

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Nomenklatur | v |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1. Einführende Prozessbeschreibung | 4 |
| 1.2. Problemstellung | 6 |
| 1.3. Aufbau der Arbeit | 8 |
| 2. Stand der Technik | 13 |
| 2.1. Steuerungsstrukturen | 13 |
| 2.2. Modellbildung | 18 |
| 2.3. Untersuchung publizierter Füllungssteuerungen | 24 |
| 3. Exakte Ein-/Ausgangslinearisierung | 31 |
| 3.1. Einführendes Beispiel | 31 |
| 3.2. Eingrößensysteme | 35 |
| 3.2.1. Zustandsregelung | 38 |
| 3.2.2. Vorsteuerung | 39 |
| 3.2.3. Nulldynamik und Minimalphasigkeit | 41 |
| 3.3. Mehrgrößensysteme | 42 |
| 3.3.1. Zustandsregelung | 45 |
| 3.3.2. Vorsteuerung | 46 |
| 3.4. Erweiterte Mehrgrößensteuerung | 47 |
| 3.5. Beziehung zu weiteren Steuerungsansätzen | 48 |
| 3.5.1. Exakte Linearisierung eingangsafliner Systeme | 49 |
| 3.5.2. Flachheitsbasierte Steuerung | 50 |
| 3.6. Beispiel | 53 |
| 4. Modellierung | 61 |
| 4.1. Prozessbeschreibung | 61 |
| 4.2. Modellierungsansatz | 64 |
| 4.3. Statische Teilmodelle | 66 |
| 4.3.1. Luftfilter | 66 |
| 4.3.2. Verdichter | 67 |
| 4.3.3. Drosselklappe | 70 |
| 4.3.4. Ladeluftkühler | 71 |
| 4.3.5. Ein- und Auslassventile | 71 |
| 4.3.6. Turbine | 78 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3.7. | Wastegate | 79 |
| 4.3.8. | Katalysator | 80 |
| 4.3.9. | Turboladerleistungen | 81 |
| 4.4. | Dynamische Modelle | 83 |
| 4.4.1. | Isotherme Modelle | 84 |
| 4.4.2. | Saugrohr | 84 |
| 4.4.3. | Saugrohrwandtemperatur und Füllungstemperatur | 86 |
| 4.4.4. | Turboladerdrehzahl | 88 |
| 4.4.5. | Quasistationäre Modelle | 88 |
| 5. | Vorsteuerungsentwurf | 93 |
| 5.1. | Struktur des Entwurfsmodells | 93 |
| 5.1.1. | Stell- und Regelgrößen | 94 |
| 5.1.2. | Steuerungsstrategie | 96 |
| 5.1.3. | Dynamische Entkopplung | 99 |
| 5.1.4. | Durchgriff | 100 |
| 5.1.5. | Relativer Grad | 100 |
| 5.2. | Modellinversion | 102 |
| 5.2.1. | Einfache Mehrgrößensteuerung | 103 |
| 5.2.2. | Erweiterte Mehrgrößensteuerung | 109 |
| 5.2.3. | Inversion der Komponenten | 111 |
| 5.2.4. | Reduzierte Steuerung | 117 |
| 5.3. | Führungsgrößenformung | 119 |
| 6. | Realisierungsaspekte | 123 |
| 6.1. | Dynamikanalyse | 124 |
| 6.1.1. | Systemdynamik | 124 |
| 6.1.2. | Nulldynamik | 126 |
| 6.1.3. | Übergangsverhalten | 130 |
| 6.2. | Numerische Differentialgleichungslöser | 132 |
| 6.2.1. | Explizites Euler-Verfahren | 133 |
| 6.2.2. | Semi-implizites Euler-Verfahren | 135 |
| 6.3. | Simulation der Vorsteuerung | 138 |
| 6.3.1. | Vergleich der regulären und erweiterten Mehrgrößensteuerung | 139 |
| 6.3.2. | Führungsverhalten | 140 |
| 6.3.3. | Störverhalten | 146 |
| 6.4. | Automatische Differentiation | 151 |
| 6.5. | Einbindung in eine Regelung | 156 |

| | |
|--|------------|
| 7. Experimentelle Ergebnisse | 163 |
| 7.1. Modellvalidierung | 164 |
| 7.1.1. Stationäre Modellvalidierung | 165 |
| 7.1.2. Dynamische Modellvalidierung | 167 |
| 7.1.3. Einordnung der Ergebnisse | 168 |
| 7.2. Vorsteuerungsvalidierung | 172 |
| 7.2.1. Stationäre Vorsteuerungsvalidierung | 172 |
| 7.2.2. Dynamische Vorsteuerungsvalidierung | 177 |
| 7.2.3. Einordnung der Ergebnisse | 182 |
| 7.3. Zusammenfassung | 185 |
| 8. Zusammenfassung | 187 |
| A. Modellidentifikation | 191 |
| A.1. Experimenteller Aufbau | 191 |
| A.2. Verfahren | 192 |
| A.3. Statische Teilmodelle | 195 |
| A.4. Dynamische Teilmodelle | 209 |
| Literatur | 213 |