

# Inhalt

|                                                                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>                                                       | <b>iii</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                                                                        | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivation und Zielsetzung . . . . .                                                   | 2          |
| 1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .                                                            | 5          |
| <b>2 Stand der Forschung</b>                                                               | <b>7</b>   |
| 2.1 Lenksysteme . . . . .                                                                  | 7          |
| 2.1.1 Aufbau Lenksysteme . . . . .                                                         | 7          |
| 2.1.2 Elektromechanische Lenksysteme . . . . .                                             | 9          |
| 2.2 Lenkfunktionen . . . . .                                                               | 11         |
| 2.2.1 Regelungsansätze . . . . .                                                           | 16         |
| 2.3 Virtuelle Methoden in der Lenkungsentwicklung . . . . .                                | 17         |
| 2.3.1 Simulationsbasierte Methoden . . . . .                                               | 17         |
| 2.3.2 Simulatorbasierte Methoden . . . . .                                                 | 20         |
| 2.3.3 Hardware-in-the-Loop Prüfstand . . . . .                                             | 22         |
| 2.4 Objektives Lenkverhalten . . . . .                                                     | 26         |
| 2.4.1 Definition des Lenkgefühls . . . . .                                                 | 27         |
| 2.4.2 Objektivierung des Lenkgefühls . . . . .                                             | 29         |
| 2.4.3 Beispiele zur Objektivierung des Lenkgefühls . . . . .                               | 36         |
| 2.4.4 Markenspezifisches Lenkverhalten . . . . .                                           | 38         |
| 2.5 Zusammenfassung und Handlungsbedarf . . . . .                                          | 40         |
| <b>3 Lenkungs-HiL-Prüfstand</b>                                                            | <b>43</b>  |
| 3.1 Aufbau und Funktionsweise . . . . .                                                    | 43         |
| 3.2 Fahrzeugmodell . . . . .                                                               | 46         |
| 3.2.1 Einspurmodell . . . . .                                                              | 47         |
| 3.2.2 Validierung des Einspurmodells . . . . .                                             | 51         |
| <b>4 Sensitivität des objektiven Lenkverhaltens durch Hardware- und Softwareänderungen</b> | <b>55</b>  |
| 4.1 Objektives Ziellenkverhalten . . . . .                                                 | 55         |
| 4.2 Einfluss von Hardwareeigenschaften . . . . .                                           | 67         |

|          |                                                               |            |
|----------|---------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3      | Einfluss von Softwareänderungen . . . . .                     | 71         |
| <b>5</b> | <b>Methoden zur prüfstands-basierten Lenkungsabstimmung</b>   | <b>75</b>  |
| 5.1      | Grundlagen der Optimierung . . . . .                          | 76         |
| 5.1.1    | Problemstellung einer Optimierung . . . . .                   | 77         |
| 5.1.2    | Nichtlineare Optimierungsverfahren . . . . .                  | 80         |
| 5.2      | Definition der Problemstellung . . . . .                      | 85         |
| 5.2.1    | Auswahl des Optimierungsverfahrens . . . . .                  | 87         |
| 5.2.2    | Partikelschwarm-Optimierung . . . . .                         | 89         |
| 5.2.3    | Nelder-Mead Verfahren . . . . .                               | 92         |
| 5.3      | Parametrierung der Lenkfunktionen . . . . .                   | 95         |
| 5.3.1    | Approximation . . . . .                                       | 97         |
| 5.3.2    | Bewertung der Approximationsmodelle . . . . .                 | 98         |
| 5.3.3    | Sensitivität der Approximationsmodelle . . . . .              | 100        |
| 5.4      | Online-Optimierung . . . . .                                  | 108        |
| 5.5      | Offline-Optimierung . . . . .                                 | 109        |
| 5.5.1    | Erstellung des Versuchsplans . . . . .                        | 111        |
| 5.5.2    | Empirische Modelle . . . . .                                  | 112        |
| 5.5.3    | Identifizierung der optimierten Applikationswerte . . . . .   | 115        |
| <b>6</b> | <b>Ergebnisse der prüfstands-basierten Lenkungsabstimmung</b> | <b>117</b> |
| 6.1      | Anwendbarkeit der Optimierung . . . . .                       | 117        |
| 6.1.1    | Optimierung einzelner Lenkfunktionen . . . . .                | 118        |
| 6.2      | Kollektive Optimierung . . . . .                              | 120        |
| 6.2.1    | Anwendung der Online-Optimierung . . . . .                    | 121        |
| 6.2.2    | Anwendung der Offline-Optimierung . . . . .                   | 122        |
| 6.2.3    | Vergleich der Optimierungsmethoden . . . . .                  | 125        |
| 6.3      | Abstimmung eines neuen Lenksystems . . . . .                  | 126        |
| 6.4      | Zusammenfassung der Optimierungsergebnisse . . . . .          | 129        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                        | <b>131</b> |
| 7.1      | Fazit . . . . .                                               | 133        |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                   | <b>135</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang - Sensitivität</b>                                  | <b>145</b> |
| <b>B</b> | <b>Anhang - Bewertung der Startapplikation</b>                | <b>149</b> |