

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Simon Merz

**Analyse der Kinematik und Kinetik
von Planetenwälzgewindetrieben**

Band 267



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Simon Raphael Merz

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planeten- wälzgewindetrieben

Band 267

Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

der KIT-Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

Dissertation

von

M.Sc. Simon Raphael Merz

aus Bühl

Tag der mündlichen Prüfung: 16.08.2022

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9010-9

ISSN 0724-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Akademischer Mitarbeiter des wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für die Übernahme des Hauptreferats, die wertvolle Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl danke ich für die Übernahme des Koreferats und das entgegengebrachte Interesse an der Arbeit.

Für die großzügige Unterstützung und die Vielzahl an Fachgesprächen möchte ich mich bei Herrn Dietmar Rudy, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Bauer, Frau Bettina Rudy, Herrn Peter Lutz, Herrn Hans-Joachim Trösch und Frau Anna Kania herzlich bedanken.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Kollegen in der Gruppe MAP für die stets sehr gute Zusammenarbeit und Arbeitsatmosphäre sowie all die wertvollen Anregungen. Mir sind die vielen Stunden am Institut in all den Jahren durch euch leichtgefallen. Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern der Service Center des wbk. Ohne eure Unterstützung, besonders durch Werkstatt und IT, gäbe es all die Versuche und Simulationen dieser Arbeit nicht. Gerne möchte ich mich auch bei all meinen Studenten und Abschlussarbeitern bedanken. Ohne euch wäre vieles nicht möglich gewesen.

Zu guter Letzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern, meiner geliebten Frau Mónica, meiner süßen Tochter Anja, meinem Bruder Benedikt und Andrea herzlich bedanken. Vielen Dank für all eure unersetzliche Unterstützung, Zuversicht und Rücksicht. Ohne euren Rückhalt und Motivation wäre diese Arbeit sicherlich noch nicht beendet.

Karlsruhe, Sommer 2022

Simon Raphael Merz

Abstract

There are a variety of linear drives available for converting a rotary motion into a translational one. Planetary screw drives (PWG) are among the most suitable for applications requiring exceedingly high load capacity at maximum reduction ratio.

Up to date, the kinematics and dynamics of planetary screw drives have been poorly studied. Due to the vastly different motion and degrees of freedom of the planets, findings on roller screws (RGT) and planetary roller screws (PRGTs) are hardly transferable.

Within the scope of this work, the system knowledge of the PWG is to be expanded and the effects of a wide variety of influencing factors of application and geometry are to be investigated. One of the focal points of the analysis is the undefined motion of the planets, which is equipped with a high number of degrees of freedom.

Based on the state of the art, multi-body simulations are set up and validated by means of experiments. The simulations are used to investigate the influence of a wide variety of factors, such as preload and radial clearance, on the PWG. After analyzing the kinematics and the forces between the bodies, the rolling contacts themselves are analyzed to evaluate the influence of factors of application and geometry. Finally, selected factors are validated in experiments and the results are evaluated against the state of the art.

The analysis of the effects of the factors down to the contacts allows, for example, optimisation of the service life through the appropriate adjustment of the radial clearance and the pretension. Furthermore, the importance of checking the stability of forces, movements, contact forces and contact points for the PWG is proved – especially because of the high non-linear behaviors.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen und Stand der Technik	8
2.1 Funktion eines Planetenwälzgewindetriebes	8
2.2 Reibung in Kontakten	15
2.3 Schadensformen am PWG	16
2.4 Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von PWGs	21
2.5 Simulation von Linearantrieben	26
2.6 Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Forschung und Technik	32
3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise	34
3.1 Präzisierte Zielsetzung	34
3.2 Vorgehensweise zur Zielerreichung	35
3.2.1 Vorgehensweise in der Modellbildung des PWG	36
3.2.2 Vorgehensweise in der Systemanalyse des PWG	37
3.2.3 Vorgehensweise in der Kontaktanalyse des PWG	39
4 Modellbildung des PWG	41
4.1 Modellbildung durch Mehrkörpersimulationen	41
4.1.1 Aufbau der Mehrkörpersimulationen	41
4.1.2 Randbedingungen der Mehrkörpersimulationen	46
4.1.3 Ablauf der Mehrkörpersimulationen	51
4.1.4 Kalibrierung der Mehrkörpersimulationen	52
4.2 Modellbildung durch Versuche	60
4.2.1 Geforderte abbildbare Versuche	61
4.2.2 Wahl der zu messenden Größen	61

4.2.3	Versuchsaufbauten	62
5	Systemanalyse – Einflüsse auf Kinematik und Kinetik des PWGs	71
5.1	Analyse der Referenzgeometrie unter Referenzlast	71
5.2	Validierung der Simulation der Referenzgeometrie unter Referenzlast	79
5.3	Auswahl zu untersuchender Einflussgrößen aus Anwendung u. Geometrie	84
5.4	Variation der Anwendung	90
5.4.1	Vorspannung	91
5.4.2	Axialkraft	99
5.4.3	Drehzahl	105
5.4.4	Wahl der Betriebsparameter für die Analyse der Geometrie	111
5.5	Variation der Geometrie	112
5.5.1	Radialspiel	112
5.5.2	Planetenlänge	117
5.5.3	Flankenwinkel	123
5.5.4	Übersetzungsverhältnis	136
5.5.5	Steigung an den Planeten	141
5.6	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Baugrößen	143
5.7	Vergleich der Auswirkungen der Parameter aus Anwendung u. Geometrie	151
6	Kontaktanalyse – Auswirkungen von untersuchten Parametern	157
6.1	Auswirkungen von Einflussfaktoren auf die Kontaktkräfte	159
6.1.1	Auswirkung der Vorspannung auf die Kontaktkräfte	161
6.1.2	Auswirkung der Axialkraft auf die Kontaktkräfte	166
6.1.3	Auswirkung der Drehzahl auf die Kontaktkräfte	167
6.1.4	Auswirkung des Radialspiels auf die Kontaktkräfte	169
6.1.5	Auswirkung der Planetenlänge auf die Kontaktkräfte	171
6.2	Auswirkungen von Einflussfaktoren auf die Wälzkreise	174
6.2.1	Auswirkung der Vorspannung auf die Wälzkreise	174
6.2.2	Auswirkung der Axialkraft auf die Wälzkreise	178
6.2.3	Auswirkung der Drehzahl auf die Wälzkreise	179

6.2.4	Auswirkung des Radialspiels auf die Wälzkreise	180
6.2.5	Auswirkung der Planetenlänge auf die Wälzkreise	183
6.3	Vergleich der Auswirkungen untersuchter Parameter auf die Kontakte	184
6.4	Validierung von Auswirkungen eines Parameters auf die Kontakte	188
6.5	Anwendungsgrenzen der gezeigten Ergebnisse	190
7	Zusammenfassung und Ausblick	192
7.1	Zusammenfassung	192
7.2	Ausblick	193
Publikationsliste		I
Literaturverzeichnis		II
Abbildungsverzeichnis		XI
Tabellenverzeichnis		XXII
Anhang		XXIII

Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
μ_G	Gleitreibungskoeffizient	()
μ_H	Haftreibungskoeffizient	()
C_{Dyn}	Dynamische Tragfähigkeit	(kN)
C_{Stat}	Statische Tragfähigkeit	(kN)
D	Dämpfungskonstante	(N*s/mm)
d_{2M}	Wälzkreisdurchmesser an der/ den Muttern	(mm)
d_{2PM}	Wälzkreisdurchmesser an den Planeten in den Mutternkontakten	(mm)
d_{2PS}	Wälzkreisdurchmesser an den Planeten in den Spindelkontakten	(mm)
d_{2S}	Wälzkreisdurchmesser an der Spindel	(mm)
F	Axialkraft	(N)
F_N	Kontaktnormalkraft	(N)
F_R	Reibkraft	(N)
k	Federsteifigkeit im Kontakt	(N/mm)
K	Generalisierte Steifigkeit	(N/mm)
M	(Antriebs-)Nennmoment	(Nm)
n	Exponent für nichtlineare Kontaktmodelle	()
P_{Ges}	Gesamtsteigung	(mm/U)
P_S	Steigung der Spindelstange	(mm/U)
P_T	Gewindeteilung	(mm/U)
t	Zeit	(s), (ms)
δ	Relative Eindringtiefe	(mm)
$\dot{\delta}$	Durchdringungsgeschwindigkeit	(mm/s)

η	Wirkungsgrad	()
ϑ	Winkel zwischen einem Planeten und Spin- delachse zu zweitem Planeten und Spin- delachse	(°)

Abkürzung	Bedeutung
bspw.	Beispielsweise
bzw.	Beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CT	Computertomographie
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FEM	Finite Element Methode
FPGA	Field programmable gate array
KGT	Kugelgewindetrieb
MKS	Mehrkörpersimulation
PRGT	Planetenrollengewindetrieb
PWG	Planetenwälzgewindetrieb
RGT	Rollengewindetrieb
SPWG	synchronisierter Planetenwälzgewindetrieb
vgl.	Vergleiche
z.B.	Zum Beispiel