

# Dezentrale elektrische Energiespeicherung mittels kinetischer Energiespeicher in Außenläufer- Bauform

Hendrik Schaede

Dissertation am Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau  
Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

**Dissertation**

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Hendrik Stefan Schaede**  
aus Siegen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Tag der Einreichung: 25.02.2014  
Tag der mündlichen Prüfung: 30.04.2014

Darmstadt 2015  
D 17



Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

**Hendrik Schaede**

**Dezentrale elektrische Energiespeicherung mittels  
kinetischer Energiespeicher in Außenläufer-Bauform**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Aachen 2015

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3575-9

ISSN 2198-8536

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort

---

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Mechatronische Systeme im Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt. Teile der beschriebenen Forschung wurden mit Mitteln der Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE), Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben des Landes Hessen gefördert.

Professor Nordmann möchte ich für die Möglichkeit danken im Bereich der aktiven Magnetlager zu promovieren. Professor Rinderknecht für das gute Arbeitsklima, das Vertrauen in meine Arbeit sowie die damit einhergehende Freiheit und Unterstützung bei der Erarbeitung der Thematik und dem Aufbau des neuen Forschungsschwerpunktes der elektrischen Energiespeicher am Institut. Und natürlich für die Betreuung meiner Promotion. Professor Abele für die Unterstützung unserer Forschung im Rahmen des Projektes ETA-Fabrik, die dabei deutlich gewordene Wertschätzung und die Co-Betreuung der Promotion.

Norman Butzek hat mir den Weg in die Mechatronik geebnet, Martin Ernst gezeigt, dass der Teller zwar groß ist, es aber trotzdem immer lohnt über den Rand zu schauen. Mecatronix hat mir vermittelt, dass der ganzheitliche Ansatz der Mechatronik, die Faszination für die Magnetlager und der Spaß bei der Arbeit nicht auf das wissenschaftliche Umfeld beschränkt sind.

Meine Arbeit wäre in dieser Breite und Tiefe nicht ohne die Unterstützung durch annähernd unzählige Studenten möglich gewesen. Im Rahmen Eurer Studien- und Diplom-, Bachelor- und Master-Arbeiten, ADPs und Forschungsseminare oder als Hiwi habt Ihr maßgeblich die Thematik vorwärts getrieben und mir in der Regel große Freude dabei bereitet.

Besonders hat mich gefreut, dass Lukas Quurck, Michael Richter und Maximilian Schneider schließlich den Weg ans Institut gefunden haben und wir gemeinsam den Energiespeichern zu Leibe rücken konnten. Ich drücke Euch die Daumen, dass es so weiter läuft!

Allen Freunden, Ihr habt mich verstanden, abgelenkt und unterstützt. Danke!

Einen besonderen Beitrag hat natürlich meine Familie. Danke für die Möglichkeiten und die Unterstützung die Ihr mir immer geboten habt! Liebe Britta, großartig, dass ich Dich habe. Großartig, dass wir es beide endlich geschafft haben!



---

# Inhalt

---

|                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>VORWORT .....</b>                                                                  | <b>III</b> |
| <b>INHALT .....</b>                                                                   | <b>V</b>   |
| <b>SYMBOLVERZEICHNIS .....</b>                                                        | <b>IX</b>  |
| <b>1 EINLEITUNG.....</b>                                                              | <b>1</b>   |
| ENTWICKLUNGSMETHODIK .....                                                            | 3          |
| BETRIEBSSTRATEGIEN.....                                                               | 4          |
| KINETISCHE ENERGIESPEICHER .....                                                      | 4          |
| KINETISCHE ENERGIESPEICHER IN AUßENLÄUFER-BAUFORM .....                               | 5          |
| STRUKTUR DER ARBEIT.....                                                              | 6          |
| ANWENDUNGSBEISPIEL LEISTUNGSANPASSUNG IN DER PRODUZIERENDEN INDUSTRIE.....            | 6          |
| <b>2 STATIONÄRE ELEKTRISCHE ENERGIESPEICHERSYSTEME.....</b>                           | <b>9</b>   |
| 2.1 EIGENSCHAFTEN UND MODELLIERUNG VON ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERSYSTEMEN .....     | 10         |
| 2.2 ENERGETISCHE VERLUSTE IN ELEKTRISCHEN ENERGIESPEICHERSYSTEMEN .....               | 12         |
| 2.2.1 Modellierung der Verluste über Verlustparameter.....                            | 14         |
| 2.2.2 Kennfeldbasierte Betrachtung der Verluste .....                                 | 15         |
| 2.3 BETRIEBSSTRATEGIEN.....                                                           | 17         |
| 2.3.1 Integration von Energiespeichersystemen .....                                   | 17         |
| 2.3.2 Umsetzung der Betriebsstrategie.....                                            | 19         |
| 2.3.3 Das Energiespeichersystem als Filter .....                                      | 22         |
| 2.3.4 Implementierung von Haupt- und Nebenfunktionen des Energiespeichersystems ..... | 24         |
| 2.3.5 Ebenen von Betriebsstrategien und Erweiterung um Prognosemethoden .....         | 25         |
| <b>3 ENTWICKLUNGSMETHODIK.....</b>                                                    | <b>29</b>  |
| 3.1 SPEZIFIZIERUNG DER ANFORDERUNGEN (SPECIFICATION) .....                            | 32         |
| 3.1.1 Anforderungen an das Ausgangs-Lastprofil .....                                  | 34         |
| 3.1.2 Synthese des generischen Speicherprofils.....                                   | 35         |
| 3.1.3 Dimensionierung des Energiespeichersystems .....                                | 38         |
| 3.1.4 Synthese des beschränkten, generischen Speicherprofils.....                     | 41         |
| 3.1.5 Belastung des Energiespeichersystems .....                                      | 42         |
| 3.1.6 Erfassung des Betriebskollektivs.....                                           | 43         |

|       |                                                                                                              |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2   | AUSLEGUNG DES ENERGIESPEICHERSYSTEMS ( <i>DESIGN</i> ) .....                                                 | 44  |
| 3.3   | BEWERTUNG DES ENERGIESPEICHERSYSTEMS ( <i>ASSESSMENT</i> ) .....                                             | 46  |
| 3.3.1 | <i>Beispiele für anwendungsneutrale Kennzahlen</i> .....                                                     | 47  |
| 3.3.2 | <i>Anwendung der Kennzahlen</i> .....                                                                        | 48  |
| 3.3.3 | <i>Diskussion der Kennzahlen</i> .....                                                                       | 51  |
| 4     | <b>KINETISCHE ENERGIESPEICHER</b> .....                                                                      | 52  |
| 4.1   | FUNKTIONSPRINZIP DER TECHNOLOGIE .....                                                                       | 53  |
| 4.2   | VERLUSTE IN KINETISCHEN ENERGIESPEICHERN .....                                                               | 55  |
| 4.3   | TOPOLOGIEN VON KINETISCHEN ENERGIESPEICHERN .....                                                            | 56  |
| 4.4   | VERGLEICH DER SYSTEME .....                                                                                  | 60  |
| 4.5   | ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG .....                                                                           | 62  |
| 5     | <b>ANALYTISCHES MODELL KINETISCHER ENERGIESPEICHER</b> .....                                                 | 65  |
| 5.1   | ROTOR.....                                                                                                   | 66  |
| 5.1.1 | <i>Polares Trägheitsmoment der Schwungmasse</i> .....                                                        | 67  |
| 5.1.2 | <i>Rotordynamisches Verhalten</i> .....                                                                      | 69  |
| 5.1.3 | <i>Festigkeit und Aufdehnung des Rotors</i> .....                                                            | 71  |
| 5.1.4 | <i>Diskussion des Rotor-Modells</i> .....                                                                    | 76  |
| 5.1.5 | <i>Gasreibung</i> .....                                                                                      | 77  |
| 5.1.6 | <i>Diskussion des Modells der Gasreibung</i> .....                                                           | 80  |
| 5.2   | BERÜHRUNGSLOSE LAGERUNG .....                                                                                | 80  |
| 5.2.1 | <i>Permanentmagnetisches Axiallager</i> .....                                                                | 82  |
| 5.2.2 | <i>Aktives Magnetlager, Radiallager</i> .....                                                                | 83  |
| 5.2.3 | <i>Maximale radiale Lagerkraft</i> .....                                                                     | 87  |
| 5.2.4 | <i>Auslegung des homopolaren Magnetlagers</i> .....                                                          | 88  |
| 5.2.5 | <i>Rotationsverluste des homopolaren Magnetlagers</i> .....                                                  | 92  |
| 5.2.6 | <i>Diskussion des Modells der Magnetlagerverluste</i> .....                                                  | 96  |
| 5.3   | MOTOR-GENERATOR-EINHEIT .....                                                                                | 97  |
|       | <i>Diskussion des Modells der Motor-Generator-Einheit</i> .....                                              | 104 |
| 5.4   | BESTIMMUNG DER BETRIEBSVERLUSTE .....                                                                        | 105 |
| 5.5   | PARAMETERSTUDIEN GESAMTMODELL.....                                                                           | 107 |
| 5.5.1 | <i>Vergleich der Auslegung auf maximale gravimetrische Energiedichte und minimale Betriebsverluste</i> ..... | 109 |
| 5.5.2 | <i>Einfluss der Dimensionierung der Leistung</i> .....                                                       | 112 |
| 5.5.3 | <i>Einfluss der Dimensionierung der Kapazität</i> .....                                                      | 113 |
| 5.5.4 | <i>Diskussion der Parameterstudien</i> .....                                                                 | 114 |



---

|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| <b>EXPERIMENTELLER FUNKTIONSNACHWEIS .....</b>              | <b>116</b> |
| 5.6 INTEGRATION DER KOMPONENTEN .....                       | 119        |
| 5.7 ROTORTEMPERATUR IM BETRIEB .....                        | 121        |
| 5.8 VAKUUMSYSTEM .....                                      | 124        |
| 5.9 ZUSAMMENFASSUNG .....                                   | 126        |
| <b>6 FAZIT .....</b>                                        | <b>127</b> |
| <b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>                           | <b>131</b> |
| <b>BETREUTE UND CO-BETREUTE STUDENTISCHE ARBEITEN .....</b> | <b>137</b> |