

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Vorwort und Danksagung</b>   | <b>III</b>  |
| <b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>  | <b>VII</b>  |
| <b>Kurzfassung</b>  | <b>XV</b>   |
| <b>Extended Abstract</b>  | <b>XVII</b> |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 Motivation . . . . .  | 1           |
| 1.2 Ziele der Arbeit . . . . .  | 3           |
| 1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .   | 4           |
| <b>2 Stand der Technik</b>  | <b>5</b>    |
| 2.1 Aufbau eines elektrischen Antriebsstrangs . . . . .                                   | 5           |
| 2.2 Aufbau der permanenterregten Synchronmaschine . . . . .                               | 7           |
| 2.3 NVH-Simulationsansätze . . . . .  | 8           |
| 2.3.1 Numerischer Modellierungsansatz im Frequenzbereich . . . . .                        | 9           |
| 2.3.2 Modalreduzierter Systemsimulationsansatz im Zeitbereich . . . . .                   | 10          |
| 2.4 Optimierungsansätze . . . . .   | 12          |
| 2.4.1 Maßnahmen in der Leistungselektronik zur Reduktion der Geräuschemissionen . . . . . | 13          |
| 2.4.2 Optimierung des elektromagnetischen Kreises . . . . .                               | 16          |
| 2.4.3 Herausforderungen für die Strukturoptimierung . . . . .                             | 20          |
| <b>3 Modellierung einer Synchronmaschine</b>  | <b>21</b>   |
| 3.1 Elektromagnetische Simulation einer PMSM . . . . .                                    | 22          |
| 3.1.1 $I_d/I_q$ -Transformation . . . . .   | 23          |
| 3.1.2 Magnetische Feldgrößen . . . . .  | 24          |
| 3.1.3 Drehmomentenwelligkeit . . . . .  | 26          |
| 3.1.4 Kennfeldberechnung . . . . .  | 27          |
| 3.1.5 Elektromagnetische Kraftdichte . . . . .  | 32          |
| 3.1.6 Exzentrizität des Rotors . . . . .  | 34          |
| 3.2 Strukturmechanische Simulation einer PMSM . . . . .                                   | 37          |
| 3.2.1 Modale Transformation . . . . .   | 38          |
| 3.2.2 Dämpfungsmodelle . . . . .  | 41          |
| 3.2.3 Domänenkopplung . . . . .   | 42          |
| 3.2.4 Maßnahmen zur Rechenzeitoptimierung . . . . .                                       | 45          |
| 3.2.5 Ausgabegrößen zur Beurteilung des NVH-Verhaltens . . . . .                          | 47          |

V

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>4</b>  | <b>Validierung des Simulationsmodells</b>   | <b>51</b>  |
| 4.1       | Abgleich der Eigenfrequenzen und Strukturmoden . . . . .  | 51         |
| 4.2       | Ordnungsanalyse an einem Akustikprüfstand . . . . .   | 55         |
| <b>5</b>  | <b>Analyse geometrischer Einflussparameter auf das NVH-Verhalten</b>                            | <b>59</b>  |
| 5.1       | Bewertung eines Frequenzgangs . . . . .   | 60         |
| 5.2       | Variation der Anzahl an Kühlkanälen im Statorgehäuse . . . . .                                  | 63         |
| 5.3       | Variation der Stegbreite zwischen den Kühlkanälen . . . . .                                     | 68         |
| 5.4       | Übertragung mit konstantem Querschnitt . . . . .  | 71         |
| 5.5       | Einfluss symmetrisch angeordneter Fixpunkte am Lagerschild . . . . .                            | 73         |
| <b>6</b>  | <b>Körperschalloptimierung mittels statistischer Versuchsplanung</b>                            | <b>79</b>  |
| 6.1       | Methode zur Körperschalloptimierung . . . . .   | 79         |
| 6.2       | Einflüsse des Gütekriteriums auf die Optimierung . . . . .                                      | 81         |
| 6.2.1     | Einfluss verschiedener Gütekriterien . . . . .  | 82         |
| 6.2.2     | Einfluss unterschiedlicher Gewichtung der Gütekriterien . . . . .                               | 83         |
| 6.3       | Optimierung der Position der Montagepunkte . . . . .  | 84         |
| 6.3.1     | Optimierung der Position der Fixpunkte für unterschiedliche Zielordnungen . . . . .             | 84         |
| 6.3.2     | Optimierung der Position der Fixpunkte für eine unterschiedliche Anzahl an Fixpunkten . . . . . | 88         |
| <b>7</b>  | <b>Luftschalloptimierung mittels Topologieoptimierung</b>                                       | <b>93</b>  |
| 7.1       | Theoretischer Hintergrund zur Topologieoptimierung . . . . .                                    | 93         |
| 7.2       | Optimierung des Statorgehäuses . . . . .  | 94         |
| 7.2.1     | Topologieoptimierung des Statorgehäuses in 2D . . . . .   | 95         |
| 7.2.2     | Topologieoptimierung des Statorgehäuses in 3D . . . . .   | 98         |
| <b>8</b>  | <b>Analyse des optimalen Gesamtsystems</b>  | <b>103</b> |
| 8.1       | Validierung der gesamtoptimierten Maschinenvariante . . . . .                                   | 103        |
| 8.2       | Betrachtung der gesamtoptimierten Maschine im Gesamtsystem . . . . .                            | 107        |
| <b>9</b>  | <b>Designempfehlungen für die Optimierung des NVH-Verhaltens</b>                                | <b>115</b> |
| <b>10</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>121</b> |
|           | <b>Literatur</b>  | <b>125</b> |
|           | <b>Anhang</b>   | <b>135</b> |
| 10.1      | Ergebnisse der Untersuchung mit konstantem Querschnitt . . . . .                                | 135        |
|           | <b>Publikationen</b>  | <b>137</b> |
|           | <b>Lebenslauf</b>   | <b>138</b> |