

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                |             |
|----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Formelzeichenkonvention</b>                                 | <b>IV</b>   |
| <b>Formelzeichenverzeichnis</b>                                | <b>VIII</b> |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>                                   | <b>IX</b>   |
| <b>1 Einleitung</b>                                            | <b>1</b>    |
| <b>2 Grundlagen</b>                                            | <b>3</b>    |
| 2.1 Einteilung der Anregungsmechanismen . . . . .              | 3           |
| 2.2 Anregungsmechanismen des Zahneingriffs . . . . .           | 4           |
| 2.2.1 Parameteranregung . . . . .                              | 5           |
| 2.2.2 Stoßanregung . . . . .                                   | 7           |
| 2.2.3 Weganregung . . . . .                                    | 7           |
| 2.2.4 Verformung von Wellen, Lagern und des Gehäuses . . . . . | 8           |
| 2.3 Zahneingriffsfrequenz . . . . .                            | 8           |
| 2.4 Maßnahmen zur Geräuschreduktion . . . . .                  | 8           |
| 2.5 Forschungsstand zur aktiven Geräuschreduktion . . . . .    | 11          |
| <b>3 Anregungsverhalten des Stirnradgetriebes</b>              | <b>17</b>   |
| 3.1 Aufbau des Antriebsstrangs . . . . .                       | 17          |
| 3.2 Modellierung des Anregungsverhaltens . . . . .             | 19          |
| 3.2.1 Modell einer Zahnradstufe . . . . .                      | 20          |
| 3.2.2 Drehwegabweichung . . . . .                              | 21          |
| 3.2.3 Dynamische Zahnkraft . . . . .                           | 23          |
| 3.3 Geometrische Daten der Verzahnung . . . . .                | 24          |
| 3.4 Dynamische Zahnkraft der Verzahnung . . . . .              | 27          |
| <b>4 Kompensation der Schwingungsanregung</b>                  | <b>28</b>   |
| 4.1 Berechnung der Kompensationskraft . . . . .                | 29          |
| 4.2 Vergleich der Berechnungsmethoden . . . . .                | 34          |
| 4.3 Einfluss der Wellenkupplung . . . . .                      | 36          |
| 4.4 Kompensationsmoment . . . . .                              | 38          |
| <b>5 Regelung zur aktiven Schwingungsreduktion</b>             | <b>41</b>   |
| 5.1 FxLMS-Algorithmus . . . . .                                | 42          |
| 5.2 Schmalbandiger FxLMS-Algorithmus . . . . .                 | 45          |

|          |                                                                     |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3      | Anpassung des schmalbandigen FxLMS-Algorithmus . . . . .            | 48         |
| 5.3.1    | Blockweise Aktualisierung . . . . .                                 | 48         |
| 5.3.2    | Verstärkung der Sekundärstrecke . . . . .                           | 52         |
| 5.3.3    | Schrittweite und Stabilitätsanalyse . . . . .                       | 53         |
| 5.3.4    | Stellgrößenbegrenzung . . . . .                                     | 55         |
| 5.4      | Identifikation der Sekundärstrecke . . . . .                        | 56         |
| 5.4.1    | Identifikation mittels Sinussweep . . . . .                         | 57         |
| 5.4.2    | Identifikation mittels weißem Rauschen . . . . .                    | 58         |
| <b>6</b> | <b>Regelung des Antriebsmoments</b>                                 | <b>60</b>  |
| 6.1      | Modell der permanentmagneterregten Synchronmaschine . . . . .       | 60         |
| 6.2      | Feldorientierte Regelung . . . . .                                  | 62         |
| 6.3      | Regelung des Kompensationsstroms . . . . .                          | 64         |
| 6.4      | Spannungsreserve . . . . .                                          | 68         |
| 6.5      | Strang- und Zwischenkreisstrom . . . . .                            | 74         |
| 6.6      | Implementierung . . . . .                                           | 78         |
| <b>7</b> | <b>Experimentelle Untersuchung</b>                                  | <b>81</b>  |
| 7.1      | Prüfstands Aufbau . . . . .                                         | 81         |
| 7.2      | Position der Beschleunigungssensoren . . . . .                      | 83         |
| 7.3      | Schwingungsverhalten des Antriebsstrangs . . . . .                  | 84         |
| 7.4      | Steuerbarkeit . . . . .                                             | 87         |
| 7.5      | Identifikation der Sekundärstrecke . . . . .                        | 90         |
| 7.6      | Statisches Verhalten . . . . .                                      | 93         |
| 7.6.1    | Schwingungs- und Geräuschreduzierung . . . . .                      | 93         |
| 7.6.2    | Strang- und Zwischenkreisstrom . . . . .                            | 97         |
| 7.6.3    | Wirk-, Blind- und Scheinleistung . . . . .                          | 102        |
| 7.6.4    | Drehmoment . . . . .                                                | 106        |
| 7.7      | Dynamisches Verhalten . . . . .                                     | 108        |
| 7.7.1    | Drehzahlhochlauf . . . . .                                          | 108        |
| 7.7.2    | Konvergenz . . . . .                                                | 116        |
| 7.7.3    | Drehmomentänderung . . . . .                                        | 117        |
| <b>8</b> | <b>Diskussion der Ergebnisse</b>                                    | <b>119</b> |
| <b>9</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                              | <b>122</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>                                                       | <b>125</b> |
| A.1      | Technische Daten . . . . .                                          | 125        |
| A.1.1    | Permanentmagneterregte Synchronmaschine . . . . .                   | 125        |
| A.1.2    | Wechselrichter . . . . .                                            | 125        |
| A.1.3    | Wellenkupplung . . . . .                                            | 126        |
| A.2      | Übertragungsfunktion des schmalbandigen FxLMS-Algorithmus . . . . . | 127        |
| A.3      | Identifikation der Sekundärstrecke . . . . .                        | 130        |

---

|                             |                                                        |            |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------|------------|
| A.4                         | Messergebnisse bei statischen Arbeitspunkten . . . . . | 132        |
| A.4.1                       | Schwingungs- und Geräuschreduzierung . . . . .         | 132        |
| A.4.2                       | Strang- und Zwischenkreisstrom . . . . .               | 152        |
| A.5                         | Messergebnisse im dynamischen Betrieb . . . . .        | 156        |
| <b>Literaturverzeichnis</b> |                                                        | <b>159</b> |