

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                           |           |
|----------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung.....</b>                                    | <b>1</b>  |
| 1.1      | Motivation und Zielstellung.....                          | 1         |
| 1.2      | Aufbau der Arbeit .....                                   | 3         |
| <b>2</b> | <b>Stand der Wissenschaft .....</b>                       | <b>5</b>  |
| 2.1      | Lineardirektantriebe .....                                | 5         |
| 2.1.1    | Vergleich mit konventionellen Linearantrieben .....       | 5         |
| 2.1.2    | Klassifikation.....                                       | 8         |
| 2.2      | Krafterzeugung bei elektrischen Maschinen.....            | 12        |
| 2.2.1    | Faraday-Maxwellsche Flächenspannungen .....               | 12        |
| 2.2.2    | Lorentzkraft .....                                        | 14        |
| 2.2.3    | Reluktanzkraft .....                                      | 16        |
| 2.3      | Modellbildung elektrischer Maschinen.....                 | 19        |
| 2.4      | Schwingungen und Geräusche .....                          | 22        |
| 2.4.1    | Entstehung und Ausbreitung von Schall .....               | 22        |
| 2.4.2    | Grundlagen der Akustik.....                               | 24        |
| 2.4.3    | Ursachen von Schwingungen und Geräuschen .....            | 26        |
| 2.4.4    | Methoden zur Geräuschreduzierung.....                     | 31        |
| <b>3</b> | <b>Prüfstandsaufbau.....</b>                              | <b>35</b> |
| 3.1      | Aufbau und Funktionsprinzip eines herkömmlichen LHSM..... | 35        |
| 3.2      | LHSM-Prototyp .....                                       | 36        |
| 3.3      | Analoge Stromregler.....                                  | 39        |
| 3.4      | Sensorik für Schwingungen und Geräusche .....             | 40        |
| 3.4.1    | Beschleunigungssensor.....                                | 40        |
| 3.4.2    | Schalldruckpegelmessgerät .....                           | 41        |
| 3.5      | Echtzeithardware-System .....                             | 42        |
| 3.6      | Kommutierung .....                                        | 44        |

|          |                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 3.7      | Übersicht der Prüfstandseigenschaften .....            | 46        |
| <b>4</b> | <b>LHSM mit konstanter magnetischer Erregung .....</b> | <b>49</b> |
| 4.1      | Optimierung der Lastwinkel.....                        | 50        |
| 4.1.1    | Problemstellung .....                                  | 50        |
| 4.1.2    | Implementierung .....                                  | 53        |
| 4.1.3    | Optimierte Lastwinkel-Kennlinie .....                  | 56        |
| 4.1.4    | Bewertung der Ergebnisse .....                         | 58        |
| 4.2      | Kompensation der Rastkräfte .....                      | 59        |
| 4.2.1    | Identifikation des Rastkraftverlaufs .....             | 59        |
| 4.2.2    | Bewertung der Ergebnisse .....                         | 62        |
| 4.3      | Optimierung der Kommutierung.....                      | 65        |
| 4.3.1    | Modell.....                                            | 66        |
| 4.3.2    | Identifikation der Kraftfunktionen .....               | 67        |
| 4.3.3    | Optimierte Phasenströme .....                          | 71        |
| 4.3.4    | Anpassung an die herkömmliche Sinuskommutierung.....   | 73        |
| 4.3.5    | Bewertung der Ergebnisse .....                         | 75        |
| 4.3.6    | Diskussion der Anwendbarkeit .....                     | 77        |
| 4.4      | Fazit der untersuchten Methoden .....                  | 79        |
| <b>5</b> | <b>LHSM mit variabler magnetischer Erregung.....</b>   | <b>83</b> |
| 5.1      | Modellbildung und Parameteridentifikation .....        | 84        |
| 5.1.1    | Stromdynamik.....                                      | 85        |
| 5.1.2    | Krafterzeugung .....                                   | 88        |
| 5.1.3    | Ummagnetisierungsverluste und Reibung .....            | 90        |
| 5.1.4    | Kraftschwankungen .....                                | 94        |
| 5.1.5    | Gesamtmodell .....                                     | 99        |
| 5.2      | Ansteuerung der Zusatzspulen .....                     | 103       |
| 5.2.1    | Grundsätzliche Überlegungen.....                       | 103       |
| 5.2.2    | Modellbasierte Optimierung .....                       | 104       |
| 5.3      | Positionsregelung .....                                | 108       |
| 5.3.1    | Bestimmung der Geschwindigkeit.....                    | 110       |
| 5.3.2    | Bewegungstrajektorie .....                             | 112       |
| 5.3.3    | Optimierungsbasierter Reglerentwurf.....               | 113       |
| 5.3.4    | PID-Regler .....                                       | 117       |
| 5.3.5    | PID-Gain-Scheduling-Regler.....                        | 121       |
| 5.3.6    | Nichtlinearer Kompensationsregler .....                | 125       |
| 5.3.7    | Modellbasierte Vorsteuerung.....                       | 133       |

|                                  |                                                                            |            |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.8                            | Bewertung und Vergleich.....                                               | 135        |
| <b>6</b>                         | <b>Validierung der Ergebnisse .....</b>                                    | <b>139</b> |
| 6.1                              | Bewertung mittels Schalldruckpegel .....                                   | 140        |
| 6.2                              | Vergleich des LHSM mit konstanter und variabler magnetischer Erregung..... | 142        |
| 6.3                              | Vergleich der Methoden für den konstant erregten LHSM .....                | 144        |
| 6.4                              | Vergleich der Positionsregelungen für den variabel erregten LHSM.....      | 146        |
| 6.5                              | Transfer auf eine kommerzielle Antriebssteuerung .....                     | 147        |
| <b>7</b>                         | <b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>                                  | <b>151</b> |
| <b>Anhang</b>                    | <b>.....</b>                                                               | <b>155</b> |
| A.1                              | Parameter .....                                                            | 155        |
| A.1.1                            | Rastkraft-Kompensation.....                                                | 155        |
| A.1.2                            | Dynamische Antriebskraft .....                                             | 155        |
| A.1.3                            | Kraftschwankungen .....                                                    | 156        |
| A.1.4                            | Regler.....                                                                | 156        |
| A.1.5                            | Modellbasierte Vorsteuerung .....                                          | 157        |
| A.2                              | Lastwinkel-Optimierung .....                                               | 157        |
| A.3                              | Längssteifigkeit.....                                                      | 157        |
| A.4                              | Notwendige Bedingung des nichtlinearen Kompensationsreglers.....           | 158        |
| A.5                              | Schwingungen.....                                                          | 159        |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b> | <b>.....</b>                                                               | <b>161</b> |