

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>                           | <b>1</b>  |
| <b>2. Stand der Technik</b>                    | <b>3</b>  |
| 2.1. Modellierung serieller Roboter . . . . .  | 3         |
| 2.2. Modellierung elastischer Balken . . . . . | 5         |
| 2.3. Wälzlager . . . . .                       | 7         |
| 2.4. Verkabelung . . . . .                     | 10        |
| 2.5. Verzahnung . . . . .                      | 11        |
| 2.5.1. Steifigkeit . . . . .                   | 14        |
| 2.5.2. Anregungsarten . . . . .                | 16        |
| 2.5.3. Verluste . . . . .                      | 18        |
| 2.5.4. Modellierung . . . . .                  | 20        |
| 2.6. Zahnriemen . . . . .                      | 23        |
| 2.7. Kompaktgetriebe . . . . .                 | 27        |
| 2.7.1. HD-Getriebe . . . . .                   | 27        |
| 2.7.2. Planetengetriebe . . . . .              | 30        |
| 2.7.3. Zykloidengetriebe . . . . .             | 32        |
| 2.7.4. Reibung . . . . .                       | 35        |
| 2.8. Fügestellen . . . . .                     | 38        |
| 2.9. Diskussion . . . . .                      | 40        |
| <b>3. Tragstruktur</b>                         | <b>43</b> |
| 3.1. Strukturteile . . . . .                   | 43        |
| 3.2. Modellierung von Wälzlagern . . . . .     | 47        |
| 3.2.1. Steifigkeit . . . . .                   | 47        |
| 3.2.2. Dissipation . . . . .                   | 51        |
| 3.2.3. Schwingungsanregung . . . . .           | 54        |
| 3.3. Verschraubung . . . . .                   | 55        |
| 3.4. Verkabelung . . . . .                     | 58        |
| 3.4.1. Steifigkeit . . . . .                   | 58        |
| 3.4.2. Modellierung . . . . .                  | 63        |
| <b>4. Antriebsstrang</b>                       | <b>65</b> |
| 4.1. Welle-Lager-System . . . . .              | 65        |
| 4.1.1. Welle . . . . .                         | 66        |
| 4.1.2. Diskretisierung . . . . .               | 68        |
| 4.1.3. Wälzlager im Antriebsstrang . . . . .   | 69        |
| 4.2. Stirnradgetriebe . . . . .                | 70        |
| 4.2.1. Kinematik . . . . .                     | 70        |

---

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.2. Antriebsstrangträgheit . . . . .       | 72         |
| 4.2.3. Verzahnungssteifigkeit . . . . .       | 72         |
| 4.2.4. Dämpfung . . . . .                     | 76         |
| 4.2.5. Verluste . . . . .                     | 77         |
| 4.2.6. Flankenspiel . . . . .                 | 82         |
| 4.2.7. Anregungsverhalten . . . . .           | 84         |
| 4.2.8. Kinematische Kopplung . . . . .        | 87         |
| 4.3. Zahnriemengetriebe . . . . .             | 88         |
| 4.3.1. Zahnriemensteifigkeit . . . . .        | 89         |
| 4.3.2. Zahnriemenverluste . . . . .           | 90         |
| 4.3.3. Übertragungsverhalten . . . . .        | 92         |
| 4.4. Kompaktgetriebe . . . . .                | 95         |
| 4.4.1. Reibung . . . . .                      | 95         |
| 4.4.2. Harmonic Drive Getriebe . . . . .      | 99         |
| 4.4.3. Zykloidengetriebe . . . . .            | 102        |
| 4.4.4. Planetengetriebe . . . . .             | 105        |
| 4.5. Motor . . . . .                          | 107        |
| <b>5. Simulation</b>                          | <b>109</b> |
| 5.1. Modellierung . . . . .                   | 109        |
| 5.1.1. Elastisches Mehrkörpersystem . . . . . | 109        |
| 5.1.2. Antriebsstrang . . . . .               | 110        |
| 5.1.3. Performance . . . . .                  | 115        |
| 5.2. Validierung . . . . .                    | 116        |
| 5.2.1. Statische Nachgiebigkeit . . . . .     | 116        |
| 5.2.2. Torsionssteifigkeit Achse 6 . . . . .  | 119        |
| <b>6. Zusammenfassung und Ausblick</b>        | <b>123</b> |
| 6.1. Zusammenfassung . . . . .                | 123        |
| 6.2. Ausblick . . . . .                       | 124        |
| <b>Anhang</b>                                 | <b>127</b> |
| <b>A. Steifigkeitsmatrizen von Wälzlagern</b> | <b>127</b> |
| A.1. Einreihiges Kugellager . . . . .         | 127        |
| A.2. Einreihiges Rollenlager . . . . .        | 129        |
| A.3. Doppelreihiges Kugellager . . . . .      | 131        |
| A.4. Doppelreihiges Rollenlager . . . . .     | 134        |
| A.5. Wälzlagerparameter . . . . .             | 135        |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>B. Wellen</b>                                       | <b>137</b> |
| B.1. Trägheitsmomente . . . . .                        | 137        |
| B.2. Torsionssteifigkeit . . . . .                     | 138        |
| <b>C. Verzahnung</b>                                   | <b>139</b> |
| C.1. Gültigkeitsbereich der Leerlaufverluste . . . . . | 139        |
| C.2. Verzahnungsdaten . . . . .                        | 140        |
| <b>D. Sensorspezifikation</b>                          | <b>141</b> |