

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Zustandsbewertung und Strukturüberwachung von Brücken	5
2.1	Schäden an Brücken	6
2.2	Methoden der Zustandsbewertung	9
2.2.1	Bauwerksprüfung	9
2.2.2	Statische Bewertung	10
2.2.3	Werkstoffprüfung und zerstörungsfreie Prüfung	11
2.2.4	Brückenmonitoring	12
2.3	Strukturüberwachung	14
2.3.1	Allgemeines	14
2.3.2	Systemmodelle	16
2.3.3	Variabilität der Einwirkungen und des Tragverhaltens	22
2.3.4	Sensortechnologien	25
2.3.5	Signalmerkmale und datenbasierte Modelle	26
2.3.6	Verortung der Arbeit in der Literatur	35
3	Anomalieerkennung für die Strukturüberwachung	37
3.1	Einführung in die Anomalieerkennung	37
3.1.1	Definition von Anomalien, Ausreißern und Neuheiten	37
3.1.2	Methoden für die Anomalieerkennung	39
3.1.3	Grundbegriffe der Statistik und des maschinellen Lernens	41
3.2	Besonderheiten der Anomalieerkennung bei der Strukturüberwachung	49
3.2.1	Ausgangssituation	49
3.2.2	Klassen von Modellen	55
3.3	Probabilistische Modelle	58
3.3.1	Univariaten Dichteverteilungen	58
3.3.2	Multivariate Normalverteilung und Mahalanobis-Distanz	60
3.3.3	Dichterverteilungen für Anomaliewerte	62
3.4	Regressionsmodelle	65
3.4.1	Lineare Regression	65
3.4.2	Entscheidungsbäume mit linearer Regression	67
3.4.3	Regression mit neuronalen Netzen	70
3.5	Rekonstruktionsmodelle	72
3.5.1	Hauptkomponentenanalyse	72
3.5.2	Autoencoder	76

3.6	Gegenüberstellung der betrachteten Modelle	78
3.7	Bewertung von Modellen zur Anomalieerkennung	79
3.7.1	Sensitivität, Spezifität und Genauigkeit	79
3.7.2	Grenzwertoptimierungskurve	81
3.7.3	Schadensindex	82
4	Signalmerkmale R- und M-Signatur	85
4.1	Signalanteile beim Brückenmonitoring	85
4.2	Signalsegmentierung und Datenvorverarbeitung	86
4.3	Definition der R-Signatur	88
4.4	Definition der M-Signatur	93
5	Numerische Untersuchungen	97
5.1	Bauwerk	97
5.1.1	Übersicht	97
5.1.2	Messanlage	99
5.1.3	Extrahierte Merkmale	100
5.2	Finite-Elemente-Berechnungen	103
5.2.1	Übersicht zu simulierten Datensätzen SDV, SD1 & SD2	103
5.2.2	Modell und Schadenssimulation	104
5.2.3	Verkehrseinwirkungen	105
5.2.4	Temperatureinwirkungen	108
5.2.5	Interpolationsmodelle	110
5.2.6	Generierung von Messdaten	114
5.3	R-Signatur	117
5.3.1	Aufbau der Untersuchungen	117
5.3.2	Voruntersuchungen (SDV)	119
5.3.3	Datenerkundung (SD1 & SD2)	123
5.3.4	Anomalieerkennung mit der Hauptkomponentenanalyse (SD1)	127
5.3.5	Einfluss der Anzahl an Hauptkomponenten (SD1)	130
5.3.6	Einfluss der Sensoranzahl (SD1)	132
5.3.7	Unterschiedliche Fehlernormen als Anomaliewerte (SD1)	133
5.3.8	Verbleibende Abhängigkeiten der Anomaliewerte (SD1)	134
5.3.9	Aggregierter Anomaliewert je Tag (SD1)	136
5.3.10	Anomalieerkennung mit der Hauptkomponentenanalyse (SD2)	137
5.4	M-Signatur	138
5.4.1	Aufbau der Untersuchungen	138
5.4.2	Datenerkundung (SD1 & SD2)	139
5.4.3	Anomalieerkennung mit der Hauptkomponentenanalyse (SD1)	142
5.4.4	Einfluss der Sensoranzahl (SD1)	144
5.4.5	Verbleibende Abhängigkeiten der Anomaliewerte (SD1)	144
5.4.6	Anomalieerkennung mit der Hauptkomponentenanalyse (SD2)	147
5.5	Temperaturabhängige Auflagerverschiebungen	147
5.5.1	Aufbau der Untersuchungen	147
5.5.2	Datenerkundung (SD1)	148
5.5.3	Anomalieerkennung mit linearer Regression (SD1)	148

5.6	Eigenfrequenzen	150
5.6.1	Aufbau der Untersuchungen	150
5.6.2	Datenerkundung (SD1 & SD2)	151
5.6.3	Anomalieerkennung mit Entscheidungsbaum (SD1)	152
5.7	Kombinierte Betrachtung mehrerer Merkmale	154
5.7.1	Aufbau der Untersuchungen	154
5.7.2	Datenerkundung (SD1 & SD2)	156
5.7.3	Anomalieerkennung mit Autoencoder (SD1)	157
5.7.4	Anomalieerkennung mit Autoencoder (SD2)	160
5.8	Ansätze zur Schadenslokalisierung	162
5.8.1	Rekonstruktionsfehler je Merkmal	163
5.8.2	Durchschnittlicher Rekonstruktionsfehler der R-Werte je Sensor	166
5.9	Schlussfolgerungen	167
6	Anwendung an einer Stahlbrücke	171
6.1	R-Signatur	171
6.1.1	Datenbereinigung	171
6.1.2	Datenerkundung	176
6.1.3	Anomalieerkennung mit der Hauptkomponentenanalyse	179
6.1.4	Interpretation der gefundenen Anomalien	182
6.2	M-Signatur	185
6.2.1	Datenbereinigung	185
6.2.2	Datenerkundung	186
6.2.3	Anomalieerkennung mit der Hauptkomponentenanalyse	188
6.2.4	Interpretation der gefundenen Anomalien	189
6.3	Temperaturabhängige Auflagerverschiebungen	191
6.3.1	Datenerkundung	191
6.3.2	Anomalieerkennung mit linearer Regression	192
6.3.3	Interpretation der gefundenen Anomalien	194
6.4	Eigenfrequenzen	195
6.4.1	Datenbereinigung	195
6.4.2	Datenerkundung	195
6.4.3	Anomalieerkennung mit MLP-Regression	197
6.4.4	Interpretation der gefundenen Anomalien	198
6.5	Kombinierte Betrachtung mehrerer Merkmale	201
6.5.1	Datenbereinigung	201
6.5.2	Datenerkundung	201
6.5.3	Anomalieerkennung mit Autoencoder	205
6.5.4	Interpretation der gefundenen Anomalien	208
6.6	Schlussfolgerungen	211
7	Zusammenfassung und Ausblick	215
7.1	Zusammenfassung	215
7.2	Ausblick	220

Nomenklatur	223
--------------------	------------

Abbildungsverzeichnis	231
Tabellenverzeichnis	247
Literaturverzeichnis	251
Anhang A Dichteverteilungsfunktionen	275
A.1 Log-Normalverteilung	275
A.2 χ^2 -Verteilung	275
A.3 Verallgemeinerte Gammaverteilung	276
Anhang B Ergänzungen zu numerischen Untersuchungen	277
B.1 R-Signatur	277
B.1.1 Modell: SD1-R-MD	277
B.1.2 Modell: SD1-R-PCA1	278
B.1.3 Modell: SD1-R-PCA2	280
B.1.4 Modell: SD1-R-PCA3	280
B.1.5 Modell: SD1-R-PCA4	282
B.1.6 Modell: SD1-R-PCA5	284
B.1.7 Modell: SD1-R-PCA6	285
B.1.8 Modell: SD1-R-PCA7	287
B.1.9 Modell: SD2-R-PCA1	289
B.1.10 Modell: SD2-R-PCA2	292
B.2 M-Signatur	294
B.2.1 Modell: SD1-M-MD	294
B.2.2 Modell: SD1-M-PCA1	296
B.2.3 Modell: SD1-M-PCA2	297
B.2.4 Modell: SD1-M-PCA3	299
B.2.5 Modell: SD1-M-PCA4	301
B.2.6 Modell: SD2-M-PCA1	302
B.3 Temperaturabhängige Auflagerverschiebungen	305
B.3.1 Modell: SD1-A-LR1	305
B.3.2 Modell: SD1-A-LR2	309
B.4 Eigenfrequenzen	311
B.4.1 Modell: SD1-E-TLM1	311
B.4.2 Modell: SD1-E-TLM2	314
B.5 Kombinierte Betrachtung mehrerer Merkmale	317
B.5.1 Modell: SD1-K-AE	317
B.5.2 Modell: SD2-K-AE	320
Anhang C Ergänzungen zur Anwendung an einer Stahlbrücke	325
C.1 R-Signatur – Modell: BM-R-PCA	325
C.2 M-Signatur – Modell: BM-M-PCA	326
C.3 Temperaturabhängige Auflagerverschiebungen – Modell: BM-A-LR . .	328
C.4 Eigenfrequenzen – Modell: BM-E-MLP	331
C.5 Kombinierte Betrachtung mehrerer Merkmale – Modell: BM-K-AE . .	334