



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>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Eine wesentliche Herausforderung der gegenwärtigen Zeit ist die Bewältigung der Klimakrise. Mit dem Anstieg der globalen Temperaturen sind neben irreversiblen Veränderungen der Ökosysteme auch soziale und politische Probleme verbunden, die ein enormes Konfliktpotential bergen. Die möglichen Klimaschutzmaßnahmen werden daher kontrovers diskutiert. Grundsätzliche Einigkeit besteht in der Annahme, dass eine deutliche Senkung der globalen Emissionen notwendig ist. Nur durch einen nachhaltigen Umgang mit den verfügbaren Energieressourcen lassen sich die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels beherrschen.

Das „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC), der Klimarat der Vereinten Nationen, fasst in regelmäßigen Berichten den wissenschaftlichen Stand des Klimawandels zusammen. Kernaussage des aktuellen Berichtes aus dem Jahr 2022 ist, dass eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen erforderlich ist, um eine Temperaturerhöhung von über 1,5 °C im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu verhindern [1]. Die größten globalen Verursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen sind der Elektrizitäts- und Wärmesektor mit 42 % sowie der Verkehrssektor mit 25 %, wie Abb. 1.1 zeigt.

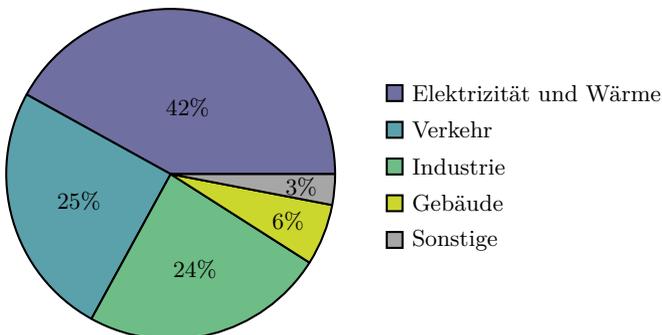


Abbildung 1.1: Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen, weltweit nach Sektoren [2]

Die Voraussetzung für die Senkung dieser Emissionen ist eine elektrische Energieerzeugung, die ohne Verbrennung fossiler Energieträger realisiert wird. Der dafür notwendige Ausbau erneuerbarer Energien wird vermehrt zu Situationen führen, in denen die Energieerzeugung die Last übertrifft. Die derzeitige Lösung des Problems besteht darin, die Energie zu z. T. negativen Preisen an Nachbarländer zu verkaufen oder Windkraft- und Photovoltaikanlagen zur Frequenzhaltung im Verteilnetz abzuregeln.

Eine Alternative zur Abregelung der Erzeugungseinheiten oder zum Verkauf ist die Speicherung der überschüssigen Energie. Speicher konkurrieren grundsätzlich mit anderen Flexibilitätsoptionen im Energiemarkt. Studien zeigen, dass ab einer Energieversorgung, die zu etwa 80 % aus regenerativ erzeugter Energie besteht, die Speicherung der überschüssigen Energie aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll wird [3]. Im Jahr 2020 lag der Anteil regenerativ erzeugter elektrischer Energie in Deutschland bei 50,3 %, mit stark wachsender Tendenz, wie z. B. aus [4] hervorgeht, so dass eine Zwischenspeicherung der schwankenden Energiebereitstellung anzustreben ist.

Eine vielversprechende Möglichkeit, insbesondere zur saisonalen Langzeitspeicherung, bietet die chemische Speicherung in Form von Wasserstoff („Power-to-Gas“). Mittels Elektrolyse wird, unter Zuführung elektrischer Energie, Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff gespalten:



Als Speicherort kommen neben größeren Tanks oder unterirdischen Kavernen die vorhandene Infrastruktur des Erdgasnetzes in Frage. Die Speicherkapazitäten des Gasnetzes betragen ca. 220 TWh [5]. Die benötigten saisonalen Speicherkapazitäten hängen von unterschiedlichen Faktoren ab, werden verschiedener Studien nach aber in der Größenordnung von 30 TWh für eine 80-prozentige Versorgung mit erneuerbaren Energien liegen [3], [6].

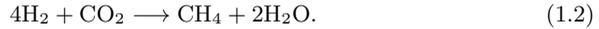
Derzeit ist ein Volumenanteil von maximal 5 %<sup>1</sup> Wasserstoff im Erdgasnetz zugelassen. Eine höhere Beimischung bedarf Anpassungen einiger Anwendungen wie z. B. Gasturbinen oder Erdgastanks in Fahrzeugen, die auf höhere Wasserstoffanteile nicht ausgelegt sind [7].

Eine Möglichkeit zur Umgehung der begrenzten Einspeisung von Wasserstoff besteht in der Methanisierung. In einem weiteren Prozessschritt, dem Sabatierprozess, kön-

---

<sup>1</sup>Ein Volumenanteil von 5 % entspricht 1,5 % der gespeicherten Energie.

nen Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid in synthetisches Methan umgewandelt und damit ohne Restriktion in Gasnetz und -speicher eingespeist werden [7]:



Das folgende Schaubild in Abb. 1.2 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Wasserstoff auf. Neben der Methanisierung können die so genannten E-Fuels<sup>2</sup> mittels Fischer-Tropsch-Verfahren produziert werden.

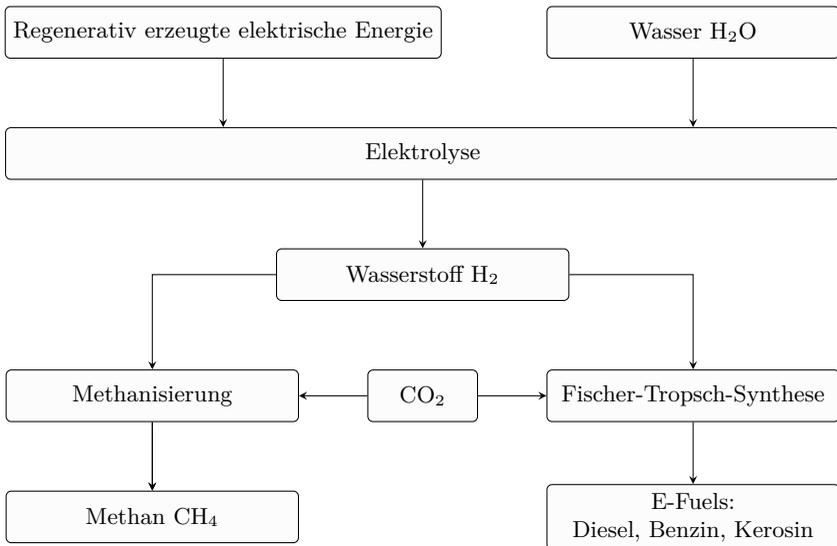


Abbildung 1.2: Energetische Nutzung des Wasserstoffs

Bei entsprechender Nachfrage muss die chemische Energie im Gas anschließend wieder in elektrische Energie zurückgewandelt werden. Dazu existieren verschiedenen Ausspeichertechnologien, wie Brennstoffzellen, (Mikro-)Gasturbinen oder Kolbenmotoren, zu denen Freikolbenlineargeneratoren zählen.

Die Brennstoffzelle funktioniert prinzipiell als Umkehrung der Elektrolyse. Die Energiewandlung erfolgt direkt von chemischer Bindungsenergie in elektrische Energie,

<sup>2</sup>Als *E-Fuels* werden synthetische Kraftstoffe bezeichnet, die aus Wasser und Kohlenstoffdioxid unter Zuführung elektrischer Energie produziert werden.

ohne als Zwischenschritt thermische Energie zu erzeugen. Damit können verhältnismäßig hohe Wirkungsgrade erreicht werden. Diese liegen, abhängig von der Bauweise, bei etwa 60 % [8]. Mit einer Reihenschaltung mehrerer Zellen als Stack ist außerdem eine sehr gute Skalierbarkeit gewährleistet. Allerdings muss der Wasserstoff für die Verwendung in Brennstoffzellen eine sehr hohe Reinheit aufweisen. In der DIN EN 17124 wird ein Wasserstoffanteil von mindestens 99,97 % vorgeschrieben [9].

Gasturbinen funktionieren nach dem Prinzip, dass verdichtete Luft einer Brennkammer zugeführt und auf Temperaturen von etwa 1500 °C erhitzt wird, um anschließend in einer Turbine, die einen Generator antreibt, zu expandieren. Mikrogasturbinen können mit einem größeren Spektrum an Brennstoffen betrieben werden, solange ein Mindestheizwert vorhanden ist, mit dem der erforderliche Druck aufgebracht werden kann. Sie müssen allerdings mit einer hohen Mindestlast betrieben werden und besitzen daher im Teillastbereich einen schwachen Wirkungsgrad [10].

Als Alternative zu Brennstoffzellen und Gasturbinen bietet sich der Einsatz eines Freikolbenmotors mit gekoppeltem Lineargenerator an. Durch die Möglichkeit, die Verdichtung des Brennstoff-Luft-Gemischs anzupassen, bietet dieser eine hohe Flexibilität bezüglich des eingesetzten Brennstoffs. Freikolbenmotoren eignen sich daher besonders für Brennstoffe mit variabler Zusammensetzung. Dies ist, wie zuvor geschildert, beispielsweise bei einer potentiellen Beimischung von Wasserstoff in das Erdgasnetz der Fall.

Freikolbenmaschinen mit Lineargenerator können neben der stationären Energieumwandlung zu Strom (und ggf. Wärme) für weitere Anwendungsbereiche eingesetzt werden:

- Als Range-Extender zur Erzeugung der elektrischen Energie für Traktionsantriebe von Straßenfahrzeugen.
- Zur Notstromversorgung, beispielsweise als Backup in Krankenhäusern oder Rechenzentren.
- Zur Hilfsenergieversorgung, z. B. in Flugzeugen.

Im Gegensatz zur Brennstoffzelle oder Mikrogasturbine ist die Technologie des Freikolbenlineargenerators am wenigsten ausgereift. Hier sind noch grundlegende Forschungsarbeiten erforderlich.

Insgesamt bieten Freikolbenmaschinen allerdings eine Möglichkeit, zur Dekarbonisierung des Energie- und Verkehrssektors beizutragen und damit einen Anteil an der Bewältigung des Klimawandels zu leisten.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist die systematische Analyse und Bewertung der effizienten Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie mit Hilfe eines Freikolbenmotors.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist es zunächst erforderlich, umfassende Modelle zu entwickeln, die das Gesamtsystem, bestehend aus einem Freikolbenmotor mit einem gekoppelten Lineargenerator, detailliert beschreiben. Diese Modelle basieren auf den thermodynamischen und physikalischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten. Durch die Simulation des Gesamtsystems sollen anschließend die für den Betrieb des Freikolbenmotors relevanten Parameter identifiziert und analysiert werden.

Basierend auf der Analyse des Gesamtsystems ist es möglich, die elektrische Linearmaschine zu entwerfen und zu optimieren. Dafür sind verschiedene Topologien für den Einsatz in einem Freikolbenmotor zu evaluieren. Für die Anwendung muss eine hohe Schubkraft bei geringer Läufermasse und gleichzeitig hohem Wirkungsgrad realisiert werden. Dazu sind detaillierte Auslegungen erforderlich, die sowohl die elektromagnetischen als auch die thermischen Randbedingungen berücksichtigen, basierend auf analytischen Berechnungen und numerischen Simulationen mittels Finite-Elemente-Methode. Durch den Einsatz multikriterieller Optimierungen sollen die verschiedenen gegensätzlichen Zielgrößen für die Auslegung des Lineargenerators berücksichtigt werden. Das Ziel der Optimierung besteht darin, die Auswahl der optimalen elektrischen Maschine zu treffen und gleichzeitig eine ganzheitliche Bewertung verschiedener Topologien bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz im Freikolbenmotor zu ermöglichen.

## 1.3 Gliederung

Der grundsätzliche Aufbau der vorliegenden Arbeit wird anhand des Strukturdiagramms in Abb. 1.3 erläutert. Die einzelnen Blöcke entsprechen den verschiedenen Kapiteln, die thematisch aufeinander aufbauen und im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Ausgehend von der Motivation, die elektrische Energiewandlung in einem Freikolbenmotor systematisch zu analysieren und zu optimieren, behandelt das zweite Kapitel die Grundlagen zu Freikolbenmaschinen. Hier werden Funktionsweise, Bauweisen und speziellen Eigenschaften dieser Maschinen ausführlich behandelt. Anschließend erfolgt eine historische Betrachtung ihrer Entwicklung bis zum aktuellen Stand der Technik, wobei der Fokus auf Freikolbenmotoren mit elektrischer Energieauskopplung („Freikolbenlineargeneratoren“) liegt.

Im dritten Kapitel erfolgt die Modellierung der Komponenten eines Freikolbenlineargenerators. Die Verkopplung der Teilsysteme erfordert eine ganzheitliche Betrachtung. In Submodellen werden die Energiefreisetzung des Verbrennungsprozesses, die Zwischenspeicherung der kinetischen Energie in der pneumatischen Feder, der Wärmeübergang an den Zylinderwänden, der Einfluss der Reibung zwischen Kolben und Zylinder sowie die elektrische Linearmaschine anhand ihrer Systemgleichungen dargestellt.

Mit Hilfe des entworfenen Modells erfolgt im anschließenden vierten Kapitel die Analyse des Gesamtsystems. Dabei wird der Einfluss verschiedener Parameter auf das dynamische Verhalten des Freikolbenlineargenerators untersucht. Die Darstellung und Aufbereitung der Simulationsergebnisse liefert einen detaillierten Einblick in die Betriebseigenschaften des Systems. Darüber hinaus werden Randbedingungen definiert, die für den Entwurf des Lineargenerators notwendig sind. Dazu zählt die Festlegung eines Betriebspunktes für die elektrische Maschine. Dies ist erforderlich, um den Wirkungsgrad und den Leistungsfaktor des Lineargenerators zu ermitteln.

Anschließend wird im fünften Kapitel eine Methodik zur Optimierung elektrischer Linearmaschinen vorgestellt und angewendet. Die Analyse des Gesamtsystems im vorherigen Kapitel definiert die Anforderungen an die elektrische Maschine. Darauf aufbauend erfolgt die Auswahl möglicher Lineargenerator-Topologien, welche die Spezifikationen erfüllen. Hierzu zählen permanentmagneterregte Maschinen in flacher und zylindrischer Bauweise, flussmodulierte Maschinen wie die Vernier- oder Flux-Switching Maschine sowie Reluktanz- und Transversalflussmaschinen. Nachdem deren Funktionsweise beschrieben wurde, erfolgt der Modellentwurf in Finiterelemente-Software. Mit Hilfe der entworfenen Modelle werden anschließend multi-kriterielle Optimierungen durchgeführt. Der genetische Algorithmus NSGA-II wird an die vorliegende Problemstellung angepasst, sodass die konkurrierenden Zielgrößen Wirkungsgrad, Kraftdichte und Leistungsfaktor gleichzeitig berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Optimierungen ist für jede Topologie eine Schar an optimalen Entwürfen, die auf einer dreidimensionalen Pareto-Fläche dargestellt werden. Daran anschließend erfolgen eine Diskussion und Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse und ein Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten schließen die Arbeit ab.

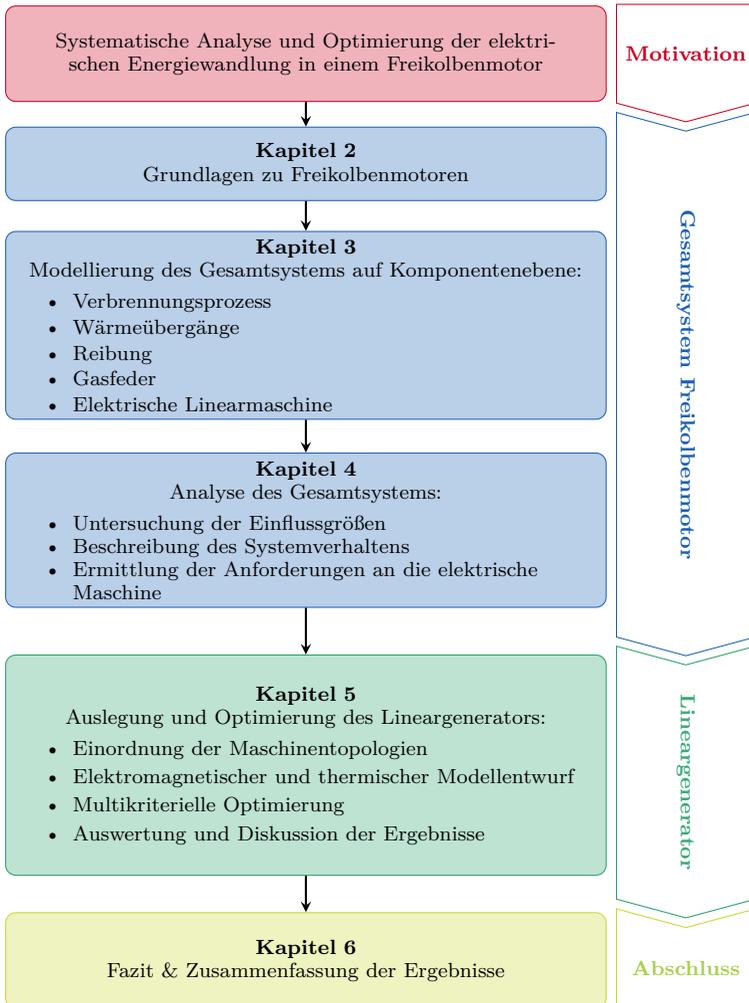


Abbildung 1.3: Gliederung der vorliegenden Arbeit



## 2 Die Freikolbenmaschine

In diesem Kapitel werden zu Beginn die grundlegenden Eigenschaften von Freikolbenmaschinen (FKM) vorgestellt. Dabei werden insbesondere die Funktionen der einzelnen Komponenten, die verschiedenen Bauweisen und die Unterschiede zu einer konventionellen Verbrennungskraftmaschine (VKM) aufgezeigt. Anschließend werden die Ursprünge in der Entwicklung dieser Maschinenart dargestellt, bevor detailliert der Stand der Technik von Freikolbenmaschinen mit elektrischer Energieauskoppelung aufgezeigt und diese Arbeit entsprechend eingeordnet wird.

Eine Freikolbenmaschine ist eine Verbrennungskraftmaschine, bei der die chemische Energie eines Brennstoffs direkt in elektrische, pneumatische oder hydraulische Energie umgewandelt wird. Die Funktionsweise basiert auf einem linear oszillierenden Kolben, dessen Bewegung frei zwischen den beiden Totpunkten erfolgt. Die einzelnen Komponenten sind in Abb. 2.1 skizziert. Dazu zählen der Brennraum (1), ein Energiespeicher (2), der in der Regel durch eine pneumatische Feder realisiert wird und die Last (3) (hier als elektrische Maschine dargestellt), die durch den Kolben (4) miteinander gekoppelt sind.

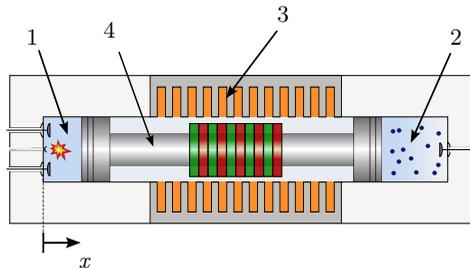


Abbildung 2.1: Komponenten eines Freikolbenmotors

Im Folgenden wird der Arbeitsprozess einer Freikolbenmaschine in der Ausführung mit einem Lineargenerator beschrieben. Abb. 2.2 stellt die verschiedenen Phasen grafisch dar. Die gesamte Kolbeneinheit, bestehend aus dem Verbrennungskolben, dem Läufer des Lineargenerators und dem Gasfederkolben, oszilliert zwischen dem

