

## Inhalt

|          |  |           |              |   |           |
|----------|--|-----------|--------------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b> .....  | <b>7</b>  | <b>3.2.1</b> | <b>Hydraulische Stellglieder</b> .....                                  | <b>21</b> |
| 1.1      | Forschungsanlass. ....   | 7         | 3.2.2        | Hydraulische Aktuatoren. ....   | 23        |
| 1.2      | Beispiele bereits realisierter adaptiver Tragwerke .....   | 8         | 3.2.3        | Evaluierung und Auswahl des Stellgliedsystems .....                     | 24        |
| 1.2.1    | Berliner Brücke in Duisburg-Meiderich (1970er Jahre) .....   | 8         | <b>4</b>     | <b>Entwicklung einer adaptiven Regelung</b> .....                       | <b>25</b> |
| 1.2.2    | Aktive Verformungskontrolle (1980-1990er Jahre) .....  | 8         | 4.1          | Einführung in die Fuzzy-Logic .....                                     | 26        |
| 1.2.3    | Fußgängerbrücke am Duisburger Innenhafen (1999) .....  | 8         | 4.1.1        | Fuzzy-Set-Theorie (Fuzzy-Mengen) ...                                    | 26        |
| 1.2.4    | Stuttgarter Träger (2002) .....  | 8         | 4.1.2        | Fuzzy-Variablen .....   | 27        |
| 1.2.5    | Organic Prestressing (2002-2008) ....  | 8         | 4.1.3        | Wissensbasis .....  | 27        |
| 1.2.6    | Konzept zur Entwicklung adaptiv geregelter Spannbetontragwerke mit externer Vorspannung (2006) ..... | 10        | 4.1.4        | Das MA-Modell .....   | 27        |
| 1.2.7    | Adaptive Prestressing of Concrete Beams (2010) .....   | 11        | 4.1.5        | Das TSK-Modell .....  | 28        |
| 1.2.8    | „Stuttgart SmartShell“ (2012) .....  | 11        | 4.2          | Adaptive Fuzzy-Regelungssysteme .....                                   | 29        |
| 1.3      | Ziel des Projektes .....   | 11        | 4.3          | Zur Regelung von Systemen mit adaptiver Vorspannung. ....               | 29        |
| 1.4      | Gliederung des Berichts .....  | 11        | <b>5</b>     | <b>Experimentelle Untersuchungen</b> .....                              | <b>32</b> |
| <b>2</b> | <b>Entwicklung eines Sensorsystems</b> .....   | <b>12</b> | 5.1          | Allgemeiner Versuchsaufbau .....  | 33        |
| 2.1      | Einleitung .....   | 12        | 5.1.1        | Regelungsaufbau (Kaskadenregelung) .....                                | 33        |
| 2.2      | Übersicht über faseroptische Sensoren und Stand der Technik .....                                    | 13        | 5.1.2        | Anbindung der Regelung .....  | 33        |
| 2.2.1    | Prinzip und Vorteile faseroptischer Messung .....  | 13        | 5.1.3        | Analoger PID-Regler .....   | 34        |
| 2.2.2    | Sensoren des Microbend-Prinzips ....   | 13        | 5.1.4        | Servogeregelte Hydraulikanlage .....                                    | 34        |
| 2.2.3    | Interferometrische faseroptische Sensoren .....  | 14        | 5.1.5        | Aktuatoren .....  | 36        |
| 2.2.4    | Evaluierung und Auswahl .....  | 17        | 5.1.6        | Prüfstand .....   | 37        |
| 2.2.5    | Komponenten und Funktionsweise des Sensorsystems .....   | 17        | 5.2          | Versuchsträger 1: Aluminium-Traversal .....                             | 38        |
| <b>3</b> | <b>Entwicklung eines Stellglied-systems</b> .....  | <b>19</b> | 5.2.1        | Vorteile der Traverse als Versuchsträger mit adaptiver Vorspannung .... | 38        |
| 3.1      | Elektromechanische Stelleinrichtungen .....  | 20        | 5.2.2        | Systemdaten .....   | 38        |
| 3.2      | Hydraulische Stelleinrichtungen .....  | 21        | 5.2.3        | Spannlitzen .....   | 40        |
|          |  |           | 5.2.4        | Verankerungs- und Umlenkstellen der Spannlitzen. ....                   | 40        |
|          |  |           | 5.2.5        | Messstellen und Sensoren .....  | 42        |
|          |  |           | 5.2.6        | Zielsetzung der Regelung .....  | 42        |

|        |   |    |       |   |     |
|--------|---|----|-------|---|-----|
| 5.2.7  | Aufbau des Fuzzy-Reglers . . . . .  | 43 | 7     | Vorschlag zur Umsetzung bei einer Bestandsbrücke . . . . .              | 96  |
| 5.2.8  | Simulationen in Matlab® . . . . .   | 47 |       |   |     |
| 5.2.9  | Versuchsdurchführung . . . . .  | 47 | 7.1   | Vorgehen bei einer Beispielbrücke . . .                                 | 96  |
| 5.2.10 | Ergebnisse . . . . .  | 49 | 7.2   | Bestandteile des adaptiven Vorspannsystems . . . . .                    | 98  |
| 5.2.11 | Zwischenbilanz . . . . .  | 58 | 7.2.1 | Spannglieder. . . . .   | 98  |
| 5.3    | Versuchsträger 2: Spannbetonplattenbalken . . . . .                         | 59 | 7.2.2 | Nachträglich angebrachte Umlenk- und Verankerungskonstruktionen . . . . | 98  |
| 5.3.1  | Systemdaten . . . . .   | 61 | 7.2.3 | Sensorsystem und Messtechnik. . . . .                                   | 99  |
| 5.3.2  | Spannlitzen . . . . .   | 62 | 7.2.4 | Hydraulisches Aktuatorensystem . . . .                                  | 100 |
| 5.3.3  | Verankerungs- und Umlenkstellen der Spannlitzen. . . . .                    | 63 | 7.2.5 | Hardware und Software . . . . .   | 100 |
| 5.3.4  | Messstellen und Sensoren . . . . .  | 65 | 8     | Zusammenfassung und Ausblick. . . . .                                   | 101 |
| 5.3.5  | Zielsetzung der Regelung . . . . .  | 66 |       |   |     |
| 5.3.6  | Aufbau des Fuzzy-Reglers . . . . .  | 68 |       | Literatur. . . . .  | 102 |
| 5.3.7  | Versuchsdurchführung . . . . .  | 74 |       |   |     |
| 5.3.8  | Ergebnisse der Versuche am Plattenbalken im ungerissenen Zustand. . . . .   | 76 |       | Internet-Quellen . . . . .  | 104 |
| 5.3.9  | Ergebnisse der Versuche am vorgeschädigten Plattenbalken . . . . .          | 85 |       |   |     |
| 5.3.10 | Zwischenbilanz . . . . .  | 87 |       |   |     |
| 5.4    | Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen . . . . . | 90 |       |   |     |
| 6      | Auslegung und Anwendungsgebiete . . . . .                                   | 90 |       |   |     |
| 6.1    | Fail-Safe-Konzepte . . . . .  | 90 |       |   |     |
| 6.1.1  | Sensorsystem . . . . .  | 90 |       |   |     |
| 6.1.2  | Stellgliedsystem und Spanngliedausfälle . . . . .                           | 90 |       |   |     |
| 6.1.3  | Stromausfälle . . . . .   | 91 |       |   |     |
| 6.2    | Anwendungsbeispiele . . . . .   | 91 |       |   |     |
| 6.2.1  | Neubau . . . . .  | 92 |       |   |     |
| 6.2.2  | Verstärkung . . . . .   | 95 |       |   |     |