

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                               |           |
|----------|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | Aufbau der Autobetonpumpe . . . . .           | 2         |
| 1.1.1    | Verteilermast . . . . .                       | 4         |
| 1.1.2    | Abstützung . . . . .                          | 5         |
| 1.1.3    | Pumpeinheit . . . . .                         | 6         |
| 1.1.4    | Rechner- und Kommunikationsstruktur . . . . . | 7         |
| 1.2      | Stand der Technik . . . . .                   | 8         |
| 1.2.1    | Modellierung . . . . .                        | 9         |
| 1.2.2    | Aktive Schwingungsdämpfung . . . . .          | 13        |
| 1.2.3    | Geometriesteuerung . . . . .                  | 17        |
| 1.3      | Ziele der Arbeit . . . . .                    | 20        |
| 1.4      | Aufbau der Arbeit . . . . .                   | 21        |
| <br>     |                                               |           |
| <b>2</b> | <b>Modellierung des Verteilmasts</b>          | <b>23</b> |
| 2.1      | Modellstruktur . . . . .                      | 23        |
| 2.1.1    | Topologie und Koordinaten . . . . .           | 24        |
| 2.1.2    | Bewegungsgleichungen . . . . .                | 27        |
| 2.2      | Flexible Körper . . . . .                     | 30        |
| 2.2.1    | Kinematik des flexiblen Körpers . . . . .     | 31        |
| 2.2.2    | Kinetik des flexiblen Körpers . . . . .       | 34        |
| 2.2.3    | Wahl der Ansatzfunktionen . . . . .           | 37        |
| 2.3      | Mehrkörpersystem . . . . .                    | 43        |
| 2.3.1    | Gelenke . . . . .                             | 44        |
| 2.3.2    | Kinematik der Referenzsysteme . . . . .       | 45        |
| 2.3.3    | Minimalform . . . . .                         | 48        |
| 2.3.4    | Umlenkmechanismen . . . . .                   | 50        |
| 2.4      | Hydraulische Aktoren . . . . .                | 52        |
| 2.4.1    | Hydrauliksystem . . . . .                     | 53        |
| 2.4.2    | Proportionalventil . . . . .                  | 55        |
| 2.4.3    | Zylinder . . . . .                            | 56        |
| 2.4.4    | Schwenkkopf . . . . .                         | 60        |
| 2.5      | Sensorik . . . . .                            | 63        |
| 2.6      | Gesamtsystem . . . . .                        | 64        |
| 2.6.1    | Kopplung der Teilsysteme . . . . .            | 65        |
| 2.6.2    | Linearisierung . . . . .                      | 66        |

|          |                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 2.6.3    | Vertikal- und Horizontaldynamik . . . . .                 | 68         |
| 2.6.4    | Modellreduktion . . . . .                                 | 69         |
| 2.7      | Implementierung . . . . .                                 | 75         |
| <b>3</b> | <b>Parameteridentifikation und Modellvalidierung</b>      | <b>79</b>  |
| 3.1      | Parameteridentifikation . . . . .                         | 80         |
| 3.1.1    | Dämpfung . . . . .                                        | 80         |
| 3.1.2    | Hydraulikkennlinien . . . . .                             | 80         |
| 3.1.3    | Antriebsdynamik . . . . .                                 | 82         |
| 3.2      | Modellvalidierung . . . . .                               | 83         |
| 3.2.1    | Zylindersteifigkeit . . . . .                             | 83         |
| 3.2.2    | Eigenfrequenzen . . . . .                                 | 85         |
| 3.2.3    | Vertikaldynamik . . . . .                                 | 86         |
| 3.2.4    | Horizontaldynamik . . . . .                               | 88         |
| 3.2.5    | Statische Durchbiegung . . . . .                          | 88         |
| 3.3      | Zusammenfassung . . . . .                                 | 91         |
| <b>4</b> | <b>Aktive Schwingungsdämpfung</b>                         | <b>93</b>  |
| 4.1      | Achskompensation . . . . .                                | 94         |
| 4.2      | Vorsteuerung . . . . .                                    | 95         |
| 4.2.1    | Vorfilter . . . . .                                       | 97         |
| 4.2.2    | Kerbfilter . . . . .                                      | 99         |
| 4.2.3    | Zustandsberechnung . . . . .                              | 101        |
| 4.2.4    | Messergebnisse . . . . .                                  | 101        |
| 4.3      | Aktor- und Sensorplatzierung für die Regelung . . . . .   | 107        |
| 4.3.1    | Aktorplatzierung . . . . .                                | 109        |
| 4.3.2    | Sensorplatzierung . . . . .                               | 111        |
| 4.3.3    | Messergebnisse . . . . .                                  | 113        |
| 4.4      | Regelung . . . . .                                        | 115        |
| 4.4.1    | Zustandsregler . . . . .                                  | 116        |
| 4.4.2    | Beobachter . . . . .                                      | 117        |
| 4.4.3    | Implementierung . . . . .                                 | 119        |
| 4.4.4    | Robustheitsuntersuchungen . . . . .                       | 127        |
| 4.4.5    | Messergebnisse . . . . .                                  | 129        |
| 4.5      | Zusammenfassung . . . . .                                 | 134        |
| <b>5</b> | <b>Geometriesteuerung</b>                                 | <b>135</b> |
| 5.1      | Aufbau . . . . .                                          | 136        |
| 5.1.1    | Achsregelung . . . . .                                    | 137        |
| 5.1.2    | Kinematisches Modell . . . . .                            | 138        |
| 5.1.3    | Beschränktes, quadratisches Optimierungsproblem . . . . . | 139        |
| 5.2      | TCP-Steuerungsfunktionen . . . . .                        | 141        |
| 5.2.1    | Deformationskompensation . . . . .                        | 141        |

|          |                                                                   |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.2    | Betriebsmodi . . . . .                                            | 144        |
| 5.2.3    | Gewichtung der TCP-Geschwindigkeit . . . . .                      | 146        |
| 5.2.4    | Konfigurationssteuerung . . . . .                                 | 147        |
| 5.3      | Beschränkungen im Konfigurationsraum . . . . .                    | 150        |
| 5.3.1    | Gelenkbeschränkungen . . . . .                                    | 150        |
| 5.3.2    | Volumenstrombeschränkung . . . . .                                | 154        |
| 5.3.3    | Messergebnisse . . . . .                                          | 157        |
| 5.4      | Beschränkungen im Aufgabenraum . . . . .                          | 161        |
| 5.4.1    | Kollisionsvermeidung . . . . .                                    | 162        |
| 5.4.2    | Abstandsrechnung . . . . .                                        | 166        |
| 5.4.3    | Hüllvolumen-Approximation . . . . .                               | 169        |
| 5.4.4    | Ebenenbeschränkungen . . . . .                                    | 170        |
| 5.4.5    | Beschränkungen der Standsicherheit . . . . .                      | 171        |
| 5.4.6    | Simulationsergebnisse . . . . .                                   | 174        |
| 5.5      | Zusammenfassung . . . . .                                         | 181        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                            | <b>183</b> |
| <b>A</b> | <b>Anmerkungen zur Notation</b>                                   | <b>187</b> |
| <b>B</b> | <b>Ergänzungen zur Modellierung des Verteilmasts</b>              | <b>189</b> |
| B.1      | Integrale der flexiblen Körper . . . . .                          | 189        |
| B.2      | Körperdaten aus FE-Modell . . . . .                               | 190        |
| B.3      | Kraftelemente . . . . .                                           | 192        |
| B.4      | Kinematik der Umlenkmechanismen . . . . .                         | 194        |
| <b>C</b> | <b>Ergänzungen zur Schwingungsdämpfung und Geometriesteuerung</b> | <b>201</b> |
| C.1      | Differenzenmatrix Reglerkennfeld . . . . .                        | 201        |
| C.2      | Herleitung Transformationsmatrix Hilfskoordinatensystem . . . . . | 202        |
| C.3      | Konforme Gelenkpositionsbeschränkung . . . . .                    | 203        |
|          | <b>Symbolverzeichnis</b>                                          | <b>207</b> |
|          | <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                      | <b>221</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                      | <b>223</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                        | <b>229</b> |
|          | <b>Literatur</b>                                                  | <b>231</b> |