



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
CO₂-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, Website: <https://cuvillier.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	5
1.3	Gliederung	5
2	Die Freikolbenmaschine	9
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
3	Systemmodellierung	31
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
4	Analyse des Gesamtsystems	49
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
5	Auslegung und Optimierung der elektrischen Linearmaschine	81
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	Transversalfluss-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
6	Zusammenfassung und Ausblick	153
A	Anhang	159
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
Literatur		189
Abbildungsverzeichnis		204
Tabellenverzeichnis		205
Symbolverzeichnis		207