

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Glossar</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Ziele . . . . .	2
1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Stand der Erkenntnisse</b>	<b>5</b>
2.1 Überblick . . . . .	5
2.2 Typische Schäden und Schädigungsprozesse von Bauwerken . . . . .	5
2.2.1 Fehler und Mängel . . . . .	5
2.2.2 Entstehung von Bauschäden . . . . .	6
2.2.3 Physikalische Schädigung von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken . . . . .	6
2.2.4 Korrosion . . . . .	7
2.2.5 Ermüdung . . . . .	9
2.3 Lebensdauermanagement von Ingenieurbauwerken . . . . .	10
2.3.1 Überwachung und Prüfung nach DIN 1076 . . . . .	11
2.3.2 Planung von Stichprobenentnahmen und Messungen . . . . .	12
2.3.3 Erfassung und Bewertung von Schäden nach RI-EBW-PRÜF . . . . .	13
2.3.4 Wertung der bisherigen Vorgehensweise . . . . .	14
2.4 Monitoring von Ingenieurbauwerken . . . . .	15
2.4.1 Möglichkeiten des Bauwerksmonitorings . . . . .	16
2.4.2 Planung von Monitoringmaßnahmen . . . . .	17
2.4.3 Auswahl von Messgrößen und Sensoren . . . . .	18
2.4.4 Verarbeitung und Auswertung von Messdaten aus dem Monitoring . . . . .	19
2.4.5 Bauwerksmonitoring als Grundlage der Bauwerksbewertung . . . . .	20
2.5 Probabilistische Verfahren zur Bauwerksbewertung . . . . .	20
2.5.1 Grundlagen . . . . .	21
2.5.2 Festlegung von Basisvariablen . . . . .	23
2.5.3 Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Zuverlässigkeit . . . . .	31
2.5.4 Modellierung von Systemen . . . . .	35
2.5.5 Anwendungen der probabilistischen Verfahren . . . . .	41

<b>3</b>	<b>Verbesserung der Bauwerksbewertung und Ableitung adaptiver Monitoringstrategien</b>	<b>43</b>
3.1	Quantitative Bauwerksbewertung . . . . .	43
3.2	Ansatzpunkte für adaptive Monitoringstrategien . . . . .	44
3.3	Der Bauwerksbewertungskreislauf . . . . .	47
3.4	Das Programmsystem PROBILAS . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Das probabilistische Modell</b>	<b>51</b>
4.1	Ablauf der Bauwerksanamnese . . . . .	51
4.2	Modellierung als Gesamtmodell oder in Teilmodellen . . . . .	52
4.3	Fehlerbaum und Versagenspunkte . . . . .	53
4.3.1	Versagensmechanismen . . . . .	54
4.3.2	Versagensarten . . . . .	55
4.4	Grenzzustandsgleichungen . . . . .	56
4.5	Stochastisches Modell und Klassifizierung der Basisvariablen . . . . .	58
4.6	Indikatorkomponenten . . . . .	60
4.7	Berücksichtigung von Schäden im Modell . . . . .	62
4.8	Festlegung der Zielzuverlässigkeit . . . . .	62
4.9	Fazit und programmtechnische Umsetzung . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Probabilistische Bauwerksbewertung auf Grundlage von Messdaten</b>	<b>67</b>
5.1	Auswahl von Berechnungsverfahren und Bewertungsintervall . . . . .	67
5.2	Bewertung des aktuellen Bauwerkszustands . . . . .	68
5.2.1	Vergleich der Berechnungsmodelle . . . . .	70
5.3	Prognose des zukünftigen Bauwerkszustands . . . . .	71
5.3.1	Herkömmliche Methoden . . . . .	71
5.3.2	Entwickeltes Verfahren auf Grundlage des probabilistischen Modells . . . . .	72
5.3.3	Definition von Modifikationsfunktionen . . . . .	73
5.3.4	Vergleich der Methoden zur Prognose der Entwicklung der Zuverlässigkeit geschädigter Bauteile . . . . .	74
5.4	Auswertung und Deutung der Berechnungsergebnisse . . . . .	77
5.4.1	Ermittlung der Zuverlässigkeit von Komponenten und Redundanzen . . . . .	78
5.4.2	Ermittlung der Signifikanz von Basisvariablen und Komponenten . . . . .	80
5.4.3	Sicherheitsmarge . . . . .	81
5.5	Fazit und programmtechnische Umsetzung . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>85</b>
6.1	Elemente eines Stichprobenplans für messende Prüfung . . . . .	85
6.2	Kalibrierungsplan . . . . .	86
6.3	Adaptive Festlegung des Stichprobenumfangs . . . . .	87
6.4	Überprüfung des notwendigen Stichprobenumfangs . . . . .	90
6.5	Kalibrierungsmessung und Aktualisierung des probabilistischen Modells . . . . .	91
6.6	Fazit und programmtechnische Umsetzung . . . . .	93

<b>7</b>	<b>Adaptive Monitoringstrategie und Monitoringplan</b>	<b>95</b>
7.1	Elemente der adaptiven Monitoringstrategie . . . . .	95
7.1.1	Auswahl der Messgrößen . . . . .	96
7.1.2	Ableitung der Monitoringintensität . . . . .	97
7.1.3	Berücksichtigung zeitlicher Veränderungen in der Strategie . . . . .	98
7.1.4	Überführung der Monitoringstrategie in den Monitoringplan . . . . .	99
7.2	Überprüfung der Messunsicherheit von Sensoren . . . . .	100
7.3	Fazit und programmtechnische Umsetzung . . . . .	100
<b>8</b>	<b>Untersuchung der Messwerte und Anpassung des probabilistischen Modells</b>	<b>103</b>
8.1	Erkennung von negativen Entwicklungen und Trends . . . . .	103
8.1.1	Vergleich der Verfahren zur Trenderkennung . . . . .	106
8.1.2	Einordnung der Trenderkennung . . . . .	109
8.2	Gewinnung stochastischer Informationen aus Messdaten . . . . .	110
8.2.1	Datenreduktion . . . . .	110
8.2.2	Methoden zur Verteilungsanpassung an die Messdaten . . . . .	112
8.2.3	Bildung einer gemeinsamen Verteilung über alle Monitoringphasen . . . . .	113
8.2.4	Einfluss des Verteilungstyps und des Stichprobenumfangs auf die Ergebnisse von Zuverlässigkeitsanalysen . . . . .	115
8.2.5	Berücksichtigung neuer stochastischer Information im Gesamtmodell . . . . .	118
8.3	Fazit und programmtechnische Umsetzung . . . . .	118
8.3.1	Aufstellung des Monitoringplans . . . . .	119
8.3.2	Erkennung von Schäden . . . . .	119
8.3.3	Verteilungsanpassung an die Messdaten . . . . .	120
8.3.4	Datenübermittlung an PROBILAS Server . . . . .	120
8.3.5	Erforderliche Vorkenntnisse des Anwenders . . . . .	121
<b>9</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>123</b>
9.1	Bauwerksbeschreibung . . . . .	123
9.1.1	Durchführung der numerischen Simulationen . . . . .	125
9.2	Entwicklung des probabilistischen Modells . . . . .	126
9.2.1	Anamnese . . . . .	126
9.2.2	Entwicklung der Versagensarten und -mechanismen . . . . .	128
9.2.3	Stochastisches Modell . . . . .	130
9.2.4	Indikatorcomponenten . . . . .	131
9.3	Erste Bauwerksbewertung . . . . .	132
9.3.1	Ergebnisse . . . . .	132
9.3.2	Planung und Durchführung des Monitorings . . . . .	133
9.3.3	Annahmen für die Simulation von Messdaten . . . . .	134
9.3.4	Gewinnung der stochastischen Information aus den Messwerten . . . . .	134
9.3.5	Bewertung des aktuellen Zustands nach einem Bewertungsintervall . . . . .	134
9.3.6	Bestimmung der Prüfgrößen für die Trenderkennung . . . . .	136
9.4	Bauwerksbewertung des geschädigten Bauwerks . . . . .	137
9.4.1	Schädigung des Bauwerks an einem nicht gemessenen Stab (Szenario I) . . . . .	138

## *Inhaltsverzeichnis*

---

9.4.2	Schädigung des Bauwerks an mehreren Stellen (Szenario II) . . . . .	143
9.4.3	Einbeziehung neuer Schwachstellen (Szenario III) . . . . .	146
9.5	Übertragbarkeit des Anwendungsbeispiels . . . . .	148
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
10.1	Zusammenfassung . . . . .	151
10.2	Ausblick . . . . .	152
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang</b>	<b>161</b>