

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** ..... V

**Kurzfassung** ..... VII

**Abstract** ..... IX

**Abkürzungen** ..... XV

**Formelzeichen** ..... XVI

  

**1 Einleitung** ..... 1

1.1 Eigenschaften des „idealen Elektromagneten“ ..... 3

1.2 Motivation und Zielsetzung ..... 4

1.3 Struktureller Aufbau der Arbeit ..... 6

  

**2 Stand der Technik** ..... 9

2.1 Grundbauformen von Elektromagneten ..... 10

2.2 Klassifizierung typischer Reluktanzaktoren ..... 11

2.3 Anwendungsgebiete von Hub- und Haftmagneten ..... 12

2.4 Kennlinienbeeinflussung von Tauchankermagneten ..... 14

  

**3 Grundlagen elektromagnetischer Aktoren** ..... 17

3.1 Gesamtübersicht zu den Maxwell’schen Gleichungen ..... 17

3.2 Grundlagen stationärer Magnetfelder ..... 19

3.2.1 Ursachen des magnetischen Feldes: Elektrische Ströme und Dauermagnete ..... 19

3.2.2 Die magnetische Feldstärke, das Durchflutungsgesetz und die magnetische Spannung ..... 21

3.2.3 Die magnetische Flussdichte und das Materialgesetz ..... 22

---

|          |                                                                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.4    | Ferromagnetische Werkstoffe .....                                                                     | 24        |
| 3.2.5    | Der magnetische Fluss, der Gauß'sche Satz des Magnetfeldes<br>und der magnetische Energiebegriff..... | 27        |
| 3.2.6    | Der magnetische Kreis.....                                                                            | 29        |
| 3.3      | Grundlagen zeitveränderlicher Magnetfelder .....                                                      | 35        |
| 3.3.1    | Das Induktionsgesetz.....                                                                             | 35        |
| 3.4      | Struktur der elektrischen Antriebstechnik.....                                                        | 37        |
| <b>4</b> | <b>Vorüberlegungen zu den Aktorentwürfen.....</b>                                                     | <b>41</b> |
| 4.1      | Modellbasierte Untersuchung der Aktorzusatzfunktion .....                                             | 41        |
| 4.1.1    | Systembeschreibung des Aktorentwurfs .....                                                            | 42        |
| 4.1.2    | Modellierung des hybriden Aktors.....                                                                 | 43        |
| 4.1.3    | Ergebnisse des Magnetmodells .....                                                                    | 46        |
| 4.1.4    | Zusammenfassung.....                                                                                  | 49        |
| 4.2      | Charakterisierung des Schaltvorgangs .....                                                            | 49        |
| 4.3      | Alternativer Schaltvorgang mit vorgelagertem Kern .....                                               | 50        |
| 4.4      | Anforderungen an Design und Funktionsweise .....                                                      | 51        |
| 4.5      | Magnetische Formgedächtnislegierungen.....                                                            | 55        |
| 4.5.1    | Kristallstrukturen und magnetischer Formgedächtniseffekt ..                                           | 56        |
| <b>5</b> | <b>Entwicklung hybrider Aktoren unter Einsatz von MFGL-Elementen ..</b>                               | <b>59</b> |
| 5.1      | Einleitung.....                                                                                       | 59        |
| 5.1.1    | Aktiver Polkern auf Basis von MFGL-Elementen mit<br>abgeleiteter Patentschrift .....                  | 59        |
| 5.1.2    | Räumliche Orientierung des MFGL-Elements.....                                                         | 62        |
| 5.2      | Entwicklung Prototyp 1 .....                                                                          | 63        |
| 5.2.1    | Konzeptionierung .....                                                                                | 64        |
| 5.2.2    | Konstruktion .....                                                                                    | 65        |
| 5.2.3    | Simulative Magnetkreisauslegung.....                                                                  | 68        |

---

|          |                                                                                 |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2.4    | Prototypenbau .....                                                             | 72         |
| 5.2.5    | Charakterisierung der stationären Energiewandlung.....                          | 75         |
| 5.2.6    | Charakterisierung der dynamischen Energiewandlung .....                         | 86         |
| 5.2.7    | Zwischenfazit .....                                                             | 99         |
| 5.3      | Entwicklung Prototyp 2.....                                                     | 100        |
| 5.3.1    | Konzeptionierung Bewegungsumformung .....                                       | 101        |
| 5.3.2    | Konstruktion.....                                                               | 105        |
| 5.3.3    | Simulative Magnetkreisauslegung .....                                           | 107        |
| 5.3.4    | Charakterisierung der stationären Energiewandlung.....                          | 110        |
| 5.3.5    | Charakterisierung der dynamischen Energiewandlung .....                         | 113        |
| 5.3.6    | Zwischenfazit .....                                                             | 115        |
| <b>6</b> | <b>Entwicklung von hybriden Reluktanzaktoren .....</b>                          | <b>117</b> |
| 6.1      | Einleitung .....                                                                | 117        |
| 6.1.1    | Aktiver Polkern auf Basis des Reluktanzprinzips.....                            | 118        |
| 6.1.2    | Abgeleitete Patentschrift – Elektromagnetischer Hub-<br>und/oder Haftaktor..... | 119        |
| 6.2      | Entwicklung Prototyp 3.....                                                     | 121        |
| 6.2.1    | Fertigungsgerechte Gestaltung und Aufbau.....                                   | 121        |
| 6.2.2    | Simulative Auslegung und Konstruktion .....                                     | 123        |
| 6.2.3    | Ermittlung F- $\delta$ -Kennlinie.....                                          | 124        |
| 6.3      | Entwicklung Prototyp 4.....                                                     | 127        |
| 6.3.1    | Konstruktion des Hybrid-Aktors.....                                             | 127        |
| 6.3.2    | Magneto-statische FEM-Simulation einer Schaltsequenz ....                       | 129        |
| 6.3.3    | Simulationsstudie zur Magnetkreisoptimierung.....                               | 130        |
| 6.4      | Ermittlung der stationären Energiewandlung (Prototyp 4).....                    | 134        |
| 6.4.1    | F- $\delta$ -Kennlinie .....                                                    | 134        |
| 6.5      | Ermittlung der dynamischen Energiewandlung (Prototyp 4)...                      | 137        |

|       |                                                                                 |            |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.5.1 | Analyse ermittelter Kennlinienfelder des verketteten magnetischen Flusses ..... | 137        |
| 6.5.2 | Transiente FEM-Simulation der Aktorzusatzfunktion.....                          | 145        |
| 6.5.3 | Messung Anzugsstrom und -zeit bei Spannungssprung .....                         | 150        |
| 6.5.4 | Untersuchung der Anzugsstrom-Luftspalt-Abhängigkeit .....                       | 152        |
| 6.5.5 | Untersuchung des Schaltgeräuschs durch Variation der Distanzscheibe.....        | 157        |
| 6.6   | Zwischenfazit .....                                                             | 159        |
| 7     | <b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>                                          | <b>161</b> |
| 7.1   | Zusammenfassung.....                                                            | 161        |
| 7.2   | Fazit .....                                                                     | 163        |
| 8     | <b>Ausblick .....</b>                                                           | <b>169</b> |
| 8.1   | Co-Simulation für die Ableitung eines digitalen Zwillings .....                 | 169        |
| 8.2   | Mögliche Anwendung zur Industrialisierung.....                                  | 171        |
|       | <b>Literatur .....</b>                                                          | <b>173</b> |
|       | <b>Anhang.....</b>                                                              | <b>i</b>   |
|       | Anhang A Magnetische Leitwerte ausgewählter Geometrien .....                    | i          |
|       | Anhang B Gesamtmodell der Magnetmodellierung.....                               | ii         |
|       | Anhang C Lastenheft Hybrid-Aktor Prototyp 1 .....                               | iii        |
|       | Anhang D Zielgrößen Hybrid-Aktor Prototyp 1 .....                               | iv         |
|       | Anhang E Design-Studie für den Prototyp 1 .....                                 | v          |
|       | Anhang F Lastenheft Hybrid-Aktor Prototyp 2.....                                | vi         |
|       | Anhang G Alternative Varianten Prototyp 4 .....                                 | vii        |