



Henning Schillingmann (Autor)  
**Systematische Optimierung von elektrischen  
Linearmaschinen für den Einsatz in  
Freikolbenmotoren**

Herausgeber: Prof. Dr. Kai Peter Birke

**ENERGIE & NACHHALTIGKEIT**  
Elektromobilität & Batterietechnologie

Henning Schillingmann

**Systematische Optimierung von  
elektrischen Linearmaschinen  
für den Einsatz in Freikolbenmotoren**

Elektrische  
Energiespeichersysteme



Nachhaltige  
CO<sub>2</sub>-Kreisläufe



Elektromobilität &  
Batterietechnologie



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/9070>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung . . . . .	5
1.3	Gliederung . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Die Freikolbenmaschine</b>	<b>9</b>
2.1	Bauweisen . . . . .	11
2.2	Besonderheiten . . . . .	13
2.3	Stand der Technik und Wissenschaft . . . . .	17
2.3.1	Ursprünge der Freikolbenmaschinen . . . . .	18
2.3.2	Aktuelle Entwicklungen zu Freikolbenmaschinen . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Systemmodellierung</b>	<b>31</b>
3.1	Entwicklung des Modells . . . . .	33
3.2	Modellierung der Einzelkomponenten . . . . .	34
3.2.1	Verbrennungsprozess . . . . .	34
3.2.2	Wärmeübergänge im Zylinder . . . . .	38
3.2.3	Reibung . . . . .	39
3.2.4	Gasfeder . . . . .	42
3.2.5	Elektrische Maschine . . . . .	44
3.3	Fazit der Systemmodellierung . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Analyse des Gesamtsystems</b>	<b>49</b>
4.1	Definition geometrischer Abmessungen . . . . .	51
4.1.1	Dimensionierung des Brennraums . . . . .	51
4.1.2	Festlegung des geometrischen Hubs . . . . .	52
4.1.3	Untersuchungen zur Gasfederdimensionierung . . . . .	52
4.2	Einfluss der zugeführten Wärmemenge . . . . .	54
4.3	Analyse möglicher Betriebsstrategien . . . . .	56
4.3.1	Untersuchung der Kraftverläufe . . . . .	57
4.3.2	Einfluss der Betriebsstrategie auf die mechanische Leistung . . . . .	58
4.3.3	Analyse der verrichteten Arbeit . . . . .	60
4.3.4	Fazit zu Betriebsstrategien . . . . .	65

4.4	Einfluss der oszillierenden Masse . . . . .	66
4.4.1	Analytische Beschreibung . . . . .	66
4.4.2	Numerische Simulation . . . . .	67
4.4.3	Fazit zur oszillierenden Masse . . . . .	70
4.5	Kenngrößen der Systemmodellierung . . . . .	71
4.6	Anforderungen an die elektrische Maschine . . . . .	75
4.7	Bewertung und Fazit der Gesamtsystemanalyse . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Auslegung und Optimierung der elektrischen Linearmaschine</b>	<b>81</b>
5.1	Struktur elektrischer Linearmaschinen . . . . .	82
5.2	Einordnung der Linearmaschinen-Topologien für den Einsatz in Freikolbenmotoren . . . . .	85
5.2.1	PM-Synchron-Linearmaschine . . . . .	86
5.2.2	PM-Vernier-Linearmaschine . . . . .	95
5.2.3	Flux-Switching-Linearmaschine . . . . .	102
5.2.4	Lineare Reluktanzmaschine . . . . .	104
5.2.5	Transversalfloss-Linearmaschine . . . . .	106
5.2.6	Fazit zur Einordnung der Linearmaschinen-Topologien . . . . .	109
5.3	Randbedingungen und Ziele des Maschinenentwurfs . . . . .	110
5.3.1	Kühlkonzept . . . . .	110
5.3.2	Definition der Materialien . . . . .	112
5.3.3	Definition der Auslegungsziele . . . . .	113
5.4	Modellentwurf der elektrischen Linearmaschine . . . . .	117
5.4.1	Eingrenzung der Bauweisen . . . . .	117
5.4.2	Definition geometrischer Parameter . . . . .	117
5.4.3	Auslegung der Wicklung . . . . .	120
5.4.4	Zusammenfassung des Modellentwurfs . . . . .	125
5.5	Optimierung der elektrischen Linearmaschinen . . . . .	125
5.5.1	Charakterisierung des vorliegenden Optimierungsproblems . . . . .	125
5.5.2	Anpassung des Optimierungsalgorithmus NSGA-II . . . . .	129
5.6	Auswertung der Optimierungsergebnisse . . . . .	134
5.6.1	Detailauswertungen . . . . .	136
5.6.2	Auswertung und Gegenüberstellung der Gesamtergebnisse . . . . .	141
5.6.3	Diskussion und Einordnung der Optimierungsergebnisse . . . . .	148
5.7	Fazit zur Optimierung der elektrischen Linearmaschine . . . . .	150
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>159</b>
A.1	Herleitung der Fourier-Koeffizienten von Flussdichte und Strombelag . . . . .	159
A.2	Parameter der Kühlkonzepts . . . . .	162
A.3	Kennlinien magnetischer Materialien . . . . .	163

A.4	Wicklungskonfigurationen der optimierten Linearmaschinen . . . . .	164
A.5	Optimierungsergebnisse: Darstellung der Pareto-Flächen . . . . .	166
A.5.1	Ergebnisse der PM-Synchron-Linearmaschinen . . . . .	166
A.5.2	Ergebnisse der PM-Vernier-Linearmaschinen . . . . .	180
A.5.3	Ergebnisse der Flux-Switching-Linearmaschinen . . . . .	186
A.6	Tabellarischer Überblick der Optimierungsergebnisse . . . . .	188
<b>Literatur</b>		<b>189</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>204</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>205</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>		<b>207</b>