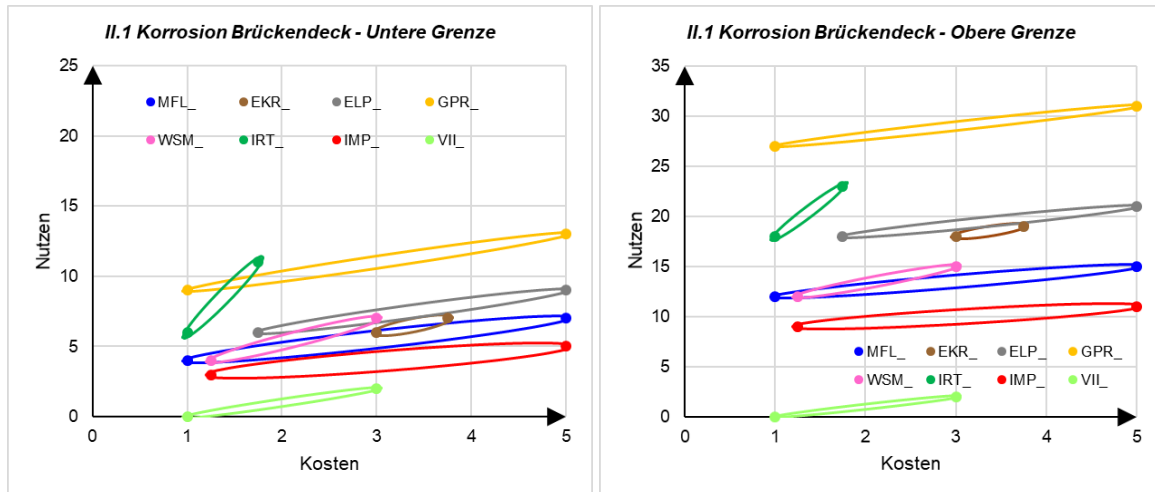


Abb. 9.181 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für Korrosion der schlaffen Bewehrung des Brückendecks (Stahl-, Spannbeton oder Verbundbrücken)

Vorspannung

Zum aktuellen Zeitpunkt sind vorgespannte Brücken mit Wellblech-Hüllrohren relevanter, da diese einerseits weniger robust sind (siehe) und den Grossteil der bestehenden Brücken darstellen. Deswegen wird in diesem Kapitel der Nutzen der Messtechniken für das Gefahrenbild der Korrosion von Vorspannkabeln mit Wellblech-Hüllrohren aufgezeigt. Bei Kunststoff-Hüllrohren ist der Nutzen von magnetischen Methoden generell höher, jedoch ist der Nutzen von Methoden, welche das Korrosionsrisiko aus Feuchtigkeit und Chloriden indirekt ableiten geringer, da gut verpresste Kabel in Kunststoff-Hüllrohren in der Regel wenig anfällig sind für Korrosion, selbst bei ausgeprägter Präsenz von Feuchtigkeit und Chloriden (eine Ausnahme bilden: Fehlstellen im Hüllrohr; nicht dichte Verpress- und Entlüftungsstutzen; durchgescheuerte Hüllrohre bei Umlenkpunkten, Ankerbereich in direktem Kontakt mit Chloriden).

Tab. 9.48 Technologiebewertung Korrosion bei Vorspannkabeln (Vorspannkabel im Verbund mit Wellblech-Hüllrohren)

Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Magnetische Streufeldmethode	MFL_	2	1	3	3
Eingebettete Korrosionsrisikobestimmung	EKR_	2	3	4	1
Potentialfeldmessung	ELP_	3	2	3	3
Georadar	GPR_	2	1	3	3
Widerstandsmessverfahren	WSM_	2	1	2	2
Infrarot Thermografie	IRT_	2	1	1	3

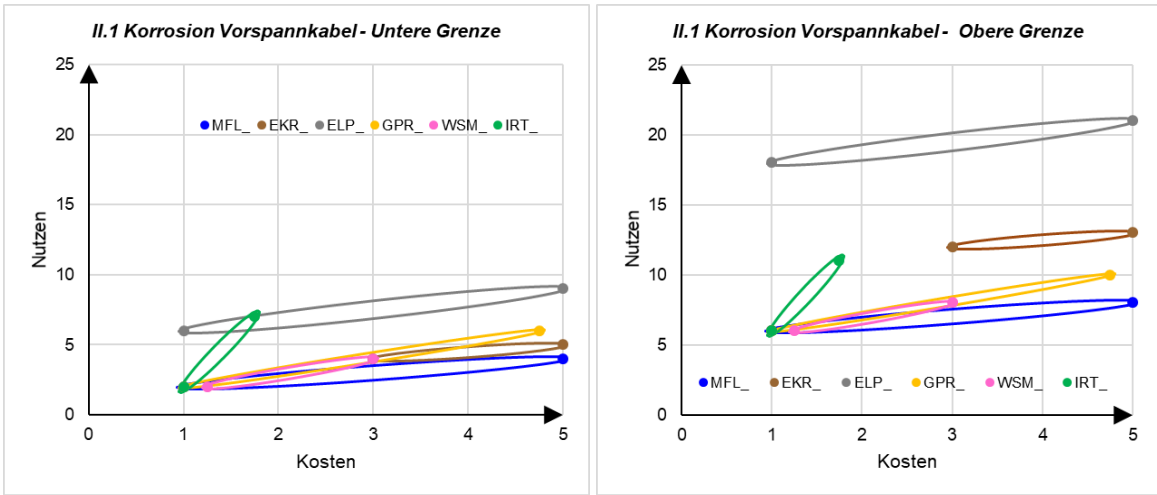


Abb. 9.182 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für die Korrosion von Vorspannkabeln im Verbund. Oben ist die untere Grenze des Nutzen abgebildet und unten die untere Grenze

Winkelstützmauern

Um Verkehrsunterbrüche sowie aufwändige Aushubarbeiten für Inspektionsschächte zu vermeiden und eine Zustandserfassung auf die gesamte Bauwerkslänge zu ermöglichen, wurde an der ETH eine zerstörungsarme Methode zur Korrosionsüberwachung der kritischen Bewehrung bei Winkelstützmauern entwickelt [488], welche die Drainagerohre für den Zugang eines Prüfsensors nutzt. Diese Anwendung funktioniert nur bei Vorhandensein dokumentierter, beidseitig zugänglicher und durchgängiger Sickerleitungen. Bisherige Pilotanwendungen erschwerten wegen Mängeln an diesen Sickerleitungen die Anwendungen, weshalb weitere Fallstudien benötigt werden um die Aussagekraft, die Kosten und den Nutzen der Methode zu überprüfen.

Tab. 9.49 Technologiebewertung Korrosion bei Stahlbeton-Winkelstützmauern						
Technologie	Kürzel	Messart	ZV1	ZV2	KK	zN
Faseroptische Verteilte Dehnmessungen	FOS_	SHM	1	3	5	3
Potentialfeldmessung (Halbzellenpotenzialkartierung)	ELP_	ZfP	1	3	4	4
Beschleunigungssensoren	MEM_	SHM	3	1	3	3

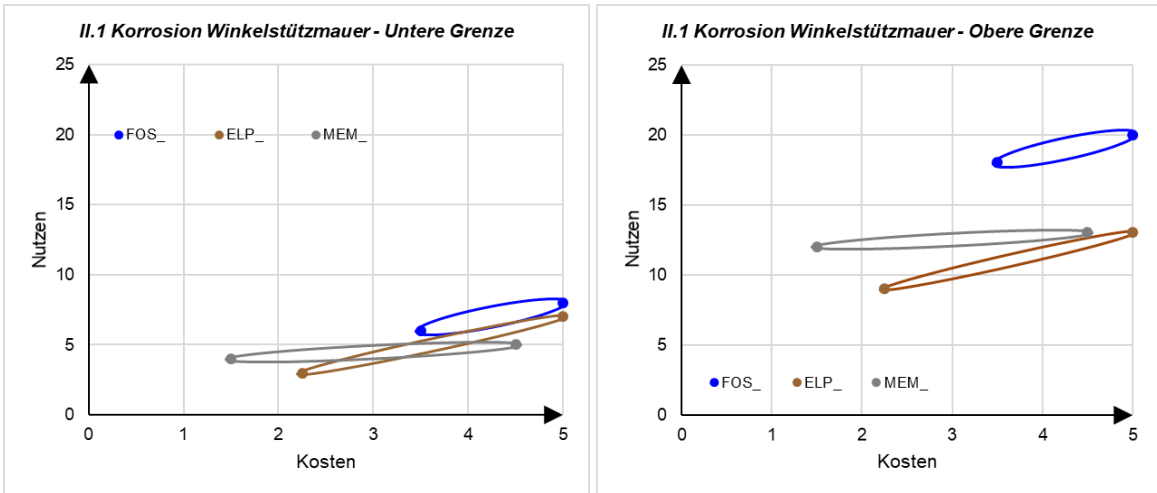


Abb. 9.183 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für die Korrosion von Bewehrungsstäben an der Einspannung von Winkelstützmauern

9.2.2.2 Alkali-Aggregat Reaktion

Ähnlich wie 9.5, jedoch können zerstörende Proben zur Analyse im Labor (z.B. Mikroskopie und Quellpotenzialbestimmung) genaueren Aufschluss geben. Da deren Anwendung in regelmässigen Intervallen zur Überwachung jedoch schwierig ist, werden sie hier nicht weiter behandelt.

9.2.2.3 Rissbildung

Tab. 9.50 Technologiebewertung Rissbildung in Bauwerksteilen in Beton

Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Thermografie	IRT_	2	3	2	3
Impulsantwort	IMP_	3	2	2	2
Schadensdetektion mit Computer-Vision	CVS_	2	2	3	3
Faseroptische Sensoren	FOS_	2	2	5	3
Schwingungs-Sensor	MEM_	3	2	3	3
Ultraschall	UTS_	2	2	4	1
Accoustic Emission	AEM_	2	2	3	2
Visuelle Inspektion	VII_	3	2	3	1

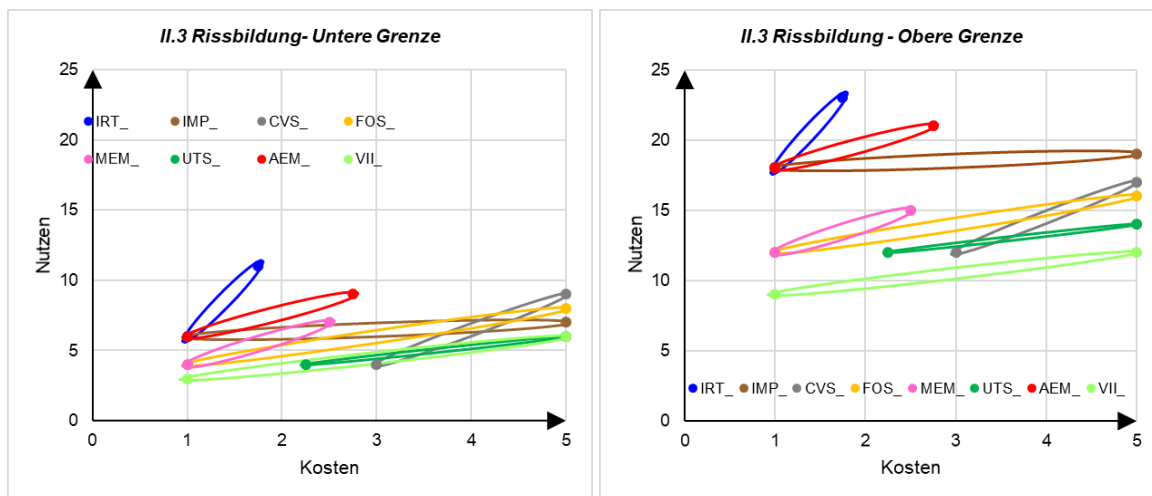


Abb. 9.184 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für Rissbildung in Bauwerksteilen aus Beton oder Mauerwerk

9.2.2.4 Ermüdung

Die Überwachung der Ermüdung von kritischen Bauteilen kann mit mehreren Sensor-Technologien angestrebt werden. Diese unterscheiden sich jedoch in der Fragestellung:

- Die tatsächlichen Verkehrslasten können mit Hilfe von WIM oder B-WIM gemessen werden. Mit Hilfe eines Computermodells können so die Spannungszyklen in kritischen Bauwerksteilen bestimmt werden. Die Präzision dieser Vorhersagen hängen stark von der Qualität des Computermodells und der zugrundeliegende Annahmen ab. Deshalb wird grundsätzlich dazu geraten – wie in Kapitel 9.3. beschrieben – die Computermodelle anhand von Messdaten zu validieren und kalibrieren.
- Wenn die kritischen Bauwerksteile bekannt sind, können die Spannungszyklen direkt gemessen werden mit Dehnmessstreifen oder faseroptischen Sensoren zur Messung von Dehnungen.

- Wenn das Bauwerk Reservekapazitäten hat und das statische System Lastumverteilungen erlaubt, kann man die Konsequenzen aus Ermüdung messen, zum Beispiel die Ermüdungsbrüche von Bewehrungsstäben. Eine gängige Technologie hierfür ist die akustische Emission. Da diese Technologie jedoch nur neue Brüche erkennt, sollten ausreichend Reservekapazitäten garantiert sein.

Tab. 9.51 Technologiebewertung Überwachung Ermüdung von kritischen Bauwerksteilen

Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Dehnmessstreifen	DMS_	3	2	2	2
Faseroptische Sensoren	FOS_	2	2	4	2
WIM	WIM_	3	3	5	5
B-WIM	BWIM_	2	3	3	3
Akustische Emission	AEM_	3	2	3	2

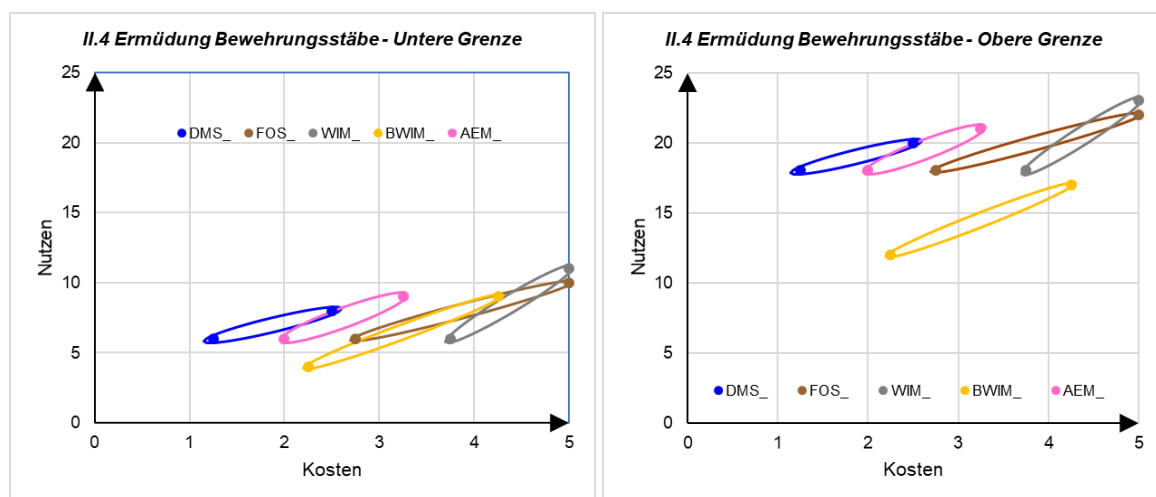


Abb. 9.185 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für Materialermüdung von schlaffen Bewehrungsstäben

9.2.2.5 Drahtbrüche

Vorspannung im Verbund

Den Zustand interner Vorspannlitzen zu erkennen wird dadurch erschwert, dass die Drähte wenig zugänglich sind (Ausnahmen bilden Ankerköpfe, in der Regel an der Spannseite, oder punktuelle zerstörend aufgeschlossene Stellen). Des weiteren können Sensoren nur schwer nachträglich an kritischen Stellen angebracht werden ohne den Effekt der Vorspannung zu beeinflussen. Deswegen stehen nur wenige Methoden zur Verfügung, welche alle limitiert sind:

- Akustische Emission: erkennt reissende Drähte, gibt jedoch keine Information darüber, wieviele Drähte vor der Installation des Messsystems gerissen sind. Diese Messtechnik gibt also nur Informationen über das Schadensinkrement.
- Dehnmessstreifen: könnte den Einfluss des Verlustes von Vorspannung erkennen, wenn der Sensor in dem – sehr begrenzten – Einflussbereich des geschädigten Spannkabels angebracht wurde. Des weiteren ermöglicht es diese Technik nur weit fortgeschrittenen substantiellen Schaden zu erkennen, weshalb der Nutzen limitiert ist.
- Faseroptische Sensoren: können dazu beitragen die Herausforderung der korrekten Lokalisierung der Dehnmessstreifen zu überwinden, da es sich um ein verteiltes System handelt. Ungeachtet dessen ermöglicht es auch diese Technik nur fortgeschrittenen

Schaden zu erkennen – ausser die optischen Fasern sind direkt auf der Spannlitze-dem Spanndraht angebracht.

- Beschleunigungssensoren: können den Einfluss des Verlustes von Vorspannung auf modale Parameter, wie zum Beispiel Modalformen und abgeleitete Indikatoren, erkennen [487]. Da es sich um globale Indikatoren handelt, eignet sich dieses Messsystem nur für fortgeschrittenen Schaden.
- Magnetische Streufeldmethoden können Querschnittsverlusten ab 5% des gesamten Kabelquerschnitts mit einer Wahrscheinlichkeit von über 80% erkennen [490].
- Ultraschalltechniken: könnten Drahtbrüche erkennen, diese jedoch nur schwer von unzureichender Verpressung (Injektion) der Spannglieder unterscheiden. Des weiteren kann diese Messtechnik nur fortgeschrittenen Schaden erkennen.
- Klassische radiografische Methoden, welche auf Röntgenstrahlen basieren, können bei Wellblech-Hüllrohren nur sehr wenig Aufschluss geben. Gammastrahlen sind jedoch eine vielversprechende Technologie, um gerissene Spanndrähte oder Spannlitzen zu entdecken. Die Gammagrafie kann zusätzlich Informationen über die Qualität der Verpressung (Injektion) liefern. Der Nachteil von radiografischen Methoden liegt in den benötigten Sicherheitsvorkehrungen zur Strahlensicherheit und dem benötigten beidseitigen Zugang zu dem geprüften Element.

Tab. 9.52 Technologiebewertung Überwachung von Drahtbrüchen bei eingebetteten Vorspannkabeln

Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Dehnmessstreifen	DMS_	3	1	2	2
Ultraschall	UTS_	2	1	4	1
Faseroptische Sensoren	FOS_	2	2	5	4
Akustische Emission	AEM_	2	2	3	2
Schwingungs-Sensor	MEM_	3	1	3	3
Magnetische Streufeldmethode	MFL_	2	3	4	2
Gammagrafie	RDG_	3	3	5	2

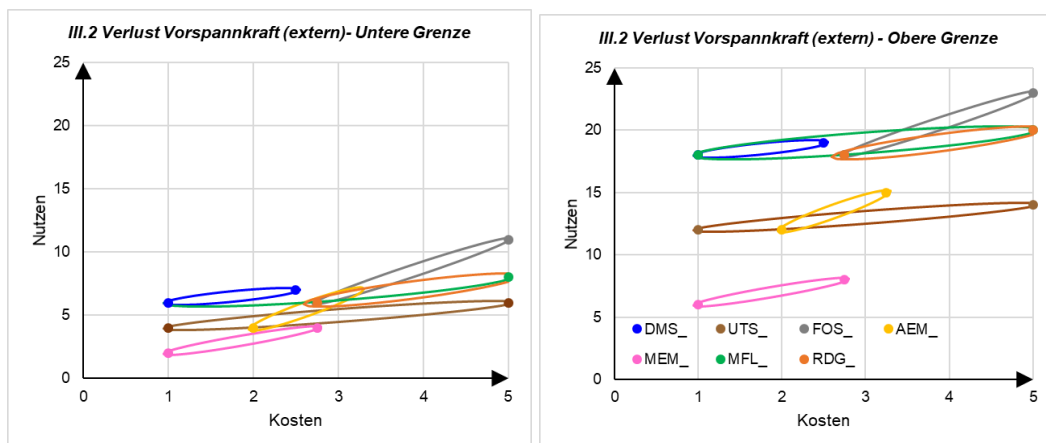


Abb. 9.186 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für Drahtbrüche interner Vorspannlitzen

Externe Vorspannung

Im Gegenteil zur internen Vorspannung sind externe Vorspannelemente besser zugänglich.

Tab. 9.53 Technologiebewertung Überwachung von Drahtbrüchen bei externen Vorspannkabeln und Spannseilen

Technologie	Kürzel	ZV1	ZV2	KK	zN
Dehnmessstreifen	DMS_	3	2	2	2
Ultraschall	UTS_	2	2	4	1
Faseroptische Sensoren	FOS_	2	3	5	2
Acoustic Emission	AEM_	2	2	3	2
Schwingungs-Sensor	MEM_	3	2	3	3
Magnetische Streufeldmethode	MFL_	2	3	5	2

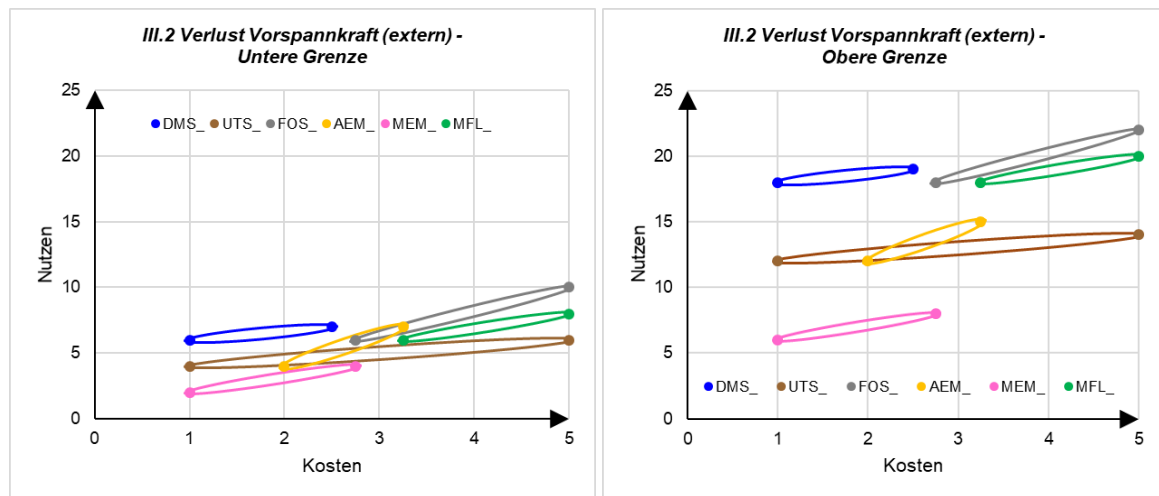


Abb. 9.187 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für Drahtbrüche externer Vorspannlitzen

9.2.3 Beeinträchtigung der Funktionalität

9.2.3.1 Fehlerhafte Auflager

Die Erkennung von Auflagern, die sich nicht so verhalten wie bei der Bemessung angenommen, kann zwei Ansätze verfolgen: wenn ein Grenzwert überschritten wird oder wenn zu grosse Abweichungen zwischen dem modellierten und dem gemessenen Verhalten festgestellt werden. Im ersten Fall ist ein Computermodell hilfreich, im zweiten Fall unabdinglich.

Tab. 9.54 Technologiebewertung Korrosion bei Stahlbeton-Winkelstützmauern

Technologie	Kürzel	Messart	ZV1	ZV2	KK	zN
Dehnmessstreifen	DMS_	SHM	3	2	2	2
Lineare Stelltransformatoren	LDV_	SHM	3	3	1	2
Beschleunigungssensoren	MEM_	SHM	3	2	2	3

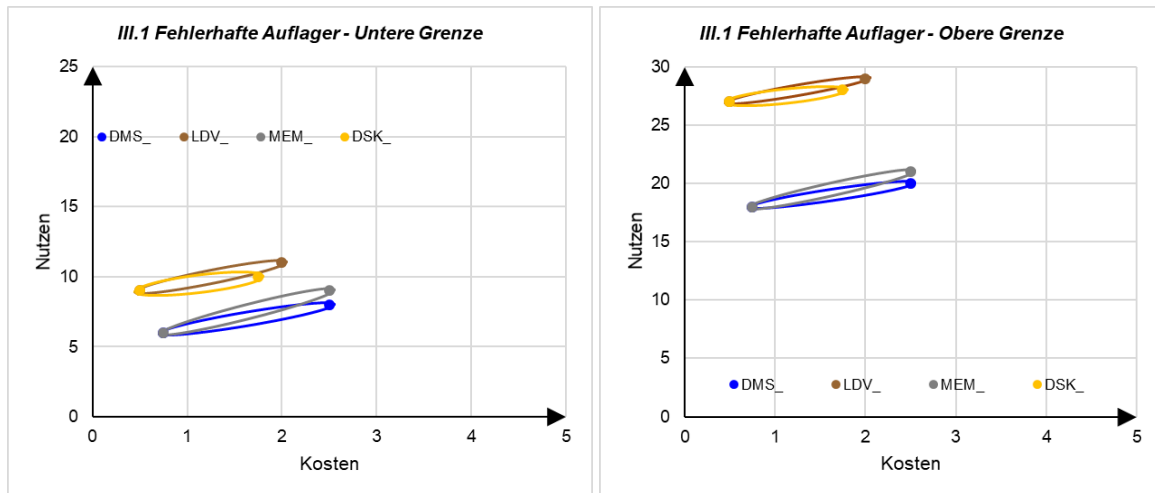


Abb. 9.188 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für fehlerhafte Auflager

9.2.3.2 Exzessive Verschiebungen

Tab. 9.55 Technologiebewertung Korrosion bei Stahlbeton-Winkelstützmauern

Technologie	Kürzel	Messart	ZV1	ZV2	KK	zN
Dehnmessstreifen	DMS_	SHM	3	2	2	2
Digitale Bildkorrelation	DIK_	SHM	1	3	3	4
Satelliten-Interferometrie	SRI_	SHM	2	1	2	5
Inklinometer	INK_	SHM	3	2	2	2
Beschleunigungssensoren	MEM_	SHM	2	1	2	2

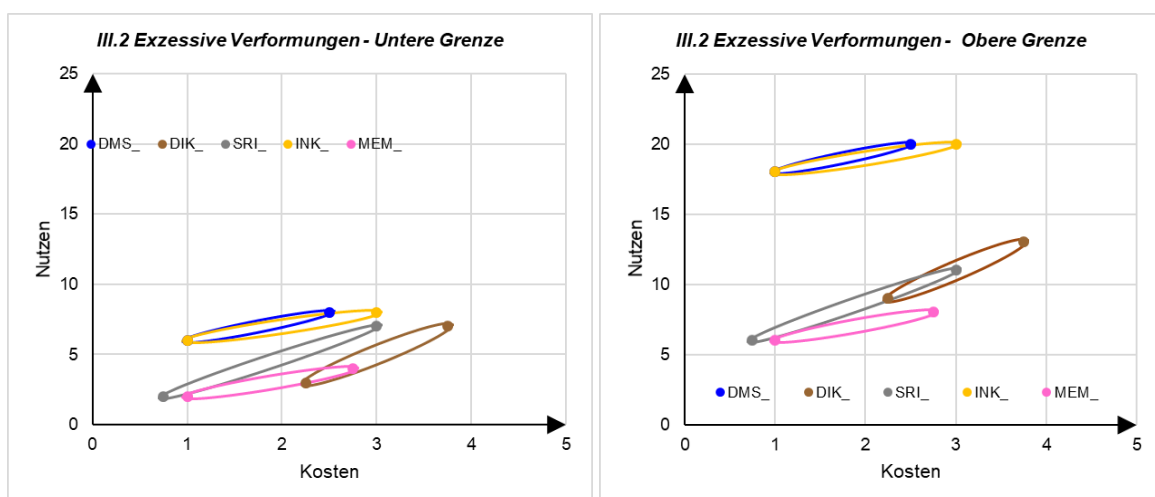


Abb. 9.189 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechniken für exzessive Verschiebungen von relevanten Bauwerksteilen

In Kapitel 9.2 werden die Messtechnologien verallgemeinert nach Messgrößen dargestellt. Jedoch gibt es, wie in Kapitel 7 beschrieben, für jede Messtechnik mehrere Sensortypen. In der nachfolgenden Abbildung wird dies beispielhaft dargestellt für die Messung von

Dehnungen für das Gefährdungsbild der exzessiven Verschiebungen, wofür drei Messtechnologien in Kapitel 7 beschrieben wurden.

9.2.4 Literaturverzeichnis

Andere Literatur / Forschungsberichte

- [483] Straub, D., Chatzi, E., Bismut, E., Courage, W., Döhler, M., Faber, M.H., Köhler, J., Lombaert, G., Omenzetter, P., Pozzi, M. and Thöns, S., 2017, August. Value of information: A roadmap to quantifying the benefit of structural health monitoring. In ICOSAR-12th international conference on structural safety & reliability
- [484] Thöns, S., Limongelli, M.P., Ivankovic, A.M., Faber, M., Val, D., Chryssanthopoulos, M., Lombaert, G., Döhler, M., Straub, D., Chatzi, E. and Köhler, J., 2017, September. Progress of the COST Action TU1402 on the Quantification of the Value of Structural Health Monitoring. In IWSHM-11th International Workshop on Structural Health Monitoring.
- [485] Giordano, P.F., Prendergast, L.J. & Limongelli, M.P. A framework for assessing the value of information for health monitoring of scoured bridges. J Civil Struct Health Monit 10, 485–496 (2020).
- [486] Kamariotis, A., Chatzi, E., & Straub, D. (2022). Value of information from vibration-based structural health monitoring extracted via Bayesian model updating. Mechanical Systems and Signal Processing, 166, 108465.
- [487] Lourens E, Reynders E, De Roeck G, Degrande G, Lombaert G. An augmented Kalman filter for force identification in structural dynamics. Mechanical Systems and Signal Processing 2012;27:446–60. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.09.025>.
- [488] Pfändler, P., Bircher, L., & Angst, U. (2022). Inspecting the corrosion state of underground reinforced concrete structures. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 3(1), 17.
- [489] Walther, A. (2012) «Vergleichende Signalinterpretation von Spannstahlbrüchen im remanenten und aktiven magnetischen Streufeld», Berlin.
- [490] Karthik, M. M., Terzioğlu, T., Hürlebaus, S., Hueste, M. B., Weischedel, H., & Stamm, R. (2019). Magnetic flux leakage technique to detect loss in metallic area in external post-tensioning systems. Engineering Structures, 201, 109765.

9.3 Erstellen und Bewertung von Überwachungskonzepten

9.3.1 Erstellung eines Überwachungskonzepts

Überwachungskonzepte erlauben es, die Strukturüberwachung mit einem ganzheitlichen Ansatz zu behandeln. Die unterschiedlichen Technologien, welche in Kapitel 9.2 bewertet wurden, decken dabei die geforderten Überwachungsaspekte je nach Gefährdungsbild unterschiedlich und selten vollständig ab.

Die Kombination mehrerer Messtechnologien kann präzisere und zuverlässigere Überwachungsdaten liefern. Dementsprechend ist das Ziel einer kombinierten Anwendung von mehreren Überwachungstechnologien, einen Mehrwert im Vergleich zur Anwendung einer einzelnen Technologie zu erhalten. Solch ein Mehrwert kann durch Redundanz (siehe Kapitel 9.3.1.2) oder Kombination von hochauflösenden lokalen Messungen mit weniger präzisen globalen Messungen entstehen. Des weiteren kann ein Mehrwert entstehen, wenn Messtechniken mit Computermodellen (siehe Kapitel 9.3.1.1), bestehender Information zur Strukturgeometrie, artfremden Daten (zum Beispiel basierend auf SIM-Karten oder Computer-Vision) oder Robotik kombiniert werden.

Die Kosten einer kombinierten Anwendung sind generell höher als bei den einzelnen Kosten der Überwachungstechnologien jedoch kann ein möglicher Minderaufwand (z.B. infolge gemeinsamer Auswertung und Speicherung oder der Kombination mehrerer Techniken in einem Gehäuse) die Kosten im Vergleich mit der Summe der einzelnen Technologiekosten signifikant reduzieren. Einige Beispiele für Überwachungskonzepte, welche mehrere Technologien kombinieren, sind in Kapitel 9.3.2 beschrieben.

9.3.1.1 Die Rolle von Rechenmodellen

Bei der Überwachung der Tragwerksleistung, speziell mittels Dauerüberwachung, bieten Daten alleine noch keinen Mehrwert. Ein Nutzen entsteht erst dann, wenn eine Auswertung vorgenommen wird.

Die einfachste Form eines Modells liegt im Vergleich des gemessenen Werts (oder eines Indikators welcher aus den Messdaten abgeleitet wird) mit einem Grenzwert. Nur in seltenen Fällen, wie zum Beispiel bei exzessiven Verschiebungen oder Vibrationen, gibt es solche Grenzwerte in Normenkatalogen. Deshalb liegt es an Ingenieuren solche Grenzwerte mittels Erfahrungswerten oder Computermodellen festzulegen.

Eine robustere Methode der Schadensdetektion beruht auf einer statistischen Analyse der Messdaten, um eine Abweichung vom Referenzzustand zu erkennen. Dies bedarf einer gleichzeitigen Messung der Temperatur und Feuchte des Bauwerks um den Einfluss der Umgebungsbedingungen auf das Strukturverhalten zu ermitteln und die Wahrscheinlichkeit eines fehlerhaften Alarm zu verringern. Auch eine „Trainings-Phase“ mit Messungen des Ist-Zustands ist erforderlich, bevor ein Schaden in Form einer statistischen Abweichung der Messdaten erkannt werden kann.

Messdaten können auch genutzt werden, um den Tragwerkszustand mittels Modellen besser einzuschätzen. Dies ist besonders interessant, wenn die Tragwerksleistung oder die Sicherheit des Tragwerks bezüglich normativer Grenzzustände ermittelt werden soll, zum Beispiel um eine Änderung des maximal zulässigen Fahrzeug-Gewichts zu veranlassen oder um die Möglichkeit eine höheres Verkehrsvolumen (zum Beispiel eine zusätzliche Fahrspur) zu bewerten. Bestehende Strukturen haben oftmals ungenutzte Kapazitätsreserven, welche durch konservative Annahmen bei der Bemessung entstehen. Die datengesteuerte Aktualisierung der Strukturmodelle (zum Beispiel eine nicht-lineare finite Elemente Modellierung) und der Einwirkungen ermöglichen genauere Vorhersagen, welches ein kosteneffizientes risikobasiertes Infrastrukturmanagement ermöglicht und unnötige Brückenerneuerungen und -verstärkungen vermeidet.

Daten-gesteuerte Modellaktualisierungen können für alle Arten von strukturellen Überprüfungen verwendet werden, da sie sowohl die Abschätzungen des Bedarfs (Lastniveau) als auch die der strukturellen Kapazität verbessern. Es gibt daher viele Anwendungsfälle in der Praxis, bei denen zunächst strukturelle Mängel vorhergesagt werden. Ein mögliches Verfahren für die datengesteuerte Überwachung der Tragwerksleistung ist:

- Bewertung des bestehenden Bauwerks ohne Überwachungsinformationen nach den Empfehlungen der SIA 269.
- Erhebung von baulichen Mängeln welche einem Erfüllungsgrad kleiner als 1 entsprechen.
- Entwurf eines geeigneten Überwachungssystems, welches mehrere Messtechniken umfassen kann.
- Durchführung der Strukturüberwachung.
- Interpretation der Daten im Hinblick auf die ermittelten Brückenparameterwerte oder im Vergleich mit Grenzwerten oder normalem Verhalten.
- Aktualisierung der numerischen oder analytischen Modelle und Neubewertung der Erfüllungsfaktoren.

Die gesammelten Messdaten können dementsprechend entweder für Bewertungen der Tragsicherheit [491] oder für ein genaueres Vorhersagen des Tragwerkverhaltens der Brücke unter Umwelt- und Nutzungsbedingungen [492] verwendet werden. Da eine Bewertung der Tragsicherheit einer Struktur nur einem bestimmten Zeitpunkt (oder einem bestimmten Zeitraum) entspricht, sollte sie von der Zustandsüberwachung (SHM) unterschieden werden, die auf die Erkennung von Schäden abzielt. Diese beiden Ansätze der Strukturüberwachung ergänzen sich dementsprechend. Da sie auf ähnlichen Sensortechnologien und Überwachungskampagnen beruhen, ist ihre Abgrenzung in der Literatur jedoch nicht immer klar.

Die datenbasierte Bestimmung der Tragwerksleistung gewinnt aufgrund der unmittelbaren Vorteile gegenüber konservativen Modellen, welche grösstenteils für die Bemessung neuer Bauwerke bestimmt sind [493], [494]. Eine direkte Überwachung der Einwirkungen kann zur Bewertung der Tragwerksleistung, wie z. B. Ermüdungsgrenzzustände, verwendet werden [495]. Die meisten Bewertungen der Tragsicherheit erfordern eine inverse Analyse, da das

Strukturverhalten (z.B. die Durchbiegung) und nicht die Ursachen (d. h. die Material- und Struktureigenschaften) überwacht werden [496]-[499]. Aufgrund dieses inversen Problems ist die Dateninterpretation von Feldmessungen eine Herausforderung, insbesondere wegen der grossen Unsicherheiten, die mit Ingenieurmodellen und deren vereinfachenden Annahmen verbunden sind. Diese Unsicherheiten führen dazu, dass herkömmliche Methoden zur Dateninterpretation, wie z. B. Residualminimierung, nachweislich unsichere Vorhersagen liefern [500]-[503] und probabilistische Strukturidentifizierungsverfahren robustere Resultate liefern [504]-[507] und deswegen empfohlen werden. Diese Methoden beruhen jedoch auf der Abschätzung der epistemischen Unsicherheiten, welche nicht trivial sind und eine der derzeitigen Einschränkungen dieser Methoden darstellt.

9.3.1.2 Die Wichtigkeit redundanter Messungen

Im Kapitel 9.2 werden einzelne Sensorsysteme bewertet. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass redundante Messsysteme von grosser Bedeutung sind um die Qualität der Daten zu garantieren.

Redundante Messsysteme helfen unter anderem dabei:

- Die Präzision der Messung durch Mittelung mehrerer Werte zu verbessern,
- Verschiedene Messgrössen zu korrelieren und daraus Informationen abzuleiten,
- Bei einem Sensorausfall eine permanente Messung zu garantieren.

Neben der Redundanz, ist es auch wichtig die Sensordaten und die korrekte Funktion der Sensoren zu überwachen. Hierfür können zum Beispiel Methoden des maschinellen Lernens genutzt werden [507].

9.3.2 Bewertung von Überwachungskonzepten

Mit der Bewertungsmethode für einzelne Messtechnologien können auch Bewertungskonzepte analysiert werden. Zusätzlich zu dem gefährdungsspezifischen Nutzen haben verschiedene Messtechnologien jedoch auch das Potential, wie in Kapitel 9.3.2.1 beschrieben, mehrere Gefährdungen abzudecken. Dieser zusätzliche Nutzen kann bei der Wahl einer Technologie auch eine Rolle spielen, da die (aktuell oder zukünftig) relevanten Gefährdungen nicht zwingend bekannt sind.

Des weiteren ist die Kombination mehrerer Messtechnologien oftmals interessant um den Nutzen, aufgrund der erhöhten Wahrscheinlichkeit der Schadensdetektion, zu verbessern. Die Kombination mehrerer Messtechnologien ist beispielhaft in Kapitel 9.3.2.2 aufgezeigt.

9.3.2.1 Mehrfachnutzen von Messtechniken

Manche Messtechnologien sind gefährdungsspezifisch, während andere Messtechnologien einen zusätzlichen Nutzwert haben können, aufgrund der möglichen Anwendung für mehrere Gefährdungen. Dieser zusätzliche Nutzen ist schematisch für den Fall der Drahtbrüche von Spannkabeln im Verbund in Abb. 9.190 gezeigt: während akustische Emissionsmessungen speziell Drahtbrüche entdecken, können Dehnmessstreifen und faseroptische Sensoren zum Beispiel auch zur ungefähren Abschätzung der Verkehrslasten genutzt werden.

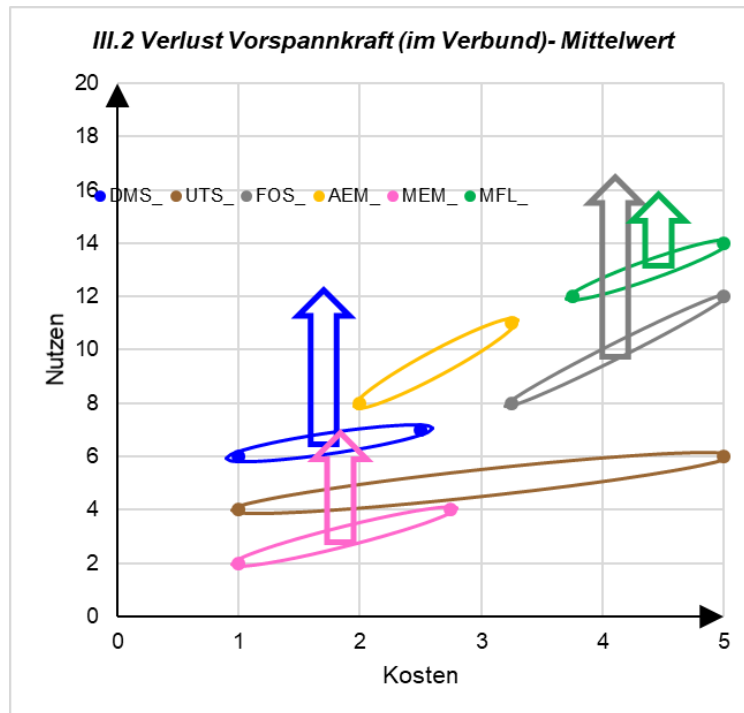


Abb. 9.190 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der Messtechnologien für Drahtbrüche von internen Vorspannlitzen und Abschätzung des zusätzlichen Nutzens der Sensoren für andere Gefährdungen / Fragestellungen

Eine Messgröße, die Informationen zu mehreren Gefährdungen liefert, sind Dehnungen (siehe Kapitel 7.B3). Dehnmessstreifen – oder andere Messtechnologien, die Dehnungen messen – liefern zum Beispiel bei einem Einsatz am Brückendeck aus Stahlbeton Informationen zu den Einwirkungen (indirekt, mittels B-WIM Technologie), der Ermüdung der Bewehrung (durch Messung der Belastungszyklen), zum Einfluss von Drahtbrüchen bei fortgeschrittenem Schaden und zu exzessiven Verformungen. Die Summe des Nutzens ist beispielhaft in Abb. 9.191 gezeigt. Viele andere Messtechniken für die permanente Bauwerksüberwachung (SHM) besitzen solche multiple Einsatzzwecke, während die NDT Methoden oftmals einen spezifischen Einsatzzweck haben.

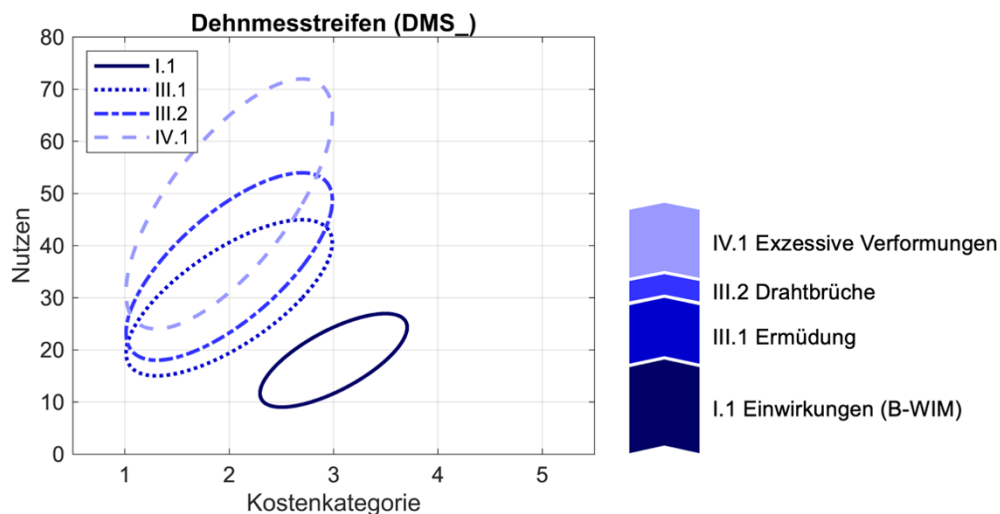


Abb. 9.191 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der multiplen Nutzen von Dehnmessstreifen

9.3.2.2 Monitoringkonzepte mit mehreren Messtechniken

Die Kombination mehrerer Messtechniken ist oftmals interessant um die individuellen Vorteile der Messtechniken miteinander zu kombinieren. Die Kombination mehrerer Technologien, die separat nicht verlässlich präzise Resultate liefern, kann die Qualität der Messdaten und damit verbunden die Wahrscheinlichkeit einer Schadensdetektion erheblich verbessern. Einige Beispiele der Kombinationen sind:

Kombination von Georadar mit Röntgenstrahlen kann eingesetzt werden um interne (eingebettete) Vorspannkabel mit Wellblechumhüllung zu untersuchen. Dabei wird der Georadar eingesetzt um die Vorspannkabel zu lokalisieren und die Röntgenstrahlen (Gammastrahlen), um den Zustand der Kabel zu prüfen. Des weiteren können die Resultate der Gammastrahlen mit Computertomographie-Techniken weiter verfeinert werden.

Kombination von Georadar mit Potentialfeldmessungen kann die Detektion von korrodierten Bewehrungsstäben erheblich verbessern, im Vergleich mit den individuellen Techniken.

Kombination von permanenten Strukturüberwachungsdaten mit Computermodellen kann dabei helfen, den Einfluss der Daten auf das Tragwerksverhalten zu analysieren. Diese Analyse ist hilfreich um tolerierbare Schäden von riskanten Zuständen der Kunstbauten zu unterscheiden.

Kombination von Dehnmessstreifen und Beschleunigungssensoren ermöglicht es, den globalen Tragwerkszustand zu überprüfen und gleichzeitig eine ungefähres Lastmodell der Verkehrslasten zu erstellen. Somit kann die Kritikalität von Schäden besser abgeschätzt und auch realistische Werte für die dynamische Amplifikation eruiert werden.

Eine weitere Kombination von zerstörungsfreien Techniken für langsam fortschreitende Schäden an Stahlbeton-Brückendecks wird im Detail erklärt.

Beispiel: Langsam fortschreitende Schädigung an Stahlbeton-Brückendecks

Es gibt verschiedene Messtechnologien zur Erkennung langsam fortschreitender Schäden an Brückendecks (wie z.B. Korrosion und ermüdungsbedingte Rissbildung). Die Fusion mehrerer dieser Technologien, die einzeln nicht immer genaue Ergebnisse liefern, kann die Präzision der resultierenden Bewertung des Zustands des überwachten Objekts erheblich verbessern.

Eine solche Kombination von elektrischem Widerstand, Impuls-Echo, Ultraschall und Georadar wurde in den USA entwickelt [509]. Die Integration dieser Techniken in einem Gehäuse (RABIT) und die Kombination mit Robotik und GPS erlaubt es die Produktivität (Ausmass der gemessenen Fläche pro Stunde) im Vergleich mit einzelnen Sensoren zu verbessern. Dementsprechend sind die Kosten geringer als die Summe der einzelnen Komponenten und der Nutzen ist im Vergleich zu den jeweiligen Technologien auch grösser, wie in Abb. 9.192 gezeigt.

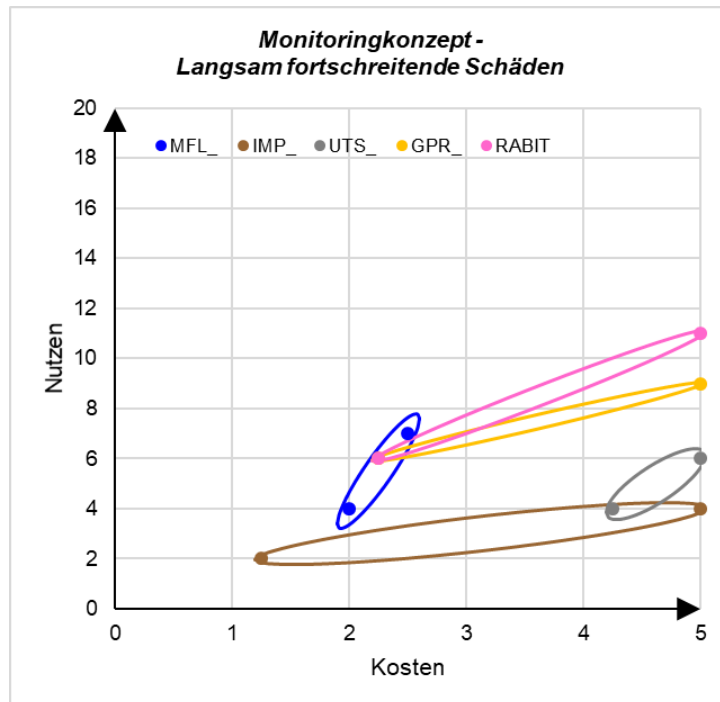


Abb. 9.192 Auswertung der Kosten-Nutzen-Analyse der einzelnen Messtechniken mit einer Technologiekombination (RABIT). Der Reifegrad ist in dieser Analyse nicht berücksichtigt, und der Nutzen besteht dementsprechend ausschliesslich aus der Wahrscheinlichkeit der Schadenserkennung.

9.3.3 Literaturverzeichnis

Andere Literatur / Forschungsberichte

- [491] Vernay D., Favre F.-X., Smith I.F.C. Robust model updating methodology for estimating worst-case load capacity of existing bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* 2018;1–18.
- [492] Sawicki B, Brühwiler E. Long-term strain measurements of traffic and temperature effects on an RC bridge deck slab strengthened with an R-UHPFRC layer. *J Civil Struct Health Monit* 2020;10:333–44. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00387-3>.
- [493] Alampalli S, Frangopol DM, Grimson J, Halling MW, Kosnik DE, Lantsoght EOL, et al. Bridge Load Testing: State-of-the-Practice. *Journal of Bridge Engineering* 2021;26:03120002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001678).
- [494] Ye C., Kuok S.-C., Butler L.J., Middleton C.R. Implementing bridge model updating for operation and maintenance purposes: examination based on UK practitioners' views. *Structure and Infrastructure Engineering* 2022;18:1638–57.
- [495] Bayane I, Mankar A, Brühwiler E, Sørensen JD. Quantification of traffic and temperature effects on the fatigue safety of a reinforced-concrete bridge deck based on monitoring data. *Engineering Structures* 2019;196:109357. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109357>.
- [496] Brynjarsdóttir J, O'Hagan A. Learning about physical parameters: The importance of model discrepancy. *Inverse Problems* 2014;30:114007.
- [497] Pasquier R, Smith IFC. Iterative structural identification framework for evaluation of existing structures. *Engineering Structures* 2016;106:179–94.
- [498] Pai, S.G.S., Reuland, Y. and Smith, I.F.C., 2019. Data-interpretation methodologies for practical asset-management. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 8(2), p.36.
- [499] Martín-Sanz, H., Tassis, K., Dertimanis, V.K., Avendaño-Valencia, L.D., Brühwiler, E. and Chatzi, E., 2020. Monitoring of the UHPFRC strengthened Chillon viaduct under environmental and operational variability. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(1), pp.138-168.
- [500] Pasquier R, Smith IFC. Robust system identification and model predictions in the presence of systematic uncertainty. *Advanced Engineering Informatics* 2015;29:1096–109.
- [501] Rebba R, Mahadevan S. Validation of models with multivariate output. *Reliability Engineering & System Safety* 2006;91:861–71.

-
- [502] Reuland, Y., Lestuzzi, P. and Smith, I.F.C., 2017. Data-interpretation methodologies for non-linear earthquake response predictions of damaged structures. *Frontiers in Built Environment*, 3, p.43.
-
- [503] Katafygiotis LS, Papadimitriou C, Lam H-F. A probabilistic approach to structural model updating. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 1998;17:495–507.
-
- [504] Lam H-F, Yang J, Au S-K. Bayesian model updating of a coupled-slab system using field test data utilizing an enhanced Markov chain Monte Carlo simulation algorithm. *Engineering Structures* 2015;102:144–55.
-
- [505] Goulet J-A, Smith I.F.C. Structural identification with systematic errors and unknown uncertainty dependencies. *Computers & Structures* 2013;128:251–8.
-
- [506] Pai S.G.S., Smith I.F.C. Methodology Maps for Model-Based Sensor-Data Interpretation to Support Civil-Infrastructure Management. *Frontiers in Built Environment* 2022;8.
-
- [507] Martakis, P., Movsessian, A., Reuland, Y., Pai, S.G., Quqa, S., Garcia Cava, D., Tcherniak, D. and Chatzi, E., 2022. A semi-supervised interpretable machine learning framework for sensor fault detection. *Smart Struct. Syst. Int. J.*, 29, pp.251-266.
-
- [508] Gucunski, N., Kee, S., La, H., Basily, B. and Maher, A., 2015. Delamination and concrete quality assessment of concrete bridge decks using a fully autonomous RABIT platform. *Structural Monitoring and Maintenance*, 2(1), pp.19-34.
-
- [509] Gucunski, N., Boone, S.D., Zobel, R., Ghasemi, H., Parvardeh, H. and Kee, S.H., 2014, April. Nondestructive evaluation inspection of the Arlington Memorial Bridge using a robotic assisted bridge inspection tool (RABIT). In *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security 2014* (Vol. 9063, pp. 148-160). SPIE.
-

Glossar

Abkürzung	Begriff	Bedeutung
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen	Elektromechanische Installationen
CT	Computertomografie	bildgebendes Messverfahren
DBK	Digitale Bildkorrelation	optisches Messverfahren
DOP	Dilution of Precision	Verringerung der Genauigkeit
DSS	Distributed Strain Sensing	Verteilte Temperatursensoren
EDM	Elektrooptische Distanzmesser	optisches Messgerät
FBG	Fibre Bragg Grating	faseroptischer Sensor
FEM	Finite-Elemente-Methode	numerisches Berechnungsverfahren
FOS	Faseroptische Sensoren	optische Messgeräte
FPI	Fabry-Perot-Interferometer	faseroptischer Sensor
GNSS	Global Navigation Satellite System	globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System	globales Positionierungssystem
IMU	Inertial Measurement Unit	Inertialmesssysteme
LVDT	Linear Variable Differential Transforme	Lineare Stelltransformatoren
MEM	Micro Electro Mechanical System	Sensortechnologie im Chipformat
RTD	Resistance Temperature Detector	Widerstandstemperaturfühler
SHM	Structural Health Monitoring	Tragwerksüberwachung
UHPFRC	Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete	ultrahochfestem, faserverstärktem Zementverbundstoff
ZaP	Zerstörungsarme Prüfmethode	
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfmethode	

Auflistung der Änderungen

Ausgabe	Version	Datum	Änderungen
2024	1.00	24.05.2024	Erste Ausgabe

