



Der Linear-Planetenmotor

Mario Nikowitz · Andreas Brunner · Manfred Schrödl

Eingegangen: 11. Januar 2022 / Angenommen: 7. Februar 2022 / Online publiziert: 9. März 2022
 © Der/die Autor(en) 2022

Zusammenfassung Die vorliegende Abhandlung stellt einen neuartigen Ansatz eines Linearmotors basierend auf dem Planetenmotorprinzip vor. Bei dem so genannten Planetenmotor handelt es sich um eine Multi-Rotor-Permanentmagnet-Synchronmaschine (PMSM), welche erstmals im Jahr 2017 veröffentlicht wurde. Durch das elektromagnetische Design des Motors in Kombination mit der geschickten Verschaltung der einzelnen Wicklungen verhält sich der Planetenmotor wie eine herkömmliche dreiphasige PMSM und kann so mit handelsüblichen Umrichtern feldorientiert betrieben werden. Um nun eine lineare Bewegung zu ermöglichen, ist eine Modifikation des Wicklungssystems notwendig. Durch den speziellen Aufbau des Planetenmotors ist es außerdem möglich, eine kostengünstige Lagerung des Linearschlittens zu entwickeln, welche den Einsatz von zusätzlichen externen Lagern überflüssig macht. Messungen am Prototyp bestätigen die Performance des neuartigen Linear-Planetenmotors.

Schlüsselwörter Linearantrieb · Planetenmotor · Multi-Rotor-Maschine · PMSM

The linear Planetary Motor

Abstract This paper presents a novel linear motor based on a modified Planetary Motor approach. The Planetary Motor is a multi-rotor permanent magnet synchronous motor (PMSM), first introduced in 2017. Due to its electromagnetic design and the windings' smart interconnection, the Planetary Motor acts like a common three-phase PMSM and can thus be oper-

ated easily by using a standard voltage source inverter. In order to enable a linear motion, the stator windings have to be modified. Due to the specific design of the Planetary Motor, it is possible to develop an inexpensive bearing of the carriage so that no additional external bearings are necessary. Measurements carried out on the prototype verify the performance of the novel linear Planetary Motor.

Keywords Linear motor · Planetary Motor · Multi-rotor machine · PMSM

1 Einleitung

Permanentmagneterregte Synchronmaschinen (PMSM) sind als hocheffiziente Antriebsmaschinen in der Industrie weit verbreitet. Speziell ihre sehr hohe Energiedichte macht sie unersetzlich für Anwendungen mit begrenztem Bauraum. Um diese sehr hohen Energiedichten erreichen zu können, werden PMSMs im hohen Drehzahlbereich betrieben [8], wobei die mechanische Abtriebsenergie mittels nachgeschaltetem Getriebe in den tieferen Drehzahlbereich transformiert wird.

Der sogenannte Planetenmotor, eine Multirotor-PMSM, stellt eine Sonderanwendung dieses Konzepts dar. Durch den verteilten Multirotor-Aufbau der Maschine ist ein Getriebe bereits integraler Bestandteil des Motors, wodurch das nachgeschaltete Getriebe zum Herabsetzen in den tieferen Drehzahlbereich entfallen kann [5]. Dies ermöglicht zum einen eine Reduktion des notwendigen Bauraums und somit auch des Gewichts als auch der Kosten. Zum anderen bietet auch die verteilte Geometrie des Motors mit den synchron drehenden Rotoren Möglichkeiten, sich an konkrete Anwendungen speziell anzupassen. In der vorliegenden Arbeit wird dies anhand eines Linearaktuators demonstriert.

M. Nikowitz (✉) · A. Brunner, OVE · M. Schrödl, OVE
 Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, TU
 Wien, Gusshausstrasse 25 E370-02, 1040 Wien, Österreich
mario.nikowitz@tuwien.ac.at

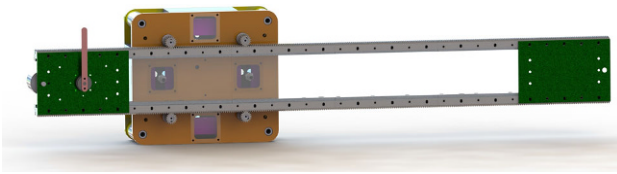


Abb. 1 3D CAD-Modell des Linear-Planetenmotors

Abb. 1 zeigt das 3D CAD-Modell des Linearmotors in Planetenmotorkonfiguration. Hierbei stellt das zentrale Modul den Planetenmotor einschließlich Steuer- und Leistungselektronik dar, wobei der Linearschlitten direkt durch die vier Rotoren gelagert ist.

2 Mathematisches Modell

Um einen Überblick über die verwendete mathematische Nomenklatur zu erhalten, sei im folgenden Kapitel kurz auf das zugrundeliegende mathematische Modell eingegangen. Die verwendeten Gleichungen sind, wenn nicht explizit anders vermerkt, in bezogener Form dargestellt. Wie bereits anfangs erwähnt, verhält sich der Planetenmotor aufgrund des Aufbaus und der Verschaltung des Wicklungssystems wie eine herkömmliche dreiphasige PMSM [7]. Somit lässt sich der Flussverkettungsraumzeiger $\underline{\psi}_s$ in gewohnter Form gemäß

$$\underline{\psi}_s = l_s \underline{i}_s + \underline{\psi}_M \quad (1)$$

angeben. Die Größen l_s und $\underline{\psi}_M$ repräsentieren hierbei die bezogene Statorinduktivität bzw. den bezogenen Flussverkettungsraumzeiger hervorgerufen durch die Permanentmagnete, wobei \underline{i}_s den bezogenen Statorstromraumzeiger darstellt. Um das Modell möglichst einfach zu halten, wurde die kaum ausgeprägte Achssymmetrie der Maschine näherungsweise vernachlässigt. In anderen Worten sind die bezogene Längsinduktivität $l_{s,d}$ und die bezogene Querinduktivität $l_{s,q}$ näherungsweise gleich groß ($l_{s,d} \approx l_{s,q} \approx l_s$), wodurch die somit entstandenen Modellfehler bei der untersuchten Maschine vertretbar gering sind. Mit der Flussverkettungsraumzeiger-Gleichung (1) lässt sich folglich die Gleichung für den bezogenen Statorspannungsraumzeiger \underline{u}_s wie folgt angeben

$$\underline{u}_s = r_s \underline{i}_s + l_s \frac{d\underline{i}_s}{dt} + j \omega_{el} \underline{\psi}_s, \quad (2)$$

wobei r_s den bezogenen Statorwiderstand, τ die bezogene Zeit und ω_{el} die bezogene Winkelgeschwindigkeit der Maschine repräsentiert. Schlussendlich kann das bezogene Drehmoment t gemäß

$$t = \left| \underline{\psi}_M \right| i_{s,q} \quad (3)$$

angegeben werden. Dabei stellt $i_{s,q}$ die orthogonale Statorstromkomponente auf den Flussverkettungsraumzeiger $\underline{\psi}_M$ dar.

3 Design des Linear-Planetenmotors

Um die Funktionalität des Linear-Planetenmotors verifizieren zu können, wurde im ersten Schritt die Entwicklung eines Demonstrator-Prototyps angestrebt. Dabei werden die verwendeten Spannungen auf den Niederspannungsbereich und auch die mechanische Energie auf ein ausreichend geringes Maß begrenzt. Tab. 1 zeigt die Nenndaten des aufgebauten Prototyps.

Bei voller elektromagnetischer Ausnutzung kann der Prototyp um ca. 400% überlastet werden.

3.1 Elektromagnetische Modifikationen

Das elektromagnetische Design des Planetenmotors basiert auf der in [6] vorgestellten Version. Für Linearantriebe, mit welchen hinreichend genau positioniert werden soll, ist ein geringes Rastmoment unverzichtbar. Um das Rastmoment der Maschine auf ein ausreichend geringes Maß zu reduzieren, wurden die 4 Rotoren aus zwei um 23° versetzten Teilrotoren aufgebaut. Abb. 2 zeigt hierbei beispielhaft den Aufbau eines der Rotoren.

Ausgehend von einem rotatorischen Planetenmotor-Prototyp wurde eine lineare Version entwickelt. Desweiteren war das zugrundeliegende elektromagnetische Design der Maschine für eine Zwischenkreisspannung von $U_{ZK} = 400\text{ V}$ ausgelegt. Um den Anforderungen der Niederspannung zu genügen, wurde im nächsten Schritt das Wicklungssystem auf eine Zwischenkreisspannung von $U_{ZK} = 48\text{ V}$ adaptiert.

Neben diesen Änderungen des Spannungsniveaus war eine Abänderung der Anordnungen der Wicklungen notwendig um eine lineare Bewegung des Schlittens zu ermöglichen. Damit sich der Linearschlitten links-rechts bewegen kann, müssen sich jeweils die oberen bzw. die unteren Rotoren paarweise in die selbe Richtung drehen (siehe Abb. 1). Um dies zu bewerkstelligen, wurden die Spulen im Vergleich zu den bisherigen Planetenmotor-Designs gemäß Abb. 3 ange-

Tab. 1 Nenndaten des Prototyps

Nenngeschwindigkeit (Schlitten)	$3,3\text{ m s}^{-1}$
Nenn-Zugkraft (Schlitten)	161,43 N
Nennstrom	28,3 A
Radius des Ritzels	9 mm

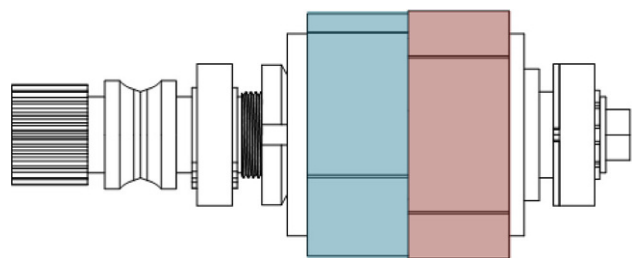


Abb. 2 Diskret geschrägter Rotor aus zwei gegeneinander versetzten Teilrotoren

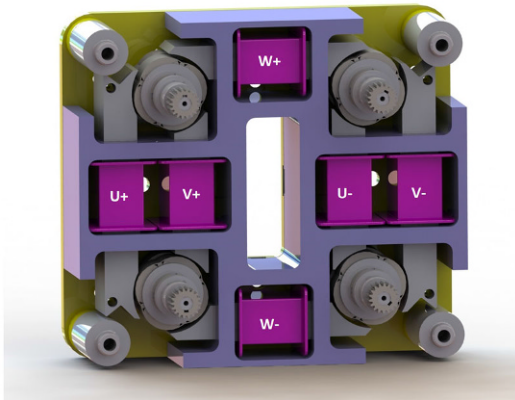


Abb. 3 Anordnung des Wicklungsystems

ordnet. Diese Anordnung der Statorspulen bewirkt im Luftspalt der oberen Rotoren ein Drehfeld, das sich in die mathematisch positive Richtung dreht, wobei das Drehfeld der unteren Rotoren in die mathematische negative Richtung rotiert.

3.2 Lagerung des Schlittens

Einer der größten Vorteile des Linear-Planetenmotors ergibt sich direkt aus der Geometrie des Motors selbst. Durch eine geschickte Platzierung der Rotoren kann die Lagerung des Linearschlittens direkt über die Rotorwellen erfolgen.

Wie Abb. 4 zeigt, wird hierfür auf der verlängerten Rotorwelle direkt nach dem Abtriebsritzel eine Führungsrolle fixiert. Diese Führungsrolle muss den selben Kontaktpunkt wie das Ritzel aufweisen, wodurch eine Entlastung des Ritzels gewährleistet ist und keine Gleitbewegungen in den Lagerungen auftreten. Durch diese Anordnung kann auf zusätzliche Lagerungen, wie z. B. in [3] verwendet, verzichtet werden, was wiederum die Kosten des Linearantriebs verringert, ohne die Komplexität des Systems wesentlich zu erhöhen [4].

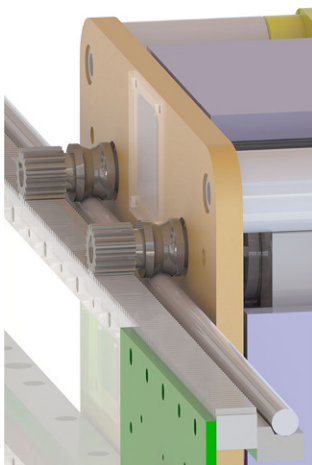


Abb. 4 Lagerung des Linearschlittens

3.3 Kompakter integrierter Umrichter

Um eine PMSM feldorientiert betreiben zu können, ist typischerweise ein Spannungszwischenkreis-Umrichter notwendig, welcher idealerweise integriert am bzw. im Motor sitzt. Wie in Abb. 3 gut ersichtlich ist, bietet sich hierfür im Fall des Linear-Planetenmotors der freie Bereich im Zentrum des Planetenmotors an.

Bei dem in Abb. 5 dargestellten Umrichter handelt es sich um einen dreiphasigen MOSFET Umrichter. Dieser Umrichter wurde so einfach wie möglich konzipiert, um den begrenzten Bauraum bestmöglich zu nutzen. Tab. 2 listet hierzu die wesentlichen Merkmale des Umrichters auf.

Gemeinsam mit dem vorgestellten integrierten Umrichter stellt der Linear-Planetenmotor eine sehr kompakte Linearantriebseinheit dar, welche in diversen Industrieapplikationen Anwendung finden kann. Um den platz- und kostensparenden Gedanken noch weiter zu treiben, wäre außerdem noch die Implementierung einer geberloser Regelung des Planetenmotors denkbar [1]. Diese würde neben dem platzsparenden Effekt noch zusätzlich die Kosten des Antriebssystems senken und dessen Ausfallssicherheit steigern. Die Implementierung einer geberlosen feldorientierten Regelung wird in einem nachfolgenden Projektschritt umgesetzt.

4 Messungen am Prototyp

Um die Leistungsfähigkeit des Linear-Planetenmotors zu charakterisieren, wurden Messungen am Prototyp durchgeführt, welche zum einen die elektrischen Aspekte des Motors beleuchten und zum anderen auf die mechanischen Eigenschaften des Linearantriebs eingehen. Abschließend wurde noch das dynamische

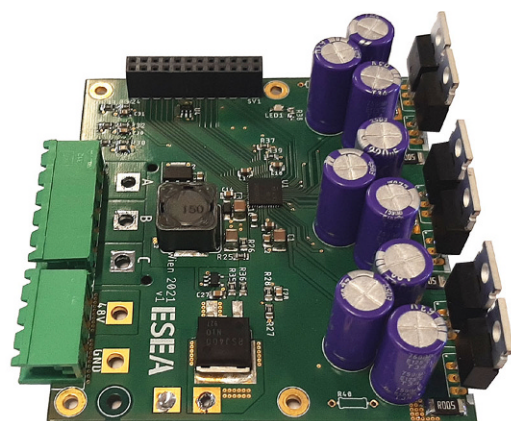


Abb. 5 Kompakter Spannungszwischenkreis-Umrichter

Tab. 2 Nenndaten des Umrichters

Max. Zwischenkreisspannung	63 V
Max. Phasenstrom	42 A
Max. PWM-Frequenz	20 kHz

Verhalten des Antriebssystems anhand einer Stabilisierung eines inversen Pendels in der instabilen Ruhelage untersucht.

4.1 Elektrische Messungen

Im ersten Experiment wurde die induzierte Spannung des Linear-Planetenmotors messtechnisch erfasst. Hierfür wurde der Linearantrieb bei offenen Anschlussklemmen extern aktuiert und die Außenleiterspannungen des Motors aufgenommen.

Abb. 6 zeigt den zugehörigen Verlauf der gemessenen Außenleiterspannungen bei einer Drehzahl von 1441 min^{-1} . Es ist erkennbar, dass die Maschine bezüglich ihrer drei Phasen weitgehend symmetrisch ist und dass die gemessenen Spannungen einen nahezu sinusförmigen Verlauf aufweisen. Dies lässt auf einen geringen Oberschwingungsanteil schließen, was ebenfalls durch die Analyse des Spektrums in Abb. 7 verifiziert werden konnte.

Desweiteren konnte aus dieser Messung der Betrag des Flussverkettungsraumzeigers hervorgerufen durch die Permanentmagnete zu $|\underline{\Psi}_M| = 15,9 \text{ mWb}$

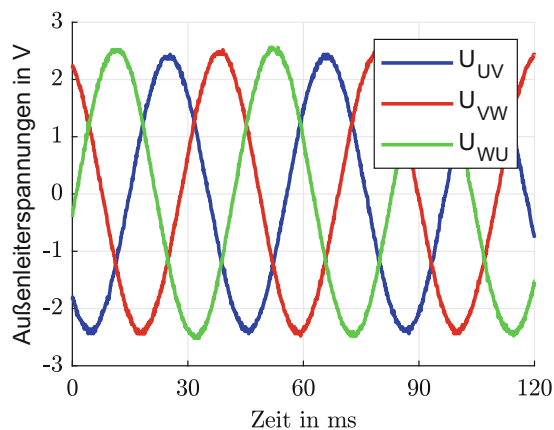


Abb. 6 Gemessene induzierte Außenleiterspannung bei einer Drehzahl von 1441 min^{-1}

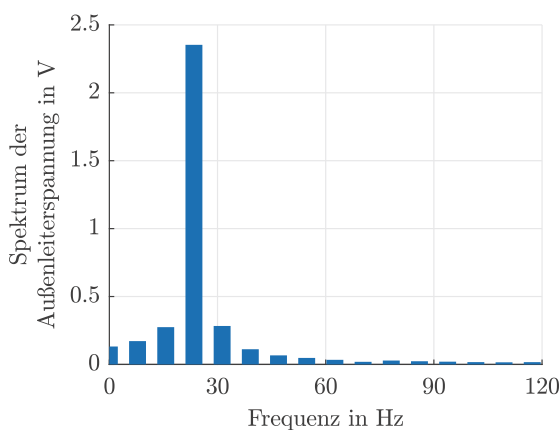


Abb. 7 Gemessenes Frequenzspektrum der induzierten Außenleiterspannung bei einer Drehzahl von 1441 min^{-1}

bestimmt werden. Gemeinsam mit der gemessenen Statorinduktivität $L_s = 0,394 \text{ mH}$, dem gemessenen Statorwiderstand $R_s = 22 \text{ m}\Omega$ und den Gleichungen aus Abschn. 2 lässt sich ein Zeigerdiagramm des Linear-Planetenmotors unter Volllast bei einer Drehzahl von 7800 min^{-1} ableiten und ein Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 0,8268$ bestimmen.

4.2 Mechanische Messungen

Die in diesem Abschnitt behandelten Untersuchungen beschäftigen sich mit den mechanischen Aspekten des Linearantriebs. Im ersten Experiment wurde die Zugkraft des Antriebs als Funktion des Betrags des Statorstroms messtechnisch aufgenommen.

Um dies zu bewerkstelligen wurde der Linearschlitten des Antriebs über eine Krafterfassung fixiert und drehmomentbildender Strom in die Maschine eingeprägt. Abb. 9 gibt den Verlauf der Zugkräfte bei unterschiedlichen Statorströmen wieder. Der nahezu lineare Verlauf der Kurve lässt auf einen weiten Überlastbereich der Maschine schließen bis sich Sättigungseffekte der elektromagnetischen Aktiveile einstellen. Bei einem Einsatz des Linearantriebs in einer Industrieanwendung kann der Eisenkreis wesentlich höher ausgenutzt werden.

Im nächsten Experiment wird die Maschine mit maximal verfügbarer Zugkraft hin und her beschleunigt, um die Dynamik des Systems untersuchen zu

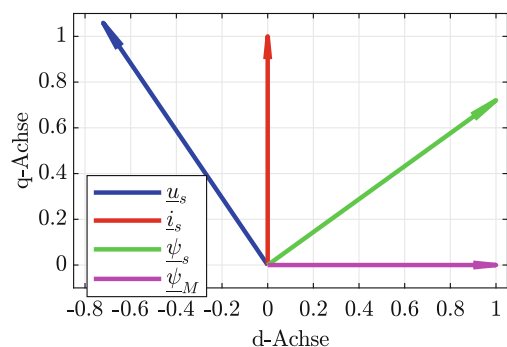


Abb. 8 Zeigerdiagramm des Linear-Planetenmotors in bezogener Darstellung bei Volllast und einer Drehzahl von 7800 min^{-1}

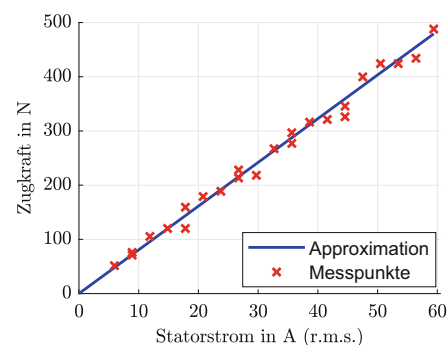


Abb. 9 Zugkraft als Funktion des Statorstrom-Betrags $|i_s|$

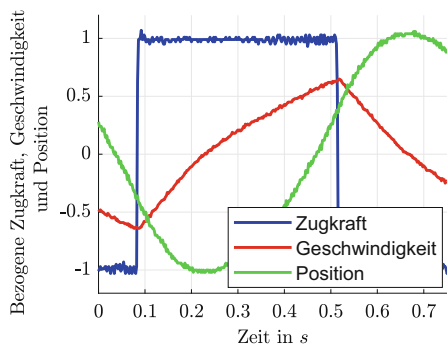


Abb. 10 Beschleunigungs-Experiment mit maximaler Zugkraft in bezogener Darstellung

Tab. 3 Bezugssystem für Abb. 10

Bezugszugkraft (Schlitten)	161,43 N
Bezugsgeschwindigkeit (Schlitten)	3,15 ms ⁻¹
Bezugsposition (Schlitten)	22,5 cm

können. Abb. 10 zeigt die zugehörigen Verläufe der Zugkraft, der Geschwindigkeit und der Position des Schlittens. Um die entsprechenden Größen in einem einzelnen Diagramm darstellen zu können, wurde diese auf ein Bezugssystem gemäß Tab. 3 normiert.

Trotz der Leistungslimitierung des Demonstrator-Prototyps konnten hohe Beschleunigungen des Linearschlittens erreicht werden, was auf eine hohe Dynamik des Linear-Planetenmotors schließen lässt. Es können folglich Linearanwendungen mit sehr hoher Dynamik realisiert werden.

4.3 Dynamisches Verhalten

Im letzten Experiment dieser Abhandlung soll das dynamische Verhalten des Motors anhand einer instabilen Regelstrecke gezeigt werden. Hierfür wird, wie in Abb. 11 dargestellt, ein inverses Pendel in dessen instabiler Ruhelage unter Zuhilfenahme des Linear-Planetenmotors als Aktuator stabilisiert. Um dies bewerkstelligen zu können, ist ein hohes Maß an dynamischem Verhalten sowie einer hohen Positionsgenauigkeit erforderlich. Die Regelung dieses Experiments basiert auf einem Riccati-Regler (LQR), siehe z. B. [2].

Um das Pendel initial von dessen stabiler (unterer) in die instabile (obere) Ruhelage zu bringen ist ein entsprechender Aufschwingvorgang notwendig. Abb. 12 zeigt die zugehörige Trajektorie der gemessenen Pendelposition, der gemessenen Pendelwinkelgeschwindigkeit und des vom Regler vorgegebenen Pendeldrehmoments. Wie man den Verläufen der Pendelposition wie auch der Pendelwinkelgeschwindigkeit entnehmen kann, folgen diese den vom Regler vorgegebenen Sollwerten sehr gut.

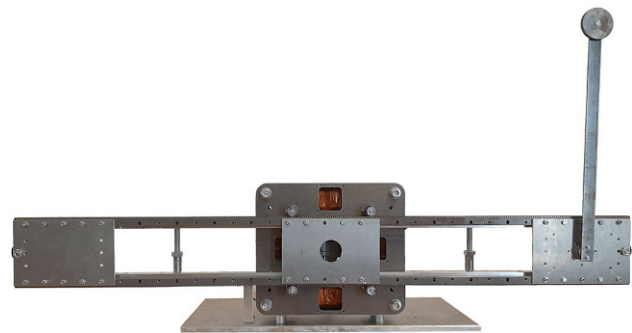


Abb. 11 Stabilisierung eines inversen Pendels in der instabilen Ruhelage unter Verwendung des Linear-Planetenmotors

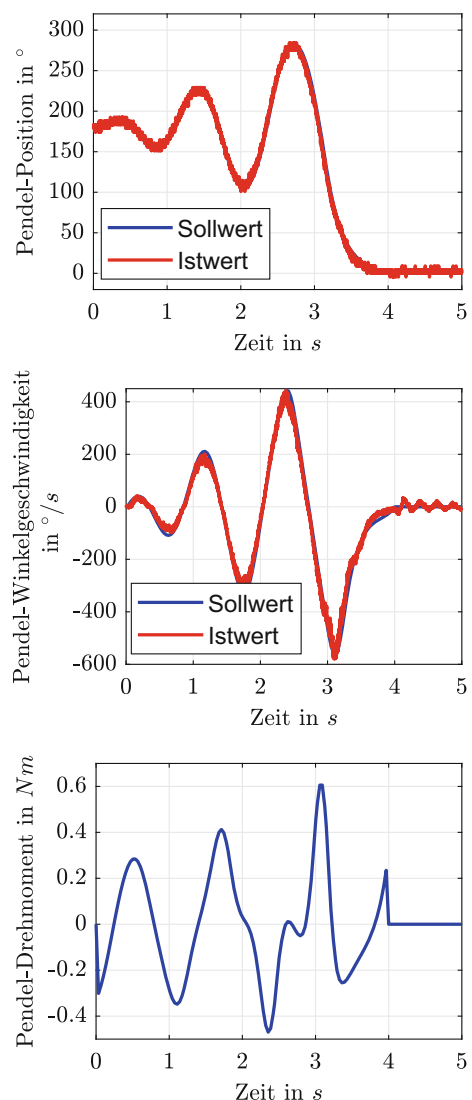


Abb. 12 Trajektorie des Aufschwingvorgangs von der unteren in die obere Ruhelage

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Linearmotor in Planetenmotorstruktur vorgestellt und dessen Leistungsfähigkeit messtechnisch erfasst. Um eine lineare

Bewegung mittels der bisherig vorgestellten rotatorischen Planetenmotoren bewerkstelligen zu können, waren verschiedene Modifikationen notwendig. Zum einen musste das Wicklungssystem des Stators dahingehend verändert werden, dass die Rotationen der einzelnen Rotoren in die richtige Richtung möglich sind. Zum anderen wurde eine Lagerung des Linearschlittens vorgestellt, welche eine weitere externe Lagerung überflüssig macht und somit die Kosten des Systems reduziert und die Geometrie des Motors bestmöglich ausnutzt. Zusammen mit dem integrierten Umrichter konnte somit ein kompakter Linearantrieb realisiert werden.

Mittels Messungen am Prototyp wurden schlussendlich die elektrischen Parameter des Motors bestimmt und die Leistungsfähigkeit des Demonstrations-Prototyps verifiziert. Anhand der Regelung einer instabilen Strecke wurden die hervorragenden dynamischen Eigenschaften des Systems verifiziert. In zukünftigen Untersuchungen wird das vorliegende Konzept hinsichtlich einer industriellen Anwendung optimiert, um die volle Leistungsfähigkeit des Linear-Planetenmotors zu untersuchen.

Funding Open access funding provided by TU Wien (TUW).

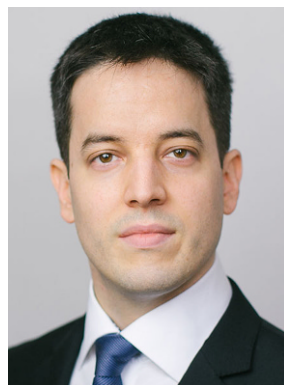
Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Brunner A, Spiessberger R, Schrödl M (2019) Sensorless control of a planetary motor. In: PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, S 1902–1907
2. Herrera D, Monllor M, Carelli R, Carstensen J, Wagner B (2017) Optimal control for balancing a rotary inverted pendulum: An experimental setting. In: 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC), S 1–6
3. Nakauchi S, Futami S, Nakagawa T (2017) Precise positioning control of a linear induction motor drive system by utilizing nonlinear friction behaviors. In: 2017 11th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), S 1–6
4. Poltschak F, Thalhammer R (2019) Winding layout for active bearing force reduction in tubular linear motors. In: 2019 12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA), S 1–6
5. Schrödl M (2017) Der (elektrische) Planetenmotor – Eine unkonventionelle Kombination von Elektromotor und Planetengetriebe. *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 134(2):170–176
6. Spiessberger R, Brunner A, Schrödl M (2019) Der Planetenmotor mit integrierter Elektronik und mechanischer Feldschwächung als neuer Antrieb für Elektro-KFZ. In: HdT-Tagung Elektrische Antriebstechnologie für Hybrid- und Elektrofahrzeuge, S 180–198
7. Spiessberger R, Brunner A, Schrödl M (2019) The four-pole planetary motor. In: PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, S 1902–1907
8. Viggiano F (ed) (1992) Aktive Magnetische Lagerung und Rotorkonstruktion Elektrischer Hochgeschwindigkeits-Antriebe. Dissertation ETH Zürich, Zürich



Mario Nikowitz, schloss im Juni 2016 das Masterstudium Automatisierungstechnik an der Technischen Universität Wien mit Auszeichnung ab. Anschließend wurde er am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe als Universitätsassistent angestellt. Seitdem ist er in mehreren Lehrveranstaltungen tätig, arbeitet bei diversen Industrieprojekten mit und schloss im Mai 2020 sein Doktorsstudium mit Auszeichnung ab. Mario Nikowitz beschäftigt sich im Rahmen seiner Forschungsarbeit mit dem optimalen und dem gerberlosen Betrieb von Synchron-Reluktanz Maschinen, dem Planetenmotor und mit Leistungselektronik für elektrische Antriebe.



Andreas Brunner, Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik an der Technischen Universität Wien, Österreich, Studienzweig Energie- und Automatisierungstechnik; Abschluss 2018. Seit 2018 Universitätsassistent am Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe.



Manfred Schrödl, Studium der Elektrotechnik an der Technischen Universität Wien, Österreich, Studiengang Industrielle Elektronik und Regelungstechnik; Abschluss 1982. Universitätsassistent am Institut für Elektrische Maschinen und Antriebe der TU Wien, 1987 Promotion zum Dr. techn., 1992 Habilitation für Elektrische Antriebe und Leistungselektronik in der Antriebstechnik. 1993 bis 1996 Leiter F&E bei Elin Verkehrstechnik Wien, 1996 bis 1998 Bereichsleiter

Zentrale Technik bei Flender ATB, Spielberg, Steiermark. Seit 1998 Ordentlicher Universitätsprofessor für Elektrische Antriebe und Maschinen sowie Vorstand des Instituts für Energiesysteme und Elektrische Antriebe an der TU Wien.