

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	6
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>8</b>
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
<b>3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>34</b>
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
<b>4 Modellbildung des PWG</b>	<b>41</b>
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
<b>5</b>	<b>Systemanalyse – Einflüsse auf Kinematik und Kinetik des PWGs</b>	<b>71</b>
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
<b>6</b>	<b>Kontaktanalyse – Auswirkungen von untersuchten Parametern</b>	<b>157</b>
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
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>192</b>
7.1	Zusammenfassung	192
7.2	Ausblick	193
<b>Publikationsliste</b>		<b>I</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>XXII</b>
<b>Anhang</b>		<b>XXIII</b>

## Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\mu_G$	Gleitreibungskoeffizient	()
$\mu_H$	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)
$\delta$	Relative Eindringtiefe	(mm)
$\dot{\delta}$	Durchdringungsgeschwindigkeit	(mm/s)

---

$\eta$	Wirkungsgrad	()
$\vartheta$	Winkel zwischen einem Planeten und Spin- delachse zu zweitem Planeten und Spin- delachse	(°)

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
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





# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Für elektromechanische Antriebskonzepte zur Erzeugung einer translatorischen Bewegung werden üblicherweise Linearantriebe als Wandlungsgetriebe von einer rotierenden Bewegung – z.B. eines Elektromotors – in eine translatorische Bewegung verwendet. Abbildung 1 zeigt eine Einteilung gängiger Linearantriebe anhand der durch ihre Übersetzung erreichten translatorischen Bewegungsgeschwindigkeiten. Zu den Linearantrieben mit niedrigen Übersetzungen und damit verhältnismäßig schnellen translatorischen Bewegungsgeschwindigkeiten zählen Ritzel-Zahnstangenantriebe (RZA) und Kugelgewindetriebe (KGT). Zu den Linearantrieben mit hohen Übersetzungen und damit verhältnismäßig langsamen translatorischen Bewegungsgeschwindigkeiten zählen Rollengewindetriebe (RGT), Planetenrollengewindetriebe (PRGT) und Planetenwälzgewindetriebe (PWG).

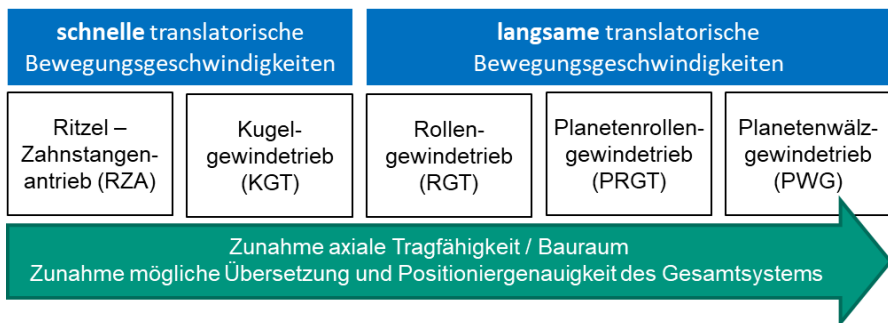


Abbildung 1 Einteilung von Linearantrieben anhand ihrer Übersetzung mit (Weck & Brecher 2006) und Michel<sup>1</sup>

Unter Verwendung eines gleichen Motors führt eine höhere Übersetzung des Linearantriebes zu einer niedrigeren translatorischen Bewegungsgeschwindigkeit. Aufgrund der höher übersetzten Winkelaufösung des Motors führt es zu einer besseren Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems.

<sup>1</sup> Michel, S., *Planetenwälzgewindetrieb nimmt es mit hydraulischen Antrieben auf.* <https://www.maschinemarkt.vogel.de/planetenwaelzgewindetrieb-nimmt-es-mit-hydraulischen-antrieben-auf-a-474332/> (zuletzt geprüft 10.11.2020).

Die aufgezeigten Linearantriebe unterscheiden sich weiterhin durch die axiale Tragfähigkeit pro Bauraum. Die axiale Tragfähigkeit einer jeden Komponente hängt von der Anzahl an gleichzeitigen Kontakten und der Größe der einzelnen Kontaktflächen ab. Bei RZAs sind ein bis mehrere Zähne des Ritzels gleichzeitig mit Zähnen der Zahnstange in linienförmigen Kontakten im Eingriff. Bei KGTs werden Axialkräfte über eine Vielzahl an Punktkontakten der Kugeln übertragen. Bei RGTs, PRGTs und PWGs sind mehrere Hundert linienförmige Kontakte gleichzeitig im Eingriff. In Folge erreichen RGTs, PRGTs und PWGs im Vergleich eine deutlich größere axiale Tragfähigkeit pro Bauraum.

Für Anwendungen, in denen eine hohe Tragfähigkeit und Leistungsdichte (axiale Tragfähigkeit pro Volumen) bei geringen Bewegungsgeschwindigkeiten gefordert ist, bieten sich insbesondere RGTs, PRGTs und PWGs an. Sie werden bspw. in Messmaschinen, Pressen, Spritzgussmaschinen, elektromechanische Zylinder und Kupplungsaktuatoren verwendet.

In diesen Anwendungen werden heute auch häufig KGTs eingesetzt. RZA sind in dafür eher unüblich. Ralf Gleichmann<sup>2</sup> vergleicht beispielsweise die Anwendung von PRGTs und KGTs in einer Maschine, in der mit einer Presskraft von 10t gepresst wird. Dabei wird die von PRGTs im Vergleich zu KGTs deutlich höhere Tragfähigkeit pro Bauraum (Volumen) deutlich gezeigt: Es wird ein KGT mit einem Spindeldurchmesser von 80mm oder ein PRGT mit einem Spindeldurchmesser von 48mm benötigt. Für Messmaschinen ist hingegen die Positioniergenauigkeit des Gesamtsystems von höchster Bedeutung. Die Positioniergenauigkeit ist u.a. stark abhängig von der minimal stellbaren Schrittweite. Die minimal stellbare Schrittweite setzt sich aus der Winkelauflösung des verwendeten Motors, der Systemsteigung des Linearantriebes und der Übersetzung eines ggf. verwendeten Getriebes zusammen. Prinzipbedingt können KGTs nach Michel<sup>3</sup> und Siedenhans<sup>4</sup> sehr kleine Systemsteigungen nicht realisieren. Um mit KGTs die gleichen minimal stellbaren Schrittweiten und damit gleiche Positioniergenauigkeit wie RGTs, PRGTs und PWGs zu erreichen werden daher entweder weitere

---

<sup>2</sup> Gleichmann, R., *Planetengewindetriebe bieten große Kraft auf kleinstem Raum*. <https://www.blechnet.com/planetengewindetriebe-bieten-grosse-kraft-auf-kleinstem-raum-a-405173/?p=2> (zuletzt geprüft 10.11.2020).

<sup>3</sup> Michel, S., *Planetenwälzgewindetrieb nimmt es mit hydraulischen Antrieben auf*. <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/planetenwaelzgewindetrieb-nimmt-es-mit-hydraulischen-antrieben-auf-a-474332/> (zuletzt geprüft 10.11.2020).

<sup>4</sup> Siedenhans, B., *Rollengewindetriebe*. <https://www.ludwigmeister.de/technische-informationen/rollengewindetriebe> (zuletzt geprüft 11.10.2020).

Getriebestufen zwischen KGT und Motor oder ein Motor mit einer höheren Winkelauf-  
lösung benötigt. Beide Maßnahmen sind mit erhöhtem Aufwand und Kosten in der Me-  
chanik oder der Elektronik verbunden.

Auf Basis ihres Aufbaus sollen im Folgenden die Unterschiede in der Eignung von  
RGTs, PRGTs und PWGs für Anwendungen, in denen eine hohe Tragfähigkeit und  
Leistungsdichte bei geringen Bewegungsgeschwindigkeiten gefordert ist, aufgezeigt  
werden. Dazu werden zuerst der unterschiedliche Aufbau und Kinematik dieser Kom-  
ponenten und anschließend die erreichbaren Systemsteigungen und Tragfähigkeiten  
diskutiert.

RGTs, PRGTs und PWGs sind grundsätzlich ähnlich aufgebaut. Ihr Aufbau ähnelt Pla-  
netengetrieben, allerdings wandeln sie eine rotative Bewegung in eine translatorische  
Bewegung. Alle drei genannten Linearantriebe besitzen eine oder zwei Muttern, Rollen  
bzw. Planeten und eine Spindel. Alle drei Antriebe stützen die Kräfte über Gewinde  
bzw. Rillen der Planeten an den Muttern und der Spindel ab. Beispielhaft ist dies für  
einen PWG in Abbildung 2 zu sehen.

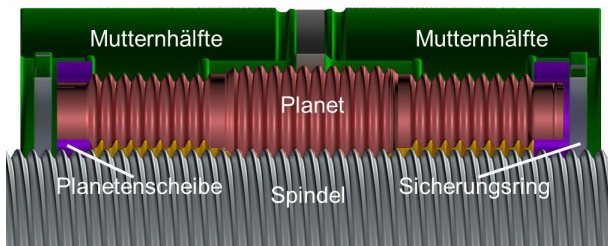


Abbildung 2 Halbschnitt durch einen PWG (exemplarisch)

In der folgenden Tabelle 1 wird ein Vergleich von RGT, PRGT und PWG anhand ihrer  
Komponenten dargestellt. Leider verwenden Hersteller und die Literatur teilweise die  
gleichen Namen für unterschiedliche Komponenten oder unterschiedliche Namen für  
die gleiche Komponente. Bspw. findet man in der englischsprachigen Literatur RGTs,  
PRGTs und PWGs unter dem Namen „planetary screw drive“ ohne eine jegliche Unter-  
scheidung. Im Rahmen dieser Arbeit sind RGTs die Komponenten mit einer Rollenrück-  
führung, PRGTs die Komponenten mit einer zusätzlichen Stirnverzahnung an den Pla-  
neten und PWGs jene ohne Rollenrückführung und ohne Stirnverzahnung.

Tabelle 1 Vergleich RGT, PRGT und PWG. RGT nach Siedenhans<sup>5</sup>, PRGT nach (Bosch Rexroth AG 2020) und PWG nach eigener Analyse von CAD Modellen.

	Muttern	Planeten	Spindel	Käfig
RGT	mit Steigung; Rollerückführung	Umfangsrillen ohne Steigung	mit Steigung	ungeteilt mit seitlicher Führung der Planeten
PRGT	mit Steigung; mit Verzahnung	mit Steigung, Verzahnung an den Stirnseiten der Planeten	mit Steigung	geteilt
PWG	ohne Steigung	Umfangsrillen ohne Steigung, getrennte Mutter- und Spindelkontakte	mit Steigung	geteilt

Die Verzahnung an beiden Stirnseiten der Planeten beim PRGT und die seitliche Führung der Planeten durch den ungeteilten Käfig beim RGT verhindern bei diesen beiden Komponenten ein Schränken der Planeten (Definition Schränken siehe Kapitel 2.1). Beim PWG können die Planeten hingegen deutlich schränken. Begründet liegt dies im vorhandenen Radialspiel. Das Radialspiel wird aufgrund der Fertigungstoleranzen zur Funktion benötigt. Damit sind die Planetenbewegungen beim PWG weniger definiert als beim RGT und beim PRGT. Aufgrund der Verzahnungen beim PRGT und der seitlichen Führung durch den ungeteilten Käfig beim RGT sind Ergebnisse von diesen beiden Komponenten im Bezug zur Planetenbewegung nicht auf den PWG übertragbar.

$$P_{Ges} = P_T \frac{d_{2M}}{d_{2PM}} \quad 1-1$$

Mit  $P_T$  : Gewindeteilung,  $d_{2M}/d_{2PM}$  : Wälzkreis an der Mutter/ an den Planeten

Kinematikbedingt ergibt sich bei PRGTs nach (Brecher & Weck 2017, S. 393) die Systemsteigung  $P_{Ges}$  nach der folgenden Formel 1-1. Das Minimum der Gewindeteilung  $P_T$  ist dabei, wie auch beim PWG, durch die benötigte Mindesttragfähigkeit der einzelnen Windungen begrenzt. Nach (Brecher & Weck 2017, S. 393) ist das Minimum von  $d_{2m}/d_{2PM}$  drei. Dabei haben die Planeten und die Spindel den gleichen Durchmesser. Damit können maximal sechs Planeten verbaut werden. Um mehr Planeten zu verbauen, muss das Verhältnis der Wälzkreise zunehmen, wodurch auch die Gesamtsteigung zunimmt. Der PRGT ist in seiner minimalen Systemsteigung stark eingeschränkt. (Brecher & Weck 2017, S. 393)

<sup>5</sup> Siedenhans, B., *Rollengewindetriebe*. <https://www.ludwigmeister.de/technische-informationen/rollengewindetriebe> (zuletzt geprüft 11.10.2020).

Nach (Brecher & Weck 2017, S. 394) ist die minimale Systemsteigung des RGTs gleich der Gewindeteilung. Im Gegensatz zu RGTs und PRGTs ist es beim PWG möglich und üblich, dass die Spindel- und Mutternkontakte auf den Planeten auf unterschiedlichen Wälzkreisdurchmessern abrollen (vgl. Abbildung 2). Im Vergleich zu RGTs und PRGTs besitzt der PWG durch diese unterschiedlichen Wälzkreisdurchmesser an den Planeten eine weitere Übersetzung. Daher kann der PWG niedrigere Systemsteigungen als RGTs und PRGTs erreichen.

In der Rollenrückführung werden die Planeten eine oder mehrere Windungen axial zurückgesetzt. Prinzipbedingt lassen sich daher über die Planeten in der Rollenrückführung keine Axialkräfte übertragen. Aufgrund der Rollenrückführung ist daher die Leistungsdichte von RGTs deutlich niedriger als von PRGTs und PWGs. PRGTs besitzen im Vergleich zu PWGs zusätzliche Verzahnungen. Die Laufpartner einer Planetenwindung bei PRGTs sind eine Muttern- und eine Spindelwindung. Bei PWGs wird dies hingegen funktional getrennt und damit hat eine Planetenwindung nur einen Laufpartner – entweder eine Muttern- oder eine Spindelwindung. Ob PRGT oder PWG eine höhere Leistungsdichte besitzen hängt von der Auslegung und Gestaltung der jeweiligen Komponente ab und kann daher nicht pauschal beantwortet werden.

*Tabelle 2 Beispiele Leistungsdichte (Tragfähigkeit/ Volumen) für PRGT und PWG mit (Bosch Rexroth AG 2020, S. 200; Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 33)*

	<i>PLSA 20 x 5R ZEM-E-S (Bosch)</i>	<i>PWG20 (Schaeffler)</i>
$C_{Dyn}/ kN$	55	39
$C_{Stat}/ kN$	80	44
<i>Länge der Mutter (mm)</i>	65	41
<i>Durchmesser der Mutter (mm)</i>	42	40
<i>Volumen der Mutter (mm<sup>3</sup>)</i>	90054	51522
$C_{Dyn}/ \text{Volumen (N/mm}^3\text{)}$	0,153	0,189
$C_{Stat}/ \text{Volumen (N/mm}^3\text{)}$	0,222	0,214

In der Tabelle 2 wird die Leistungsdichte im Bezug zur dynamischen ( $C_{Dyn}$ ) und statischen Tragfähigkeit ( $C_{Stat}$ ) von einem PRGT und einem PWG mit jeweils 20mm Spindeldurchmesser und vergleichbaren Mutternformen aufgezeigt. Aufgrund der gleichen Spindeldurchmesser kann daher die Leistungsdichte über das Hüllvolumen der Muttern (Berechnung über Länge und Durchmesser) bestimmt werden. Der PRGT besitzt eine Systemsteigung von 5mm und der PWG von 1,35mm. Der PWG „PWG20“ besitzt dabei

eine um ca. 24% höhere Leistungsdichte für die dynamische Tragfähigkeit und eine um ca. 4% geringere Leistungsdichte für die statische Tragfähigkeit als der PRGT „PLSA 20 x 5R ZEM-E-S“.

Durch die hohe Leistungsdichte bei maximaler Übersetzung, ist der PWG neben PRGT und RGT mit am besten als Wandlungsgetriebe für Anwendungen mit hoher benötigter axialer Tragfähigkeit und hoher geforderter Übersetzung geeignet. Im Vergleich zum PRGT und RGT hat der PWG aber die undefinierteste Bewegung der Planeten. Als Wälzkörper sind die Planeten und ihre Bewegung maßgeblich für die Kinematik, Kinetik und Lebensdauer des PWGs verantwortlich. Die Dissertation von (Balázs 1999) ist nach heutigem Stand die einzige Arbeit, in der die Kinematik und das Übertragungsverhalten von PWGs untersucht wird. (Balázs 1999) untersucht dabei zwei spezifische PWG-Geometrien auf Basis der Erfindung von (Dietrich & Gombert 1988). Untersuchungen unterschiedlichster Einflussfaktoren wie z.B. des Radialspiels auf das Verhalten des PWGs, auf die Kinematik, die Kinetik und die Lebensdauer des PWGs sind in seiner Arbeit nicht enthalten.

## **1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

Aus einem ungenügenden Systemverständnis folgt meist ein nur schlecht vorhersehbares Verhalten einer Komponente und eine ungenaue Auslegung – insbesondere hinsichtlich der Lebensdauer. Ziel dieser Arbeit ist es daher, das Systemverständnis für den PWG zu erweitern. Dazu sollen Einflussfaktoren der Anwendung und der Geometrie auf die Kinematik, die Kinetik, das Übertragungsverhalten des PWGs ermittelt und ihre Auswirkungen analysiert werden.

Aufgrund der freien Bewegung der Planeten ist insbesondere eine Modellbildung im Hinblick auf die Kinematik und die Dynamik des PWGs durch Simulationen und Versuche nötig. Um das sehr weite mögliche Feld zur Untersuchung einzuschränken, fokussiert sich diese Arbeit auf Auswirkungen auf die Kinematik und Kinetik des PWGs im bewegten (aktiven) Betrieb durch Einflussfaktoren der Anwendung und der Geometrie.

Im Folgenden soll der Aufbau dieser Arbeit dargelegt werden. In Kapitel 2 – den Grundlagen und dem Stand der Technik – wird das für diese Arbeit relevante Themenfeld dargestellt und Forschungsdefizite daraus abgeleitet. Grundlage hierzu ist die in Kapitel 2.1 dargestellte Funktion des PWGs und die in Kapitel 2.2 dargestellten Reibungsmechanismen in den Kontakten. In Kapitel 2.3 werden resultierende Schadensformen und in Kapitel 2.4 Einflussfaktoren auf die Lebensdauer des PWGs aufgezeigt. Basis der

Modellbildung über Simulationen für den PWG sind die in Kapitel 2.5 dargestellten Kontaktmodelle und Methoden zur Simulation. Abschließend wird in Kapitel 2.6 der Stand der Technik zusammengefasst und bewertet.

Auf Basis des Stands der Technik kann in Kapitel 3 die Zielsetzung präzisiert und die Vorgehensweise zur Zielerfüllung abgeleitet werden. In Kapitel 4 wird die Modellbildung zur Systemanalyse des PWGs dargelegt. Kapitel 4.1 befasst sich dabei mit der Mehrkörpersimulation von PWGs und zeigt deren Aufbau, Randbedingungen, Ablauf und Kalibrierung. In Kapitel 4.2 wird die Modellbildung durch Versuche aufgezeigt. Dabei werden die zu messenden Größen ausgewählt sowie die benötigten Versuchsaufbauten abgeleitet.

In Kapitel 5 erfolgt die Systemanalyse. Mittels einer Referenzsimulation wird in Kapitel 5.1 eine PWG-Referenzgeometrie analysiert und diese Simulation in Kapitel 5.2 validiert. Mit den Erkenntnissen des Verhaltens der Referenzsimulation können mögliche Einflussfaktoren in Kapitel 5.3 abgeleitet und zur Untersuchung ausgewählt werden. Im Kapitel 5.4 werden die gewählten Parameter der Anwendung und in Kapitel 5.5 die gewählten Parameter der Geometrie variiert und auf ihre Auswirkungen auf die Summenkräfte zwischen den PWG-Komponenten und die Bewegung der Planeten untersucht. Weiterhin werden in Kapitel 5.6 andere Baugrößen untersucht, um die Gültigkeit der Erkenntnisse der Simulationen für andere PWGs aufzuzeigen. In Kapitel 5.7 werden die Auswirkungen der variierten Parameter der Anwendung und der Geometrie auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht.

Die Analyse der variierten Parameter auf ihre Auswirkungen auf die Kontakte erfolgt anschließend in Kapitel 6. In Kapitel 6.1 werden die Kontaktkräften und in Kapitel 6.2 die wirkenden Wälzkreise der Kontakte auf Ursachen von in der Systemanalyse aufgetretenen Effekte durch die variierten Parameter untersucht. Anschließend werden in Kapitel 6.3 Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Ursachen in den Kontakten, der in der Systemanalyse aufgetretenen Effekte ermittelt. Es folgt die Validierung der Auswirkungen eines ausgewählten Einflussfaktors auf die Kontakte in Kapitel 6.4. Die Analyse der Kontakte schließt mit den Anwendungsgrenzen der Auswirkungen der variierten Parameter auf die Kinematik, Kinetik und Kontakte des PWG in Kapitel 6.5. Diese Arbeit endet mit der Zusammenfassung und dem Ausblick auf weitere Forschungsfragen zum PWG in Kapitel 7.



## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Im Folgenden soll die Funktion des PWGs und der für die Präzisierung der Zielstellung nötige Stand der Technik dargelegt werden. Nach der Funktion des PWGs wird auf die Reibung in Kontakten und auf die im PWG wirkenden Verschleißmechanismen eingegangen. Diese sind wiederum eine der Grundlagen für Lebensdauermodelle und den in Versuchen zu erwartenden Verschleiß. Als nächstes werden Methoden und Modelle zur Simulation von Linearantrieben gezeigt. Zuletzt wird in diesem Kapitel der Stand der Technik zusammengefasst und bewertet.

### 2.1 Funktion eines Planetenwältzgewindetriebes

Anhand eines PWGs wird hier die Funktion eines Planetenwältzgewindetriebes erläutert. Wie aus Abbildung 3 ersichtlich, besteht dieser PWG aus neun Planeten, zwei Müttern, zwei Planetenscheiben, einer Spindel, zwei Sicherungsringen und einer geteilten Distanzscheibe zwischen den Müttern. Die Spindel entspricht dem Sonnenrad, die Planetenscheiben dem Steg und die Müttern dem Hohrrad eines Planetengetriebes. Wird die Spindel relativ zu den Müttern um die Spindelachse gedreht, so bewegt sich die Spindel gleichzeitig entlang ihrer Achse translatorisch zu den Müttern.

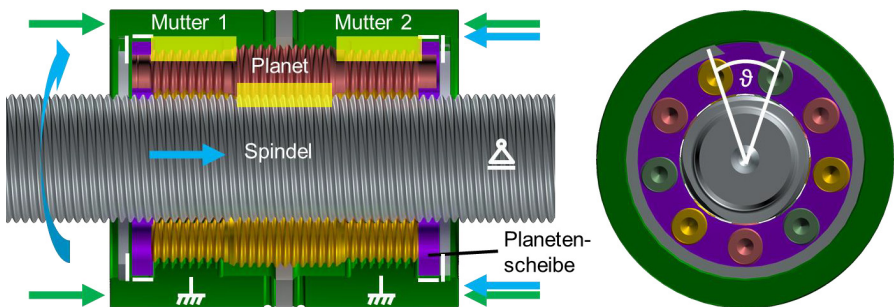


Abbildung 3 Schnitt durch einen PWG (links) und Ansicht der Stirnseite (rechts)

Jeder Planet rollt mit seinem mittleren Teil auf der Spindel und mit den äußeren beiden Teilen auf jeweils einer Mutter ab (Kontaktbereiche gelb am roten Planeten markiert). Planeten und Müttern besitzen Rillen – haben keine Steigung. In Folge kann es mit Ausnahme der Auswirkungen von Spiel und Nachgiebigkeit zu keiner translatorischen Bewegung zwischen den Müttern und den Planeten kommen. Die Spindel ist dabei die einzige Komponente mit einem Gewinde – mit einer Steigung. Dadurch kann sie analog

zu einer Schraube durch das Paket der Planeten gedreht werden und bewegt sich damit auch translatorisch zu den Planeten und den Muttern.

Gleichzeitig sind die Planeten an jeder Seite in Kontakt mit den Planetenscheiben. Die zur Spindelachse radialen Langlöcher in den Planetenscheiben stellen sicher, dass zwischen den Achsen zweier benachbarter Planeten der Winkel  $\vartheta$  eingehalten wird (vgl. Abbildung 3). Die Planetenscheiben stoßen zur PWG-Mitte an den jeweiligen Muttern an. Sicherungsringe verhindern ihre Bewegung aus der jeweiligen Mutter hinaus.

Nach (Balázs 1999) sollen nun die Funktionsprinzipien und die daraus resultierenden Eigenschaften des PWGs hergeleitet werden. Die Planeten entsprechen Wälzkörpern in Wälzlagern. Sie bewirken damit eine geringe Systemreibung sowie eine hohe Lauf-ruhe und eine hohe Effizienz. Der Aufbau aus Spindel, Planeten und Muttern arbeitet analog zu einem Planetengetriebe. Dies erzeugt eine hohe Übersetzung des Systems und ermöglicht häufig den Antrieb mittels eines Elektromotors im für ihn optimalen Drehzahl-Drehmomentbereich ohne ein weiteres Getriebe. Es können dadurch auch hohe Axialkräfte bei minimalem Antriebsmoment gestellt werden. Die Leistungsübertragung im PWG erfolgt in den Kontakten zwischen den Planeten und Muttern bzw. Spindel analog zu einer Verschraubung. Damit wird eine hohe Tragfähigkeit durch die sehr hohe Anzahl an Linienkontakten im Bauraum erzeugt. Gleichzeitig bewirkt dies ein optimales Ausfallverhalten: Es muss erst eine Vielzahl an Windungen versagen, bis ein Planet keine Kraft mehr zwischen der Spindel und den Muttern überträgt. Die Steigung an der Spindel erzeugt die Vorschubbewegung des Systems.

Weiterhin arbeitet der PWG analog zu einem Reibradgetriebe. Zwischen Muttern und Planeten werden Drehmomente (blauer gebogener Pfeil im Bild) durch die nicht vorhandene Steigung an Planeten und Muttern immer über einen Reibschluss und Axialkräfte (blaue gerade Pfeile im Bild) über einen Formschluss übertragen. Zwischen der Spindel und den Planeten werden durch die Steigung der Spindel sowohl Axialkräfte als auch Drehmomente jeweils über Form- und Reibschlüsse übertragen. Die Wirkweise des PWGs als Reibradgetriebe bedingt Schlupf, ermöglicht aber auch einen Überlastschutz. Durch die Wirkweise als Reibradgetriebe wird eine Vorspannung benötigt. Die Vorspannung stellt eine definierte Übersetzung zu jenen Zeitpunkten sicher in denen keine Axialkraft wirkt. Würden weder Axialkraft noch Vorspannung wirken, so ist das System unbestimmt – es wäre nicht vorhersehbar, ob Muttern und Planeten in Kontakt sind. Die Komponente könnte in den Mutterkontakten daher durchrutschen und hätte keine definierte Übersetzung mehr.

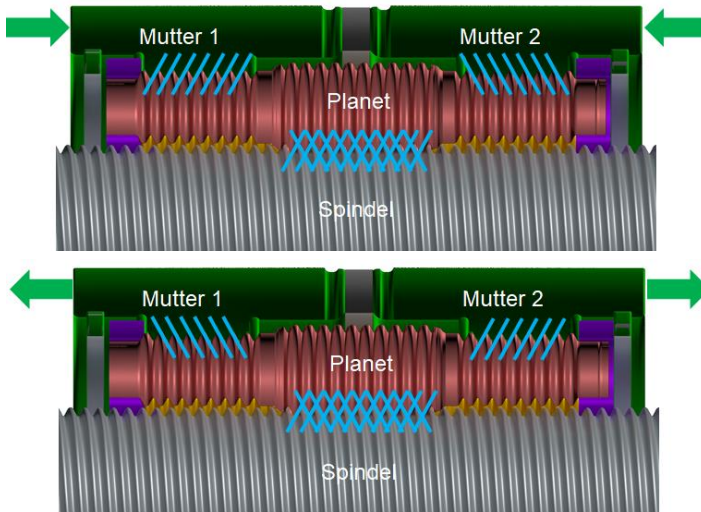
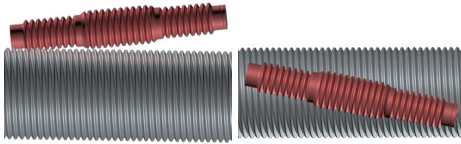


Abbildung 4 Durch Vorspannung sich in Kontakt befindende Wirkflächen der Planeten. Oben für die X- und unten für die O-Anordnung dargestellt.

Werden für die Vorspannung die Muttern zusammengedrückt so entsteht an den Planeten eine X-Anordnung und werden die Muttern auseinander gezogen so entsteht eine O-Anordnung (vgl. grüne Pfeile in Abbildung 3 und Abbildung 4). Dazu wird der Abstand der Muttern nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2015) über die zweigeteilte Distanzscheibe eingestellt. Haben die Distanzscheiben axial Spiel zwischen den Muttern, so werden die Muttern in der Anwendung durch ihre Anbindung zusammengedrückt (X-Anordnung) bis die Distanzscheiben in Kontakt mit beiden Muttern sind. Haben die Distanzscheiben axial ein Übermaß, drücken sie die Muttern auseinander (O-Anordnung). In Abbildung 4 ist dargestellt welche Wirkflächen (hellblau markiert) an den Muttern in Abhängigkeit der Vorspannung ohne eine wirkende Axialkraft in Kontakt sind. Zu beachten ist dabei, dass die äußersten Windungen der Planeten nicht voll ausgebildet sind und dadurch nicht in Kontakt kommen. Zwischen Spindel und Planeten stellt sich dabei im Gegensatz zu den Mutterkontakten ein beidseitiger Kontakt ein sofern dabei nur die Vorspannung und keine Axialkraft wirkt. Nach (Ortlieb Präzisionssysteme GmbH & Co. KG 2016, S. 7) sinkt der PWG-Wirkungsgrad mit zunehmender Vorspannung und abnehmender Axialkraft. Nach (Wilhelm Narr GmbH & Co. KG 2005, S. 3) ist der PWG mit einem Wirkungsgrad  $< 50\%$  selbsthemmend.



*Abbildung 5 Überhöhte Darstellung des Kippens eines Planeten (links) und des Schränkens eines Planeten (rechts)*

Der hier dargestellte PWG ist mit 426 Kontakten an den neun Planeten hochgradig statisch überbestimmt. Daher gibt es im nicht vorgespannten System Spiel – das sogenannte Radialspiel. Dieses bezeichnet, wie weit sich ein zur Spindel achsparalleler Planet radial maximal zwischen der Spindel und den Muttern bewegen kann. Das Radialspiel ermöglicht es bei der Einstellung der Vorspannung Fertigungstoleranzen auszugleichen. Um diese Einstellung zu ermöglichen, werden Langlöcher an den Planetenscheiben benötigt. An jedem seiner Enden kann sich ein Planet somit radial in der jeweiligen Planetenscheibe bewegen.

Abbildung 4 zeigt, dass durch die Vorspannung immer eine Seite der Rillen der Mutter mit den Planeten in Kontakt ist. An beiden Muttern sind dabei jeweils entgegengesetzte Seiten in Kontakt. Wirkt auf einen vorgespannten PWG eine Axialkraft, so werden die vorgespannten Kontakte an einer Mutter entlastet und an der anderen zusätzlich belastet. Ist die Axialkraft groß genug, so wird sie hauptsächlich an einer der beiden Muttern abgestützt. Berücksichtigt man in Abbildung 4 die Abstützung von Axialkräften an hauptsächlich einer Mutter so wird durch die Kräfteinleitungspunkte in den Planeten deutlich, dass ein Kippmoment entsteht. Nachdem jeder Planet sich in den Planetenscheiben radial bewegen kann, wird er bedingt durch das Kippmoment, wie beispielsweise in Abbildung 5 dargestellt, kippen.

Die Planetenscheiben sind weiterhin nicht zueinander abgestützt - sie können also gegeneinander verdrehen. Damit kann ein Planet im PWG auch schränken (vgl. Abbildung 5). Muttern und Planeten besitzen im Gegensatz zur Spindel keine Steigung. Der Planet ist bestrebt sowohl an der Spindel als auch an der Mutter anzuliegen. Bedingt durch die Spindelsteigung wird er versuchen analog zu dieser zu schränken. Dagegen wirken die Mutterkontakte, die die Planeten achsparallel zur Spindel drücken.

Zuletzt können sich die Planetenscheiben radial und axial innerhalb der Muttern in Grenzen bewegen. Damit kann sich das ganze Konstrukt aus Planeten und Planetenscheiben ein wenig relativ zur Spindel und den Muttern bewegen. (Balázs 1999, S. 84)

weist aufgrund all der Bewegungen von PWG-Planeten bereits nach, dass eine Auslegung im Meridianschnitt – eine Auslegung mit zur Spindelachse achsparallelen Planeten – für PWGs nicht zulässig ist.

Nachdem die Spindel als einzige Komponente eine Steigung besitzt, ist es nötig je nach Baugröße mehrere Typen und Einbaulagen der Planeten zu verwenden (vgl. Abbildung 6). Die Planetentypen unterscheiden sich im Versatz der Windungen im mittleren Bereich (blau eingerahmt). Bedingt dadurch entstehen beim hier gezeigten PWG in diesem Bereich eine unterschiedliche Anzahl an Windungen: Der Typ 31 (rot in Abbildung 6) besitzt im mittleren Bereich der Spindelkontakte eine Windung weniger als die Planeten des Typs 41 und 51 (grün und gelb in Abbildung 6).

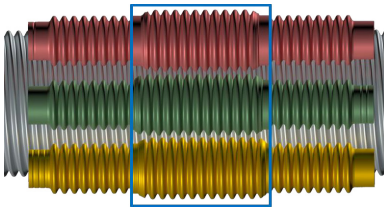


Abbildung 6 Planetentypen im hier diskutierten PWG

Ein PWG muss nicht grundsätzlich in der Mitte den Spindelkontakt, außen zwei Mutterkontakte und zwei getrennte Muttern besitzen. (Balázs 1999) untersucht in seiner Arbeit zwei PWG-Ausführungen des DLR mit mehreren Spindel- und Mutterkontakten im Wechsel und einer Mutter. Beide Ausführungen unterscheiden sich dadurch, dass bei der einen die Planeten eine Steigung und an der anderen keine Steigung besitzen. Ortlieb Präzisionssysteme verwendet zu (Balázs 1999) sehr ähnliche Geometrien mit einer Mutter, drei Bereichen mit Mutter und zwei Bereichen mit Spindelkontakten. (Ortlieb Präzisionssysteme GmbH & Co. KG 2016, S. 6–7) Dabei besitzen die beiden äußeren Mutterkontakte deutlich weniger Windungen als der mittlere Mutterkontakt und es werden unterschiedliche Planetentypen verwendet (Ortlieb Präzisionssysteme GmbH & Co. KG 2016, S. 6). Unterschiedliche Planeten verwenden auch die Geometrien des DLR (Balázs 1999, S. 96). Für einseitige Belastungen gibt es den PWG von Schaeffler auch mit nur einer Mutter als Kupplungsaktuator. (Schumann & Mán et al. 2015b) Nachdem bei der letzten Variante die Vorspannung nicht durch die Vorspannung zweier Muttern erzeugt wird, muss eine Mindestlast von außen wirken, um die Funktion der Reibkontakte sicherzustellen. Weiterhin gibt es noch synchronisierte

PWGs (SPWG). Bei diesen wird an den Planetenscheiben angetrieben und die Muttern gegenüber den Planetenscheiben mit Wälzlagern gelagert (Schumann & Mán et al. 2015a). Dabei werden beide Planetenscheiben miteinander verbunden und damit das Schränken der Planeten reduziert.

Eine analytische Herleitung der Position der Dreh- und Kraftpole sowie der Systemsteigung eines PWGs findet sich in der Arbeit von (Balázs 1999) anhand der Geometrie des DLRs. Die Systemsteigung  $P_{Ges}$  eines PWGs berechnet sich nach (Balázs 1999, S. 12) mit der folgenden Formel 2-1 und ist nach (Brecher & Weck 2017, S. 394) für alle PWGs gültig. Mögliche Geometrien zur Erreichung der gewünschten Systemsteigung bei gegebener Spindelsteigung zeigt (Balázs 1999, S. 45–48).

$$P_{Ges} = \frac{P_S}{\frac{d_{2PM}}{d_{2M}} \frac{d_{2S}}{d_{2PS}} + 1} \quad 2-1$$

Mit:

- $P_S$  : Steigung der Spindelstange
- $d_{2M}$  : Wälzkreisdurchmesser an den Muttern
- $d_{2S}$  : Wälzkreisdurchmesser an der Spindel
- $d_{2PM}$  : Wälzkreisdurchmesser an den Planeten in den Mutterkontakten
- $d_{2PS}$  : Wälzkreisdurchmesser an den Planeten in den Spindelkontakten

Nach (Balázs 1999, S. 45) sinkt der Systemwirkungsgrad des PWGs mit der Gesamtsteigung aufgrund der Zunahme des Anteils des durch Schlupf zurückgelegten Weges mit der Gesamtsteigung. Erhöht man den Reibwert der PWG-Komponenten so sinkt der Schlupf, die Systemsteigung wird unabhängiger von der übertragenen Axialkraft und der PWG rutscht weniger durch (Balázs 1999, S. 45).

Sowohl Drehmoment- als auch Axialkraftfluss gehen im PWG immer von der Spindel über die Planeten zu den Muttern. Zwischen der Spindel und den Planeten werden Kräfte sowohl über Formschlüsse als auch Reibschlüsse übertragen. Versagen diese Reibschlüsse, so werden Kräfte und Momente komplett über die Formschlüsse zwischen der Spindel und den Planeten übertragen. Der Formschluss rotativ um die Spindelachse entsteht dadurch, dass die Spindel eine Steigung und die Planeten keine Steigung besitzen. Zwischen den Planeten und der Mutter hingegen werden die Antriebsmomente rein über Reibschlüsse und die Axialkraft rein über Formschlüsse übertragen. Begründet liegt dies darin, dass Muttern und Planeten Rillen keine Steigung

besitzen. Wirkt eine Axialkraft, so wird durch die Spindelsteigung ein Drehmoment in die Planeten um die Spindelachse induziert. Dieses muss in den Müttern durch die Reibschlüsse abgestützt werden. Versagen die Reibschlüsse zwischen Müttern und Planeten so kommt es also zu einem Gleiten zwischen den Müttern und den Planeten. In diesem Fall können die Planeten um die Spindel drehen und eine translatorische Bewegung zwischen den Müttern und der Spindel erzeugen, selbst wenn es keine rotative Bewegung zwischen der Spindel und den Müttern gibt. Versagen die Reibschlüsse zwischen Müttern und Planeten, so ändert sich die Systemsteigung – des translatorischen Vorschubs zwischen den Müttern und der Spindel pro Umdrehung – zwischen ihnen. Der PWG wirkt nicht mehr als Wandlungsgetriebe. Ein Versagen dieser Reibschlüsse ist unter anderem abhängig von der Spindelsteigung, der eingestellten Reibung und der wirkenden Axialkraft. Ein sicheres Schränken der Planeten kann dazu führen, dass sich auch ein Formschluss zwischen den Planeten und den Müttern einstellt und das zuvor beschriebene Versagen verhindert.

Von den zuvor aufgezeigten PWG-Varianten ist der SPWG – vgl. (Schumann & Mán et al. 2015b) – der einzige PWG an dem der Momentenfluss maßgeblich über die Planetenscheiben geht. Hier wird das Drehmoment an den Planetenscheiben statt an den Müttern, wie beim PWG, abgestützt. Durch die Formschlüsse zwischen den Planetenscheiben und den Planeten kann im Gegensatz zum PWG ohne eine rotative Relativbewegung nur axial der Weg zurückgelegt werden, den die Planeten zum Wechsel von einer Spindelflanke zur anderen benötigen. An den Kontakten zwischen Müttern und Planeten kann es beim SPWG noch immer zu einem Gleiten bei einem Versagen der Reibschlüsse kommen. Dieses Versagen führt aber im Gegensatz zum PWG nur zu einer Änderung des benötigten Antriebsmomentes aber nicht zu einer Änderung der Systemsteigung.

In Folge der hochkomplexen Bewegung des PWGs kann zusammenfassend gesagt werden, dass für genaue Ergebnisse der Kinematik und Kinetik und Dynamik der PWG in Simulationen vollständig – mit allen Körpern und mit allen Freiheitsgraden – abgebildet werden sollte. Nachdem sich bei vermeintlich sehr ähnlichen Linearantrieben wie RGTs und PRGTs die Planetenbewegungen von denen des PWGs deutlich unterscheiden, können deren Erkenntnisse zur Kinematik, Kinetik und Statik nur schwerlich auf den PWG übertragen werden. Bzgl. der Untersuchung der Kinematik und Kinetik von PWGs ist nur die Arbeit von (Balázs 1999) bekannt. Er untersuchte zwar diese in Mehrkörpersimulationen, führte dazu aber nur drei Simulationen durch: ein PWG mit einem

Planeten ohne äußere Belastung, ein PWG mit einem Planeten arbeitet gegen eine Feder und ein PWG mit fünf Planeten ohne äußere Belastung. Bisher wurden damit die Auswirkungen einer Vielzahl an Einflussparametern – wie z.B. dem Radialspiel, der Vorspannung und der Drehzahl – auf den PWG noch nicht untersucht.

## 2.2 Reibung in Kontakten

Die Reibung in den Wälzkontakten des PWGs ist eine der zentralen Größen für verschleißerzeugende Schadensmechanismen. Nach (GfT 2002) wird Verschleiß als zunehmender Oberflächenmaterialverlust eines Körpers durch einen mit einer Relativbewegung behafteten Kontakt mit einem anderen Körper beschrieben. Durch die Vielzahl an Kontakten, sind gerade im Bezug zum Verschleiß für den PWG das Ausmaß und die Art der Reibung von besonderer Bedeutung. Daneben ist sie besonders wichtig für die Kontaktmodelle in Simulationen – insbesondere bei Maschinenelementen wie dem PWG an denen die Kräfte teilweise über reine Reibkontakte übertragen werden. Nach (GfT 2002, S. 12) kann die Reibung nach dem Zustand der dazugehörigen Bewegung unterschieden werden – in Haft- und Bewegungsreibung – sowie nach dem Aggregatzustand der beteiligten Komponenten in Festkörper-, Misch-, Flüssigkeits- und Gasreibung. Reibung kann nach (Czichos & Habig 2015; Deters 2012; Sommer & Heinz et al. 2014; GfT 2002) aber auch in die folgenden drei grundlegenden Arten – dazugehörige Bewegungen in Abbildung 7 dargestellt – und drei kombinierten Arten unterteilt werden:

- Gleitreibung:  
In der Gleitreibung sind die Bewegungsgeschwindigkeiten oder -richtungen zwischen zwei Körpern in der Kontaktfläche für jeden der Körper verschieden.
- Rollreibung:  
In der Rollreibung sind Bewegungsgeschwindigkeit und -richtung zwischen zwei Körpern in einem idealisierten punkt- oder linienförmigen Kontakt gleich. Weiterhin dreht sich mindestens ein Körper um eine in der Kontaktfläche liegende Drehachse.
- Bohrreibung:  
In einem idealisiert punktförmigen Kontakt sind die Bewegungsgeschwindigkeit und/ oder -richtung unterschiedlich. Weiterhin dreht sich mindestens ein Körper um eine im Zentrum der Kontaktfläche liegende, zur Kontaktfläche senkrechte Achse.



- Wälzreibung:  
Wälzreibung ist die Kombination aus Gleit- und Rollreibung
- Gleitbohren:  
Gleitbohren ist die Kombination aus Gleit- und Bohrreibung
- Rollbohren:  
Rollbohren ist die Kombination aus Roll- und Bohrreibung

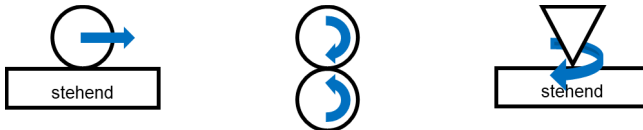


Abbildung 7 Darstellung der Bewegungen Gleiten (links), Wälzen (Mitte) und Bohren (rechts) nach (GfT 2002, S. 14; Czichos & Habig 2015, S. 70)

Jede dieser Reibungsarten ist eine tribologische Belastung für den PWG. Zusätzlich sind als tribologische Belastungen für den PWG noch Stoßen und Oszillieren relevant. Mahlen, Strömen, Prallen und Schwingen in denen Flüssigkeiten oder Gas beteiligt sind, sind aufgrund der Kontakte im PWG von untergeordneter Wichtigkeit. In den Kontakten des PWGs treten immer Kontakte zwischen zwei Festkörpern auf – bspw. ein Kontakt zwischen einem der Planeten und einer Mutter. Dabei können sich zwischen den beiden Festkörpern ein Schmierstoff und/ oder Partikel befinden. Solange der Schmierfilm im PWG ohne eine Verunreinigung durch Partikel im jeweiligen Kontakt aktiv ist, können als wirksame Schadensmechanismen nur die Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen auftreten. Befinden sich Partikel im Schmierfilm oder ersetzen sie sogar den Schmierstoff so tritt als zusätzlicher Schadensmechanismus Abrasion auf. Läuft der Kontakt trocken – befindet sich also kein Schmierstoff zwischen den Kontaktpartnern – so treten neben Oberflächenzerrüttung und tribochemischen Reaktionen auch Abrasion und Adhäsion auf. (GfT 2002) Für weiterführende Informationen zu den Zusammenhängen zwischen Reibung und Verschleiß, sei bspw. auf die Arbeiten von (Straffelini 2015; Rabinowicz 1965) verwiesen. Die hier genannten Schadensformen werden im folgenden Kapitel 2.3 erläutert.

## 2.3 Schadensformen am PWG

Im Folgenden soll nun auf die Schadensmechanismen und -formen am PWG eingegangen werden. Zuerst werden dazu die am PWG auftretenden Schadensmechanismen und -formen aufgezeigt und anschließend ihre Wirkweise erläutert. Sie sind

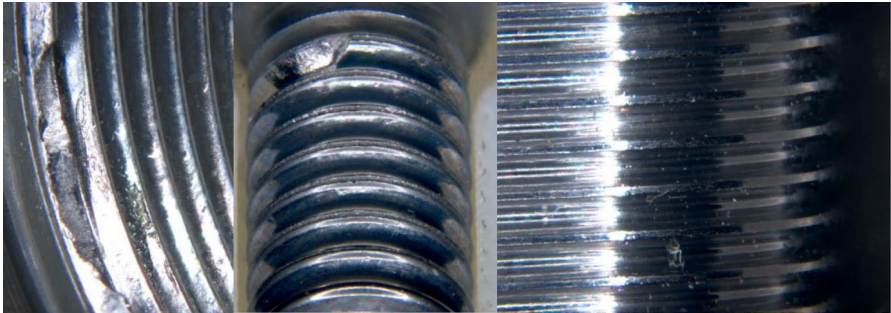
Grundlage für die Ermittlung, Analyse und Bewertung von Einflussfaktoren auf die PWG-Lebensdauer. Verschleißmechanismen an PWGs aus Lebensdauerversuchen wurden von (A\_Zürn 2017) und (A\_Liang 2018) untersucht. Beide analysierten mittels Mikroskop-Bildern den Verschleiß an Prüflingen aus Lebensdauerversuchen des Autors dieser Arbeit. Durch den Vergleich mit neuen, unbenutzten Prüflingen wurden von ihnen auch herstellungsbedingte Vorschäden ermittelt. (A\_Zürn 2017) befasste sich mit der Baugröße 15 und (A\_Liang 2018) mit der Baugröße 9. Beide fanden die folgenden Schadensmechanismen und Schadensformen vergleichbar zu (GFT 2002; VDI3822; NSK Europe Ltd. 2009):

- Oberflächenzerrüttung:  
in Form von Graufleckigkeit, Grübchen und Zahn(an)brüchen
- Plastische Deformationen:  
in Form von Fremdkörper- und Wälzkörpereindrückungen
- Abrasion und Adhäsion:  
in Form von Riefen und Verschleiß
- Tribochemische Reaktionen:  
in Form von Reibkorrosion und chemischer Korrosion

Die Schadensmechanismen und Schadensformen sind dabei in ihrer Bedeutung für den Ausfall nach (A\_Zürn 2017) sortiert. Die Oberflächenzerrüttung ist damit die wichtigste Ursache für den identifizierten Ausfall der PWGs. Nach (A\_Liang 2018) hat allerdings die Schadensform „Verschleiß“ die höchste Bedeutung. Dieser scheinbare Widerspruch erklärt sich durch die gelieferten Prüflinge: Obwohl das Verhältnis  $F/C_{Dyn}$  – mit  $F$ : axiale äquivalente Belastung – für die Arbeit von (A\_Liang 2018) mit ca. 0,37 höher als für die Arbeit von (A\_Zürn 2017) mit ca. 0,34 lag, fielen die PWGs der Baugröße 15 schneller aus. Vergleicht man bei beiden die statische Tragsicherheit, so liegen beide Versuche mit ca. 3,3 als statische Tragsicherheit deutlich unter dem empfohlenen Wert von 4,0. Die Prüflinge der Baugröße 15 stammten aus einer Testserie und stellten sich nachträglich aufgrund ihrer Sondergeometrie als Kopfläufer heraus. Damit führten Kraftpeaks aus den Versuchen zur plastischen Verformung des Materials. In Folge fielen die PWGs der Baugröße 15 nach einem sehr kleinen Bruchteil der Lebensdauer aus, während der PWG der Baugröße 9, der keine Kraftpeaks im plastischen Bereich hatte, seine volle Lebensdauer und Zyklenzahl erreichte. Folglich trat bei den PWGs der Baugröße 15 durch die hohen Spitzenbelastungen eine stärkere Oberflächenzerrüttung im Bereich der Kurzzeitermüdung auf, während die Baugröße 9

durch eine Vielzahl an mittelstarken Peaks im Bereich der Langzeitermüdung verschliffen wurde. Dies ist ein Musterbeispiel für die Notwendigkeit der Untersuchung von Kontaktpunkten und -kräften im PWG.

Nachdem nun erläutert wurde, welche Schadensmechanismen und -formen beim PWG auftreten, sollen diese nun erklärt werden. In Abbildung 8 sind beschädigte Komponenten eines PWGs der Baugröße 15 aus Lebensdaueruntersuchungen als Beispiel dargestellt.



*Abbildung 8 Auszug aus Mikroskop-Bildern eines PWGs der Baugröße 15 nach Lebensdaueruntersuchungen. Links: Ausschnitt hochbelastete Mutter, Mitte: Ausschnitt hochbelasteter Bereich eines Planeten 31, rechts: Ausschnitt aus der Spindel*

Tribologische Wechselbeanspruchungen, wie sie im PWG auftreten, führen zur Oberflächenerrüttung – zur Ermüdung und Rissbildung in Oberflächenbereichen – und zu Materialabtragungen und -trennungen, wie sie in Abbildung 8 zu sehen sind. (vgl. (GfT 2002)) Abhängig von der Belastungsamplitude und der Lastspielzahl entwickelt sich die Werkstoffermüdung. (Czichos & Habig 2015) Ist die Festigkeit des Werkstoffs geringer als die Spannungsamplitude kann dabei bereits im ersten Zyklus ein Gewaltbruch auch ohne Vorschäden stattfinden. Bei einer typischen Anwendung eines Linearantriebes mit einer hohen Lastspielzahl und Belastungsamplituden um ein Vielfaches kleiner als der Spannungsamplitude, für einen Gewaltbruch tritt Langzeitermüdung auf. In einer Langzeitermüdung kann der Ermüdungsprozess nach (Czichos & Habig 2015; Sommer & Heinz et al. 2014) in vier Phasen eingeteilt werden:

1. Inkubationsphase:

Rissfreie Vorschädigung z.B. durch Gitterverzerrungen und Versetzungen

2. Entstehung von Submikro- und Mikrorissen:

Rissbildung durch Anhäufung von Gitterversetzungen an Gitterfehlern oder starke plastische Deformation

### 3. Rissausbreitung und -vereinigung:

Zyklische Beanspruchung der (Mikro-)Risse führt zu ihrer Ausbreitung und Vereinigung

### 4. Bruch bzw. Ausbruch:

Übersteigt die Spannung die verbleibende Festigkeit, findet ein Gewaltbruch statt. Durch die Vereinigung von Rissen unter der Oberfläche kann es auch zu einem Ausbruch kommen.

Neben den von (A\_Zürn 2017) und (A\_Liang 2018) an PWGs mit Mikroskop-Bildern ermittelten Schadensformen – Graufleckigkeit, Grübchen und Zahn(an)brüchen – können bei der Oberflächenzerrüttung auch Verformungen, Risse und Gefügeänderungen auftreten. Nach (Balázs 1999, S. 20; Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 9) arbeitet der PWG im Bereich der Mischreibung und bei hohen Geschwindigkeitsbereichen teilweise im Bereich der Flüssigkeitsreibung. Nach (Sommer & Heinz et al. 2014; Czichos & Habig 2015; Broszeit 1982) entstehen in der Oberflächenzerrüttung bei Mischreibung nach innen wachsendem Risse an der Oberfläche, während im elastohydrodynamischen Kontakt die Risse unter der Oberfläche entstehen.

Wird Material durch ritzende oder furchende Beanspruchungen durch die Rauheit eines Wälzpartners abgetragen, so wird dies als Abrasion bezeichnet. Analog zur Oberflächenzerrüttung führt Abrasion zu Rissvorgängen und Stoffabtrennungen. (Czichos & Habig 2015) Die Schäden werden dabei in einem weichen Grundkörper entweder durch Rauheitsspitzen eines harten Festkörpers oder durch harte Partikel zwischen den beiden Kontaktpartnern erzeugt. Wirkt eine Abrasion zwischen zwei Festkörpern, so wird sie als „Zwei-Punkt-Abrasion“ bezeichnet. Wirkt zwischen beiden Festkörpern ein Zwischenmedium, so wird sie als „Drei-Punkt-Abrasion“ bezeichnet. (Zum Gahr 1987; GFT 2002)

Adhäsion bezeichnet die Ausbildung einer Grenzflächenverbindung durch stoffliche, auf atomarer und molekularer Ebene wirkende Wechselwirkungen. (Czichos & Habig 2015; GFT 2002) Dabei können Grenzflächenverbindungen entstehen, die stärker sind als die Festigkeit des Umgebungsmaterials. (Czichos & Habig 2015) Bilden sich diese Verbindungen in einem Wälzkontakt aus, so kann es bei der Weiterbewegung dazu führen, dass Material eines Partners durch die Grenzflächenverbindungen auf den anderen übertragen werden.

(A\_Zürn 2017) und (A\_Liang 2018) ermittelten als Schadensformen von Adhäsion und Abrasion am PWG Riefen und flächigen Verschleiß. Die Abrasion und Adhäsion als Schadensformen führen generell zu einem eher gleichmäßigen Materialabtrag der Flanken der Kontaktpartner. Die plastischen Deformationen durch Wälzkörper- oder Fremdkörpereindrückungen sind lokale und deutlich größere Beschädigungen an den Flanken. Bei den plastischen Deformationen werden die Wälzkörper, bzw. Muttern und/oder die Spindel im PWG verformt. Eine mögliche Ursache dafür sind Fremdkörper. Wenn bspw. am PWG an einer Windung Material ausbricht, wird es durch die Schmierstoffbewegung in der Komponente langsam weiterbewegt. Bei einem Ausbruch an einer inneren Windung ist es dann nahezu unumgänglich, dass dieses Material durch das Abrollen zwischen zwei weitere Windungen gerät. Sind dabei die auftretenden Spannungen groß genug, so kommt es zu einer lokalen, plastischen Verformung. In den Prüflingen von (A\_Zürn 2017; A\_Liang 2018; Moser 2018; Moser 2019a; Moser 2019b) sind Windungen in der Mitte des PWGs in Teilen in den Lebensdauerversuchen komplett ausgebrochen. Die größten Partikel, die z.B. (A\_Zürn 2017, S. 108) in seinen Prüflingen fand waren bis zu 0,5mm groß. (A\_Zürn 2017, S. 109) findet allerdings deutliche Hinweise darauf, dass die Partikel nach dem Ausbrechen deutlich größer waren und durch den PWG zermahlen wurden. Durch eine hinreichende äußere Kraft oder aufgrund von lokal höheren Belastungen durch Fertigungsungenauigkeiten kann es auch zu Wälzkörpereindrückungen kommen. Es arbeitet sich ein Wälzkörper plastisch in einen anderen ein.

Am PWG fanden (A\_Zürn 2017) und (A\_Liang 2018) nur sehr geringfügig die Spuren von tribochemischen Reaktionen in Form von Reibkorrosion und chemischer Korrosion. Chemische Reaktionen zwischen den beiden Kontaktpartnern mit einem Zwischenstoff oder Umgebungsstoff werden als tribochemische Reaktionen bezeichnet. Dabei können die Reaktionsprodukte andere Eigenschaften – gerade im Bezug zur Festigkeit – erhalten. In Folge weisen sie ein anderes Abtragsverhalten auf und können damit den Verschleiß erhöhen oder senken. (GfT 2002; Sommer & Heinz et al. 2014)

Neben den ermittelten Schadensmechanismen interessieren für die Systemanalyse die möglichen Ursachen. Aus FEM-Simulationen von (A\_Breining 2016) zum statischen Verhalten von PWGs der Baugröße 15 ist bekannt, dass die Belastung durch eine Axialkraft vor allem über eine Mutter abgestützt wird. Gleichzeitig kommt es zu einer schraubverbindungsähnlichen Lastverteilung zwischen den Windungen – einer Lastverteilung, in der eine äußerste Windung hochbelastet wird und nach innen jede

Windung weniger trägt. (A\_Zürn 2017) und (A\_Liang 2018) können einen Verschleiß analog zu dieser Lastverteilung zwischen den Windungen nachweisen. (A\_Liang 2018) weist den Unterschied zwischen den Muttern in der Bewertung des Verschleißes, analog zu (A\_Breining 2016), noch deutlicher nach als bereits (A\_Zürn 2017). (A\_Zürn 2017) konnte bereits das Schänken aber nicht das Kippen der Planeten durch die aufgetretenen Schäden nachweisen. (A\_Liang 2018) untersucht weder das Kippen noch das Schränken. Sowohl (A\_Zürn 2017) als auch (A\_Liang 2018) konnten eine unterschiedliche Lastverteilung zwischen den Planeten abhängig vom Planetentyp nachweisen.

Der Nachweis der Lastverteilung zwischen den einzelnen Windungen der Planeten und Planetentypen zeigt die Notwendigkeit auf, alle Komponenten des PWGs zu untersuchen sowie die zwischen den Körpern übertragenen Kräfte als auch die einzelnen Kontaktpunkte und -kräfte zu kennen. Die Arbeiten von (A\_Zürn 2017) und (A\_Liang 2018) zeigen die Folgen von einigen Aspekten des dynamischen Verhaltens des PWGs aber keine Ursachen davon. Ursachen von z.B. dem Schränken und mögliche Einflussfaktoren darauf, müssen erst noch genauer ermittelt werden.

## **2.4 Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von PWGs**

Im Folgenden soll ermittelt werden welche Einflussfaktoren sich auf die Lebensdauer von PWGs auswirken können. Von anderen Maschinenelementen werden hier nur jene Einflussfaktoren aufgeführt, die auch auf einen PWG Einfluss haben können.

Im vorherigen Kapitel wurden als Folgen einer tribologische Wechselbeanspruchung am PWG Oberflächenzerrüttung, Abrasion und Adhäsion aufgezeigt. Das Ausmaß von Schäden wird bei diesen maßgeblich durch die Spannungsamplitude, Anzahl an Überrollungen und die wirkenden Relativgeschwindigkeiten und -richtungen beeinflusst. Materialtechnisch ist nach (Balázs 1999, S. 24–25) für den PWG in den Kontakten eine hohe Härte von Vorteil um Rissbildung und Grübchenbildung zu minimieren.

Der Verschleiß ist u.a. nach (Straffellini 2015; Rabinowicz 1965) stark abhängig vom Gleitanteil der Bewegung in den Kontakten und der Bewegungsrichtung der Körper zueinander. Ein höherer Gleitanteil führt bei ansonsten gleichen Bedingungen zu höherem Verschleiß. Steht die Planetenachse schräg zur Spindelachse, so besitzt jede Windung der Mutter einen anderen Wälzkreis in den Kontakten mit dem Planeten. Gleichmaßen unterscheiden sich die Wälzkreise an jeder Windung der Spindel, jeder Windung mit Mutterkontakt der Planeten und jeder Windung mit Spindelkontakt der

Planeten. Nach Formel 2-1 (Seite 13) berechnet sich die Systemsteigung aus den wirkenden Wälzkreisen. Jede Windung eines schrägstehenden Planeten würde daher nach (Balázs 1999, S. 45–48) unterschiedliche Drehgeschwindigkeiten erfordern. Nachdem dies nicht möglich ist, muss ein schrägstehender Planet die unterschiedlichen Wälzkreise durch Gleiten in den Kontakten ausgleichen und erhöht damit den Verschleiß.

Durch eine Schrägstellung eines Planeten entstehen weiterhin unterschiedliche Bewegungsrichtungen der Körper in den Kontakten und damit ebenfalls ein erhöhter Verschleiß. Das Abrollen der Planeten erfordert aufgrund der Wirkweise des PWGs eine Drehbewegung der Planeten um die eigene Achse und eine Drehbewegung um die Spindelachse. Schränken oder Kippen die Planeten so ist die Achse der Drehbewegung um die eigene Achse schief zur Drehbewegung um die Spindelachse. Damit sind bei einem Schränken oder Kippen die Bewegungsrichtungen der Körper – bspw. der Müttern zu den Planeten – unterschiedlich. In Folge erhöht sich der Verschleiß durch das Schränken und Kippen.

Die in den Kontakten wirkenden Spannungsamplituden sind wiederum von den Kontaktkräften und der Geometrie abhängig. Werden beispielsweise Kräfte näher am Zahnkopf eingeleitet so steht ggf. ein geringeres Volumen zur Abstützung zur Verfügung – die Spannungen im Material nehmen zu. Gleichermaßen sind für eine etwaige plastische Verformung die Kontaktkräfte und die Kontaktpunkte bedeutend. Für Lebensdauermodelle ist daher von besonderer Relevanz, die Kontaktpunkte und -kräfte aber auch ihre Häufigkeit – die Anzahl an Überrollungen – zu kennen. (Balázs 1999) untersuchte für einzelne Geometrien zwar die Kontaktpunkte und -kräfte aber keine Auswirkungen von unterschiedlich ausgeprägten Einflussfaktoren auf diese, noch untersuchte er die Häufigkeitsverteilungen beider. Nach dem heutigen Stand wurden diese und die Auswirkungen von unterschiedlich ausgeprägten Einflussfaktoren bisher noch nie untersucht.

Wird ein PWG vorgespannt, so liegt eine zusätzliche Belastung an. Je nach Axialkraft wird diese Vorspannung überdrückt oder bleibt bestehen. (A\_Breining 2016) Bleibt die Vorspannung bestehen, so wirkt sie sich als zusätzliche Belastung zwangsweise auf die Lebensdauer aus. Aufgrund von Verschleiß im PWG nimmt die Vorspannung mit der Gebrauchsdauer der Komponente ab. Dadurch nimmt dann zwangsweise auch die axiale Steifigkeit des PWGs ab.

Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 29) erzeugen Querkräfte und Kippmomente zusätzliche Kräfte im Inneren des PWGs und führen dadurch zu einem deutlich früheren Ausfall des PWGs. In Folge muss die Achsparallelität der Spindel zu den Führungen bzw. der Abgriff an den Stirnseiten der Mutter sehr genau sein. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 30) gibt für beides Toleranzen von 0,01mm an. Für PRGTS gelten nach (Bosch Rexroth AG 2020, S. 260) die gleichen Toleranzen. (SKF Group 2014, S. 121) hingegen benötigt diese Genauigkeiten nur bei den kleinen Baugrößen und lässt mit zunehmender Baugröße bis zu 0,04mm zu.

Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 7) führt zwar eine oszillierende Bewegung mit sehr kleiner Winkelbewegung des Antriebes ggf. immer noch zu einem frühzeitigen Versagen, doch durch den Schlupf wird nach (Ortlib Präzisionssysteme GmbH & Co. KG 2016, 6, 19) ein Einlaufen der Komponenten des PWGs vermieden. Damit werden die Standzeit und Lebensdauer erhöht, da sich die Berührungspunkte durch den Schlupf fortwährend ändern. Insbesondere im Kurzhubbetrieb ist dies von besonderer Bedeutung für Anwendungen, an denen immer in einem Punkt die Last auftritt: Durch den Schlupf wandern die Mutterkontakte und es werden nicht immer die gleichen Kontaktpunkte in diesen belastet. Dadurch wird auch der Schmierstoff in der Komponente bewegt. An den Spindelkontakten werden allerdings an der Spindel weiterhin die gleichen Punkte belastet, während an den Planeten durch den Schlupf immer rotativ gesehen an anderen Punkten belastet wird. Offen bleibt aus dem Stand der Technik, ob der Schlupf beim Anheben und Absenken der Last signifikant unterschiedlich ist.

Nachdem (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 22) die Spindel und die Gewindemutter zupaart, (Ortlib Präzisionssysteme GmbH & Co. KG 2016, S. 11) von einem hohen Anspruch an die Fertigungsqualität spricht, in z.B. einem PWG der Baugröße 15 an den neun Planeten bei einseitigem Kontakt der Flanken bereits 426 Kontakte wirken, ist mit einem großen Einfluss der Fertigungsgenauigkeiten auf die Lebensdauer des PWGs zu rechnen. (A\_Zhang 2018) berechnete einzelne Mehrkörpersimulationen (MKS) mit Planeten, deren Geometrie nach den in Computertomographiemessungen (Ct-Messungen) ermittelten Abweichungen verzerrt wurde. Er konnte dabei sehr hohe Änderungen der Belastungen nachweisen und damit die Auswirkungen der Fertigungsungenauigkeiten bestätigen.

Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2015; Balázs 1999) wirkt sich die Schmiegun der Wälzpartner deutlich auf die PWG-Lebensdauer aus. Wichtig ist dabei, dass



mindestens ein Wälzpartner eine genügend hohe Balligkeit aufweist, um die Position der Kontakte sicher zu definieren. Mit zunehmender Balligkeit sinken zwangsweise die wirkenden Kontaktflächen. Damit werden dann die wirkenden Kräfte auf kleinere Flächen verteilt – die Spitzenspannungen in den Kontakten nehmen zu. Ist die Balligkeit zu hoch, so sinkt die Lebensdauer aufgrund der höheren Spannungen in den zunehmend kleineren Kontaktflächen.

Im Bezug zur tatsächlichen Anwendung führen nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, 7) folgende weitere Ursachen zu einem frühzeitigen Versagen des PWG:

- Querkräfte und Kippmomente
- Lastüberhöhung durch fehlerhafte Flucht des PWGs zur Bewegung
- Verschmutzung
- Unzureichende Schmierung
- Vibrationen bei Stillstand

Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020) ist die Schmiermittelgebrauchsdauer im PWG von der Belastung, der Drehgeschwindigkeit, dem Hub, der Betriebstemperatur, der Alterung des Schmierstoffes und den Umgebungsbedingungen abhängig. Zu den Umgebungsbedingungen gehören Vibrationen, Rüttelkräfte, Stöße sowie das Eindringen von Fremdmedien (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 12). Nach (SKF Group 2014, S. 31) ist das Schmierintervall bei PRGTs zusätzlich vom Spindeldurchmesser abhängig. Die Übertragbarkeit der letzten Abhängigkeit ist für den PWG noch unbekannt. Wenn der Schmierstoff nicht rechtzeitig ersetzt wird, haben alle Faktoren, die einen Einfluss auf die Gebrauchsdauer des Schmierstoffes haben, Auswirkungen auf den Schmierstoff und damit Auswirkungen auf die Lebensdauer des PWGs. Bei vielen dieser Faktoren für die Schmiermittelgebrauchsdauer ist allerdings anzunehmen, dass sie die Lebensdauer des PWGs nicht nur durch ihren Einfluss auf den Schmierstoff, sondern auch durch andere Effekte direkt beeinflussen. Die Drehgeschwindigkeit kann z.B. auch zur Anregung von Eigenfrequenzen führen. Die entstehenden Resonanzschwingungen können wiederum zur Schädigung des PWGs führen (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 15).

Nachdem eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von PWGs aufgezeigt wurden, sollen nun mögliche, auf den PWG vorstellbar übertragbare, Einflussfaktoren anderer Maschinenelemente untersucht werden. Dabei soll im Folgenden nur auf Einflussfaktoren eingegangen werden, die bisher noch nicht genannt wurden.

Aus der Analyse von (Bosch Rexroth AG 2020) fällt auf, dass für PRGTs die gleichen Anforderungen und Einflussfaktoren auf die Lebensdauer wie beim PWG nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020) genannt werden. (SKF Group 2014) zeigt ebenfalls vergleichbare Einflussfaktoren auf die Lebensdauer. Zusätzlich wird die Lebensdauer von PRGTs nach (Bosch Rexroth AG 2020, S. 251–252) noch durch die Toleranzklasse des PRGTs und der Lagerung des PRGT beeinflusst. Diese beiden Faktoren lassen sich aber auf die Fertigungstoleranzen und mögliche Auswirkungen von Querkräften und Kippmomente zurückführen. Nach (SKF Group 2014, S. 120) müssen PRGTs einlaufen und dabei entstehen nach dem Hersteller Partikel im System, die ausgespült werden müssen. Ob dies gleichermaßen für PWGs relevant ist, ist noch nicht untersucht.

Von Kugelgewindtrieben (KGT) ist nach (Haberkern 1998) mit zunehmendem Kugel- und Laufbahnverschleiß mit einem zunehmendem Risiko des Verklammerns oder eines Gewaltbruchs zu rechnen. Je nach Geometrie wäre dies auch am PWG denkbar.

Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2000; Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019; Bartz 1999) können an Lagern Heißlaufschäden auftreten. Auf stark erhöhte Reibung durch möglicherweise zu geringe Lagerluft, Verspannung der Lager, Wärmeausdehnung oder bspw. Mangelschmierung folgt ein sprunghafter Anstieg der Temperatur. Dies ist auch beim PWG möglich. Ein Politurverschleiß von Wälzlagern nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019, S. 726) ist ebenfalls am PWG denkbar. Ein Kantenlauf, wie er an Lagern auftreten kann, ist aufgrund der ausgerundeten Geometrie am PWG nur schwerlich denkbar.

Zusammenfassend sind alle genannten Einflussfaktoren in den Bereichen Geometrie des PWGs, Materialeigenschaften der PWG-Komponenten und Anwendung aufzufinden. Für die meisten der hier aufgeführten Einflussfaktoren sind im Bezug zum PWG nur qualitative Aussagen möglich. Von den Materialeigenschaften und Teilen der Anwendung – wie z.B. dem Schmierkonzept – wird eine gute Übertragbarkeit aus Untersuchungen anderer Maschinenelemente und Grundlagenuntersuchungen erwartet. Kaum einer der hier aufgeführten Einflussfaktoren ist unabhängig von der Geometrie. Die Bewertung der meisten Einflussfaktoren erfordert eine genaue Kenntnis der Kontaktgeometrien, -kräfte und -punkte sowie deren Häufigkeit und Schwankung. Zu diesen gibt es nach heutigem Stand zum PWG nur wenige, unzureichende Untersuchungen von (Balázs 1999) und keine im Hinblick auf die Variation von Einflussgrößen. Es ist daher dringend nötig, gerade im Hinblick auf die kaum untersuchte Kinematik und

Kinetik, den Einfluss der Geometrie und jener Einflussgrößen der Anwendung zu untersuchen, die nicht auf den PWG direkt übertragbar sind. Aufgrund der Vielzahl an zu untersuchenden Einflussfaktoren, ist es sinnvoll, mittels Simulationen die Relevanz und Auswirkungen von ihnen zu ermitteln.

## 2.5 Simulation von Linearantrieben

Es stellt sich beim PWG die Frage, ob nicht analytische Modelle oder Versuche anstatt von Simulationen besser geeignet wären. Die von (Balázs 1999) hergeleiteten, einzig bekannten analytischen Modelle zum PWG setzen ein bekanntes Schränken und Kippen der Planeten voraus. (Balázs 1999, S. 84) weist nach, dass eine Auslegung im Meridianschnitt, also eine Vernachlässigung des Schränkens und des Kippens nicht zulässig ist. Das Schränken und das Kippen können nach dem bisherigen Stand der Technik nur durch MKS-Simulationen oder Versuchen aus den dort ermittelten quasi-statischen Gleichgewichtslagen der Planeten bestimmt werden. Begründet liegt dies in der statischen Überbestimmtheit des PWGs und den sich in der Bewegung ausbildenden Schwingungen der Planeten. Aufgrund der in Kapitel 2.1 aufgeführten Besonderheiten der Kinematik ist die Planetenbewegung des PWGs von ähnlichen Maschinenelementen – von PRGTs und RGT – nicht auf den PWG übertragbar. Die Bestimmung aus Versuchen ist allerdings äußerst schwierig (vgl. Kapitel 4.2) sowie bei einer Untersuchung vieler Einflussfaktoren sehr zeitaufwendig. Folglich verbleibt die Simulation als zielführendste Option.

Zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf Linearantriebe sind insbesondere zwei Arten an Simulationstypen üblich: Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) und Mehrkörpersimulationen (MKS). Klassisch rechnet die FEM mit flexiblen Körpern statische Lastfälle und die MKS mit Starrkörpern die dynamischen Lastfälle und Bewegungen. Im Rahmen von Co-Simulationen ist es auch möglich, beide Simulationsarten zu verbinden. Durch die flexiblen Körper ermittelt die FEM neben der Deformation der Körper auch die Spannungen im Körper. Vor allem bedingt durch den Rechenaufwand kann in FEM-Simulationen das dynamische Verhalten nur sehr eingeschränkt untersucht werden. Eine MKS ermittelt die Kinematik und Kinetik der simulierten Körper. Durch die Simulation des dynamischen Verhaltens kann in einer MKS im Gegensatz zu FEM-Simulationen bspw. die Entstehung von Schwingungen aufgrund des dynamischen Verhaltens ermittelt werden. Um das dynamische Verhalten untersuchen zu können arbeitet die MKS im Vergleich zu FEM-Simulationen mit weiteren Vereinfachungen:

In einer reinen Starrkörper-MKS sind die Körper nicht flexibel – ihre Deformation sowie die Spannungen in den Körpern können und müssen nicht berechnet werden. Flexibel ist ein System in einer Starrkörper-MKS nur in Kontakten und speziellen Randbedingungen.

Im Folgenden soll näher auf die Möglichkeiten von FEM-Simulationen und MKS von PWGs eingegangen werden. (A\_Zürm 2017, S. 140) weist aufgrund des Verschleißes in den Planetenscheiben und der beidseitigen Schäden an den Flanken des Schränkens der Planeten nach. In den FEM-Simulationen von (A\_Breining 2016) zeigte sich, dass sich in der FEM viel geringere Schränkwinkel als in den ersten, eigenen MKS zum PWG einstellen. Analysiert man die später in dieser Arbeit gezeigten MKS genauer, so stellt man fest, dass sich die Schränkwinkel erst in der Dynamik, ab einer größeren Rotation der Spindel einstellen. (A\_Breining 2016, 88, 92) sagt aus, dass eine Modellierung der Drehbewegung in der FEM nach dem bisherigen Stand der Technik und mit der bisher zur Verfügung stehenden Hardware nicht zielführend ist. (A\_Zhao 2016) erweiterte und automatisierte die FEM-Simulationen, ohne eine rechenstechnisch effizientere Lösung für die Simulation der Drehbewegung zu finden. (A\_Arnarson 2018) übernahm deshalb in seinen FEM-Simulationen das Schränk- und Kippen als feste Vorgabewerte aus MKS des PWG.

Die FEM hat u.a. mit freibeweglichen Körpern große Probleme und findet für Dynamiksimulationen meist keine zielführende Konvergenz in noch vertretbarer Rechenzeit. Die Planeten des PWGs sind allerdings aufgrund der Wirkweise des PWG als freibewegliche Körper abzubilden. Nach (Flores & Lankarani 2016, S. 11) ist eine MKS die deutlich effizientere Methode für mechanische Systeme mit einer Vielzahl an gleichzeitig wirkenden Kontakten, wie es der PWG sicherlich ist. Die später gezeigten eigenen MKS benötigen bspw. für ca. 40 000 Zeitschritte ca. sechs Stunden bei acht CPU-Kernen und 16GB dafür verwendetem Arbeitsspeicher. Die FEM-Simulationen von (A\_Breining 2016; A\_Arnarson 2018) benötigen zur Simulation eines dieser Zeitschritte der MKS zwei bis drei Tage bei der doppelten Anzahl an CPU-Kernen und dem vierfachen Arbeitsspeicher. Die vollständige MKS in der FEM abzubilden ist daher wenig zielführend. Sinnvoller ist es hingegen, zuerst mit der MKS das dynamische Verhalten unterschiedlichster Einflussfaktoren zu untersuchen und dann, sofern möglich, diese im Detail in einzelnen Zeitpunkten der MKS mit FEM-Simulationen zu untersuchen. Auch Co-Simulationen, die bspw. nur jeden zehnten oder hundertsten Schritt der MKS in der FEM rechnen, sind aufgrund der benötigten Rechenzeit wenig zielführend. Im

Folgenden soll deshalb näher auf MKS eingegangen werden. Auf FEM-Simulationen wird nicht näher eingegangen, da diese nicht Teil dieser Arbeit sind. Für einen Einblick in diese sei beispielsweise auf die Arbeiten von (Klein 2015; Nasdala 2015; Whiteley 2017) verwiesen.

Nach (Rill & Schaeffer et al. 2020) werden komplexe Systeme in der klassischen Mehrkörperdynamik durch massebehaftete Körper und masselose Verbindungselemente abgebildet. Für den PWG ist dies in dieser Form wenig zielführend. Hier sind die zentralen Verbindungselemente im Kraftfluss die Kontakte zwischen den Planeten mit den Müttern und der Spindel. Die Lage der Planeten selbst wird nur durch ihre Kontakte bestimmt. Die Planeten und ihre Kontakte sind auch das zentrale Element für die Kinetik, Kinetik und Dynamik des PWGs.

Die Arbeit von (Flores & Lankarani 2016) vergleicht die aktuellen Ansätze der Kontaktmodelle für MKS. Dabei wird zwischen rein elastischen Kontaktmodellen und Modellen mit Energiedissipation unterschieden. Es soll nun zuerst auf die wichtigsten von (Flores & Lankarani 2016) aufgeführten rein elastischen Kontaktmodelle eingegangen werden. Das lineare Hook'sche Kontaktmodell nach (Budynas & Nisbett et al. 2011; Ravn 1998) berechnet die Normalkraft im Kontakt über die folgende Formel 2-2. Dabei ist  $k$  die Federsteifigkeit im Kontakt und  $\delta$  die relative Eindringtiefe. Die relative Eindringtiefe bezeichnet die maximale Durchdringung parallel zum Normalkraftvektor im Kontakt.

$$F_N = k\delta \quad 2-2$$

Das nichtlineare Hertz'sche Kontaktmodell erweitert das lineare Modell um den Exponenten  $n$  und ersetzt nach (Johnson 1982) die Federsteifigkeit  $k$  durch eine generalisierte Steifigkeit  $K$  analog zu Formel 2-3. Nach Daniel<sup>6</sup> ist die Konstante  $K$  – von ihm dargestellt für die Implementierung im MKS-Programm Adams – eine Kombination der Materialeigenschaften und Kontaktgeometrie. Für die Konstante  $n$  empfiehlt Daniel<sup>7</sup> 1,1 für weiche Kunststoffe wie Gummi, 1,5 für weiche Metalle und 2,2 für harte Metalle.

---

<sup>6</sup> Daniel, W. (06.2011), *Handout zum Vortrag WM119 Adams - Contacts Overview, Best Practices, and Tips*, ArtikelNr. 000012407, MSC Software, <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/simacademy-webinar-archive-adams--contacts-overview--44--best-practices--44--and-tips-wm119>, (zuletzt geprüft 11.10.2020).

<sup>7</sup> Daniel, W. (06.2011), *Handout zum Vortrag WM119 Adams - Contacts Overview, Best Practices, and Tips*, ArtikelNr. 000012407, MSC Software, <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/simacademy-webinar-archive-adams--contacts-overview--44--best-practices--44--and-tips-wm119>, (zuletzt geprüft 11.10.2020).

$$F_N = K\delta^n \quad 2-3$$

Das lineare Kelvin-Voigt-Modell ergänzt das lineare Hook'sche Kontaktmodell nach (Goldsmith 1960) um den in Formel 2-4 dargestellten Dämpfungsterm und ist damit ein Beispiel für die Modelle mit Energiedissipation. Der Dämpfungsterm besteht aus der Dämpfungskonstante  $D$  und der Geschwindigkeit  $\dot{\delta}$  des Eindringens der Körper ineinander.

$$F_N = k\delta + D\dot{\delta} \quad 2-4$$

Zuletzt soll noch auf das nichtlineare Hunt-Crossley Kontaktmodell nach (Hunt & Crossley 1975) eingegangen werden. Dieses erweitert das nichtlineare Hertz'sche Kontaktmodell um den gleichen Dämpfungsterm wie das lineare Kelvin-Voigt-Modell und wird in Formel 2-5 dargestellt. Dieses Kontaktmodell entspricht dem in Adams als „Impact“ implementierten Kontaktmodell mit dem Unterschied, dass in Adams  $D$  proportional zur Durchdringung aber nicht wie im Modell von (Hunt & Crossley 1975) auch proportional zur initialen Durchdringungsgeschwindigkeit ist. Das Impact-Modell wird vom Hersteller der MKS-Software Adams<sup>8</sup> gegenüber dem ebenfalls verfügbaren Restitution-Modell empfohlen, nachdem es numerisch glatter – damit auch schneller und effizienter simulierbar, sowie besser einstellbar ist. Das Restitution-Modell basiert dabei auf einer Poisson-Formulierung und benötigt die aus Versuchen ermittelte Stoßzahl der Komponente.

$$F_N = K\delta^n + D\dot{\delta} \quad 2-5$$

Eine gute Übersicht aktueller Reibungsmodelle wird in (Font-Llagunes 2016, S. 67–92) dargestellt. Im Folgenden soll auf die Grundlagen und ein Modell in Mehrkörpersimulationen eingegangen werden. Nach (Coulomb 1809) wird mit der folgenden Formel 2-6 die maximale Haftreibungskraft und mit der Formel 2-7 die Gleitreibungskraft vereinfacht definiert. Der Haftreibungskoeffizient  $\mu_H$  ist dabei immer größer als der Gleitreibungskoeffizient  $\mu_G$ . Nach (Coulomb 1809) gilt die Formel 2-6 für eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Kontaktpartnern von Null. Wird die Reibkraft durch eine äußere Kraft überwunden, so beginnen die Körper sich zueinander zu bewegen und solange

---

<sup>8</sup> *Tech Articles KB8015613. Contact best practices.* <https://simcompanion.mscsoftware.com/infocenter/index?page=content&id=KB8015613&actp=search&searchid=1324020050060> (zuletzt geprüft 13.10.2020).

sie in einer Relativbewegung zueinander sind, gilt die Formel 2-7. Nachdem die Reibungskoeffizienten unterschiedlich sind, ergibt sich bei dem Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung nach (Coulomb 1809) eine unstetige Funktion.

$$F_R = \mu_H F_N \quad 2-6$$

$$F_R = \mu_G F_N \quad 2-7$$

Nach (Popov 2009) ist dabei die Coulomb'sche Reibung von den folgenden Faktoren abhängig: Kontaktzeit, wirkende Normalkraft, Gleitgeschwindigkeit und Oberflächenrauheit. Die Abhängigkeiten sind dabei je nach Material unterschiedlich ausgeprägt. Für detaillierte Reibmodelle wie sie in (Font-Llagunes 2016, S. 67–92) dargestellt werden, kommen noch weitere Einflussfaktoren hinzu.

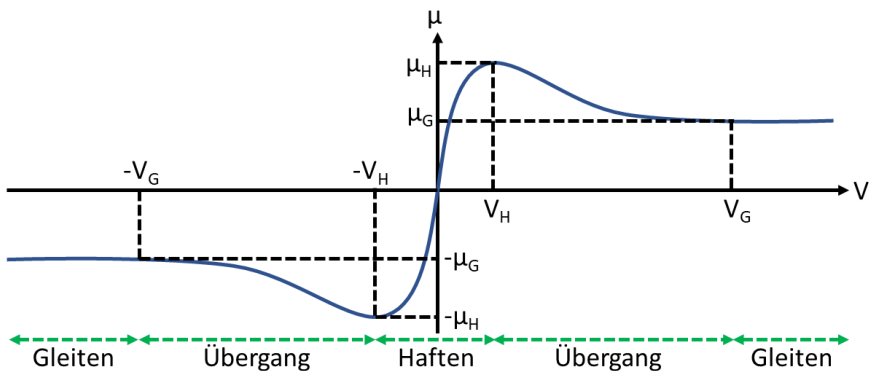


Abbildung 9 Resultierender Reibkoeffizient  $\mu$  durch Coulomb'sche Reibung in Adams nach Davidson<sup>9</sup> in eigener Darstellung

Um Konvergenzprobleme in Simulationen zu vermeiden und dadurch die Rechenzeit deutlich zu minimieren sowie die Stabilität zu erhöhen, ist es zielführend eine stetige Funktion zur Reibung, anstatt der aus der Theorie kommenden unstetigen Funktionen,

<sup>9</sup> Davidson, C. (02.2010), *Handout Friction Modeling in Adams and SimXpert Motion.*, Tech Article KB8022007, MSC Software, <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/friction-modeling-in-adams-and-simxpert-motion-kb8022007>, (zuletzt geprüft 13.10.2020).

zu verwenden. In Adams wird daher die Coulomb'sche Reibung nach Davidson<sup>10</sup> analog zur Abbildung 9 als Spline abgebildet. Bei einer Geschwindigkeit  $> v_G$  bzw.  $< -v_G$  wirkt als Reibkoeffizient  $\mu_G$ . Anhand des Verhaltens der zu simulierenden Komponente müssen die Haftgeschwindigkeit ( $v_H$ ), die Gleitgeschwindigkeit ( $v_G$ ), der Haftreibungskoeffizient ( $\mu_H$ ) und der Gleitreibungskoeffizient ( $\mu_G$ ) eingestellt werden. Eine Haftgeschwindigkeit ( $v_H$ ) oder Gleitgeschwindigkeit ( $v_G$ ) von Null führt dabei zu einer numerisch völlig instabilen Simulation und kann daher im Programm nicht gewählt werden. Dies wurde bereits von Davidson<sup>11</sup> für das Programm Adams aufgezeigt.

(Flores & Lankarani 2016; Johnson 2003; Font-Llagunes 2016) zeigen noch eine Vielzahl an weiteren Modellen zu den Kontaktnormalkräften und zur Reibung auf, die meist auch weitere Eingangsparameter berücksichtigen und mathematisch daher deutlich komplexer sind. Dafür können diese Modelle – bei korrekter Parametrierung – eine höhere Genauigkeit erreichen. Diese erweiterten Modelle erfordern entweder eine genaue Kenntnis der Kontakte, welche beim PWG zum heutigen Stand nicht vorliegt oder sind wie bspw. das Modell von (Deppler 2017) mathematisch viel komplexer zu lösen. Die Ermittlung der genauen Gegebenheiten in den Kontakten – z.B. der Schmierstoffverteilung – erfordern wiederum eine Kenntnis des Verhaltens der Komponente unter unterschiedlichsten Einflussfaktoren. Diese Auswirkungen unterschiedlichster Einflussfaktoren werden allerdings erst in dieser Arbeit für den PWG ermittelt. Gleichzeitig erfordern mathematisch komplexere Modelle zwangsweise deutlich mehr Rechenzeit. Nachdem schon mit einfachen Kontaktmodellen eine Simulation ungefähr sechs Stunden benötigt, wird die Verwendung von komplexeren Kontaktmodellen zur Untersuchung der Vielzahl an Einflussfaktoren als wenig zielführend gesehen.

Maßgebliche Unterschiede in der Berechnungszeit ergeben sich auch durch die Implementierung der Kontaktmodelle. Hier muss zwischen im jeweiligen Simulationsprogramm implementierten und nicht implementierten Kontaktmodellen unterschieden werden. Nicht implementierte Kontaktmodelle können meist durch User-Subroutinen eingebunden werden. Aufgrund der starken Auswirkungen der Kontaktmodelle auf die Berechnungszeit, sind üblicherweise für die im jeweiligen Simulationsprogramm

---

<sup>10</sup> Davidson, C. (02.2010), *Handout Friction Modeling in Adams and SimXpert Motion.*, Tech Article KB8022007, MSC Software, <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/friction-modeling-in-adams-and-simxpert-motion-kb8022007>, (zuletzt geprüft 13.10.2020).

<sup>11</sup> Davidson, C. (02.2010), *Handout Friction Modeling in Adams and SimXpert Motion.*, Tech Article KB8022007, MSC Software, <https://simcompanion.hexagon.com/customers/s/article/friction-modeling-in-adams-and-simxpert-motion-kb8022007>, (zuletzt geprüft 13.10.2020).



implementierten Kontaktmodelle Optimierungen für die unterschiedlichen Solver hinterlegt. Wird ein eigenes Kontaktmodell mit User-Subroutinen eingebunden, so können diese Optimierungen nicht verwendet werden und es ist in Folge ein massiver Anstieg der Berechnungszeit zu erwarten. Zuletzt spielt auch das Debugging eine wichtige Rolle. Simulationsprogramme bieten zu den eigenen Modellen eine deutlich bessere Fehleranalyse und erkennen bspw. etwaige numerische Instabilitäten. Dies ist bei User Subroutinen nicht einfach möglich.

In Summe ist es daher im Rahmen dieser Arbeit am zielführendsten, im jeweiligen Simulationsprogramm hinterlegte Kontaktmodelle zu verwenden. Nach einer Kalibrierung der Parameter des gewählten Kontaktmodells anhand von Versuchen kann in dieser Arbeit die Relevanz von Einflussfaktoren auf das Systemverhalten und die Lebensdauer ermittelt werden. Damit wird es späteren Arbeiten ermöglicht, passend zu dem ermittelten Verhalten, bessere Kontakt- und Reibungsmodelle auszuwählen und damit die Auswirkungen von Einflussfaktoren genauer als in dieser Arbeit zu bewerten.

(A\_Ji 2016; A\_di Noia 2017) führten MKS-Reihen auf Basis von Simulationen des Autors dieser Arbeit durch. Der Abgleich mit Versuchen zeigte allerdings, dass die in diesen Arbeiten verwendete Kontaktparameter nicht valide sind und daher deren Simulationen nicht verwendet werden können. Aus der Arbeit von (A\_Heider 2017) sind Methoden zur Automatisierung der Erstellung von Simulationen in die Erstellung der Simulationen dieser Arbeit eingeflossen.

## **2.6 Zusammenfassung und Bewertung des Stands der Forschung und Technik**

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Kinematik, Kinetik und Dynamik des PWGs bei weitem noch nicht ausreichend untersucht wurde. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Bewegung der Planeten, gerade nachdem diese nicht von funktionsähnlichen Komponenten wie dem PRGT und RGT übertragen werden kann. Hierzu sind MKS und Versuche nötig.

Jegliche Auswirkungen von Einflussfaktoren aus der Geometrie, wie bspw. dem Radialspiel, sowie viele Auswirkungen aus der Anwendung – z.B. die Drehzahl oder Vorspannung – auf das Systemverhalten und die Lebensdauer wurden noch nicht untersucht. Auswirkungen von Materialeigenschaften und Teilen der Anwendung – wie bspw. Schmierkonzepte – können von anderen Maschinenelementen in Teilen übertragen werden bzw. erfordern zuerst das in dieser Arbeit erweiterte Systemverständnis

vom PWG. Die Analyse der Auswirkungen von Einflussfaktoren auf die Lebensdauer erfordert die Analyse der Kontaktkräfte und -punkte sowie deren Häufigkeit und Schwankung.

Es sind dazu systematische Untersuchungen unterschiedlichster Betriebspunkte nötig. Auch hier ist wiederum der Einfluss auf das dynamische Verhalten, auf die Kinematik und Kinetik zu untersuchen. Aufgrund der Vielzahl an zu untersuchenden Einflussfaktoren, ist es sinnvoll mittels Simulationen die Relevanz und Auswirkungen von ihnen zu ermitteln. Aus der benötigten Simulation der Dynamik und der dazu in FEM-Simulationen benötigten nicht tragbaren Rechenleistung sind MKS die zielführende Option. FEM-Simulationen späterer Arbeiten können dann auf dem Wissen dieser Arbeit aufbauen und zielgerichtet einzelne Betriebspunkte detailliert untersuchen.

Aus den zuvor aufgezeigten Gründen in Bezug zur Komponentenkenntnis des PWGs und zur benötigten Rechenzeit sind die Mehrkörpersimulationen mit bereits in dem gewählten Simulationsprogramm vorhandenen Kontakt- und Reibungsmodellen aufzubauen. Auf Basis des damit ermittelten Systemverhaltens und Systemverständnisses können dann in späteren Arbeiten genauere Modelle aufgebaut werden.

## **3 Präzisierte Zielsetzung und Vorgehensweise**

### **3.1 Präzisierte Zielsetzung**

Auf Basis der im Stand der Technik aufgezeigten Defizite leiten sich für diese Arbeit deshalb die folgenden Ziele ab: Das Systemverständnis für die Komponente erweitern und die relevanten Einflussfaktoren auf die Kinematik des PWGs und die Kinetik im PWG zu ermitteln und zu bewerten.

Aus dem Stand der Technik wird klar deutlich, dass die größten Defizite zum PWG in der Kenntnis seiner Kinematik und Kinetik liegen. Aufgrund der komplexen Bewegung der Planeten und der Vielzahl an äußeren und inneren Einflüssen werden zur Abbildung der Kinematik und Dynamik des PWGs Mehrkörpersimulationen benötigt. Bisher wurde eine Vielzahl an Effekten noch nicht auf ihre Auswirkungen hin untersucht, noch gibt es geometrieunabhängige Ersatzmodelle. Es lassen sich mit Hilfe von Mehrkörpersimulationen weitere kaum oder gar nicht untersuchte Faktoren wie die Anwendung, die Stabilität und der Stabilitätsbereich der Planetenbewegung, sowie statistische Verteilungen von Kräften und Kontaktpunkten ermitteln und bewerten.

Daher sind MKS zum PWG aufzubauen, Größen zur Kalibrierung abzuleiten und die Simulationen mittels des Abgleiches dieser Größen aus Versuchen zu kalibrieren. Ein Teil der dazu einzustellenden Parameter sind jene für die Kontaktmodelle im jeweiligen Simulationsprogramm. Die Kalibrierung soll anhand einer noch zu wählenden Referenzgeometrie geschehen.

Anschließend sind mögliche Einflussgrößen auf Kinematik und Kinetik des PWG aus Parametern der Anwendung und der Geometrie zu ermitteln und nach ihrer zu erwartenden Relevanz zu bewerten. Auf Basis der Untersuchung ausgewählter Parameter der Anwendung auf das Systemverhalten können Referenzwerte der Anwendung für spätere Simulationen abgeleitet werden. Mit diesen werden dann Einflussgrößen der Geometrie untersucht. Um sicherzustellen, dass die ermittelten Eigenschaften des Systemverhaltens möglichst allgemeingültig sind, sind andere Baugrößen auf das gleiche Verhalten anhand einer Einflussgröße zu prüfen.

Mit der Kenntnis des Systemverhaltens bei unterschiedlichen variierten Parametern der Anwendung und der Geometrie können Einflussgrößen bestimmt werden, deren Verhalten in den Kontakten näher untersucht werden soll. Nur die Kontakte an den Planeten definieren deren Bewegung und die übertragenen Kräfte. Ursachen für auftretende

Effekte der Kinematik und Kinetik des PWGs durch die variierten Parameter sind daher in den Kontakten zu suchen. Die Einflüsse der Kontakte sind anhand mindestens einem variierten Parameter zu validieren. Abschließend sind die Anwendungsgrenzen der gezeigten Ergebnisse aufzuzeigen.

Neue, genauere Lebensdauermodelle werden in dieser Arbeit nicht aufgebaut, denn leider kann in dieser Arbeit nur ein Bruchteil der dazu nötigen Vorarbeiten geleistet werden. Bspw. müssen für genauere Lebensdauermodelle neue auf den PWG angepasste Kontaktmodelle und Modelle zum Verhalten der Schmierung aufgebaut werden. Diese benötigen wiederum die Ergebnisse dieser Arbeit.

### **3.2 Vorgehensweise zur Zielerreichung**

Die Vorgehensweise zur Zielerreichung der Erweiterung des Systemverständnisses zum PWG hinsichtlich Kinematik und Kinetik gliedert sich in drei große Themen – die Modellbildung, die Systemanalyse und die Kontaktanalyse. Grundsätzlich wird dabei vom Großen ins Kleine gegangen – von der Black-Box PWG mit validiertem Übertragungsverhalten zu den Bewegungen der Planeten und den zwischen den Komponenten wirkenden Summenkräften bis letztlich zu den wirkenden Kontaktkräften und Wälzkreisen.

Die Modellbildung klärt einerseits die Frage, wie Simulationen und Versuche an Prüfständen zu gestalten sind, um die Kinematik und Kinetik des PWGs zu untersuchen. Andererseits werden in der Modellbildung Kontaktmodelle der Simulation kalibriert, um eine Simulation mit validiertem Übertragungsverhalten des PWG aufzubauen.

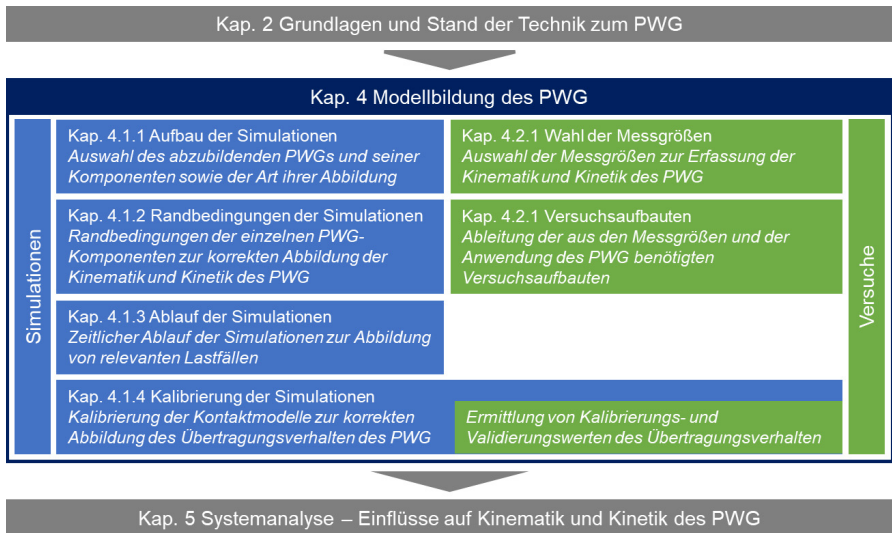
In der Systemanalyse werden dann mittels den in der Modellbildung geplanten Simulationsmodellen und Versuchen an Prüfständen Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik des PWGs ermittelt, auf ihre Auswirkungen untersucht und ihre Relevanz für Kinematik und Kinetik des PWG bewertet. Sowohl die Modellbildung, die Systemanalyse als auch die Kontaktanalyse konzentrieren sich auf eine noch auszuwählende Baugröße des PWGs als Beispiel. In der Systemanalyse wird die Kinematik und Kinetik des PWGs bis auf die Ebene der Summenkräfte zwischen den PWG-Komponenten und der Planetenbewegung analysiert und validiert sowie der Nachweis der Übertragbarkeit der Analysen dieser Baugröße auf andere PWGs erbracht und validiert.

In der Kontaktanalyse werden dann die Auswirkungen von zuvor in der Systemanalyse untersuchten Einflussfaktoren auf die Kontaktkräfte und die Wälzkreise untersucht, um

Ursachen für in der Systemanalyse ermittelte Effekte zu ermitteln. Im Folgenden soll nun jeweils die Vorgehensweisen für die Modellbildung, die Systemanalyse und die Kontaktanalyse aufgezeigt werden.

### 3.2.1 Vorgehensweise in der Modellbildung des PWG

Die Modellbildung des PWGs basiert auf den Grundlagen und Stand der Technik zum PWG und ist die Basis für die Systemanalyse zur Untersuchung der Kinematik und Kinetik des PWG. Die Modellbildung des PWGs dieser Arbeit basiert auf zwei Säulen: Simulationen und Versuche. Beide haben zum Ziel die Systemanalyse der Kinematik und der Kinetik des PWGs zu ermöglichen. Anhand von Abbildung 10 soll auf das Vorgehen der Modellbildung eingegangen werden.



#### Abbildung 10 Vorgehensweise zur Modellbildung des PWG

Erster Schritt der Modellbildung mittels Simulationen in Kapitel 4.1.1 ist die Auswahl eines abzubildenden PWGs (Referenzgeometrie). Anhand dieses PWG werden die abzubildenden PWG-Komponenten und die Art ihrer Abbildung – bspw. als Starrkörper oder flexible Körper – in der MKS ausgewählt. Äußere Zwangsbedingungen, Randbedingungen der einzelnen PWG-Komponenten und die Wahl der Kontakte sind anschließend in Kapitel 4.1.2 für eine korrekte Abbildung der Kinematik und Kinetik des PWGs

festzulegen. Nachdem ein PWG in unterschiedlichen Lastfällen betrieben werden kann, wird in Kapitel 4.1.3 ein zeitlicher Ablauf der Simulation zur Abbildung der relevanten Lastfälle ausgewählt. Beispiele der Lastfälle sind die Wirkrichtung der von außen wirkende Axialkraft und die Drehrichtung des PWG als auch innere Lasten wie die eingestellte Vorspannung.

Der PWG arbeitet u.a. als Reibradgetriebe. Daher ist sein Übertragungsverhalten – die Wandlung eines Antriebsmomentes in eine Axialkraft als auch die Wandlung einer rotativen in eine translatorische Bewegung – sehr stark von den Kontaktmodellen abhängig. Anhand ausgewählter Lastfälle und der Referenzgeometrie werden daher in Kapitel 4.1.4 die Kontaktmodelle kalibriert und das Übertragungsverhalten des PWG validiert. Hierzu wird auf Messungen aus Versuchen mit den Prüfständen zurückgegriffen. Später, in der Systemanalyse (Kapitel 5), wird mittels der Analyse einzelner Einflüsse auf die Kinematik und Kinetik des PWGs nachgewiesen, dass die Ergebnisse der Untersuchungen an der gewählten Referenzgeometrie auch auf andere PWG-Baugrößen übertragbar sind.

Um die Modellbildung mittels Versuche zu ermöglichen, werden in Kapitel 4.2.2 zuerst die zu messenden Größen zur Erfassung der Kinematik und Kinetik des PWG gewählt. Dabei konzentriert sich diese Arbeit auf Messungen, bei denen der PWG unverändert bleibt, um seine Kinematik und Kinetik nicht zu beeinflussen. Aus den Messgrößen, den zu erwarteten Messbereichen dieser sowie für den PWG mögliche Lastfälle werden in Kapitel 4.2.3 Versuchsaufbauten abgeleitet. Auf Basis der Modellbildung mittels Simulationen und Versuchen kann anschließend die Systemanalyse bzgl. Einflüssen auf die Kinematik und Kinetik des PWG durchgeführt werden.

### **3.2.2 Vorgehensweise in der Systemanalyse des PWG**

Die Systemanalyse des PWGs zu Einflüssen auf seine Kinematik und Kinetik basiert auf den Grundlagen und dem Stand der Technik zum PWG (Kapitel 2) und der erarbeiteten Modellbildung (Kapitel 4). In der Systemanalyse sollen Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik ermittelt und ihre Auswirkungen bewertet werden. Die Vorgehensweise in der Systemanalyse des PWGs soll mit Hilfe der folgenden Abbildung 11 erläutert werden.

Um Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik des PWGs später bewerten zu können und die Kinetik und Kinematik im PWG zu validieren, ist es notwendig, eine Referenzgeometrie des PWGs zu einem Referenzlastfall zu untersuchen (vgl. Kapitel 5.1).

Bevor mit diesem Modell weitere Einflussfaktoren untersucht werden, ist dieses Modell in Versuchen zu validieren. In der Modellbildung (Kapitel 4.1.4) wurde bereits für eine Referenzgeometrie das Verhalten des PWGs nach außen – sein Übertragungsverhalten – validiert.

Nachdem das Verhalten der Referenzgeometrie zu einem Referenzlastfall bekannt ist, kann nun auch in Kapitel 5.2 die Kinematik und Kinetik im Inneren des PWG validiert werden. Auf Basis der validierten Simulation der Referenzgeometrie bei einem Referenzlastfall und dem Stand der Technik können nun in Kapitel 5.3 Parameter mit zu erwartendem hohem Einfluss auf die Kinematik und Kinetik des PWGs zur weiteren Untersuchung ausgewählt werden. Diese Parameter können in zwei Gruppen aufgeteilt werden: Zum einen Parameter der Anwendung des PWG und zum anderen Parameter der Geometrie des PWGs.

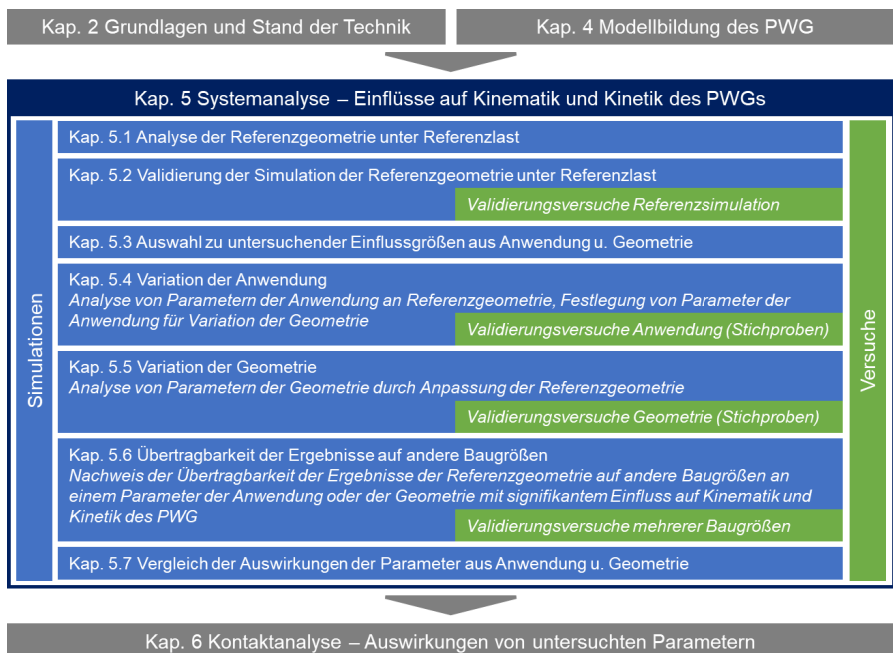


Abbildung 11 Vorgehensweise zur Systemanalyse der Einflüsse auf Kinematik und Kinetik des PWG

Parameter der Anwendung des PWG werden in Kapitel 5.4 untersucht. Hierzu zählen beispielsweise die wirkende Axialkraft und die Vorspannung<sup>12</sup> des PWG. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Parametern ist es nicht sinnvoll, Parameter der Geometrie mit allen Parametern der Anwendung zu untersuchen. Daher wird am Ende der Untersuchungen in Kapitel 5.4 ein Parametersatz der Anwendung gewählt, mit dem die Parameter der Geometrie in Kapitel 5.5 untersucht werden sollen.

Ausgehend von der Referenzgeometrie wird in Kapitel 5.5 die Geometrie des PWG durch die Änderung einzelner Geometrieparameter auf deren Auswirkungen auf Kinematik und Kinetik des PWG untersucht. Aus den in den Kapiteln 5.4 und 5.5 untersuchten Parametern kann nun ein Parameter mit signifikanten Auswirkungen gewählt werden, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Referenzgeometrie auf andere Baugrößen in Kapitel 5.6 nachzuweisen und mittels Versuche an den Prüfständen zu validieren. Die Systemanalyse schließt in Kapitel 5.7 mit einem Vergleich der Auswirkungen der Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik des PWG.

### **3.2.3 Vorgehensweise in der Kontaktanalyse des PWG**

In der Kontaktanalyse sollen die Ursachen von Auswirkungen von Parametern der Anwendung und der Geometrie auf die Kinematik und Kinetik des PWGs in den Kontakten selbst ermittelt werden. Die Vorgehensweise in der Kontaktanalyse des PWGs soll mit Hilfe der folgenden Abbildung 12 erläutert werden.

In der Kontaktanalyse werden Parameter der Anwendung und der Geometrie in Kapitel 6.1 auf ihre Auswirkungen auf die Kontaktkräfte und in Kapitel 6.2 auf ihre Auswirkungen auf die Wälzkreise analysiert. Schwerpunkt der Diskussion liegt dabei auf der Ermittlung der Ursachen für in der Systemanalyse ermittelten Effekte an den Summenkräften zwischen den PWG-Komponenten und der Bewegung der Planeten. In der Tabelle 12 zu Beginn von Kapitel 6 werden dabei die zu untersuchenden Effekte zusammenfassend aufgezeigt.

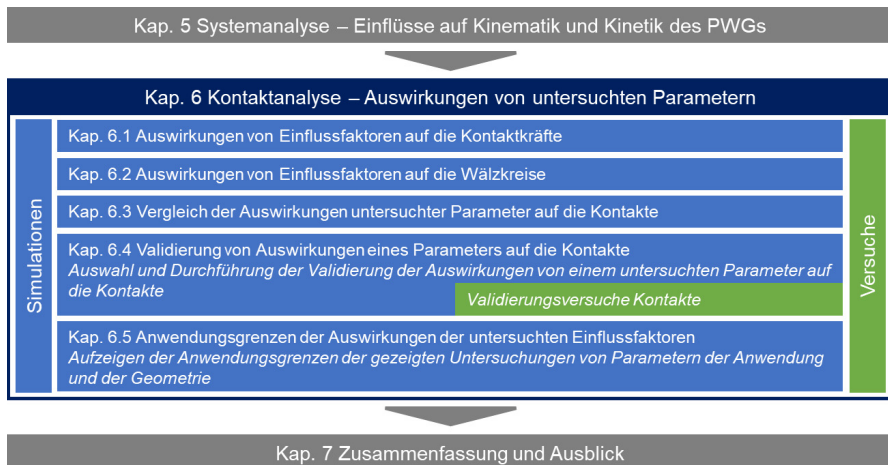
In Kapitel 6.3 werden die in den Kapiteln 6.1 und 6.2 ermittelten Ursachen der Effekte der Parameter der Anwendung und der Geometrie auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht. In Kapitel 6.4 wird einer der bzgl. seiner Kontakte untersuchten

---

<sup>12</sup> Die Vorspannung des PWGs könnte zu beiden Gruppen gezählt werden. Durch die Geometrie (Dicke der Distanzscheiben) wird die in der Anwendung maximal erreichbare Vorspannung begrenzt. Nachdem sie durch die Anwendung – die Anbindung des PWGs an seine Umgebung – aufgebracht und eingestellt wird, zählt sie in dieser Arbeit zu den Parametern des Betriebsverhalten.



Parameter ausgewählt und seine Auswirkungen auf die Kontakte über Lebensdauer- versuche mit PWGs validiert. Die Kontaktanalyse des PWG endet in Kapitel 6.5 mit der Darstellung der Anwendungsgrenzen der in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen von Parametern der Anwendung und der Geometrie auf die Kinematik und Kinetik von PWGs.



*Abbildung 12 Vorgehensweise zur Kontaktanalyse bzgl. der Auswirkungen von zuvor untersuchten Parametern der Anwendung und der Geometrie*

## 4 Modellbildung des PWG

Die Modellbildung gliedert sich in zwei maßgebliche Bereiche: zum einen die simulative Untersuchung mit Mehrkörpersimulationen und zum anderen die Versuche. In beiden werden Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik des PWGs untersucht und das Systemverständnis erweitert. In den Simulationen wird das Verhalten von idealen Komponenten ohne Störfaktoren und in den Versuchen das von realen Komponenten unter dem Einfluss von Störfaktoren untersucht.

### 4.1 Modellbildung durch Mehrkörpersimulationen

Im Folgenden sollen in Kapitel 4.1.1 ein als Referenz abzubildender PWG als auch die Art seiner Abbildung in den Simulationen ausgewählt werden. In den anschließenden Kapiteln 4.1.2, 4.1.3 und 4.1.4 werden dann darauf aufbauend die Randbedingungen in den Simulationen, der zeitliche Ablauf in einer Simulation und die Kalibrierung der Simulationen vorgestellt.

#### 4.1.1 Aufbau der Mehrkörpersimulationen

Ausgehend von einer Referenzgeometrie eines PWG sollen unterschiedliche Einflussfaktoren aus Anwendung und Geometrie auf Kinematik und Kinetik von PWGs untersucht werden. Es ist daher ein PWG zu wählen, der die Untersuchung möglichst vieler Effekte zulässt und ein möglichst „typischer“ PWG in seinem Aufbau ist, um die Übertragbarkeit seiner Untersuchungen auf viele andere Bauarten und Größen zu ermöglichen.

Wie jeder Linearantrieb werden PWGs vor allem aufgrund unterschiedlicher Lasten in verschiedenen Baugrößen eingesetzt. Für die Auswahl der Referenzgeometrie ist es daher wichtig, kurz auf die Skalierung von PWGs einzugehen. Dabei gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten:

1. Skalierung um einen Größenfaktor: Alle Bauteile des PWGs werden in ihrer Größe um den gleichen Faktor verändert. Dabei ändern sich also sowohl die axialen als auch die radialen Abmaße der Muttern.
2. Skalierung der Muttern und Spindel radial zusammen mit einer Veränderung der Anzahl an Planeten und ggf. einer Veränderung der Anzahl an verwendeten Planetentypen. Zur Erhöhung der Tragfähigkeit werden mit dieser Methode Spindel und Mutterndurchmesser erhöht. Dadurch können mehr Planeten um die Spindel

eingebaut werden und die Tragfähigkeit steigt. Der axial benötigte Bauraum für die Muttern bleibt aber gleich. Diese Möglichkeit lässt die Verwendung von gleichen Planeten für unterschiedliche Baugrößen zu und ist aufgrund der daraus resultierenden möglichen Kostenersparnis eine in der Industrie präferierte Methode. Für gute Füllgrade an Planeten in den PWGs werden dabei zwangsweise mehrere Planetentypen in beiden möglichen Orientierungen des Einbaus verwendet.

Bei der Skalierung über einen Größenfaktor ist davon auszugehen, dass Ergebnisse der Simulation für eine Baugröße auch sicher für Baugrößen mit anderem Größenfaktor gelten. Hingegen sind bei der zweiten Methode aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an Planeten, verwendeten Planetentypen und unterschiedlichen Orientierungen im Einbau der Planeten je Baugröße ähnliche aber leicht unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten. In Folge sollte eine Referenzgeometrie ausgewählt werden, in der mehrere Planetentypen verwendet werden und deren verwendete Planetentypen für zumindest mehrere Baugrößen zum Einsatz kommen.

Um Effekte durch unterschiedliche Planetentypen bzw. Einbauorientierungen untersuchen zu können, ist es von Vorteil, wenn in der Referenzgeometrie ein Planetentyp in einer Orientierung eines Einbaus mindestens drei Mal verwendet wird. Drei Planeten in der gleichen Orientierung besitzen ihre in der Anwendung höchstbelasteten Windungen axial zur PWG-Spindel an der gleichen Position und spannen daher eine Ebene auf in der Kräfte abgestützt werden. Werden beispielsweise zwei Planetentypen in je einer Orientierung des Einbaus mit jeweils drei Planeten verwendet so können sich die Planetentypen gegeneinander verspannen.

Wie zuvor in Kapitel 2.1 aufgezeigt, benötigt der PWG eine Vorspannung für ein in allen Betriebspunkten definiertes Übertragungsverhalten. Hierzu sind zwei Möglichkeiten üblich:

1. Radiale Vorspannung: durch die Veränderung der Durchmesser einzelner Komponenten wird der PWG radial vorgespannt. Hier ist im Gegensatz zur zweiten Möglichkeit eine einteilige Mutter möglich. Je nach axialer Lage der Mutterwindungen zueinander, ist es dabei möglich, eine X- oder O-Anordnung sowie eine gleichzeitige Belastung beider Flanken der Mutterwindungen zu erzeugen.
2. Axiale Vorspannung durch mindestens zwei Muttern: Bewegt man zwei Muttern, die im Kontakt mit den gleichen Planeten sind, axial entlang der Spindel

gegeneinander, so kann man die Planeten in einer X- oder O-Anordnung vorspannen. Bei dieser Art der Vorspannung sind die Windungen an Planeten, Muttern und Spindel mit einer Flanke jeder Windung in Kontakt.

Bei der radialen Vorspannung werden je nach Vorspannung unterschiedliche Komponenten benötigt. Bei der axialen Vorspannung können immer die gleichen Komponenten verwendet werden. Um in Versuchen zusätzliche Einflüsse – z.B. durch andere Fertigungsabweichungen anderer Komponenten – zu vermeiden, wird für die Referenzgeometrie eine axiale Vorspannung bevorzugt.

Zusammengefasst wird damit ein PWG als Referenzgeometrie mit folgenden Eigenschaften gesucht:

- Es existieren größere und kleinere Baugrößen als die Referenzgeometrie.
- Es werden mindestens zwei Einbaurichtungen eines Planetentyps oder zwei Planetentypen verwendet.
- In jeder verwendeten Einbaurichtung eines Planetentyps sind mindesten 3 Planeten verbaut.
- Es wird eine zweigeteilte Mutter für eine axiale Vorspannung des PWG benutzt.
- Zusätzlich zu den zuvor genannten sollte die Anzahl an Planeten möglichst gering sein, um Berechnungszeit bei der vollständigen simulativen Abbildung einzusparen.

Als Referenzgeometrie für die Mehrkörpersimulationen wird aufgrund der zuvor genannten Anforderungen der PWG15x3 von Schaeffler gewählt. Die „15“ in der Benennung bezeichnet den Spindeldurchmesser und die „3“ die Gängigkeit der Spindel. Der PWG15x3 besitzt aufgrund der dreigängigen Spindel die Planetentypen 31, 41 und 51 von denen jeweils 3 immer gleich orientiert eingebaut sind. Planeten des gleichen Typs sind dabei im Winkel von  $120^\circ$  gleichmäßig um die Spindel verteilt. Diese Planeten werden auch in zwei größeren und zwei kleineren Baugrößen von Schaeffler verwendet. Der PWG15x3 besitzt zwei Muttern.

Nachdem die Referenzgeometrie ausgewählt wurde, gilt es nun ihre simulative Abbildung zu wählen. Systemgrenze der Simulationen ist dabei der PWG. In der Simulation gewählte Randbedingungen sollen die Integration des PWGs in das ihn umgebende System darstellen. Dabei wird von idealen Bedingungen ausgegangen:

- Die Spindel befindet sich in der Mitte der Muttern und die Mittelachsen aller drei Körper liegen aufeinander.

- Spindel und Muttern bewegen sich nur um die Spindelachse rotativ zueinander und translatorisch nur entlang dieser Achse.
- Die Vorspannung wird ideal durch eine Verschiebung der Muttern zueinander entlang der Spindelachse aufgebaut und ändert sich nach dem Erreichen der Wunschvorspannung nicht mehr.

Zum Aufbau der Simulationen gibt es weiterhin zwei zentrale Fragestellungen: zum einen, welche Körper des PWG werden abgebildet, und zum anderen, auf welche Art werden diese Körper abgebildet.

Generell sollen alle Körper abgebildet werden, die sich im Hauptkraftfluss befinden. Diese Körper sind in der folgenden Abbildung 13 dargestellt. Von der Spindel werden die Axialkraft und das Drehmoment auf die Planeten und von diesen auf die Muttern übertragen. Zusätzlich halten die Planetenscheiben die Planeten zueinander auf Abstand analog zu einem Käfig in einem Lager. Es müssen somit die Spindel, die Muttern und die Planetenscheiben sowie ein oder mehrere Planeten in der Simulation abgebildet werden.

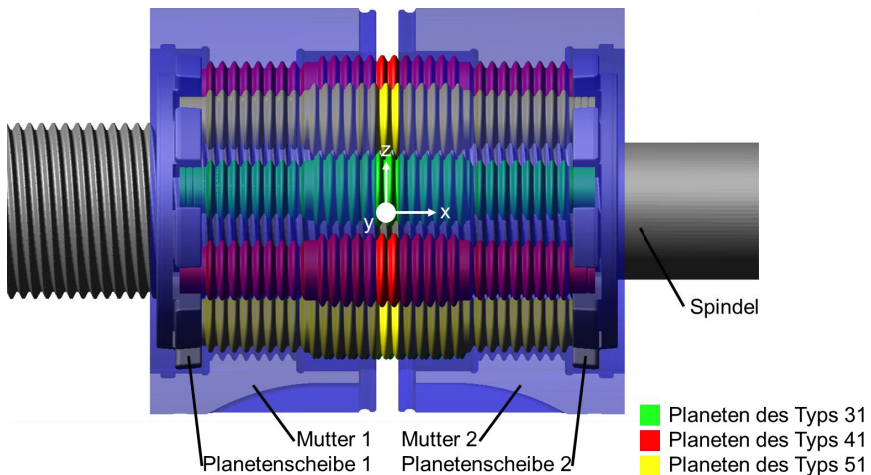


Abbildung 13 Komponenten des PWG15x3 im Hauptkraftfluss

Es wäre möglich in der Simulation nur jeweils ein Planet jeden Typs einzubauen und die anderen durch Symmetriebedingungen abzubilden. Dies würde allerdings annehmen, dass sich Planeten des gleichen Typs genau gleich verhalten. Dies muss in der Dynamik gerade unter Effekten wie einem Aufschwingen einzelner Planeten oder

Verspannen der Planeten gegeneinander nicht der Fall sein. Um sicher vergleichen zu können, ob etwaige Unterschiede zwischen den Planeten des gleichen Typs größer sind als die Unterschiede zwischen den Planetentypen selbst, werden daher alle neun Planeten simuliert. Dies dient auch der Bewertung der Stabilität der Planetenbewegung – bspw. der Klärung, ob Planeten des gleichen Typs immer vergleichbar kippen und schränken.

Grundsätzlich können die Planetenscheiben nach innen, zur Mitte des PWG, rutschen, bis sie an den Planeten anstoßen und nach außen bis sie am in der jeweiligen Mutter montierten Sicherungsring anstoßen. Zwischen den Planetenscheiben und den Planeten können prinzipbedingt nur sehr geringfügig Axialkräfte über Reibung in den Kontakten übertragen werden. Dadurch sind, wie im folgenden Kapitel 4.1.2 detailliert ausgeführt und begründet wird, Vereinfachungen der Randbedingungen der Planetenscheiben möglich. Dazu gehört, dass sich die Planetenscheiben in ihrer Bewegung entlang der Spindelachse immer gleich mit der sie umgebenden Mutter bewegen. Durch diese Randbedingung ist die Abbildung der Sicherungsringe in der Simulation nicht mehr nötig. Daher werden die Sicherungsringe auch nicht in den Simulationen abgebildet.

Ebenfalls nicht abgebildet werden die zwischen den Muttern verbauten Distanzscheiben. Diese dienen dem Einstellen der Vorspannkraft bei einer O-Anordnung durch das Auseinanderdrücken beider Muttern bzw. dem Begrenzen der von außen eingebrachter Vorspannung bei einer X-Anordnung des PWG durch das Anschlagen beider Muttern an ihnen (vgl. Kapitel 2.1). Nachdem der Zweck der Distanzscheiben das Einstellen der Verschiebung der Muttern zueinander und das Abstützen von Druckkräften zwischen beiden Muttern ist, können die Auswirkungen der Distanzscheiben auf den PWG durch Verschiebungsrandbedingungen zwischen den Muttern in der Simulation abgebildet werden.

Nachdem als in der Simulation abzubildenden Körper beide Muttern, alle Planeten, die Spindel und beide Planetenscheiben ermittelt wurden, gilt es noch zu klären, ob diese mit Starrkörpern oder flexiblen Körpern abgebildet werden. Aufgrund der hohen Komplexität des PWGs und der hohen Anzahl an geplanten Simulationen werden die Mehrkörpersimulationen mit Starrkörpern durchgeführt. Simulationen mit flexiblen Körpern erfordern vielfach höhere Rechenzeiten und sind daher für die hier geplante Menge an Untersuchungen wenig zielführend. Testweise – zur Bestätigung der hohen Rechenzeiten – wurden Rechnungen mit flexiblen Planeten, starrer Muttern und starrer Spindel aufgebaut und in Auszügen berechnet. Flexible statt starren Planeten steigerten die

Berechnungszeiten bereits von sechs Stunden auf über acht Wochen und bestätigten damit die extremen Rechenzeiten bei flexiblen Körpern.

Als Simulationstool für die Mehrkörpersimulationen wird MSC Adams gewählt. Alle Simulationen werden mit Adams View 2017.1 aufgebaut und simuliert.

#### 4.1.2 Randbedingungen der Mehrkörpersimulationen

Passend zur Anwendung des PWGs, den in den Simulationen abgebildeten Körpern und einer idealen Integration des PWGs in seine Umgebung werden die Randbedingungen der Simulation gewählt. Die Randbedingungen gliedern sich dabei in Zwangsbedingungen, abgebildete Kontakte und abgebildete Lastfälle.

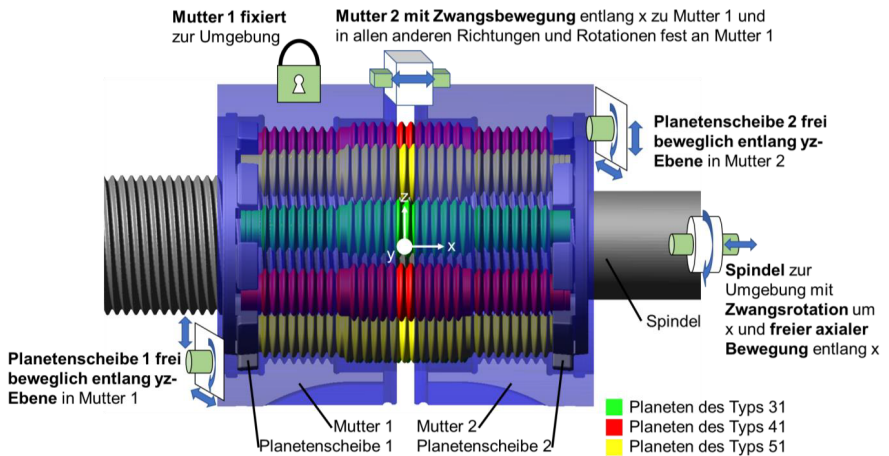


Abbildung 14 Randbedingungen der PWG-Komponenten in den MKS

Die Zwangsbedingungen sind in der Abbildung 14 zusammenfassend dargestellt und sollen im Folgenden erläutert werden. Der PWG dient der Umwandlung einer Rotationsbewegung in eine Linearbewegung entlang seiner Spindelachse unter ebenfalls zur Spindelachse koaxial wirkenden Kräften – später Axialkräfte genannt. Dazu müssen entweder die Muttern oder die Spindel im Vergleich zum Umfeld rotativ um die in Abbildung 14 dargestellte x-Achse festgesetzt werden. Ebenfalls darf nur den Muttern oder der Spindel eine translatorische Bewegung entlang der x-Achse ermöglicht werden. Für die hier aufgebauten Simulationen werden Muttern nach dem Aufbringen der Vorspannung ortsfest und rotativ unbeweglich gesetzt. Die Zwangsbedingungen der Spindel bilden dann die Bewegungen ab – die Spindel darf sich translatorisch entlang der x-

Achse bewegen und auch um diese Achse drehen. Dazu wird die Spindel am rechten Ende gelagert.

Um die zuvor ausgeführte axiale Vorspannung im PWG in den Simulationen zu erzeugen, muss eine Mutter gegenüber der anderen axial – entlang der x-Achse – verschoben werden. Gleichzeitig sollen die Muttern – exklusiv der zur Erzeugung der Vorspannung nötigen Bewegung – ortsfest sein. Um dies abzubilden, wird in den in dieser Arbeit gezeigten Simulationen Mutter 1 zur Umgebung fixiert. Mutter 2 ist in y- und z-Richtung sowie in den Rotationen aller Achsen fest mit Mutter 1 verbunden. Für die translatorische Bewegung in x-Richtung zwischen Mutter 2 und Mutter 1 ist eine Zwangsbewegung zum Erreichen der gewünschten Vorspannung vorgegeben.

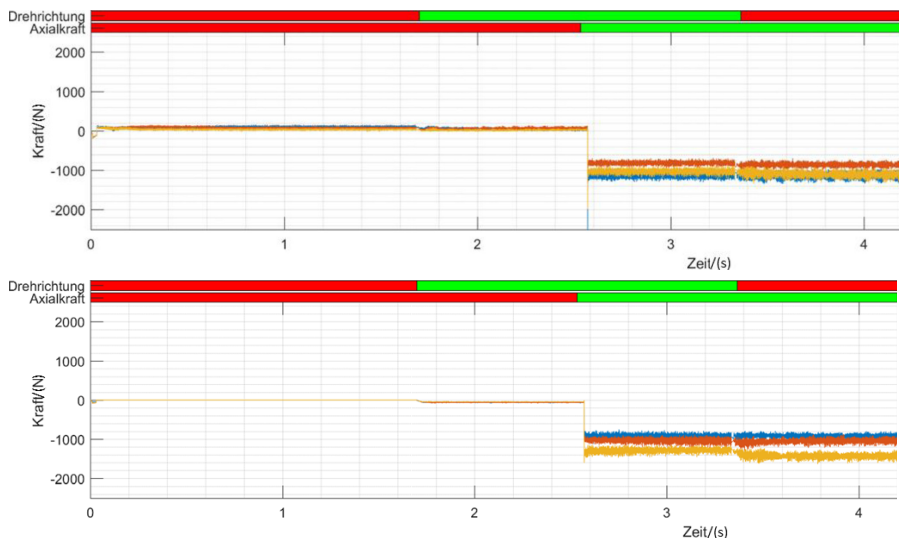
In ersten Testsimulationen zeigten sich sehr hohe Berechnungsaufwände durch sich komplett freibewegende – also auch kippende – Planetenscheiben. Um den Berechnungsaufwand zu senken, wurden deshalb die Freiheitsgrade der Planetenscheiben eingeschränkt. Rein in x-Richtung gesehen bestehen durch die Windungen der Komponenten Formschlüsse zwischen den Planeten und den Muttern bzw. der Spindel. In den Planetenscheiben können sich die Planeten entlang der x-Richtung frei bewegen. Bevor die Windungen der Planeten dabei mit den Planetenscheiben in Kontakt treten können und damit die freie Bewegung entlang der x-Achse behindern würden, sind die Planeten in den Formschlüssen mit der Spindel und den Muttern.

Daher ist es als Vereinfachung zulässig, die Planetenscheiben in ihrer Position entlang der x-Achse ortsfest zu der jeweils nächsten Mutter zu setzen. Durch die Langlöcher in den Planetenscheiben können die Planeten nur geringfügig Kräfte radial und vor allem Kräfte tangential zur Spindel auf die Planetenscheiben übertragen. Deshalb und in Kombination mit der Betrachtung in x-Richtung sind die Einflüsse von verkippenden Planetenscheiben als vernachlässigbar anzusehen. Damit wurde als weitere Zwangsbedingung gesetzt, dass die Planetenscheiben nicht verkippfen dürfen.

In Summe dürfen sich die Planetenscheiben nur translatorisch entlang der y- und z-Achse bewegen sowie rotativ um beliebige, zur x-Achse koaxialen oder parallelen Drehachsen drehen. Beispielsweise zeigen sich in der Simulation der Referenzgeometrie aus Kapitel 5.1 Kräfte von wenigen Newton zwischen den Planeten und den Planetenscheiben. Im Vergleich zu den Kräften von mehreren hundert Newton zwischen den Planeten und der Spindel bzw. den Planeten und den Muttern sind diese Kräfte und die Einflüsse der hier genannten Vereinfachungen vernachlässigbar.



Durch die hohe Anzahl an Kontakten, das geringe Spiel und die sehr steifen Materialien des PWGs werden keine großen Kipp- und Schrämbewegungen der Planeten erwartet. Damit wäre es denkbar, mit zur Spindel achsparallelen Planeten als Vereinfachung zu rechnen. Dies würde die Kontaktbetrachtungen und die Lebensdauerberechnung der Komponente massiv vereinfachen: es gäbe an den Muttern und der Spindel jeweils nur einen und an den Planeten zwei Wälzkreisdurchmesser (je einer für die Kontakte mit der Spindel und einer für die Kontakte mit den Muttern). Für die Kraftverteilung zwischen den Flanken im Kontakt mit den gleichen Körpern könnte dann auf eine Verteilung analog zu Schrauben zurückgegriffen werden. Zusätzlich würden diese Vereinfachungen aufgrund der weniger freien Planetenbewegung Rechenzeit einsparen.



*Abbildung 15 Auszug der Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten des Typs 31 für eine freie Bewegung der Planeten (oberes Schaubild) und für eine koaxiale Bewegung der Planeten zur Spindel (unteres Schaubild). Ein Farbwechsel der Balken für die Drehrichtung bzw. die Axialkraft bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt die Drehrichtung gedreht bzw. Richtung der Axialkraft umgekehrt wird.*

Um den Effekt der freien Bewegung der Planeten zu untersuchen, wurden in einer angepassten Simulation die Planeten durch zusätzliche Randbedingungen gezwungen, sich immer koaxial zur Spindel zu bewegen. Dabei zeigte sich wie beispielhaft in Abbildung 15 für die Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten 31 dargestellt, dass die freien Schrämb- und Kippbewegungen die maximalen Kräfte zwischen den

Körpern um bis zu 200N (13,3%) und die minimalen um bis zu 100N (14,3%) reduzieren. Ein vergleichbares Verhalten zeigt sich für die hier nicht dargestellten Kräfte in x-Richtung zwischen den anderen Körpern. Die Antriebsmomente, radial wirkenden Kräfte und Positionen der Planeten in x-Richtung zeigen geringere Unterschiede zwischen der freien und der auf eine koaxiale Bewegung eingeschränkten Planetenbewegung als die Kräfte.

Durch die hohen Unterschiede in den Kräften ist es daher nicht zielführend, die Planetenbewegung in den Simulationen einzuschränken und damit entfällt die Vereinfachung auf achsparallele Planeten auch in einer Lebensdauerberechnung. Zusammenfassend leiten sich damit für alle Körper die in Tabelle 3 dargestellten Freiheitsgrade für die Komponenten des PWGs ab.

Tabelle 3 erlaubte Freiheitsgrade der Körper in den MKS-Simulationen

Körper	erlaubte Freiheitsgrade					
	Translation in			Rotation um		
	x	y	z	x	y	z
Mutter 1						
Mutter 2						
Spindel	(*)			*		
Planeten	*	*	*	*	*	*
Planetenscheiben		*	*	*		

\* bedeutet eine freie Bewegung und (\*) eine Zwangsbewegung

Unabhängig vom Lastfall des PWGs und den zuvor beschriebenen Zwangsbedingungen sind in diesem Kapitel noch die wirkenden Kontakte zu definieren. Aufgrund der zuvor gewählten Randbedingungen zu den Müttern und den Planetenscheiben sind folgende Kontakte in den Simulationen abzubilden:

- Kontakte zwischen den Planeten und Mutter 1
- Kontakte zwischen den Planeten und Mutter 2
- Kontakte zwischen den Planeten und der Spindel
- Kontakte zwischen den Planeten und Planetenscheibe 1
- Kontakte zwischen den Planeten und Planetenscheibe 2

Aufgrund der komplexen Planetenbewegung können in den Simulationen beispielsweise ein- und beidseitige Flankenkontakte auftreten. Es muss daher ein Kontaktalgorithmus verwendet werden, der selbstständig die gerade in der Simulation vorhandenen

Kontakte sucht. Deshalb wurde in Adams für die Kontakte „Solid to Solid Generalcontact“ gewählt. „Solid to Solid“ bezeichnet dabei Kontakte zwischen zwei Starkkörpern und „Generalcontact“ Kontakte, die an beliebigen Punkten der Oberfläche beider Körper auftreten können. Jeder Generalcontact beinhaltet alle Kontakte zwischen den zwei in ihm verknüpften Körpern. Dabei ermittelt das Programm selbst die auftretenden Kontaktpunkte zwischen den Körpern.

Im Falle eines Generalcontacts zwischen Mutter 1 und dem Planeten 31-1 beinhaltet dieser eine Generalcontact damit alle Kontakte an jeder der Windungen, an denen sich die beiden besagten Körper berühren. Generalcontacts bestehen zwischen jeweils einem Planeten und jeweils einer Mutter, zwischen jeweils einem Planeten und der Spindel sowie zwischen jeweils einem Planeten und jeweils einer Planetenscheibe.

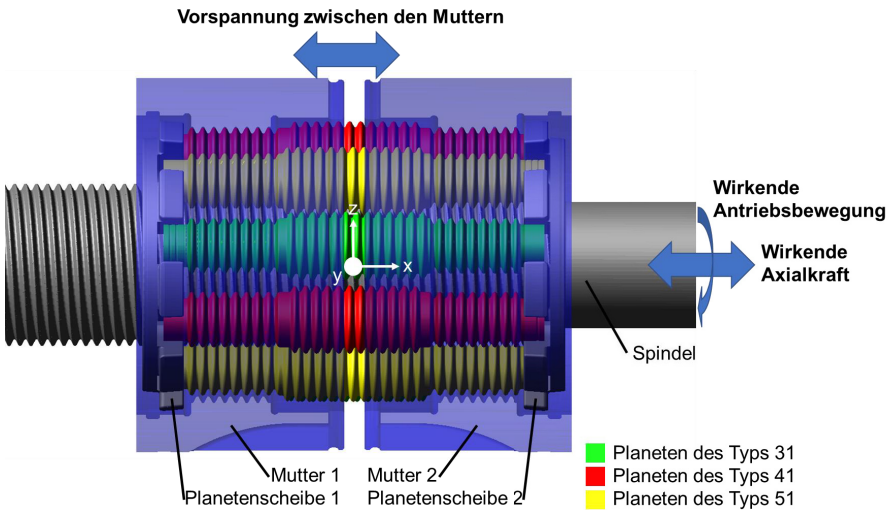


Abbildung 16 In der Simulation abgebildete Lastfälle

Zuletzt sind in diesem Kapitel noch die in den Simulationen abzubildenden Lastfälle durch äußere Einwirkungen festzulegen. Diese sind zusammenfassend in Abbildung 16 dargestellt. Aufgrund der Annahme der idealen Integration des PWGs in seine Umgebung und der daraus resultierenden Zwangsbedingungen wirken auf den PWG keine Querkräfte, sondern nur zur Spindelachse koaxial wirkende Axialkräfte. In den Simulationen wird die wirkende Axialkraft in der Mitte der rechten Stirnseite der Spindel aufgebracht. Gleichzeitig wird die gewünschte Antriebsbewegung ebenfalls am rechten

Ende der Spindel als Zwangsrotation induziert. Zu untersuchen sind dabei alle Kombinationen der möglichen Richtungen der Axialkraft und den möglichen Drehrichtungen. Die Vorspannung des PWGs wird durch seine Integration in ein übergeordnetes System beeinflusst. Wie zuvor beschrieben, wird die Vorspannung durch eine Zwangsverschiebung zwischen den beiden Muttern erzeugt. Nachdem nun alle Zwangsbedingungen, Kontakte und Lastfälle der Simulationen definiert wurden, sollen im nächsten Kapitel der zeitliche Ablauf und die abgebildeten Lastfälle in jeder Simulation dargestellt werden.

### 4.1.3 Ablauf der Mehrkörpersimulationen

Die Simulationen gliedern sich jeweils zeitlich in zwei Hauptphasen – Initialisierung und Bewegungsphase. In der Initialisierung wird zuerst die Vorspannung durch eine definierte Bewegung von Mutter 2 in x-Richtung in das System eingebracht. Anschließend wird eine weitere Bewegung dieser Mutter für den Rest der Simulation blockiert. Im zweiten Schritt der Initialisierung wird die Axialkraft in positive x-Richtung wirkend auf die Mitte des rechten Endes der Spindel eingebracht.

In der Bewegungsphase werden immer 2 Hübe mit jeweils ca. 106mm Hub simuliert. Dazu wird der Drehwinkel der Spindel um die x-Achse zeitabhängig vorgegeben. Je nach gewünschter Drehzahl der Spindel ändert sich dadurch die zu simulierende Zeit. Innerhalb der Bewegungsphase werden alle Kombinationen aus jeweils positiver und negativer Drehrichtung der Spindel bzw. Axialkrafttrichtung simuliert. Abhängig von der Richtung der Axialkraft entspricht eine Drehrichtung dem Anheben einer Last (Arbeit/ Drehen gegen eine Last) bzw. dem Absenken einer Last (Arbeit/ Drehen in Richtung einer Last). Aufgrund der Asymmetrie der Planeten sind durch unterschiedliche lange Hebelarme (vgl. Abbildung 6 in Kapitel 2.1) je nach Axialkrafttrichtung und Drehrichtung Unterschiede in Bewegung der Komponenten und Kräften zwischen ihnen zu erwarten. Dabei sind die Hebelarme zwischen den in Abhängigkeit der Axialkrafttrichtung jeweils höchstbelasteten Windungen unterschiedlich.

Für die Initialisierungs- und die Bewegungsphase sind in der folgenden Abbildung 17 die Drehrichtung, die Richtung der Axialkraft und die Position der Spindel für eine Simulation der gewählten Referenzgeometrie als Beispiel dargestellt. Der lila eingefärbte Bereich zu Beginn beinhaltet die Initialisierungsphase, die anderen Bereiche gehören alle zur Bewegungsphase. Wie dargestellt werden in einer Simulation 2 komplette 106mm Hübe und unterschiedliche Lastfälle des PWGs simuliert. Die farbigen Balken

über dem Schaubild kennzeichnen die Richtung der Axialkraft bzw. die Drehrichtung. Rot bedeutet eine Axialkraft in Richtung der positiven x-Achse (Spindelachse) bzw. eine Rotation der Spindel entgegen dem mathematisch positiven Drehsinn der x-Achse. Grün bedeutet eine Axialkraft entgegen der Richtung der positiven x-Achse bzw. eine Rotation der Spindel im mathematisch positiven Drehsinn der x-Achse.

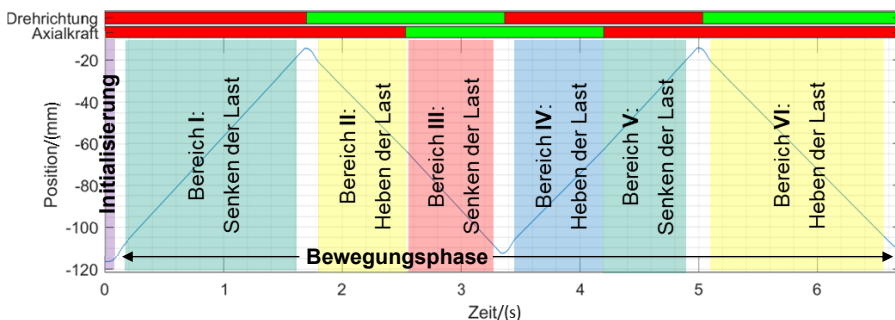


Abbildung 17 Bewegung der Spindel in x-Richtung für eine MKS mit der Referenzgeometrie als Beispiel. Bereiche I – VI bezeichnen dabei die quasistatischen Bereiche der Bewegung.

Der Wechsel der Drehrichtung innerhalb einer Simulation wird bei allen folgenden Simulationen über eine Rampe mit einer konstanten Beschleunigung innerhalb von 0,12s realisiert. Die Änderung der Axialkraft erfolgt immer schlagartig. Innerhalb einer Simulation ergeben sich damit 6 quasistatische Bereiche – Bereiche mit konstanter Drehzahl, Axialkraft- und Drehrichtung (Bereiche I bis VI in Abbildung 17). In den Lücken zwischen den Bereichen wird die Drehzahl der Spindel geändert. Die konstante Drehzahl ist in allen quasistatischen Bereichen gleich. Damit werden die vier möglichen Kombinationen aus Drehrichtung und Axialkraft- und Drehrichtung sowie zwei zusätzliche Kontrollbereiche in einer Simulation abgebildet. Die Bereiche I, III und V entsprechen dem Senken einer Last und die Bereiche II, IV und VI dem Anheben einer Last. In den folgenden Schaubildern wird meist auf die Darstellung der redundanten Bereiche V und VI verzichtet.

#### 4.1.4 Kalibrierung der Mehrkörpersimulationen

Damit die Mehrkörpersimulationen der Realität entsprechen, ist eine Kalibrierung der Simulationen nötig. Ziel dieser Kalibrierung ist, dass die Simulationen des PWGs das Übertragungsverhalten des PWG in der Dynamik – also mit einer Drehzahl  $> 0 \text{ U/min}$  –

korrekt abbilden. Aufgrund der teilweise reinen Reibkontakte im PWG sind sowohl die Wandlung eines Drehmomentes in eine Axialkraft (Kalibrierung des benötigten Antriebsmomentes) als auch die Wandlung einer Drehbewegung in einer Linearbewegung (Kalibrierung der Übersetzung) abzugleichen. Der Abgleich zwischen Versuch und Simulation einer dieser beiden Wandlungen reicht aufgrund der Wirkweise des PWGs als Reibradgetriebe und der Kontaktdefinitionen in den Simulationen nicht automatisch als Abgleich für die andere Wandlung. Der Abgleich der Wandlung eines Drehmomentes in eine Axialkraft kann durch den Vergleich der Momente im Versuch und in der Simulation geschehen und der Abgleich der Wandlung der Drehbewegung in eine Linearbewegung über den Vergleich der Systemsteigungen aus Versuch und Simulation.

Bedingt durch die steigungsfreien Rillen der Planeten und der Muttern werden Drehmomente um die x-Achse zwischen diesen rein über Reibschlüsse übertragen. Damit ist die aus der Simulation ermittelte Bewegung der Planeten und in Folge die erreichte Systemsteigung maßgeblich von der Definition der Kontakte und insbesondere der Reibung abhängig. In ersten Simulationen mit unterschiedlichen Reibwerten im Bereich der Reibkoeffizienten von geschmiertem Stahl – Stahl Kontakten zeigte sich, dass das (Antriebs-) Drehmoment deutlich stärker von den Reibungskoeffizienten beeinflusst wird als die Systemsteigung. Daher wird im Folgenden zuerst das Drehmoment kalibriert und anschließend die Systemsteigung mit diesen Parametern überprüft und falls nötig die Definition der Kontakte nochmals angepasst.

### **Kalibrierung der Wandlung eines Drehmomentes in eine Axialkraft**

Das Nennmoment ( $M$ ) berechnet sich aus der Theorie nach (Balázs 1999, S. 15) und (Hähnle 1995, S. 10) über die folgende Formel 4-1 mit der wirkenden Axialkraft, der Gesamtsystemsteigung  $P_{ges}$  und dem Wirkungsgrad  $\eta$  des PWG.

$$M = \frac{F \cdot P_{ges}}{2\pi \cdot \eta} \quad 4-1$$

Aus der Theorie ist damit bei konstanter Systemsteigung und konstantem Wirkungsgrad ein linearer Zusammenhang zwischen Last (Axialkraft) und dem benötigtem Antriebsmoment gegeben. In einfacher Näherung kann für hinreichend große Lasten von einem konstanten Wirkungsgrad und konstanter Systemsteigung ausgegangen werden. Das Datenblatt von Schaeffler nennt hierbei für den PWG15x3 als Wirkungsgrad 69% und als Systemsteigung 2,11 (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32–33). Für Lasten gegen Null geht der Wirkungsgrad ebenfalls gegen Null und diese

Näherung des Antriebsmomentes stimmt aufgrund der wirkenden Grundreibung in diesem Bereich nicht.

Aus von Schaeffler bereitgestellten Versuchen ist das mittlere Drehmoment des PWG15x3 unter unterschiedlicher Last bekannt (vgl. Abbildung 18). In den Versuchen bei Schaeffler wurde immer die gleiche Einbaurichtung des PWG verwendet und die Last immer in der gleichen Richtung eingeleitet. Durch das Grundreibungsmoment der Komponente – insbesondere aufgrund der Vorspannung – schneidet die Kraftdrehmomentkurve nicht den Punkt 0N Axialkraft und 0Nm Drehmoment. Je nachdem ob in Richtung der wirkenden Last oder entgegen dieser bewegt wird, ergeben sich unterschiedliche Drehmomente.

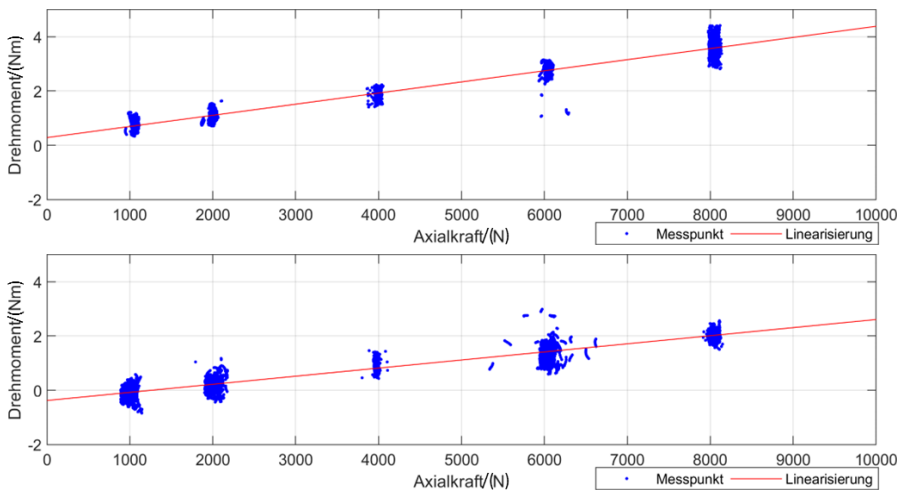
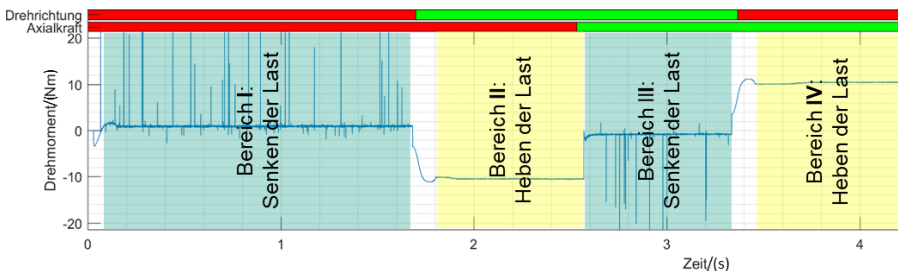


Abbildung 18 Axialkräfte und dabei benötigte Antriebsmomente aus Versuchen von Schaeffler WII/ILT für das Anheben einer Last (oben) und das Absenken einer Last (unten) in eigener Darstellung. Rote Kurven: Linearisierung der Messpunkte. Standardabweichung dieser Geraden für die obere Approximation: 0,2388Nm und für die untere 0,2856Nm.

In jeder Simulation gibt es ein numerisches Rauschen. Bei hohen Axialkräften und daraus resultierenden hohen Momenten ist dieses im Vergleich zu den Kräften und den Momenten verhältnismäßig kleiner als bei niedrigen Kräften und Momenten. Um die Simulationen zu kalibrieren, wird daher ein Punkt mit großen Axialkräften und damit auch hohen Momenten gewählt. An diesem Punkt werden die Reibwerte angepasst, bis diese das aus der Linearisierung der Versuche erforderlichen Drehmoment

erzeugen. Anschließend werden mit den ermittelten Reibkoeffizienten die anderen in den Versuchen geprüften Axialkräfte simuliert und die Drehmomente zwischen Versuch und Simulation verglichen, um die Abweichung zwischen ihnen bestimmen zu können.

Als Punkt zum Abgleich wurde eine Axialkraft von 10kN gewählt, um an allen Axialkräften der Versuche Kontrollrechnungen durchführen zu können. Für die Axialkraft 10kN ergibt sich aus der Extrapolation der Linearisierung der Versuche ein Drehmoment von 4,39Nm zum Anheben und 2,61Nm zum Absenken der Last. Simulationen mit den von Adams vorgeschlagenen Standardwerten von 0,30 für den Haftreibungskoeffizienten und 0,15 für den Gleitreibungskoeffizienten führen zu um ca. Faktor 2,7 zu großen Drehmomenten beim Anheben der Last im Vergleich zum Versuch (10,48Nm statt 4,39Nm). Für die ersten 4,2s der Simulation (Gesamtdauer 6,7s) sind die Antriebsmomente der Simulation in der folgenden Abbildung 19 dargestellt.



*Abbildung 19 Auszug des Antriebsmomentes aus der Simulation für 10kN Axialkraft und 1706U/min Spindeldrehzahl für den Haftreibungskoeffizienten von 0,30 und den Gleitreibungskoeffizienten von 0,15. Schlagartige Sprünge im Antriebsmoment sind auf die noch nicht korrekt eingestellten Kontaktparameter zurückzuführen. Bereiche I-IV sind quasistatische Bereiche der Bewegung.*

Aufgrund der numerischen Stabilität wechselt Adams im gewählten Kontaktmodell nicht direkt bei der Änderung der Geschwindigkeit in einem Kontakt von 0mm/s auf eine Geschwindigkeit  $\neq$  0mm/s vom Haft- auf den Gleitreibungskoeffizienten, sondern erst bei höheren Geschwindigkeiten (vgl. Kapitel 2.5). Daher ist in dieser Kalibrierung sowohl der Haft- als auch der Gleitreibungskoeffizient zu variieren. In erster Näherung wurden beide Reibungskoeffizienten in einer weiteren Simulation um den Faktor 2,7 – dem Faktor der zu hohen Drehmomente der oben genannten Simulation – reduziert. Damit ergibt sich ein Haftreibungskoeffizient von 0,111 und ein Gleitreibungskoeffizient von 0,056. Wie in Abbildung 20 dargestellt, sinken damit die benötigten mittleren Antriebsmomente stark, sind aber immer noch deutlich zu hoch. Des Weiteren ist noch zu



klären, welcher Quotient aus Haft- zur Gleitreibung für die Kontaktmodelle anzunehmen ist, da aufgrund des verwendeten Kontaktmodelles aus beiden Reibungskoeffizienten zusammen ein Antriebsmoment entsteht.

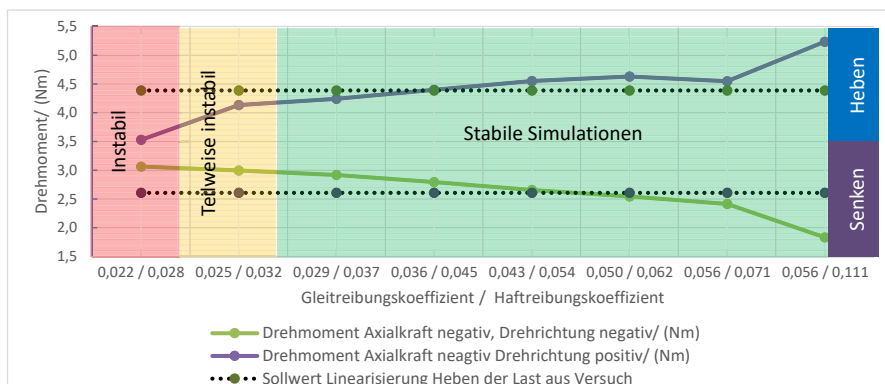


Abbildung 20 Benötigtes Antriebsmoment für die Variation von Gleit- und Haftreibungskoeffizienten in zueinander gleichem Verhältnis – Auszug aus den Simulationen

Im Folgenden soll anhand von Versuchen das benötigte Verhältnis von Haft- zu Gleitreibung ermittelt werden. Aus eigenen Versuchen mit einem PWG09x3 ist das in Abbildung 21 dargestellte Verhalten bekannt. Dieses ist exemplarisch für das Verhalten von PWGs für einen Lastzyklus – hier zuerst ein Anheben und dann das Absenken einer Last. Die Schwingungen der Belastung entstanden dabei durch im Prüfstand verbaute Hydraulik. Untersucht man das Moment geteilt durch die wirkende Belastung (unterstes Schaubild in der Abbildung) so sieht man zwei Sprünge – jeweils einer beim Beschleunigen und einer beim Abbremsen der Last. Diese Sprünge sind genau am Anfang und am Ende der Bewegung sowie der Beschleunigung zum Anheben der Last und lassen daher Rückschlüsse auf den Wechsel im PWG von der Haft- zur Gleitreibung zu. Beim Beschleunigen und während des Wechsels der stehenden Komponente zur bewegten Komponente sinkt der Wert des Moments geteilt durch die wirkende Belastung von 0,73 auf 0,55. 0,55 ist dabei das Mittel der direkt folgenden Schwingung. Diese Schwingung – bzw. das Schwingen unter 0,55 – entsteht in diesem Fall durch die Trägheit der Hydraulik. Am Ende des Abbremsens – also dem Wechsel von bewegter zu stehender Komponente – sinkt der beschriebene Wert von 0,48 auf 0,38. Teilt man die Anfangswerte der Sprünge durch die dazugehörigen Endwerte so erhält man 1,33 bzw. 1,26. Um dieses Verhalten nachher in der Simulation ähnlich abzubilden, sollen deshalb Haft- und

Gleitreibungskoeffizienten mit einem dazu vergleichbaren Verhalten verwendet werden. Nachdem die Berechnung mit den Reibungskoeffizienten 0,056/ 0,111 noch zu hohe Drehmomente lieferte, wurden deshalb die anderen in Abbildung 20 dargestellten Berechnungen durchgeführt. Diese besitzen aber im Gegensatz zu der erstgenannten Berechnung das gerade hergeleitete Verhältnis von Haft- zu Gleitreibung.

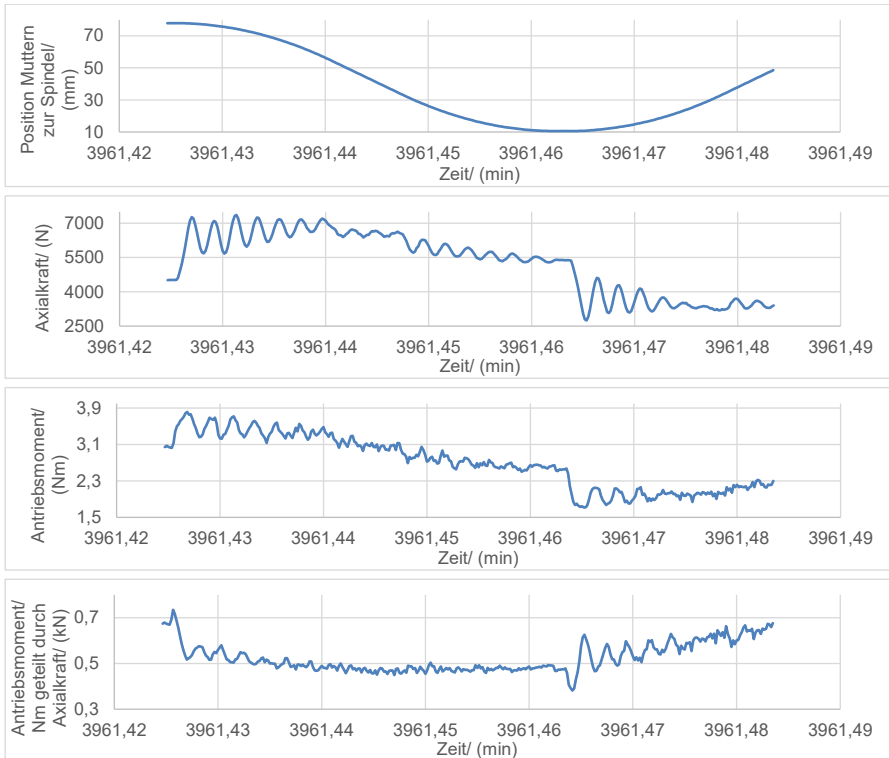
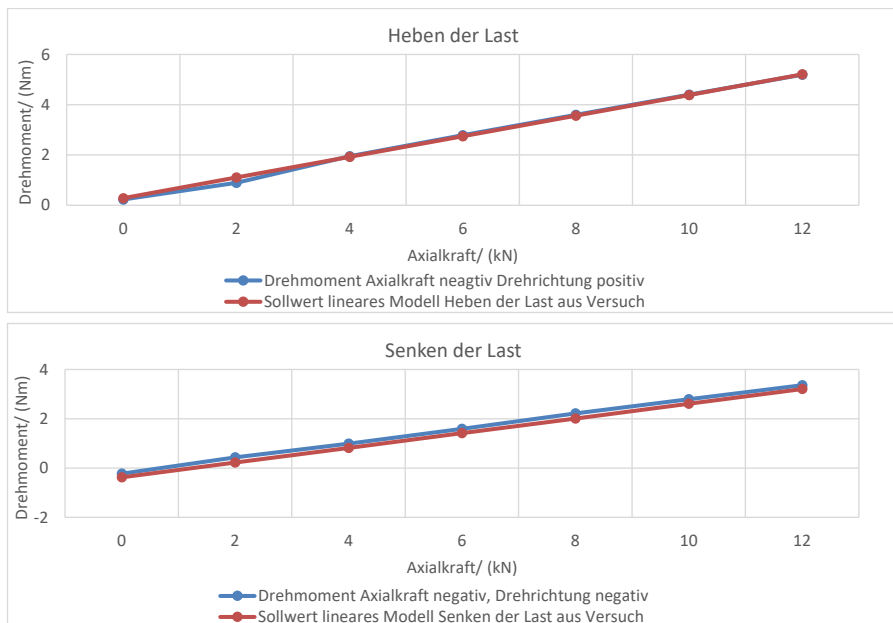


Abbildung 21 Einzelzyklus von Versuchen mit einem PWG09x3: von oben nach unten ist zu sehen: Position der Muttern zur Spindel, auf den PWG durch Hydraulik wirkende Axialkraft, das benötigte Antriebsmoment und das benötigte Moment/ Belastung

Aus Abbildung 20 ist ersichtlich, dass die mittleren Drehmomente der Simulationen mit den Koeffizienten 0,036/ 0,045 bzw. 0,043/ 0,054 am besten die Drehmomente aus der Linearisierung der Drehmomente der Versuche treffen. Nachdem es aufgrund der höheren Kräfte und Momente wichtiger ist, genauer im Abgleich beim Anheben als beim Absenken der Last zu sein, wurden als Gleit- bzw. Haftreibungskoeffizienten für die in

dieser Arbeit folgenden Simulationen 0,036 bzw. 0,045 verwendet. Diese Koeffizienten wurden über eine Extrapolation der Linearisierung aus den Versuchen für eine Axialkraft von 10kN ermittelt. In Abbildung 22 sind die mittleren Drehmomente für die Simulationen mit diesen Reibwerten für die Axialkräfte 2, 4, 6 und 8kN aus den Versuchen sowie aus den Versuchen extrapolierte Werte für 0, 10 und 12kN Axialkraft dargestellt. Die Unterschiede zwischen dem Heben und dem Senken der Last entstehen durch die in den Kapiteln 5 und 6 diskutierten unterschiedlichen Bewegungen der Planeten und unterschiedlichen wirkenden Wälzkreise.

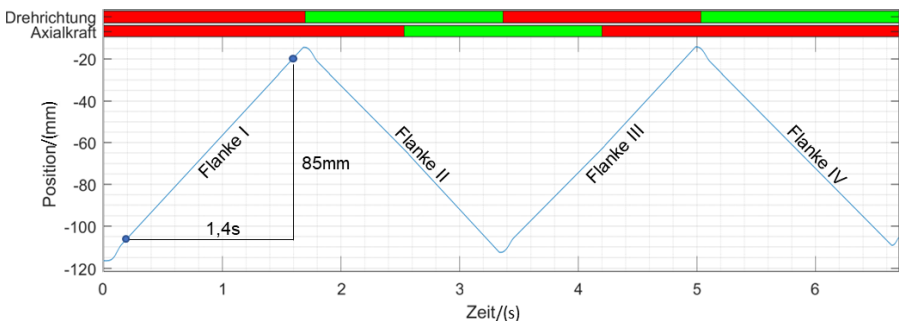


**Abbildung 22** Vergleich zwischen den mittleren Antriebsmomenten aus Simulation und Versuch für unterschiedliche Axialkräfte für die bei 10kN Axialkraft abgeglichenen Reibkoeffizienten. Die Punkte stehen für durchgeführte Simulationen.

Wie in der Abbildung 20 ersichtlich, werden beim Anheben der Last auch bei den geringeren Axialkräften die mittleren Sollmomente aus dem Versuch nahezu perfekt getroffen. Beim Absenken der Last ist zwischen den mittleren Momenten aus Versuch und Simulation ein geringer Offset zu sehen. Damit können die ermittelten Reibkoeffizienten als sinnvolle Parameter für die Simulationen gesehen werden.

Nach der Kalibrierung des Antriebsmomentes ist nun die Systemsteigung der Simulationen zu prüfen. Für den PWG15x3 ist die Systemsteigung 2,11mm/Umdrehung nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020). Für die Simulation mit 10kN und den Gleit- und Haftreibungskoeffizienten von 0,036 bzw. 0,045 ist in Abbildung 23 die Bewegung der Spindel für 1706U/min dargestellt. Nach (Wittel & Roloff et al. 2009, S. 74) liegt die Reibungszahl für die Wälzreibung von Zahnrädern zwischen 0,02 und 0,08 und für die Wälzreibung von Reibrädern zwischen 0,06 und 0,12. Damit liegen die gewählten Reibwerte aufgrund ihrer Funktionsähnlichkeit innerhalb eines sinnvollen Bereiches.

In den im Bild markierten 1,4s dreht die Spindel in der Simulation konstant mit 1706 U/min und bewegt sich dabei 85mm (Flanke I). Damit ist die Systemsteigung in der Simulation 2,135 und somit 1,2% zu hoch. Untersucht man die weiteren Flanken II-IV des Profils der Position der Spindel über die zwei Hübe gleichermaßen, so erhält man Steigungen von 2,110, 2,110 und 2,043. Besonders wichtig sind dabei die erste und die letzte Flanke. Während diesen ändert sich die Axialkraftrichtung im Gegensatz zu den anderen Flanken nicht. Damit steht die erste Flanke mit der Steigung von 2,135 für ein reines Absenken der Last und die letzte Flanke mit der Steigung von 2,043 für das Anheben der Last. Die Flanken zwischen diesen beiden beinhalten jeweils Anheben und Absenken der Last. In Folge liegt die Systemsteigung der zweiten und dritten Flanke zwischen jenen der ersten (Absenken der Last) und der letzten, vierten Flanke (Anheben der Last).



**Abbildung 23** Position der Spindel für PWG15x3 unter 10kN Axialkraft, 1706U/min Spindeldrehzahl und Gleit- und Haftreibungskoeffizienten von 0,036 bzw. 0,045

Aus eigenen Versuchen mit einer axial äquivalenten Belastung des PWGs von 6,8kN (Prüfling PWG15x3-3a) bzw. 11,8kN (Prüfling PWG15x3-3b, Prüfling PWG15x3-4) und

einer Spindeldrehzahl von 436 (PWG15x3-3a) bzw. 785U/min (PWG15x3-3b und PWG15x3-4) konnten die in der folgenden Tabelle 4 dargestellten Geschwindigkeiten ermittelt werden. Prüfling PWG15x3-3a und PWG15x3-3b beziehen sich auf den gleichen PWG aber mit unterschiedlichen verwendeten Axialkräften und Drehzahlen in den Versuchen. Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32) hätte die Mutter bei 436U/min Spindeldrehzahl eine Vorschubgeschwindigkeit von 15,32mm/s und bei 785U/min Spindeldrehzahl eine Vorschubgeschwindigkeit von 27,60mm/s aufgrund der im Datenblatt genannten Systemsteigung von 2,11mm erreichen sollen.

Die Einbaulage des Prüfling PWG15x3-4 im Versuch entspricht dabei der positiven Axialkrafttrichtung und die des Prüflings PWG15x3-3a/ PWG15x3-3b der negativen Axialkrafttrichtung der Simulation. Die zuvor in der Simulation ermittelten Systemsteigungen sind für das Absenken der Last höher als für das Anheben. Dieses Verhalten ist in den Versuchen genau gleich. Die Systemsteigungen der Versuche sind immer über den Systemsteigungen des Datenblattes – ihr Fehler ist immer größer null. Die Steigungen der Simulation liegen beim Absenken der Last zwischen der Nennsteigung von 2,11mm des Datenblattes und der Steigung aus den Versuchen. Beim Anheben der Last liegen die Steigungen der Simulation leicht unter der Nennsteigung und damit auch unter der Steigung aus den eigenen Versuchen. Die Gleit- und Haftreibungskoeffizienten von 0,036 bzw. 0,045 in der Simulation bilden aufgrund der geringen Abweichungen zum Datenblatt und den Versuchen sehr gut die Realität ab und damit können die Simulationen als kalibriert gelten.

Prüfling	Sollgeschwindigkeit/ (mm/s) nach Datenblatt		Geschwindigkeit/ (mm/s) aus Versuch		Fehler/ (%) Versuch zur Sollgeschwindigkeit	
	Absenken d. Last	Anheben d. Last	Absenken d. Last	Anheben d. Last	Absenken d. Last	Anheben d. Last
PWG15x3-3a	27,60	27,60	28,47	27,92	3,1	1,2
PWG15x3-3b	15,32	15,32	15,87	15,52	3,6	1,3
PWG15x3-4	27,60	27,60	28,52	28,17	3,4	2,1

*Tabelle 4 Prüfling 3a, 3b und 4 ermittelte Geschwindigkeiten im Vergleich zur aus der Systemsteigung des Datenblattes geforderten Geschwindigkeit nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32)*

## 4.2 Modellbildung durch Versuche

Zur Erweiterung des Systemverständnisses und zur Validierung der Simulationen sind Versuche nötig. Im Folgenden sollen die für diese Arbeit geforderten abbildbaren

Versuche, die aus der Funktion des PWG und aus den geforderten Versuchen abgeleitet zu messenden Größen sowie Versuchsaufbauten und -abläufe dargestellt werden.

#### 4.2.1 Geforderte abbildbare Versuche

Um die Kinematik und Kinetik von PWGs zu untersuchen und die Simulationen validieren zu können, müssen die Prüfstände einen aktiven Betrieb der PWGs ermöglichen:

- Die Prüfstände ermöglichen eine zur Spindelachse parallele, translatorische Bewegung zwischen der Spindel und den PWG-Muttern. Weiterhin können die Muttern und die Spindel um die Spindelachse aktiv gegeneinander gedreht werden. Der in den Prüfständen abbildbare Hub muss für eine sinnvolle Fettverteilung im Versuch deutlich größer als die Mutternlänge der zu untersuchenden PWGs sein.
- Die Prüfstände können eine einstellbare Axialkräfte achsparallel und zentrisch zur Spindel in den PWG einleiten. Die möglichen Axialkräfte müssen mindestens  $\frac{1}{4}$  der statischen Tragzahl der zu untersuchenden PWGs betragen, um Lebensdauerersuchen in hinreichend kurzer Zeit durchführen zu können. Für Sonderversuche ist es zulässig, Prüfstände auch nur mit einer nicht einstellbaren Gegenkraft aufzubauen.
- Die Prüfstände arbeiten querkraftfrei und bilden damit eine ideale Integration eines PWGs in seine Umgebung ab.
- Prüfstände für Lebensdauerersuche müssen eine automatische Nachschmierung und eine aktive Kühlung für die PWGs enthalten, um die Versuchsbedingungen konstant zu halten.

#### 4.2.2 Wahl der zu messenden Größen

Im Folgenden sollen aus den in den Prüfständen abbildbaren Versuchen und der Funktion des PWG die zu messenden Größen abgeleitet werden. Linearantriebe wie ein PWG wandeln eine rotative in eine translatorische oder eine translatorische in eine rotative Bewegung. Dies führt zu einem Moment zwischen der rotierenden und der nicht rotierenden Komponente und durch eine wirkende äußere Belastung zu einer Axialkraft zwischen der stehenden und der sich translatorisch bewegende Komponente. Die wichtigsten Messgrößen sind somit die rotativen und die translatorischen Bewegungen der Spindel und der Mutter, das (Antriebs-)Moment und die Belastung durch die wirkende Axialkraft.

Für die Funktion des PWGs ist eine Vorspannung zwischen den beiden Muttern nötig. Um zum einen die Montage zu kontrollieren als auch mögliche Änderungen während längerer Versuchen zu detektieren, ist damit als zusätzliche Messgröße die Vorspannung zu erfassen. Die Verlustleistung im PWG führt zu einer Erwärmung der Komponente und damit ebenfalls zu möglichen Änderungen bei langen Versuchen – gerade im Hinblick auf die Fettgebrauchsdauer. Die Umgebungstemperatur des PWGs beeinflusst zusätzlich die am PWG erreichten Temperaturen. Damit sind weitere Messgrößen die Temperatur des PWGs und die Temperatur der Umgebung.

Des Weiteren sollte der Linearantrieb nicht im Bereich seiner Eigenfrequenz betrieben werden bzw. für die Erweiterung des Verständnisses des PWG ist es sinnvoll, die von ihm erzeugten Vibrationen zu erfassen. Somit leiten sich die Beschleunigungen in alle drei Raumrichtungen als weitere Messgrößen ab.

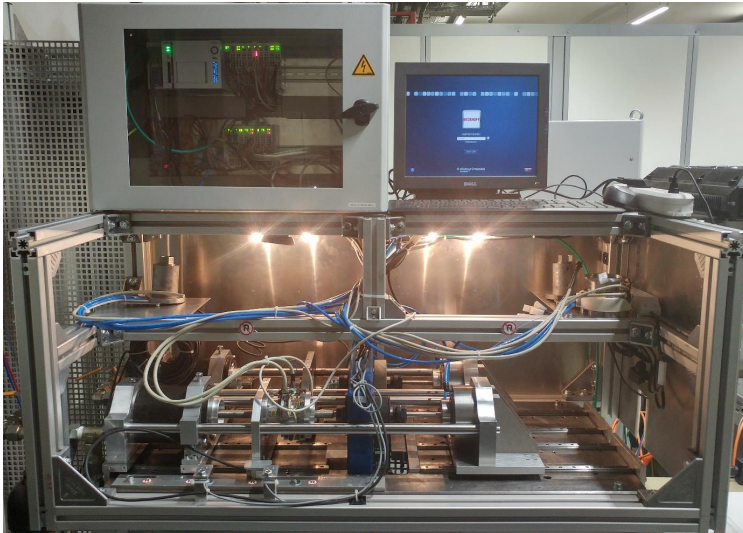
In der Anwendung von PWGs sind die Muttern und die Spindel an den jeweiligen Adaptionen fixiert. Einzig die Planeten sind Komponenten im Hauptkraftfluss, die frei beweglich sind und ihre Position nur aufgrund der Kontakte und den in den Kontakten wirkenden Kräften erhalten. Von Vorteil wäre es damit, die Bewegung der Planeten im Versuch beobachten zu können. Wie zuvor in Kapitel 2.1 gezeigt, ist es wichtig, insbesondere das Schränken und Kippen der Planeten zu kennen. Die Bewegung der Planeten sollte idealerweise nicht nur statisch in einzelnen Positionen, sondern auch dynamisch bekannt sein.

### 4.2.3 Versuchsaufbauten

Die auf Basis der Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 vom Autor entwickelten Prüfstände sollen nun vorgestellt werden. Dieses Kapitel gliedert sich in zwei Teile: zum einen den PWG-Prüfstand für Lebensdauerversuche und Funktionsprüfung unter Last sowie den zweiten Teil, der sich mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensorsystem zur Positionsüberwachung der Planeten und einem dazugehörigen Sonderprüfstand befasst.

Der PWG-Prüfstand (vgl. Abbildung 24) ermöglicht Versuche mit PWGs der Baugrößen 9 bis 15 mit einer drehenden Spindel und translatorisch bewegten Muttern. Zur Verfügung stehen dabei zwei unabhängige Prüfplätze für jeweils einen PWG. Unterstützt wird dabei ein Hub von 80mm. Der Prüfplatz 1 erlaubt bis zu 5000U/min Drehzahl an der PWG Spindel und gleichzeitig bis zu 16kN Axialkraft. Bei Prüfplatz 2 sind es bedingt durch den schwächeren Motor bis zu 1667U/min bei bis zu 12kN Axialkraft. Um in Versuchen nicht die PWGs zu überhitzen, ist eine in ihrer Kühlleistung einstellbare

Wasserkühlung mit den Haltern der PWG-Muttern verbunden. Die Antriebsmotoren bei-der Prüfplätze liegen unterhalb des Prüfbettes und sind mit Riemen mit separat gela-gerten Zwischenwellen verbunden, um keine Querkräfte auf den PWG zu bringen. Die Zwischenwellen sind mit den PWG-Spindeln mittels Spannzangen verbunden.



*Abbildung 24 PWG-Prüfstand*

Im Prüfstand wird gemäß der in Kapitel 4.2.2 geforderten Messgrößen in jedem Ver-such das benötigte Antriebsmoment, die wirkende hydraulische Belastung, die rotative Lage der Spindel, die translatorische Position der Muttern sowie die PWG- als auch die Umgebungstemperatur erfasst. Zusätzlich ist am Prüfplatz 1 ein Beschleunigungs-sensor zur Schwingungsmessung integriert. Beide Prüfplätze sind vorbereitet, ein ei-gens für diese Arbeit entwickeltes Messsystem zur Erfassung der Bewegung der Plane-ten aufzunehmen. In der Abbildung 25 ist ein Schnitt durch eine PWG-Aufnahme des PWG-Prüfstandes mit der in diesen integrierten Messtechnik zu sehen. Die translatorische Position der PWG-Muttern in der PWG-Aufnahme wird durch einen außen an der PWG-Halterung angebrachten Linearencoder erfasst. Die rotative Lage der Spindeln wird über die an den Motoren verbauten Encoder erfasst.



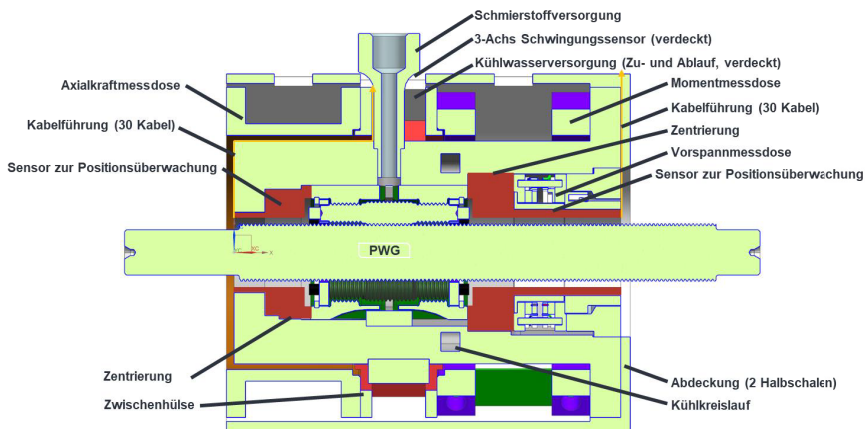


Abbildung 25 Schnitt durch die PWG-Aufnahmen im PWG-Prüfstand, abgeändert nach (A\_Hess 2018, S. 80)

Am Aufbau des PWG-Prüfstandes war nicht nur der Autor dieser Arbeit, sondern auch Studierende in ihren Abschlussarbeiten unter Anleitung des Autors dieser Arbeit beteiligt: Die Qualifizierung der Messdosen und eine erste aber nicht die finale Version der Hydraulik des Prüfstandes erfolgte durch (A\_Widemann 2015). (A\_Hess 2018) entwickelte die PWG-Halterung in der jetzigen Form auf Basis, der vom Autor dieser Arbeit entwickelten, ersten PWG-Halterung. Dazu passte er die von (A\_Mußgnug 2016) entwickelte DMS-Vorspannkraft-Messdose an. Die Sensorik zur Positionsüberwachung wurde ebenfalls von (A\_Hess 2018) in die heutige PWG-Halterung integriert.

Alternativ zu Vorspannkraft-Messdosen wurde noch ein eigens für diese Anwendung entwickelter kapazitiver Sensor getestet. Dieser ersetzt die Abstandsscheibe zwischen den Muttern. Die Idee dafür stammt von (A\_Valev 2017). Die Auswertung davon wurde von (A\_Yang 2019) untersucht und in Versuchen von (A\_Rodsiri 2019) bestätigt. Der kapazitive Sensor wurde aufgrund der geringeren Genauigkeit im Vergleich zur von (A\_Hess 2018) angepassten DMS-Vorspannkraft-Messdose nicht weiterverfolgt.

Im Folgenden soll nun auf das im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Sensorsystem zur Messung der Position und Orientierung der Planeten im Versuch eingegangen werden. Hierzu ist zuerst ein passendes Messprinzip auszuwählen, anschließend erfolgen das Design des Sensorsystems und das Design eines zusätzlichen Prüfstandes zum Test des Sensorsystems.

Durch dieses Sensorsystem soll der PWG selbst möglichst wenig beeinflusst oder abgeändert werden. In der Abteilung WI/ILT von Schaeffler existieren Versionen der Planetenscheiben aus Bronze. Im Gegensatz zu den heute im PWG genutzten Scheiben aus Kunststoff decken diese die Stirnseiten der Planeten nicht ab. Damit ist es möglich von außen die Bewegung der Stirnseiten der Planeten zu beobachten. Aus der Beobachtung der Bewegung jeweils beider Stirnseiten der Planeten lässt sich wiederum auf die Bewegung der Planeten selbst schließen. Die in dieser Arbeit aufgeführten Simulationen und Versuche zeigen eine sehr geringe Belastung der Planetenscheiben. Dadurch wird durch den Wechsel auf die bronzenen Planetenscheiben nur mit vernachlässigbaren Änderungen des Systemverhaltens gerechnet.

Aufgrund des möglichen Bewegungsraumes der Referenzgeometrie werden bis  $5^\circ$  Bewegung der Planeten erwartet. Um unterschiedlichste Bewegungen detailliert unterscheiden zu können, sollte das Sensorsystem den Winkel zwischen den Mittelpunkten der beiden Stirnseiten eines Planeten zur Spindelachse  $\pm 0,05^\circ$  genau messen. Durch die 36mm langen Planeten wäre dies bei einer reinen Kippbewegung der Planeten ein Unterschied von knapp  $63\mu\text{m}$ . Aufgrund von Toleranzen im Einbau des PWG und des Messsystems sollte das Messsystem idealerweise um Faktor 10 genauer, also mit einer Toleranz von  $6,3\mu\text{m}$ , die Position der Stirnseiten der Planeten erfassen.

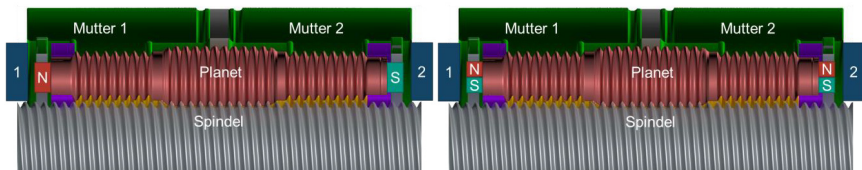
Grundsätzlich sind optische Verfahren, Verfahren auf Basis von kapazitiven, induktiven oder magnetfeldbasierten Messtechniken und CT-Messungen denkbar. Optische Verfahren können durch die Fettschmierung des PWGs nicht die Bewegung der Planeten erfassen: Durch die Schmierung in den Versuchen bilden sich an den Stirnseiten der Planeten Ansammlungen von Schmierfett. Diese sind nicht homogen und ggf. verunreinigt z.B. durch Stahlpartikel aus der Abnutzung des PWGs. Nachdem sowohl die Partikel als auch die Planeten aus dem gleichen Material bestehen können wird, damit keine hinreichend genaue Erfassung der Bewegung der Planeten mit optischen Verfahren erreicht.

Induktive und kapazitive Sensoren erreichen die gewünschte Genauigkeit. Als Beispiele für die erreichbare Genauigkeit mit Sensoren mit diesem Messprinzip seien hierfür IPRM 12I9504/S14 von Baumer (Baumer Holding AG 2017) und LEC100 von Siko (SIKO GmbH 2020) genannt. Bei der kapazitiven und der induktiven Messung werden ebenfalls Probleme durch die Metallpartikel und umgebende metallische Bestandteile des PWG erwartet. Die induktive Messung wird weiterhin durch das Schmierfett beeinflusst. Das Fett unterscheidet sich zur Luft deutlich in seiner relativen Permittivität.

Nachdem der Anteil an Fett/ Luft an den Stirnseiten der Planeten sich ebenfalls immer im Versuch ändert wird dadurch ebenfalls die Messung verfälscht. Somit entfallen auch kapazitive und induktiven Messungen.

Durch eine Magnetisierung der Planeten oder ein Aufkleben von Magneten an den Stirnseiten der Planeten könnte mit einer Magnetfeldmessung die Position der Planeten unabhängig von den umgebenden metallischen Bauteilen bestimmt werden. Bei lang andauernden Versuchen ist allerdings dabei zu erwarten, dass sich die Umgebung der Planeten magnetisiert und dadurch ebenfalls die Messung verfälscht wird. Aufgrund der geringen Magnetisierbarkeit der Komponenten des PWGs im Vergleich zu aufgetragenen Magneten wird dabei nur eine geringfügige Verfälschung der Messung erwartet.

CT-Messungen können je nach CT die gewünschte Genauigkeit erreichen, würden jedoch erfordern den Prüfstand in einem CT aufzubauen. Zusätzlich können durch die lange Messdauer keine dynamischen Effekte beobachtet werden. Damit entfällt dieses Messprinzip ebenfalls. Somit verbleibt als sinnvollstes Messprinzip die Messung des Magnetfeldes von magnetisierten Planeten. Diese soll im Folgenden weiterverfolgt und daraus ein Sensorsystem entwickelt werden.



*Abbildung 26 Magnetisierung der Planeten und Integration der Sensorarrays: 1 und 2 zeigen den Bauraum für die Sensorarrays, links axiale und rechts radiale Magnetisierung der Planeten.*

Idee der Messung ist es, die Planeten an den Stirnseiten zu magnetisieren und dann mittels Magnetfeldsensoren die Bewegung der Magnete und damit der Planeten zu beobachten. Dieser Aufbau ist in Abbildung 26 für die in dieser Anwendung zwei geeigneten Magnetisierungen vereinfacht dargestellt. Bei einer axialen Magnetisierung kann die Bewegung der Stirnseiten und das Kippen und Schränken der Planeten aber nicht die Rotation der Planeten um die eigene Mittelachse erfasst werden – denn es befindet sich bei jedem Sensorarray nur ein Magnetpol. Bei einer radialen Magnetisierung befinden sich zwei Magnetpole bei jedem Sensorarray. Werden nun auf jedem Sensorarray mehrere Sensoren verbaut (wie in Abbildung 28 dargestellt) so misst jeder

Sensor den nächsten Magnetpol. Damit werden an jeder Stirnseite zwei Pole räumlich erfasst, wodurch die Rotation des Planeten um seine Mittelachse bestimmt werden kann.

Aufgrund des höheren Aufwandes in der Kalibrierung der Sensorik und der Auswertung bei der radialen Magnetisierung wird die axiale Magnetisierung der Planeten weiterverfolgt. Aufgrund des magnetisch suboptimalen Materials der Planeten wurden nicht die Planeten selbst magnetisiert, sondern runde Magneten auf die Stirnseiten der Planeten aufgeklebt. Um die Überlagerung von Magnetfeldern unterschiedlichster Planeten zu vermeiden, wurde in den späteren Versuchen nur ein Planet des PWG zur Vereinfachung der Versuche und der Auswertungen mit Magneten ausgestattet.

Nachdem die Bewegung der Planeten im Raum verfolgt werden soll, ist es nötig, mit den Sensoren die Bewegung der Stirnseiten der Planeten im Raum zu beobachten. Sensoren zur Messung der Magnetfeldstärke messen diese üblicherweise in eine Richtung. Damit müssen für eine räumliche Beobachtung entweder immer drei einzelne Sensoren pro Stirnseite verbaut werden oder ein Sensor der in seinem Package drei Einzelsensoren enthält. Nach einer Recherche wurde als Sensor MLX90393 von Melaxis gewählt. In diesem Sensor sind auf einer Fläche von ca. 3mm x 3mm drei Sensoren sowie die Auswertung verbaut (Melaxis NV 2017). Gewählt wurde dieser Sensor aufgrund der geringen Baugröße, der integrierten Auswertung und vor allem aufgrund des sehr breiten Messbereichs. Viele Sensoren sind für eine Anwendung als Kompass gedacht und messen deshalb nur sehr schwache Magnetfeldflussdichten. In dieser Anwendung wird aber ein Sensor benötigt, der direkt neben den Magneten positioniert ist und dieser muss daher sehr hohe Magnetfeldflussdichten messen können.

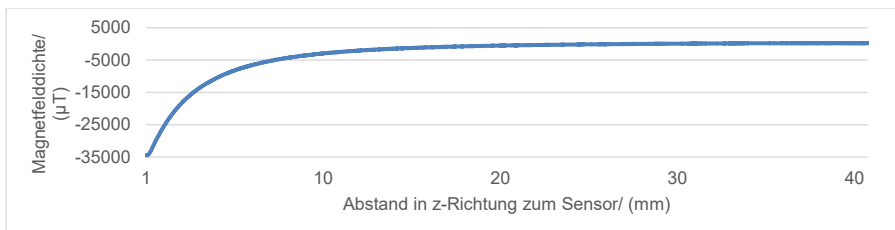
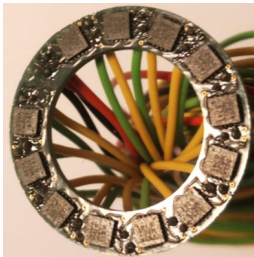


Abbildung 27 Magnetfeld/  $\mu\text{T}$  über den Abstand zum Sensor, Bewegungsgeschwindigkeit 240mm/min

Nachdem die Magnetfeldstärke exponentiell mit dem Abstand zum Magneten abnimmt (vgl. Abbildung 27), die Messungsgenauigkeit aber linear vom Messwert abhängt, wird

das konzipierte Messsystem umso genauer je näher man am Magneten ist. Beispielhaft ist die gemessene Magnetfeldstärke über den Abstand in Sensor z-Richtung – und damit senkrecht zur Platine des verlöteten Sensors – für eine Messung mit den gewählten MLX90393 in Abbildung 27 dargestellt. Um diesen Effekt auszunutzen, wurde im Design der Sensorarrays eine möglichst hohe Anzahl an Sensoren eingebaut.

Auf Basis des gewählten Sensors und des Bauraums entwickelte (A\_Chilakalar 2018) die erste Version des Sensorarrays mit 13 Sensoren. Aufgrund der mechanischen Anfälligkeit der ersten Version bzgl. den Kabeln und zur Vereinfachung des Designs wurde eine zweite Version des Sensorarrays (vgl. Abbildung 28) entwickelt: Durch den Entfall von nicht verwendeten Signalleitungen, dem Zusammenfassen der Stromversorgungen der einzelnen Sensoren, der Umstellung von einer zweischichtigen auf eine vierschichtige Platine und dem Entfall eines Sensor auf der Platine konnte die Anzahl der Kabel pro Sensorarray von 55 auf 30 gesenkt und die Kabel mit deutlich stärkeren Litzen ausgestattet werden.

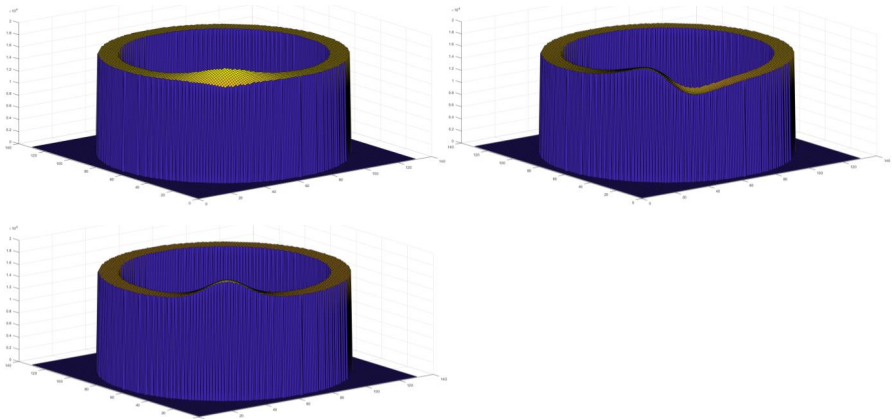


*Abbildung 28 Zweite Version des Sensorarrays bestückt mit 12 Sensoren*

In der anschließenden Softwareentwicklung zur Auswertung und Kalibrierung der Sensoren wurden in den Abschlussarbeiten von (A\_Zhang 2019), (A\_Liu 2019) und (A\_Xu 2019) die Sensorarrays von (A\_Chilakalar 2018) nicht mehr mit einem FPGA sondern jeweils von drei Mikrocontrollern pro Sensorarray ausgewertet und angesteuert. (A\_Liu 2019) entwickelte auf Basis eines 3Ds-Druckers einen einfachen und schnellbeweglichen Prüfstand für die Softwareentwicklung und den Ablauf der Kalibrierung der Sensorarrays. (A\_Zhang 2019) entwickelte die Algorithmen zur Auswertung und Kalibrierung der Sensorarrays. (A\_Xu 2019) entwickelte auf Basis der anderen Arbeiten einen hochgenauen Prüfstand zur Kalibrierung auf Basis eines auf  $1\mu\text{m}$  genau positionierenden sich aber sehr langsam bewegenden Hexapoden.

Auf Basis dieser Arbeiten wurden Sensorarrays der zweiten Version auf den zu verwendenden Planeten kalibriert. Dazu wurde der später im PWG verbaute Planet analog zur Arbeit von (A\_Xu 2019) über die Sensorarrays geführt. Dabei wurden als Kalibrierungsdaten das Kennfeld der angefahrenen Positionen in x, y und z sowie die gemessene Magnetfeldstärke in x, y und z in diesen Positionen aufgezeichnet. Nachdem ein Tripel der Magnetfeldstärke in x, y und z eindeutig für eine Position in x, y und z ist, kann aus dem Tripel der Magnetfeldstärke die aktuelle Position des nächsten Magneten am Planeten in Versuchen bestimmt werden.

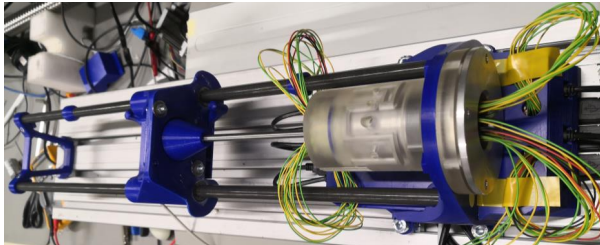
Das Kennfeld wurde mit einer Rasterweite der Positionen von 0,2mm aufgezeichnet. Dazu wurde immer eine Ebene mit dem gleichen z-Abstand zu den Sensoren abgetastet. Die Messwerte für das Magnetfeld in x, y und z für einen der 12 Sensoren für eine dieser Ebenen - Abstand 2mm zwischen den Sensoren und dem Magnet - ist in Abbildung 29 dargestellt. An jedem Messpunkt wurde der Wert zur Kalibrierung aus 10 Messungen gemittelt. Jeder Sensor mittelt aufgrund der gewählten Einstellungen bereits aus 32 Messungen für das Ergebnis jeder Messung. Die Messfrequenz von jedem Sensorarray inkl. der Übertragung an den Versuchsstandrechner liegt bei 16,67Hz. Zwischen den Positionen des 3D-Rasters wird linear interpoliert.



*Abbildung 29 Auszug aus der Kalibrierung eines Sensorarrays: Magnetfeldstärke in x (oben links), y (oben rechts) und z (unten) für einen Sensor in einer Ebene der Kalibrierung mit dem Abstand 2mm zwischen den Sensoren und dem Magneten*

Um Messungen ohne die Beeinflussung – z.B. durch die Stahlteile der PWG-Halterung und die Antriebsmotoren – durchführen zu können, wurde für die zweite Version der

Sensorarrays ein weiterer, einfacher Prüfstand aus möglichst vielen Kunststoff- und Aluteilen aufgebaut (vgl. Abbildung 30). Der dabei verwendete Antriebsmotor der Spindel wurde dabei axial soweit zum PWG versetzt bis er nicht mehr die Messungen beeinflusst hat.



*Abbildung 30 Prüfstand zur Bewertung von magnetischen Einflüssen auf die Messung der Sensorarrays*

## **5 Systemanalyse – Einflüsse auf Kinematik und Kinetik des PWGs**

Auf Basis der in Kapitel 4 vorgestellten Modellbildung sollen im Folgenden Einflussfaktoren der Anwendung und der Geometrie des PWGs hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Kinematik und Kinetik des PWGs untersucht werden. Dazu wird zuerst in Kapitel 5.1 das Verhalten einer Referenzsimulation analysiert und in Kapitel 5.2 validiert. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden die zu analysierende Parameter der Anwendung und der Geometrie ausgewählt (Kapitel 5.3) und untersucht (Kapitel 5.4 und 5.5). In Kapitel 5.6 wird ein analysierter Parameter der Anwendung oder der Geometrie ausgewählt, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf andere Baugrößen nachzuweisen. In Kapitel 5.7 werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Systemanalyse vergleichend zusammengefasst. Die hier diskutierten Auswertungen konzentrieren sich auf die quasistatischen Bereiche der Simulationen.

### **5.1 Analyse der Referenzgeometrie unter Referenzlast**

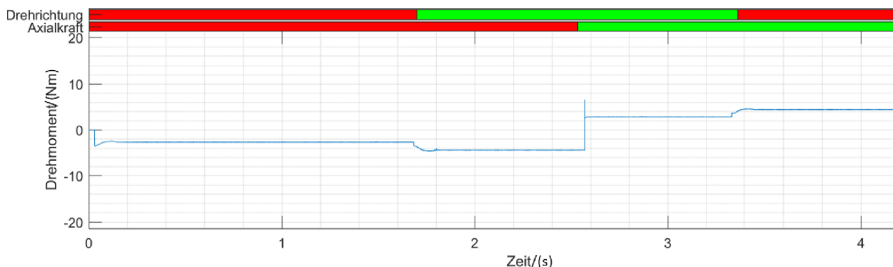
Es soll dazu die bei Schaeffler bestehende Geometrie des PWG15x3 analysiert werden, um das grundsätzliche Verhalten und die Eigenschaften eines PWGs aufzuzeigen. Diese Simulation dient auch als Referenz für spätere Vergleiche. Analog zu Versuchen bei Schaeffler wird der PWG mit einer Vorspannung von 632N in einer X-Anordnung und 1706 U/min als Nenndrehzahl der Spindel simuliert. Die simulierte Axialkraft liegt bei 10 kN. Das Radialspiel dieser Geometrie liegt bei 36 $\mu$ m. Wie in Kapitel 4.1.4 ermittelt und validiert, wird mit einem Haftreibungskoeffizienten von 0,045 sowie einem Gleitreibungskoeffizienten von 0,036 simuliert. Dabei werden wie in Kapitel 4.1.3 in Abbildung 17 dargestellt zwei Hübe mit drei Wechsels in der Axialkraftfrichtung simuliert. Für eine bessere Darstellung wird in den folgenden Schaubildern auf die Darstellung der redundanten Kontrollbereiche verzichtet – in den Schaubildern sind damit 1,3 der zwei simulierten Hübe dargestellt.

Für die hier analysierte Simulation werden in Tabelle 5 die benötigten Antriebsmomente für die quasistatischen Bereiche dargestellt. Der Verlauf des Drehmomentes über die Zeit ist, wie in Abbildung 31 dargestellt, innerhalb der quasistatischen Bereiche näherungsweise konstant und zeigt nur bei Änderungen derselben ein Einschwingverhalten. Besonders deutlich sind dabei die Sprünge durch die Änderung der Axialkraftfrichtung. Begründet liegt dies in der schlagartigen Änderung der Axialkraftfrichtung.



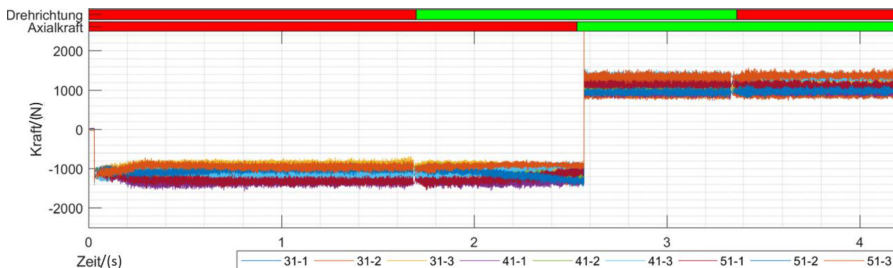
**Tabelle 5** Benötigte Antriebsmomente für die Referenzsimulation in den quasistatischen Bereichen

	Drehrichtung positiv	Drehrichtung negativ
Axialkrafttrichtung positiv	-2,68 Nm	-4,42 Nm
Axialkrafttrichtung negativ	4,40 Nm	2,80 Nm



**Abbildung 31** Auszug benötigtes Antriebsmoment der Spindel in Abhängigkeit der Drehrichtung und der Richtung der Axialkraft

Der in Abbildung 32 dargestellte Verlauf der Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten in x-Richtung zeigt eine deutliche Spreizung zwischen der mittleren Last der Planeten. Von den 9 Planeten gibt es Individuen die von den 10kN Axialkraft 0,9kN im Mittel in einem quasistatischen Bereich übertragen und welche die 1,3kN im Mittel übertragen. Teilweise driftet ein Planet langsam von einer Kraft zu einer anderen – im Schaubild besonders gut zwischen 1,8 und 2,5s bei Planet 51-2 ersichtlich. Der Planet 51-2 driftet von einer mittleren Kraft von 0,9 zu 1,3kN.

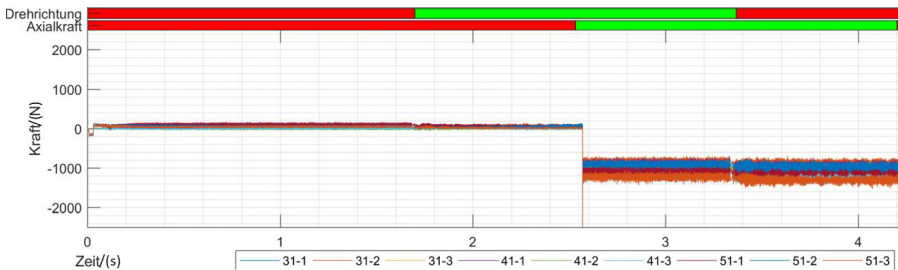


**Abbildung 32** Auszug Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den neun Planeten (jeweils drei der Typen 31, 41 und 51)

Wie zuvor in Kapitel 2.1 beschrieben, unterscheiden sich die Planetentypen geometrisch durch den axialen Versatz der Windungen der Spindelkontakte zu den Windungen

der Mutterkontakte. Bei der hier untersuchten Geometrie ist keine Abhängigkeit vom Planetentyp im Bezug zur mittleren Last ersichtlich – bei jedem Planetentyp gibt es Individuen mit 0,9kN und 1,3kN mittlerer Last.

Die Axialkraft, die in der Spindel eingeleitet wird, wird auf den Muttern abgestützt. Ein Großteil der Kraft wird dabei nur auf einer Mutter abgestützt (vgl. Abbildung 33). Welche der beiden Muttern dies ist, hängt von der Richtung der Axialkraft ab. Die Ursache für die hauptsächliche Abstützung über nur eine der beiden Muttern liegt in der Vorspannung des PWGs: wird der PWG in X- oder O-Anordnung vorgespannt, so liegen die Planeten an den Muttern an Flanken mit unterschiedlichen Richtungen an (vgl. Kapitel 2.1 Abbildung 4). Wirkt nun auf den vorgespannten PWG eine Axialkraft so werden damit die vorgespannten Flanken an einer Mutter entlastet und an der anderen höher belastet. Bei Axialkräften größer der Vorspannung wird dabei die Vorspannung überdrückt. Bedingt durch die hohen Steifigkeiten im PWG kommt es daher bei hinreichend großen Axialkräften zu einer sehr ungleichen Lastverteilung zwischen den Muttern.

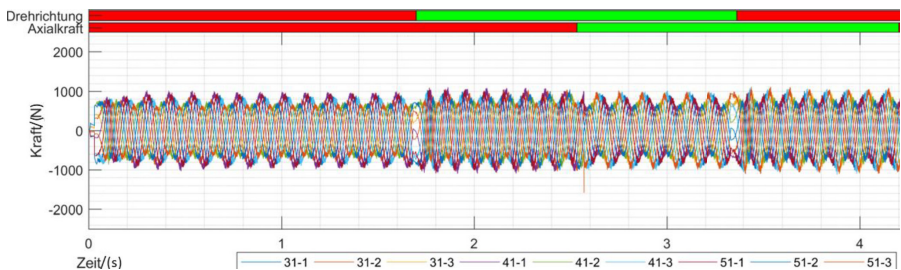


**Abbildung 33 Auszug Kräfte in x-Richtung zwischen der Mutter 1 und den neun Planeten**

Die in der Abbildung 33 dargestellte Mutter 1 stützt die Kräfte vor allem für eine entgegen der x-Achse wirkende Axialkraft (zwischen 2,6 und 4,2s der Simulation) ab. In den Zeitbereichen zwischen 0,0 und 2,6s bzw. zwischen 4,2 und 6,7s sind die Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten auf maximal 0,2kN begrenzt, obwohl eine Axialkraft von 10kN wirkt. Diese werden über die hier nicht dargestellte Mutter 2 abgestützt. Damit stützt immer eine Mutter hauptsächlich die Axialkräfte ab, während die andere durch die Axialkräfte nur geringfügig belastet wird. Welche Mutter dabei hauptsächlich belastet wird, hängt von der Richtung der Axialkraft ab. D.h. in den Zeitbereichen zwischen 0 und 2,6s bzw. zwischen 4,2 und 6,7s verhalten sich diese Kräfte

an Mutter 2 unter Berücksichtigung ihres gedrehten Vorzeichens wie jene von Mutter 1 im Zeitbereich zwischen 2,6 und 4,2s.

Bedingt durch die Verzahnung werden durch Axialkräfte immer auch Radialkräfte innerhalb des PWG erzeugt. Die im PWG erzeugten radial wirkenden Kräfte liegen je nach Planet im Mittel der quasistatischen Bereiche zwischen 0,6 und 1,0kN unabhängig vom Planetentyp. Auch hier kann es zu einem Drift innerhalb eines quasistatischen Bereiches kommen. Der z.B. zuvor angesprochene Planet 51-2 driftet zwischen 1,8 und 2,5s in der mittleren Kraft zwischen der Spindel und ihm selbst in x-Richtung von 0,9 auf 1,3kN. Seine mittlere Radialkraft steigt gleichermaßen von 0,6 auf 1,0kN.



**Abbildung 34 Auszug Kräfte in y-Richtung zwischen der Spindel und den neun Planeten**

Durch die gleichmäßige Verteilung der Planeten um die Spindel wäre ein Ausgleich dieser Kräfte zu erwarten – d.h. dass keine im PWG erzeugten Querkräfte auf seine Lagerung/ Fixierung induziert werden. In Abbildung 34 sind die Kräfte in y-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten dargestellt. Nachdem die y-Achse ortsfest ist und die Planeten um die Spindel kreisen, erzeugt jeder Planet während einer Umdrehung um die Spindel einen sinusförmigen Kraftverlauf. Die Kurvenschar der neun Planeten wird durch jeweils eine sinusförmige Welle oben und unten beschränkt. Die Existenz dieser Wellen und ihre zeitliche Verschiebung zueinander zeigt, dass innerhalb des PWGs Querkraftschwingungen erzeugt werden die nach außen auf die Lagerungen bzw. Fixierung des PWG übertragen werden. Addiert man die dargestellten Kräfte in y-Richtung der einzelnen Planeten unter Berücksichtigung ihrer Richtung auf, so erhält man eine um 0 oszillierende Sinusschwingung mit einer Amplitude von 1,8kN. Zeitlich versetzt zeigt sich das gleiche Verhalten für die z-Richtung. Der PWG erzeugt also eine umlaufende Querkraftschwingung die radial mit 0,9kN nach außen drückt. Nachdem die Muttern gegenüber der Spindel die Planeten abstützen, treten dort genau die gleichen Schwingungen auf. Die Schwingungen an

den Muttern verhalten sich aber auch analog zu den Kräften zwischen den Muttern und den Planeten in x-Richtung – abhängig von der Richtung der Axialkraft wird immer eine Mutter hauptsächlich mit dem Großteil der Schwingungen und der Radialkräften belastet. Die Frequenz dieser umlaufenden Schwingung entspricht näherungsweise der Frequenz der Drehung der Planetenscheiben um die x-Achse. Für das Heben der Last sind dies 10,0Hz und für das Senken 8,6Hz.

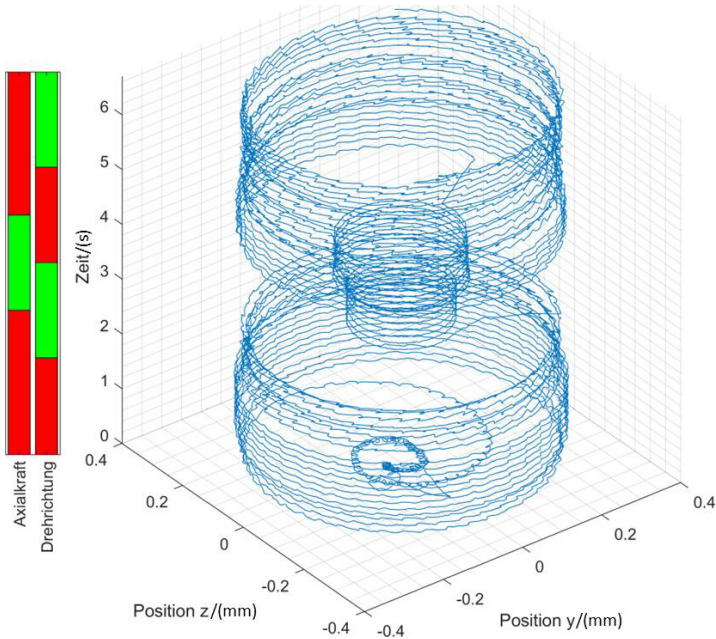


Abbildung 35 Bewegung des Mittelpunktes der Planetenscheibe 1 um die x-Achse

Die umlaufende Querkraft und die Schwingung der Planeten zeigt sich auch in der Bewegung der Planetenscheiben. Als Nebenkraftfluss verbinden diese die Planeten, ohne mit großen Anteilen der Axialkraft oder den hohen Querkraften belastet zu werden. Auf die Scheiben wirkende Kräfte liegen unter 20N. Die Bewegung der Scheiben findet, wie Abbildung 35 für die Scheibe 1 gezeigt, meist mit einem konstanten Radius um die x-Achse innerhalb des gleichen quasistatischen Bereiches statt. Der maximale Durchmesser der Kreisbewegung um die x-Achse sind 0,7mm. Die Bewegung der Scheibe 2 ist konträr zur Scheibe 1 – sie kreist dort mit großem Radius um die x-Achse, wo die Scheibe 1 mit kleinem Radius um die x-Achse kreist und umgekehrt. Die großen Radien

sind immer an der Seite des PWGs an der die Mutter minimal belastet wird. Des Weiteren ist in der Abbildung eine überlagerte, sägezahnförmige und deutlich höherfrequente Schwingung zu sehen. Die Scheibe driftet im Radius immer nach innen, um dann kurze Zeit später um ein Vielfaches schneller wieder nach außen zu springen.

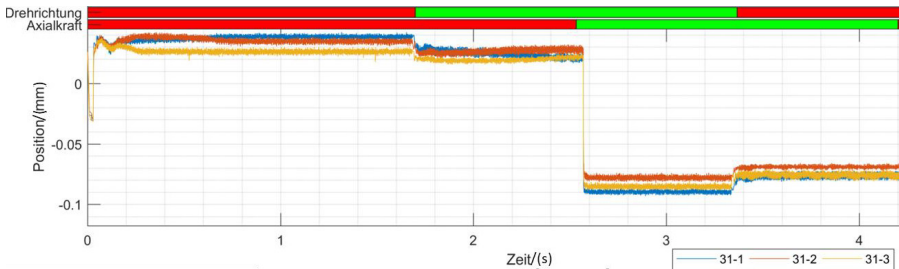


Abbildung 36 Auszug Bewegung der Planeten des Typs 31 in x-Richtung

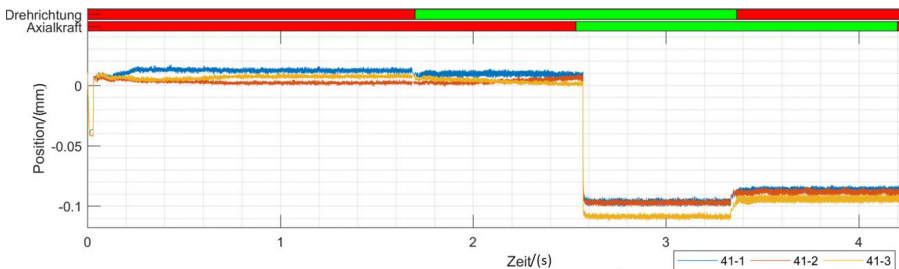


Abbildung 37 Auszug Bewegung der Planeten des Typs 41 in x-Richtung

Durch die gewählten Randbedingungen der Simulationen können sich die Planeten auch im Gegensatz zu den Scheiben und Müttern in x-Richtung – also parallel zur Spindel – frei bewegen. Dabei bewegen sich die Planeten aller Typen um maximal 0,15mm entlang der x-Achse wie es exemplarisch für die Bewegung der Planeten 31 und 41 in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt ist. Die Änderung der Richtung der Axialkraft, bspw. zum Zeitpunkt 2,55s, führt zu einer großen Verlagerung von ca. 0,11mm und die Änderung der Drehrichtung, bspw. zum Zeitpunkt 1,7s, zu einer eher kleinen von ca. 0,01mm. Bei der Änderung der Drehrichtung zeigt sich eine Besonderheit der Planeten 41 (vgl. Abbildung 37): Bei der Änderung der Drehrichtung unter Axialkraft in Richtung der x-Achse (Zeitpunkte 1,7 und 5s) entfällt die Verlagerung im Gegensatz zu den Planeten 31 und 51 nahezu komplett. Bei einer Axialkraft entgegen der Richtung der x-Achse verhalten sich die Planeten 41 aber analog zu den Planeten 31 und 51 –

sie weisen bei der Änderung der Drehrichtung einen deutlichen Sprung der x-Position auf. Analog zum Drift der Planeten bei den übertragenen Kräften sind auch in den Bewegungen der Planeten Driftbewegungen zu sehen.

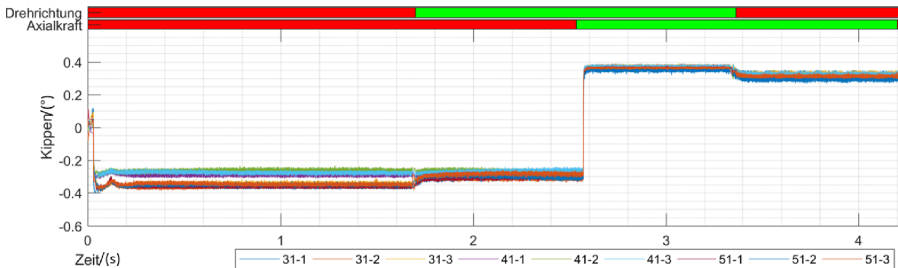


Abbildung 38 Auszug Kippen der Planeten

Im Gegensatz zu allen anderen Körpern der Simulation können die Planeten sich komplett frei im Raum bewegen. Neben ihrer rotativen Bewegung um die eigene Achse ist es ihnen auch erlaubt zu kippen und zu schränken. Die Planeten kippen dabei um maximal  $\pm 0,4^\circ$ . Damit bewegen sich die äußeren Seiten der Planeten unter der Annahme von Starrkörpern um  $\pm 0,37\text{mm}$ . Sofern ein Planet sich in der Realität nicht hinreichend verbiegt, ist aufgrund der Zahnhöhe von rund  $0,5\text{mm}$  an den äußeren Windungen mit deutlich höheren Schäden als erwartet zu rechnen.

Abhängig von der Richtung der Axialkraft ändert sich die Richtung des Kippens. Die Planeten versuchen immer an der Seite der höchstbelasteten Mutter der Kraft auszuweichen – die Kontaktpunkte in Richtung der Zahnköpfe zu verschieben. Dies deckt sich mit der Bewegung der Planetenscheiben, denn dies führt an der Seite mit den hohen Lasten zu kleinen Radien der Planetenscheibenbewegung. Durch die hohen Kräfte laufen die Planeten an der Seite, an der die Mutter hoch belastet ist, erwartungsgemäß stabiler als an der anderen Seite. In Folge kreisen die Planetenscheiben an dieser Seite auf einem kleineren Radius um die x-Achse als an der niedrigbelasteten Seite.

Abhängig von der Drehrichtung ändert sich der Winkel des Kippens nur minimal. Das Kippen verhält sich zusammengefasst analog zur Bewegung der Planeten entlang der x-Achse. Auch hier zeigen die Planeten 41 bei einer Axialkraft in Richtung der x-Achse wieder den gleichen Unterschied zu den Planeten 31 und 51 sowie zu ihrem Verhalten bei einer Axialkraft entgegen der Richtung der x-Achse: Die Planeten 41 ändern in

diesem Fall nicht den Winkel ihrer Kippbewegung. Daher ist der Winkel des Kippens der Planeten 41 bei einer Axialkraft in Richtung der x-Achse und einer positiven Drehrichtung der Spindel um die x-Achse deutlich kleiner als bei den Planeten 31 und 51. Das Kippen der Planeten ist in der Abbildung 38 dargestellt. Beim Kippen der Planeten sind ebenfalls Driftbewegungen einzelner Planeten vorhanden.

Nach dem Einbringen der Randbedingungen in der von 0,0 bis 0,1s andauernden Initialisierungsphase bewegt sich das Schränken der Planeten zwischen 0,0 und  $-1,6^\circ$  (vgl. Abbildung 39). Die Planeten schränken in die Richtung passend zur Steigung der Spindel. Das Schränken der Planeten ist damit zwischen dem Steigungswinkel der Spindel ( $\sim 2,6^\circ$ ) und dem der Muttern ( $0,0^\circ$ ). Im Gegensatz zum Kippen und zur Bewegung entlang der x-Achse sind die Auswirkungen der Änderung der Drehrichtung mit der Änderung der Wirkrichtung der Axialkraft vergleichbar. Im Vergleich zum Kippen schwankt der Winkel beim Schränken innerhalb des gleichen, quasistatischen Bereiches zwischen den Planeten deutlich stärker. Beispielsweise zwischen 2,6 und 3,4s gibt es Planeten mit einem Schränken von fast 0 sowie  $0,8^\circ$ . Auch beim Schränken der Planeten sind wieder Driftbewegungen zu sehen.

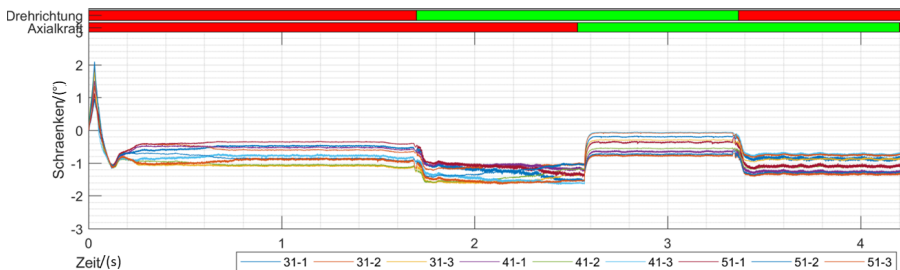


Abbildung 39 Auszug Schränken der Planeten

In Summe zeigen sich auch in den quasistatischen Bereichen signifikante Kraft-, Positions- und Orientierungsschwankungen der Planeten – selbst bei Planeten des gleichen Typs und gleicher Einbaulage. Die unterschiedliche Belastung der Planeten ist unabhängig von ihrem Planetentyp, die unterschiedlichen Planetenbewegungen zeigen teilweise Abhängigkeiten vom Planetentyp. Die Lage der Planeten im PWG und die von ihnen übertragenen Kräfte sind dabei rein von den in ihren Kontakten wirkenden Kräften und Positionen der Kontakte abhängig. Für eine Ursache der genannten Schwankungen müssen deshalb die Kontakte analysiert werden. Wie das spätere Kapitel 6 zeigt, findet die Wälzbewegung der Planeten in den einzelnen Kontakten in einem

Wälzbereich statt auf einem Wälzkreis statt. In Folge übertragen die Planeten selbst in den idealen Simulationsbedingungen auch in den quasistatischen Bereichen unterschiedliche Kräfte und ändern ihre Position und Orientierung. In der Simulation reichen bspw. schon kleinste numerische Fehler oder Fehler durch die Diskretisierung der Oberflächen aus, um die Planeten im Wälzbereich langsam driften zu lassen. Als weitere Folge des Wälzbereiches entstehen die in diesem Kapitel aufgezeigten Querkraftschwingungen. Übertragen die gleichmäßig um die Spindel angeordneten Planeten nicht gleichmäßig Kräfte, so gleichen sich die Querkräfte der Planeten nicht mehr aus und es verbleiben unausgeglichene radiale Kräfte. Mit der Bewegung der Planetenscheiben wurde gezeigt, dass sich die Planeten an der Seite der niedrig belasteten Mutter deutlich stärker als an der Seite der hochbelasteten Mutter bewegen. Weiterhin wurde in diesem Kapitel aufgezeigt, dass die Axialkraft hauptsächlich über eine Mutter abgestützt wird.

## 5.2 Validierung der Simulation der Referenzgeometrie unter Referenzlast

Bevor weitere Kriterien untersucht werden, soll die vorherige Simulation der Referenzgeometrie validiert werden. In Kapitel 4.1.4 wurde bereits das Übertragungsverhalten des PWG – das Verhalten des PWGs nach außen validiert. Damit sind bereits die benötigten Antriebsmomente und die Systemsteigung des PWGs validiert. In diesem Kapitel sollen Kinematik und Kinetik im PWG über zentrale Eigenschaften des PWGs wie folgt validiert werden:

*Tabelle 6 Übersicht Validierung der Kinematik und Kinetik des PWGs*

Zu validierende Eigenschaft des PWGs in der Simulation	Validierung mittels
Schwingungen durch unausgeglichene Querkräfte	Messung im Versuch
Kippen und Schränken der Planeten	Messung im Versuch, Verschleißanalyse
Unterschiedliche Belastung der Planeten unabhängig vom Planetentyp	FEM, Verschleißanalyse
Axialkraft fließt hauptsächlich über eine Mutter	FEM, Verschleißanalyse

Die Frequenzen von Schwingungen - bspw. durch unausgeglichene Querkräfte – wurden bei 1706U/min in Versuchen am PWG-Prüfstand mit einem 3-Achs Beschleunigungssensor ermittelt. Dazu wurden die quasistatischen Bereiche der in Versuchen gemessenen Schwingungen für achtmal Anheben und siebenmal Absenken der Last



mittels einer FFT ausgewertet. Die x-Achse des verwendeten Sensors ist dabei senkrecht zur Spindel ausgerichtet und kann damit optimal Schwingungen durch unausgeglichene Querkräfte erfassen. Die mit der x-Achse des Sensors erfassten Schwingungen sind in der folgenden Abbildung 40 dargestellt. Alle drei Achsen des Beschleunigungssensors liefern deutliche Schwingungen beim Senken der Last bei 8,5Hz. Für das Anheben der Last sind es bei der x- und bei der y-Achse jeweils 10,8Hz und bei der z-Achse 10,0Hz. Die zu validierende Referenzsimulation aus Kapitel 5.1 zeigt Schwingungen von 8,6Hz beim Senken der Last und von 10,0Hz beim Anheben der Last in Richtung der x-Achse des Schwingungssensors der Versuche. Damit liegt der Fehler der Simulation beim Absenken der Last bei 1,2% und beim Anheben der Last bei 7,4%. Die Schwingungen der unausgeglichene Querkräfte treten damit auch nachweislich im Versuch auf.

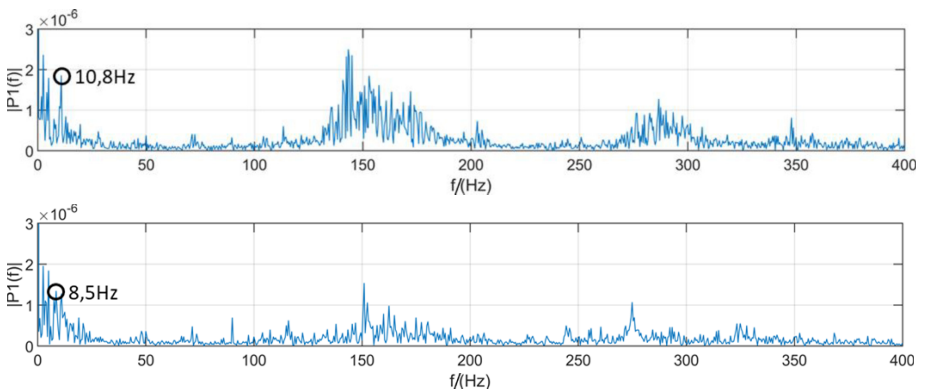


Abbildung 40 Auszug FFT (Single-Sided Amplitude Spectrum) der Schwingungen entlang der x-Achse: oben für das Anheben und unten für das Absenken der Last

Im Versuch sind noch weitere Schwingungen zu sehen: weitere niederfrequenten Schwingungen ( $<30\text{Hz}$ ) konnten auf Stick-Slip-Effekte des Prüfstandes zurückgeführt werden. Die Schwingungen  $>100\text{Hz}$  traten in der Simulation nicht auf. Wahrscheinliche Ursachen für diese sind Anregungen durch Fertigungsungenauigkeiten im PWG und Effekte durch die Lagerung des PWG im Prüfstand. In eigenen CT-Vermessungen der Planeten wurden U- und S-förmig verbogene Planeten festgestellt. Aufgrund der Fertigungsprozesse ist davon jeder Planet in unterschiedlichem Ausmaß betroffen. Der Peak bei ca. 142Hz entspricht einem Ereignis, welches fünfmal pro Spindelumdrehung auftritt. Die Planeten drehen aufgrund der Wälzkreise und des Schlupfes mit ziemlich

genau der fünffachen Drehzahl der Spindel. Ein U-förmiger Planet erzeugt damit eine Schwingung von 142Hz. Der Peak bei ca. 284Hz entsteht daher wahrscheinlich aus der Überlagerung der Schwingung zweier U-förmiger Planeten oder aus der Schwingung eines S-förmigen Planeten.

Mit dem am Ende von Kapitel 4.2.3 gezeigten Prüfstands Aufbau für die Messung mit den Sensorarrays konnte u.a. das Kippen der Planeten in einfachen Versuchen überwacht werden. Dabei wurde auf den PWG eine im Versuch veränderte Vorspannung von 100 bis 800N und eine Drehzahl von 20 U/min aufgebracht. Vor jeder Bewegung wurde dabei im Versuch die Vorspannung erhöht (vgl. Abbildung 41). Aufgrund des Prüfstandsbaus mit den Sensorarrays konnte in diesen Versuchen keine äußere Axialkraft aufgebracht werden. Die durch Reibung in den Führungen und Massenträgheiten wirkende Axialkraft ist dabei  $<100\text{N}$ . Die Spindel wurde in den hier gezeigten Versuchen immer zwei Umdrehungen vor und zurückgedreht. In Abbildung 42 sind die 8 Wiederholungen dieses Versuchs zu sehen. Dabei kippt der überwachte Planet 31 hauptsächlich zwischen  $-0,1$  und  $+0,1^\circ$ .

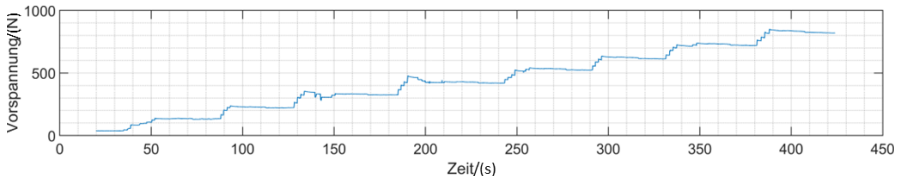


Abbildung 41 Vorspannung eines PWGs aus Versuchen mit 100 bis 800N Vorspannung, Drehzahl von 20 U/min ohne eine wirkende Axialkraft

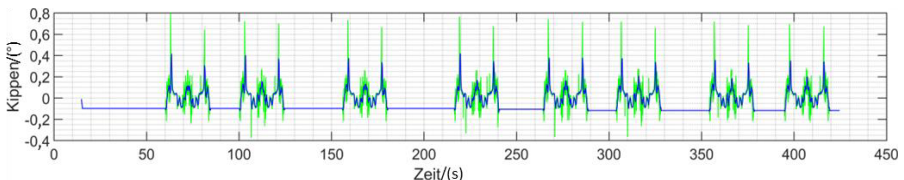
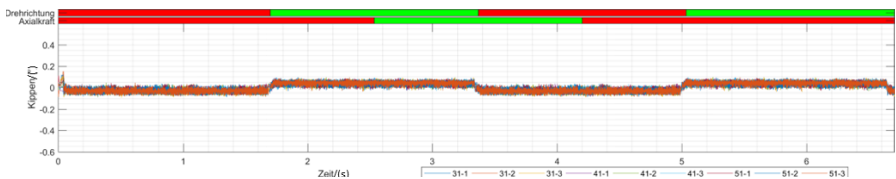


Abbildung 42 Kippen des überwachten Planeten aus Versuchen mit 100 bis 800N Vorspannung, Drehzahl von 20 U/min ohne eine wirkende Axialkraft, in grün ungefiltert und in blau mit gleitendem Mittelwert gefiltert dargestellt

Im Vergleich dazu wird in Abbildung 43 das Kippen der Planeten in einer Simulation gezeigt, die sich nur durch die fehlende Axialkraft von der in Kapitel 5.1 gezeigten Referenzsimulation unterscheidet. In dieser bewegen sich die Kippwinkel zwischen  $-0,1$

und  $+0,1^\circ$  sofern der Sprung beim Start der Simulation (Einbringung der Vorspannung) ignoriert wird. Dieser Bereich deckt sich sehr genau mit den Messdaten aus dem zuvor beschriebenen Versuch. In der Simulation ist beim Senken der Last (z.B. Zeitraum 0,0 bis 1,6s) das Mittel des Kippens ca.  $0,075^\circ$  geringer als beim Anheben der Last (z.B. Zeitraum 1,8 bis 2,4s). Dieser Unterschied ist im Versuch nicht sichtbar. Erklärung dafür sind Fertigungsungenauigkeiten der Planeten. Bedingt durch die Fertigung sind diese, wie eigene CT-Messungen zeigten, meist minimal um bis zu  $40\mu\text{m}$  verbogen. Dies führt dazu, dass der Unterschied zwischen dem Anheben und dem Absenken der Last nicht mehr sichtbar sind und die Planeten mit dem in Abbildung 42 dargestellten Profil charakteristisch und auch bei unterschiedlichen Vorspannungen vergleichbar schwingen. In der Simulation wurden deutlich höhere Drehzahlen als im Versuch verwendet. In Kapitel 5.4.3 wird später aufgezeigt, dass die Drehzahl bis ca.  $5000\text{U}/\text{min}$  im Gegensatz zur Axialkraft (Kapitel 5.4.2) nur äußerst geringe Auswirkungen auf das Schränken und Kippen der Planeten hat. Liegt die Axialkraft in der Simulation bei  $2\text{kN}$ , so vergrößert sich der Bereich des Kippens der Planeten deutlich auf  $-0,3$  bis  $+0,3^\circ$ . Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Simulation das Kippen der Planeten sehr gut abbildet.



**Abbildung 43** Kippen aus Simulation mit  $0,6\text{kN}$  Vorspannung,  $1706\text{U}/\text{min}$  und ohne Axialkraft.

Bei dem gegebenen Versuchsaufbau war es leider nicht möglich, die rotative Lage der Sensorarrays zueinander im eingebauten Prüfstand hinreichend genau zu bestimmen. Damit kann im Folgenden für das Schränken nur auf die Schwankung des Schränkens im Versuch eingegangen werden. In der Messung mit den Sensorarrays schwankt das Schränken der Planeten in 95% der Zeit um bis zu ca.  $0,6^\circ$ . In den verbleibenden 5%, die sich immer in der Nähe des Beschleunigens und Abbremsen der Versuche befinden, sind es bis zu  $1,5^\circ$ . In der Simulation ohne Axialkraft liegt die Schwankung der quasistatischen Bereiche bei ca.  $0,2^\circ$  und in der Simulation mit  $2\text{kN}$  Axialkraft bei ca.  $0,6^\circ$ . In den Simulationen beträgt das Schränken immer ein Vielfaches des Kippens und schwankt immer deutlich stärker als das Kippen. Berücksichtigt man den beim

Schränken grundsätzlich größeren möglichen Weg im Vergleich zum Kippen und die Fertigungsabweichungen der Planeten, so bildet die Simulation das Schränken der Planeten gut ab.

Zusätzlich wurde das Schränken und das Kippen noch in der Abschlussarbeit von (A\_Zürn 2017) anhand des Verschleißes an Prüflingen des PWGs 15x2,11 aus Lebensdauerversuchen untersucht. Das Schränken der Planeten konnte dabei anhand der Schädigungen an den PWGs nachgewiesen werden. Für das Kippen sind keine verwertbaren Erkenntnisse aus den Prüflingen vorhanden. Aufgrund der im Vergleich zum Schränken zu geringen Bewegung, ist diese Bewegung nicht im Verschleiß der Komponenten einzeln sichtbar bzw. von anderen Effekten eindeutig trennbar. Auf eine zu den Simulationen vergleichbare Änderung des Kippens beim Drehrichtungswechsel deuten schwache radiale Riefen, wie sie von (A\_Zürn 2017) festgestellt wurden. (A\_Zürn 2017, S. 139–141)

Ein unterschiedliches Verhalten der Planeten – selbst von Planeten des gleichen Typs – konnte bereits in den FEM-Simulationen des PWG15x3 der Abschlussarbeit von (A\_Breining 2016) nachgewiesen werden. Bei geringen Axialkräften wurde dabei ein unterschiedliches Verhalten der Planetentypen aufgezeigt. Je höher die Axialkraft wurde, desto geringer wurden die Unterschiede zwischen den Planetentypen, während die Unterschiede zwischen Planeten des gleichen Typs vergleichbar blieben. (A\_Breining 2016, S. 78–83)

Die Abschlussarbeit von (A\_Zürn 2017) untersucht PWG15x3 nach Schäden aus Lebensdauerversuchen sowie herstellungsbedingte Vorschädigungen. Die von (A\_Breining 2016) gezeigte Beanspruchungsverteilung deckt sich dabei mit den makroskopischen Schädigungen der PWGs aus Lebensdauerversuchen der Arbeit von (A\_Zürn 2017).

In der Abschlussarbeit von (A\_Arnarson 2018) wurden in FEM-Simulationen analog zu den Bedingungen der Referenzsimulation in Adams aufgebaut. Dabei wurde die Vorspannung von 0,6kN und Axialkraft von 10kN der Mehrkörpersimulation übernommen. Es zeigt sich eine hohe Streuung zwischen der Belastung der Planeten: bei manchen liegt die maximale von Mises Spannung bei 833 und bei anderen bei 1110MPa. Dabei ist die Streuung zwischen den Planeten eines Typs deutlich größer als die Streuung zwischen den unterschiedlichen 3 Planetentypen. Dies deckt sich genau mit dem Verhalten der hier zu validierenden Mehrkörpersimulation. (A\_Arnarson 2018, S. 35–39)

Sowohl in den FEM-Simulationen von (A\_Breining 2016) und (A\_Arnarson 2018) wurde unter einer wirkenden Axialkraft die hohe Belastung einer und die niedrige Belastung der anderen Mutter analog zu den Simulationen bestätigt. (A\_Zürn 2017) weist diese Lasterverteilung zwischen den Muttern ebenfalls anhand des Verschleißes der Prüflinge aus Lebensdaueruntersuchungen nach.

Es sind damit alle in diesem Kapitel zu validierenden Eigenschaften des PWGs erfolgreich validiert. Damit können im folgenden Kapitel die zu untersuchenden Parameter der Anwendung und der Geometrie des PWGs ausgewählt werden.

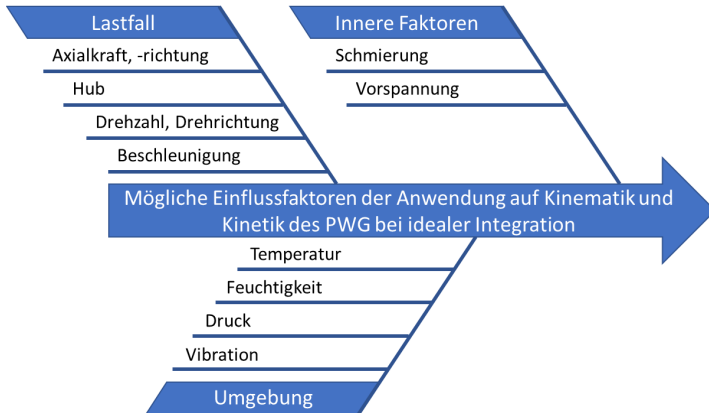
### **5.3 Auswahl zu untersuchender Einflussgrößen aus Anwendung u. Geometrie**

Auf Basis des Stands der Technik und der analysierten und validierten Referenzsimulation sollen nun die zu untersuchenden Parameter der Anwendung und der Geometrie eines PWG ausgewählt werden. Auch wenn die Parameter anhand der Geometrie des PWG15x3 ausgewählt werden, ist es Ziel dieser Arbeit nicht nur die Parameter als Einflussgrößen auf die Kinematik und Kinetik für eine Baugröße, sondern allgemein für PWGs zu ermitteln. Nach der Auswahl und Analyse der Einflussgrößen wird daher die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf andere Baugrößen validiert. Dieses Kapitel teilt sich in einen ersten Teil, in dem die zu untersuchenden Parameter der Anwendung und in einen zweiten Teil, in dem die zu untersuchenden Parameter der Geometrie ermittelt werden.

Für die Anwendung sind unter der Annahme einer idealen Integration mögliche und relevanten Einflussfaktoren in Abbildung 44 dargestellt. Die in Abbildung 44 dargestellten Einflussfaktoren der Anwendung wurden bisher – wie es bereits im Stand der Technik gezeigt wurde – für PWGs noch nicht systematisch auf ihre Auswirkungen auf die Kinematik und Kinetik des PWGs untersucht. Die Einflussfaktoren lassen sich dabei in drei Cluster Lastfall, innere Faktoren und Umgebung gliedern. Entsprechend dieser drei Cluster sollen nun die möglichen zu untersuchende Einflussfaktoren diskutiert werden.

Die ersten und im Normalfall wichtigsten zu untersuchenden Faktoren für die Auslegung von Linearantrieben sind die Profile der benötigten Axialkraft und der Drehzahl sowie der geforderte Hub aus dem Cluster Lastfall. Damit sind diese drei mögliche, zu untersuchende Einflussfaktoren. Von den Auswirkungen des Hubes auf die Mehrkörpersimulationen mit Starrkörpern wird erwartet, dass ab einem gewissen Mindesthub die Planeten bzw. die ganze Simulation eingeschwungen ist und ein noch höherer Hub in

der Simulation keine weiteren Erkenntnisse liefert. Diese Annahme bestätigt sich in der Referenzsimulation (Kapitel 5.1): sehr schnell, auch nach schlagartigen Lastwechseln, ist die Simulation eingeschwungen. Für eine Untersuchung des Hubes verbleiben damit nur Sonderfälle der Anwendung im Bereich eines extremen Kurzhubes und daher wird in dieser Arbeit auf Untersuchung des Hubes verzichtet und hinreichend große Hube verwendet, um eingeschwungene Simulationen zu erhalten.



*Abbildung 44 Mögliche Einflussfaktoren der Anwendung auf Kinematik und Kinetik des PWG bei idealer Integration*

Die geforderte Beschleunigung ist meist Teil des Drehzahlprofils und der wirkenden Gegenkräfte (Axialkräfte) der jeweiligen Anwendung und wird daher in dieser Arbeit ebenfalls nicht als Einflussfaktor untersucht. Aus dem Cluster Lastfall sollen damit in dieser Arbeit die Einflussfaktoren Axialkraft und Drehzahl untersucht werden. Sowohl für die Axialkraft als auch für die Drehzahl werden unterschiedliche Werte als auch jeweils beide mögliche Richtungen untersucht. Die Untersuchung aller Richtungen ist dabei aufgrund der Asymmetrie der Planeten (vgl. Kapitel 2.1) und daraus etwaigen resultierenden Unterschieden der Kinematik und Kinetik bei den unterschiedlichen Richtungen der Axialkraft und der Drehrichtung nötig.

Bei idealer Integration enthält das Cluster innere Faktoren die Einflussfaktoren Schmierung und Vorspannung. Für die Schmierung wären vor allem die Schmierstoffverteilung im PWG und die Auswirkungen der Schmierung auf die Kontakte zu untersuchen. Es existiert bereits eine Vielzahl an allgemeingültigen Modellen für die Auswirkung einer Schmierung in Kontakten. Relevant für diese ist allerdings wieviel Schmierstoff im

jeweiligen Kontakt (ggf. auch neben dem Kontakt) vorhanden ist und wie sich die Kontaktpartner zueinander bewegen. Die Verteilung des Schmierstoffes im PWG wurde bisher genauso wenig untersucht wie die detaillierte Kinematik und Kinetik des PWGs unter unterschiedlichen Einflussfaktoren. Damit ist die Anwendung der bestehenden Modelle für die Auswirkungen der Schmierung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Die Ergebnisse dieser Arbeit können allerdings als Grundlagen für die Anwendung besagter Modelle auf den PWG in nachfolgenden Untersuchungen verwendet werden.

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, wirkt der PWG als Reibradgetriebe und benötigt daher eine Vorspannung für eine definierte Übersetzung auch ohne eine wirkende Axialkraft. Damit ist die Vorspannung ein zentraler zu untersuchender Parameter. Die Vorspannung ist von den genannten Größen auch die einzige Größe, die unabhängig von der Anwendung selbst eingestellt werden kann, um in der Anwendung ein optimales Verhalten zu erreichen.

Von den genannten Einflussfaktoren der Umgebung können in Mehrkörpersimulationen mit Starrkörpern die Auswirkungen des Drucks, der Temperatur und der Feuchtigkeit nicht sinnvoll untersucht werden. Die sinnvolle Untersuchung dieser Parameter erfordert u.a. flexible Körper und rechentechnisch um ein Vielfaches aufwendigere Modelle. Ggf. auftretende Vibrationen aus der Umgebung sind in ihrem Schwingungsprofil, ihrer Amplitude und ihren Frequenzen sehr anwendungsspezifisch. Aufgrund der hohen Anwendungsspezifität und der in vielen Anwendungen des PWG geringeren Relevanz als die anderen zu untersuchenden Einflussfaktoren wird in dieser Arbeit auf eine Untersuchung der Auswirkungen von extern entstandenen Vibrationen auf den PWG verzichtet.

Von den in Abbildung 44 dargestellten Einflussfaktoren der Anwendung werden in dieser Arbeit Vorspannung, Axialkraft und Drehzahl auf ihre Auswirkungen auf die Kinematik und Kinetik des PWGs untersucht. Im Folgenden sollen nun die zu untersuchenden Einflussfaktoren der Geometrie des PWGs ausgewählt werden.

Betrachtet man den Kraftfluss durch die PWG, so werden hochbelastete und niedrigbelastete Bereiche der PWG-Komponenten ersichtlich. Abbildung 45 zeigt, dass bei einer wirkenden Axialkraft diese über die Windungen an der Spindel (2) und über die Windungen an den Muttern (1) abgestützt wird. Mit (3) sind die Distanzscheiben bezeichnet, die die Vorspannung im PWG zusammen mit der Anwendung einstellen bzw. begrenzen. Mit (6) sind die sogenannten Krüppelzähne im Bild markiert. Diese sind





unveränderten Planeten aber längere Planeten. Daher wird die Erhöhung der Windungsanzahl in einer zusätzlichen Rechnung in der Simulationsreihe mit der Verlängerung der Planeten geprüft.

Zentrale Kenngrößen eines Gewindes sind Flankenform, Flankenwinkel, Nenndurchmesser, Kerndurchmesser, Steigungswinkel und Teilung. Aus diesen sollen im Folgenden weitere zu untersuchende Parameter abgeleitet werden. Der PWG besitzt an den Muttern und der Spindel gerade Flanken und an den Planeten Flanken mit einer Balligkeit. Ohne eine Balligkeit an den Planeten, würde die Bohrreibung durch die dann sehr großen Kontaktflächen zu einem extremen Verschleiß an den Flanken führen. Wären beide Flächen ähnlich zu zwei aufeinanderliegenden Kugeln ballig, so wäre ein sehr instabiles Verhalten der Planeten in ihrer Bewegung die Folge. Für die Stabilität der Bewegung ist es am besten, wenn die Balligkeit zu gering wie möglich aber noch hoch genug ist, um die eine niedrige Bohrreibung zu erreichen. Nachdem hier das Optimum schon aus der Arbeit von (Balázs 1999) bekannt ist, wird die Balligkeit der Flanken in dieser Arbeit nicht variiert.

Für die Stabilität der Bewegung der Planeten und Richtung mit denen die Kräfte in die Muttern, Planeten und Spindel in jeder Flanke eingeleitet werden, ist der Flankenwinkel an den belasteten Windungen von (1) und (2) von besonderer Bedeutung. Damit ist er ein weiterer Faktor, der in den Simulationen untersucht werden soll. Der Winkel bestimmt das Verhältnis, in dem eine axiale Verschiebung eine radiale Verschiebung entlang der Zahnflanke bewirkt. Ist der Flankenwinkel bspw. sehr klein, die Flanken damit nahezu senkrecht zur Spindel, so ist es dem Planeten deutlich einfacher, sich radial als axial zu bewegen. Ist der Flankenwinkel sehr groß, so ist es umgekehrt. Um die Anzahl an nötigen Simulationen zu begrenzen, werden in dieser Arbeit die Flankenwinkel an den Muttern und der Spindel gleich zur Änderung an den Planeten geändert. Damit bleiben die Flanken an der Spindel und den Muttern immer parallel zu den Flanken der Planeten, sofern sich die Planeten achsparallel zur Spindel bewegen.

Die Übersetzung des PWGs beruht auf dem Verhältnis der Wälzkreisdurchmesser der einzelnen Bestandteile. Damit ist ein weiterer Parameter der Untersuchung die Variation des Verhältnisses der Wälzkreisdurchmesser. Um näherungsweise ähnlich zur Referenzgeometrie im Bezug zur Festigkeit zu bleiben, ist es daher sinnvoll, für eine Änderung der Wälzkreisdurchmesser den Nenndurchmesser und den Kerndurchmesser gleichermaßen zu ändern, um die Zahnhöhe konstant zu halten.

Um den Bauraum möglichst effizient zu nutzen, sollte die Breite der Windungen so gering wie möglich sein. Die (Mindest-)Breite einer Windung wird vor allem für die geforderte Festigkeit z.B. gegen einen Gewaltbruch der Windung benötigt. Die Festigkeit kann in Starrkörpersimulationen nicht sinnvoll untersucht werden und damit ist es wenig sinnvoll, in diesen Simulationen die Breite der Windungen zu variieren.

Die Spindel ist der einzige Bestandteil im PWG mit einer Steigung  $\neq$  Null. Gleichzeitig ist sie der einzige Bestandteil, bei dem die Steigung geändert werden kann, ohne die Funktionsweise des PWGs komplett zu ändern. Bleibt die Breite der Windungen konstant, so kann der Steigungswinkel an der Spindel nur über die Variation der Spindelsteigung um ein ganzzahliges Vielfaches der Windungsbreite geändert werden. Werden weiterhin die gleichen Planeten verwendet, so ändert sich mindestens einer der folgenden Parameter: jeweils die Anzahl an verbauten Planeten von jedem Planetentyp und die Orientierung der eingebauten Planeten. Die Orientierung muss dabei nicht für alle Planeten vom gleichen Typ gleich sein. Eine Änderung der Spindelsteigung führt gleichzeitig auch zu einer Änderung der Übersetzung im PWG. Nachdem die Änderung der Spindelsteigung damit mehrere Folgeänderungen bedingt und die Auswirkungen der Folgeänderungen noch unbekannt sind, wird in dieser Arbeit die Spindelsteigung nicht variiert. Es wäre unklar, ob eine Folgeänderung oder die Änderung der Spindelsteigung die Ursache von Effekten ist.

In den Spindel-Planetenkontakten rollt eine Komponente mit einer Steigung auf einer ohne eine Steigung ab. Dies induziert eine Schräknbewegung. Dahingegen drücken die Mutterkontakte den Planeten in eine zur Spindel achsparallele Bewegung, denn beide Körper besitzen keine Steigung. Eine Verringerung dieser Verspannung ist denkbar, wenn die Planeten in den Spindelkontakten mit einer Steigung versehen werden. In der Variation der Geometrie sollen daher auch Planeten mit einer Steigung untersucht werden.

Um die Effekte auf ihre Allgemeingültigkeit – die Übertragbarkeit auf andere PWGs – zu überprüfen, sollen noch weitere Baugrößen untersucht werden. Gewählt wurden dazu PWG09x3 und PWG25x2. Der PWG09x3 besitzt ebenfalls, wie der als Referenz verwendete PWG15x3, eine dreigängige Spindel aber nur die Planetentypen 31 und 51. Der PWG25x2 wurde gewählt, da er der momentan Größte von Schaeffler angebotene PWG ist. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020) Nach Analyse aller anderen zu untersuchenden Einflussfaktoren soll aus diesen der am besten geeignete

Einflussfaktor zur Validierung der Übertragbarkeit der Simulationen auf andere Baugrößen ausgewählt werden.

In der Tabelle 7 werden im Simulationsplan die zu untersuchenden Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik mit dem ausgewählten zu untersuchenden Wertebereich zusammenfassend dargestellt. In der Variation der Planetenlänge ist dabei eine Simulation mit zusätzlichen Windungen an den verlängerten Planeten enthalten. Die Anzahl an Simulationen bei der Variation der PWG-Baugröße wird später bestimmt, denn dafür muss noch der dabei zu untersuchende Einflussfaktor ausgewählt werden.

Alle durchzuführenden Simulationen sind dabei Abwandlungen der Referenzsimulation aus Kapitel 5.1. Zu einzelnen Einflussgrößen der Anwendung und der Geometrie werden in Stichproben Versuche an den Prüfständen zur Validierung und Erweiterung der Erkenntnisse durchgeführt.

*Tabelle 7 Simulationsplan der Mehrkörpersimulationen*

	Untersuchte Einflussgröße	Variation		
		Minimum	Maximum	Anzahl an Simulationen
<b>Variation Anwendung</b>	Vorspannung	-4,0kN	4,0kN	11
	Axialkraft	0,0kN	12,0kN	7
	Drehzahl	400U/min	10000U/min	9
<b>Variation Geometrie</b>	Radialspiel	-10µm	70µm	7
	Planetenlänge - zusätzliche Länge	0,0mm	10,0mm	6
	Flankenwinkel - Änderung der Muttern- und der Spindelkontakte in unterschiedlichen Kombinationen	-5,0°	5,0°	25
	Übersetzungsverhältnis - Durchmesseränderung an den Planeten	0,0mm	0,3mm	4
	Steigung an den Planeten	1,03mm/U	1,03mm/U	1
	PWG-Baugröße	PWG09x3	PWG25x2	-

## 5.4 Variation der Anwendung

Im Folgenden sollen die Auswirkungen der zuvor gewählten Parameter der Anwendung des PWGs an Kinematik und Kinetik der Referenzgeometrie analysiert werden. Daher werden in Kapitel 5.4.1 die Vorspannung, in Kapitel 5.4.2 die Axialkraft und in Kapitel 5.4.3 die Drehzahl untersucht. Um die Menge der anschließenden Simulationen einzuschränken, wird in Kapitel 5.4.4 aus den untersuchten Parametern der Anwendung ein

Parametersatz – also eine Vorspannung, eine Axialkraft und eine Drehzahl – ausgewählt mit dem die Parameter der Variation der Geometrie untersucht werden.

### 5.4.1 Vorspannung

In dieser aus 11 Simulationen bestehenden Simulationsreihe wurde die Referenzgeometrie des PWGs analog zu Kapitel 5.1 mit Vorspannungen zwischen -3,9 und +4,0kN simuliert. Ohne äußere Last ziehen negative Vorspannungen die Muttern auseinander und führen daher zu einer O-Anordnung der Kontakte der Planeten mit den Muttern. Analog schieben positive Vorspannungen die Muttern zusammen und führen zu einer X-Anordnung der Kontakte der Planeten mit den Muttern. Die Standardabweichung wird in den folgenden Schaubildern durch die zusätzlichen schwarzen Balken am Ende der jeweiligen Größe dargestellt.

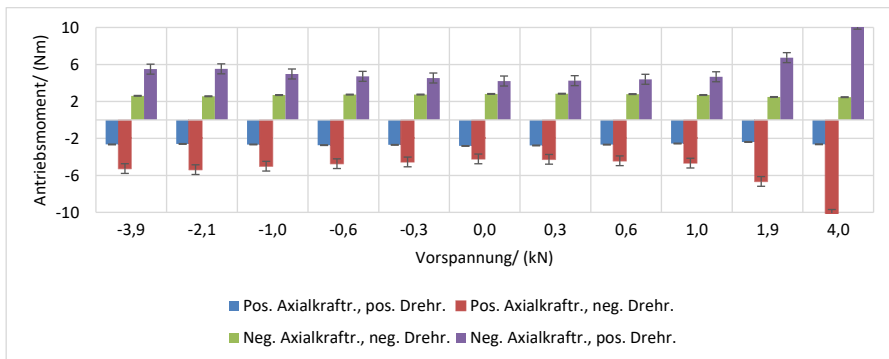


Abbildung 46 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben.

Das Verhalten des mittleren Drehmomentes je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung wird in Abbildung 46 dargestellt. Wie erwartet lässt sich über die Vorspannung der Systemwirkungsgrad des PWG einstellen. Je höher der Betrag der Vorspannung desto geringer das benötigte Bremsmoment beim Senken der Last und desto höher das benötigte Antriebsmoment zum Anheben der Last. Beim Absenken einer Last – also bspw. unter positiver Axialkraftrichtung und positiver Drehrichtung – liegt das mittlere Drehmoment zwischen 2,39 und 2,84Nm je nach Vorspannung. Beim Anheben einer Last liegt das mittlere Drehmoment zwischen 4,21 und 10,35Nm je nach Vorspannung. Optimal, d.h. mit dem geringsten benötigten mittleren

Antriebsmoment, sind die Simulationen mit 0,0 bzw.  $\pm 0,3$  kN Vorspannung. Besonders wichtig sind dabei die folgenden zwei Asymmetrien:

1. O- und X-Anordnung verhalten sich nicht spiegelsymmetrisch – die benötigten Antriebsmomente beim Anheben der Last nehmen mit zunehmender X-Anordnung deutlich stärker zu als mit zunehmender O-Anordnung.
2. Die benötigten Antriebsmomente durch im Betrag zunehmende Vorspannung steigen beim Anheben der Last um einen deutlich größeren Faktor an, als dabei die Haltemomente beim Absenken der Last abnehmen.

Ursache für diese beiden Asymmetrien sind die Bewegung der Planeten in Kombination mit den wirkenden Kräften im PWG. Ursache für die Asymmetrie 1 sind vor allem die später diskutierten radialen Kräfte im PWG. Die Beträge der benötigten Antriebsmomente zum Anheben der Last folgen qualitativ den radialen Kräften zwischen der Spindel und den Planeten (vgl. spätere Abbildung 51). Die großen Unterschiede der mittleren radialen Kräfte werden durch das sehr unterschiedliche Verhalten der Planeten beim Kippen und Schränken der X-Anordnung im Vergleich zur O-Anordnung bei hohen Vorspannungen möglich. Die Unterschiede der Kipp- und Schränkwinkel der Planeten beim Anheben und Absenken der Last sowie andere Richtungen der wirkenden Kräfte sind die Ursache für die Asymmetrie 2. Die Kipp- und Schränkwinkel werden später in diesem Kapitel diskutiert.

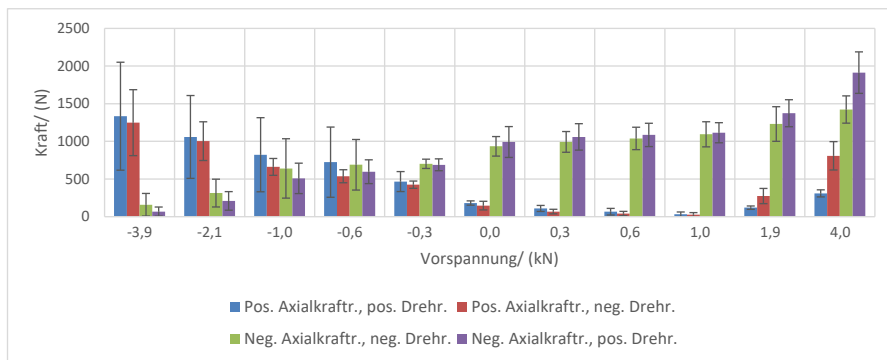


Abbildung 47 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung

In Abbildung 47 wird die mittlere in x-Richtung wirkende Kraft zwischen den Planeten und Mutter 1 dargestellt. Analog zum Drehmoment sind die geringsten Kräfte bei niedrigen Vorspannungen. Bei negativer Axialkraftrichtung nimmt die Belastung an Mutter 1 mit ansteigender Vorspannung streng monoton zu. Hingegen bei positiver Axialkraftrichtung nimmt sie zwischen  $-3,9\text{kN}$  und  $1,0\text{kN}$  Vorspannung streng monoton ab und steigt zwischen  $1,0\text{kN}$  und  $4,0\text{kN}$  wieder streng monoton an. Sowohl bei O-Anordnung (Vorspannung  $< 0\text{N}$ ) als auch bei X-Anordnung (Vorspannungen  $> 0\text{N}$ ) sind die betragsmäßig geringeren Vorspannungen mit deutlich geringeren maximalen Kräften (je nach Richtung der Axialkraft) verbunden. Der Unterschied zwischen Anheben und Absenken einer Last nimmt bei einer X-Anordnung ab  $1,0\text{kN}$  Vorspannung mit steigender Vorspannung deutlich zu. In den Simulationen mit Vorspannungen zwischen  $-1,0\text{kN}$  und  $-0,3\text{kN}$  sind dabei die Unterschiede zwischen beiden Axialkraftrichtungen am geringsten – hier werden also beide Muttern ähnlich belastet. Dies wird in Abbildung 48 im Schaubild für Mutter 2 als auch in den Kapiteln 6.1.1 und 6.2.1, in denen Kontaktkräfte und Wälzkreise bei unterschiedlichen Vorspannungen diskutiert werden, bestätigt. Bei  $-0,6\text{kN}$  Vorspannung sind dabei die Unterschiede zwischen beiden Axialkraftrichtungen am geringsten. Ursache für die gleichmäßige Belastung der Muttern ist ihre axiale Positionierung aufgrund der Vorspannung. Bei einer passenden Axialkraft können dadurch die Flanken beider Muttern belastet werden.

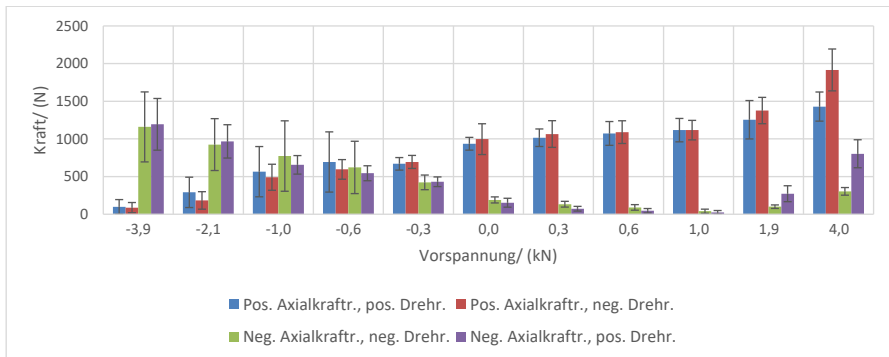
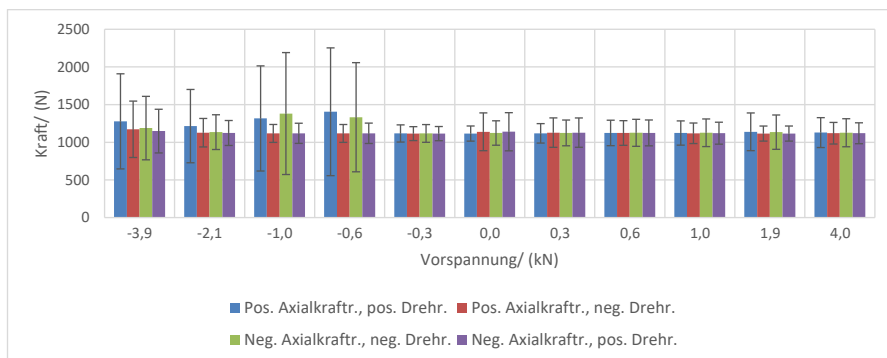


Abbildung 48 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 2 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung

Das Schaubild des Mittels der Kraft in x-Richtung zwischen den Planeten und Mutter 2 (Abbildung 48) zeigt die genau gleichen Tendenzen wie Mutter 1 aber mit vertauschtem

Verhalten der Axialkraftrichtungen. Der Vergleich beider Schaubilder zeigt die Änderung der höchstbelasteten Mutter 1 in Abhängigkeit der Anordnung: Im Bereich der O-Anordnung wird bei positiver Axialkraftrichtung Mutter 1 höher belastet als Mutter 2. Im Bereich der X-Anordnung ist es genau umgekehrt – hier wird bei positiver Axialkraftrichtung Mutter 2 höher als Mutter 1 belastet. Bei negativer Axialkraftrichtung ist es wieder genau umgekehrt. Hier wird bei einer O-Anordnung die Mutter 2 und bei einer X-Anordnung die Mutter 1 höher belastet als die jeweils andere Mutter.

Bei beiden Muttern nimmt die Standardabweichung tendenziell mit dem Betrag der Vorspannung zu. Besonders deutlich ist die hohe Standardabweichung für die O-Anordnung mit einer Vorspannung  $\leq -0,6\text{kN}$ : Sie ist um ein Vielfaches höher als bei den X-Anordnungen bzw. der O-Anordnung mit  $-0,3\text{kN}$  Vorspannung. Damit ist das Verhalten des PWGs bei starken Vorspannungen in der O-Anordnung ab  $-0,6\text{kN}$  Vorspannung sehr instabil. Dies zeigt sich auch in den in Kapiteln 6.1.1 diskutierten Kontaktkräften bei unterschiedlichen Vorspannungen.



*Abbildung 49* Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung

Im Gegensatz zu den Muttern ist das Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen den Planeten und der Spindel bis auf wenige Ausnahmen unabhängig von der Vorspannung konstant (vgl. Abbildung 49). Bei den O-Anordnungen mit  $-0,6$  und  $-1,0\text{kN}$  Vorspannung ist das Mittel der Kraft beim Absenken der Last deutlich erhöht. Deutlich schwächer ist dieser Effekt auch bei den O-Anordnungen mit  $-2,1$  und  $-3,9\text{kN}$  Vorspannung zu sehen. Während die Standardabweichungen bei den X-Anordnungen sich zwischen  $125$  und  $250\text{N}$  befinden, sind sie bei der O-Anordnung mit bis zu  $750\text{N}$  deutlich

höher. Ursache für die hohen Standardabweichungen ist das bereits zuvor bei den Muttern diskutierte instabile Verhalten des PWG.

Im Folgenden wird auf die mittleren radialen Kräfte eingegangen. Bei diesen handelt es sich um zwischen der Spindel bzw. den Muttern und den Planeten jeweils radial wirkenden Kräfte. Dabei geht die Richtungsinformation bei der Mittelung verloren. D.h. mittlere radiale Kräfte von 400N zwischen der Spindel und den Planeten bedeuten, dass zwischen jedem Planeten und der Spindel radial im Mittel eine Kraft von 400N wirkt. Durch die Symmetrie des PWGs gleichen sich diese Kräfte durch die gleichmäßige Verteilung der Planeten um die Spindel im statischen Fall aus. Im dynamischen Fall können unausgeglichene Querkräfte entstehen.

Im Gegensatz zum Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Mutter 1 nehmen die mittleren radialen Kräfte zwischen den Planeten und Mutter 1 für eine negative Axialkraftrichtung nur von -0,3kN bis +4,0kN Vorspannung zu und sind zwischen -0,3kN bis -3,9kN Vorspannung näherungsweise konstant (vgl. Abbildung 50). Der näherungsweise konstante Bereich entsteht durch eine Umverteilung der übertragenen radialen Kräfte zwischen den Muttern aufgrund der unterschiedlichen axialen Position der Muttern. Bei positiver Axialkraft nehmen die mittleren radialen Kräfte zwischen -3,9kN und 1,0kN streng monoton ab und nehmen zwischen 1,0kN und 4,0kN wieder streng monoton zu. Mutter 2 verhält sich bei den Kräften in x-Richtung analog zu Mutter 1 aber mit vertauschtem Verhalten der Axialkraftrichtungen.

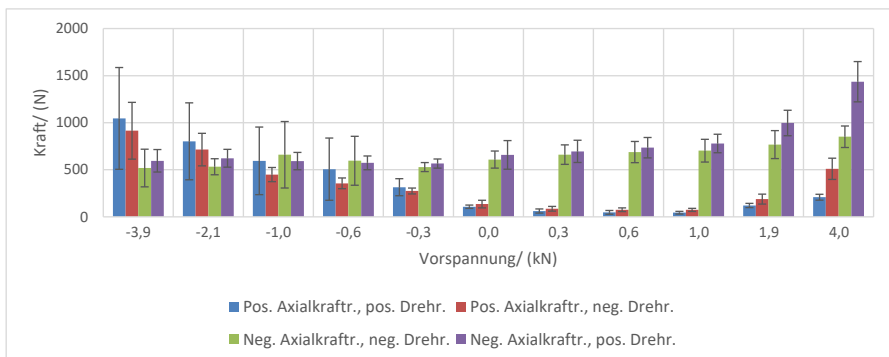
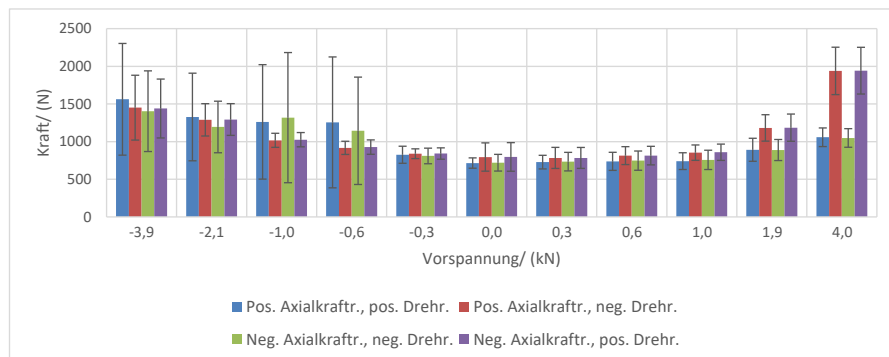


Abbildung 50 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung



Die radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten verhalten sich wie die Summe der radialen Kräfte zwischen den Muttern und den Planeten. Dies entspricht auch genau der Kinematik des PWGs: die radialen Kräfte zwischen der Mutter und den Planeten drücken die Planeten nach innen auf die Spindel. Im Gegensatz zur Kraft in x-Richtung sind die mittleren radialen Kräfte zwischen den Planeten und der Spindel deutlich abhängig von der Vorspannung. Je höher der Betrag der Vorspannung desto größer die radialen Kräfte. In der X-Anordnung steigen mit steigender Vorspannung ab 0,3kN die radialen Kräfte und auch die dazugehörigen Standardabweichungen zum Anheben der Last sehr deutlich. Die extrem hohen mittleren radialen Kräfte bei der Vorspannung von 4,0kN beim Anheben der Last entstehen durch eine Änderung des Bewegungsverhaltens des PWGs. Wie die spätere Abbildung 52 zeigt, ist diese Vorspannung die einzige, bei der das Kippen der Planeten nicht der Axialkrafttrichtung sondern der Drehrichtung folgt. Analog zu den Kräften in x-Richtung sind auch bei den radialen wirkenden Kräften in der O-Anordnung sehr hohe Standardabweichungen zu sehen. (vgl. Abbildung 51)



*Abbildung 51* Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkrafttrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung

In den hier gezeigten Simulationen nimmt das Kippen in der O-Anordnung linear mit dem Betrag der Vorspannung zu (vgl. Abbildung 52). In der X-Anordnung nehmen die Kippwinkel bis zu einer Vorspannung von 1,0kN zu und danach wieder ab. Ohne eine Vorspannung ist der Betrag der Kippwinkel der Planeten  $<0,1^\circ$ . Die Kipprichtung ist dabei bis auf die Simulation mit 4kN Vorspannung rein abhängig von der

Axialkraftrichtung und der Anordnung: Eine Änderung der Richtung der Axialkraft oder der Wechsel zwischen einer X- und einer O-Anordnung ändert die Richtung des Kippens.

Die möglichen Winkel des Kippens sind abhängig von der axialen Position der Muttern zueinander (eingestellt durch die Vorspannung) und dem sich einstellenden Schränken der Planeten. Bei der O-Anordnung – insbesondere bei den hohen Vorspannungen – sind die Kippwinkel größer denn dabei sind die Winkel des Schränkens (vgl. Abbildung 53) geringer. Umgekehrt ändern sich in der X-Anordnung die Winkel des Kippens eher wenig denn mit steigender Vorspannung in der X-Anordnung nimmt das Schränken der Planeten stark zu.

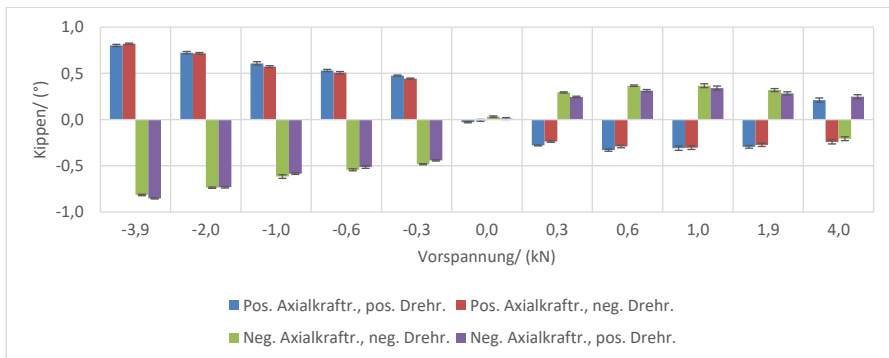
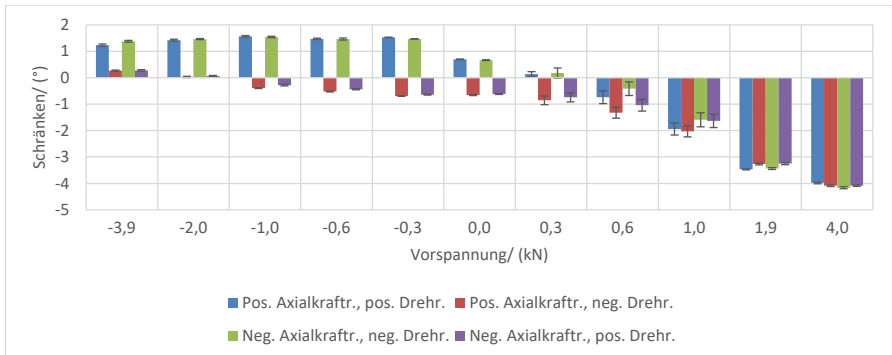


Abbildung 52 Mittleres Kippen der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung

Das Schränken der Planeten ist in der Abbildung 53 dargestellt. Hier sind drei weitere wichtige Effekte zu sehen:

1. Beim Absenken der Last und einer O-Anordnung bis zu einer schwachen X-Anordnung mit 0,3kN Vorspannung schränken die Planeten gegen die Steigung der Spindel, während sie in der X-Anordnung mit Vorspannungen größer 0,3kN mit der Steigung der Spindel schränken.
2. Exklusiv der O-Anordnungen mit -2,0 und -3,9kN Vorspannung schränken die Planeten beim Anheben der Last mit der Steigung der Spindel. Mit zunehmender Vorspannung nimmt dabei das Schränken zu
3. Am höchsten sind die Standardabweichungen des Schränkens bei den X-Anordnungen zwischen 0,3 und 1,0kN Vorspannung. Bei diesen Vorspannungen sind

die zuvor gezeigten Schwankungen der Kräfte am geringsten. Bei diesen Vorspannungen wird den Planeten also ermöglicht, die Last zwischen ihnen durch kleine Bewegungen am besten zu verteilen



**Abbildung 53** Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Vorspannung

Zusammenfassend ergeben sich folgende Einflüsse der Vorspannung auf den PWG:

- Der Wirkungsgrad des PWG kann in gewissen Grenzen über die Vorspannung eingestellt werden
- Abhängig von der Axialkraft kann über die Vorspannung eingestellt werden ob hauptsächlich eine Mutter trägt oder beide Muttern ähnlich tragen. In einer O-Anordnung zwischen -1,0 und -0,3kN sind beide Muttern in den mittleren Lasten ähnlich belastet.
- O-Anordnungen neigen zu hohen Kraftschwankungen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn beide Muttern ähnlich belastet sind. Bei X-Anordnungen sind die Kraftschwankungen deutlich geringer – zwischen 0,3 und 1,0kN Vorspannung können die Planeten durch eine erhöhte Varianz ihres Schränkens Kraftspitzen sehr gut minimieren.
- In der O-Anordnung ändert sich über die Vorspannung vor allem das Kippen der Planeten und das Schränken ändert sich in deutlich geringerem Maße. In der X-Anordnung hingegen ändert sich vor allem das Schränken der Planeten und das Kippen ändert sich im Vergleich eher in geringem Maße.

### 5.4.2 Axialkraft

Ausgehend von der Referenzsimulation (Kapitel 5.1) wurde die Axialkraft zwischen 0 und 12kN variiert. Die Berechnung mit 10kN Axialkraft ist dabei das Ausgangsmodell mit der die Referenzgeometrie analysiert wurde.

In Abbildung 54 wird das benötigte Antriebsmoment in Abhängigkeit der Axialkraft, der Axialkraftrichtung und der Drehrichtung dargestellt. Ohne eine wirkende Axialkraft ist das in beide Drehrichtungen gleiche Grundreibmoment des PWGs von 0,23Nm ersichtlich. Danach steigt mit steigender Axialkraft das benötigte Drehmoment erwartungsgemäß fast perfekt linear an (gestrichelte Geraden im Schaubild) – denn die Systemsteigung bleibt unabhängig von der Stärke der Axialkraft gleich. Dies konnte in Versuchen (vgl. Abbildung 55) bestätigt werden. Trotz hoher Schwankung der auf den PWG wirkenden Axialkraft zwischen 2,2 und 5,2kN stellt sich bei konstanter Drehgeschwindigkeit der Spindel eine nahezu perfekt konstante Vorschubgeschwindigkeit der Muttern ein. Aus dem idealen Antriebsmoment und den benötigten Antriebsmomenten in der Simulation ergeben sich für Axialkräfte > 0kN Wirkungsgrade zwischen 69 und 78%. Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020) sollten 69% erreicht werden.

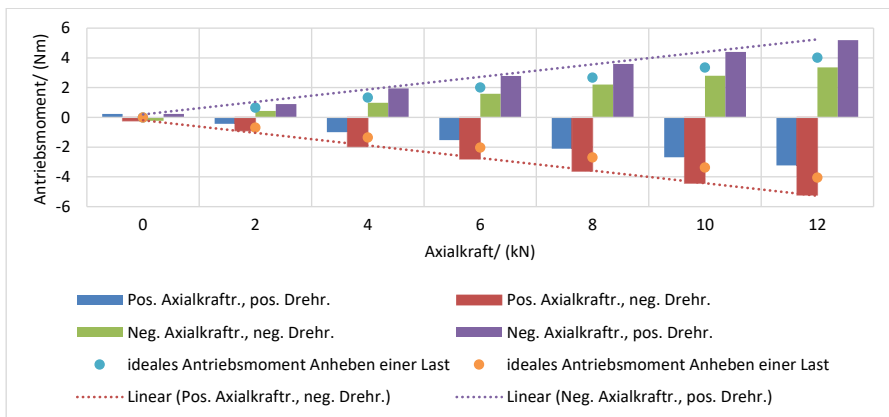


Abbildung 54 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben. Die Punkte stellen das ideale Antriebsmoment (100% Wirkungsgrad) dar.

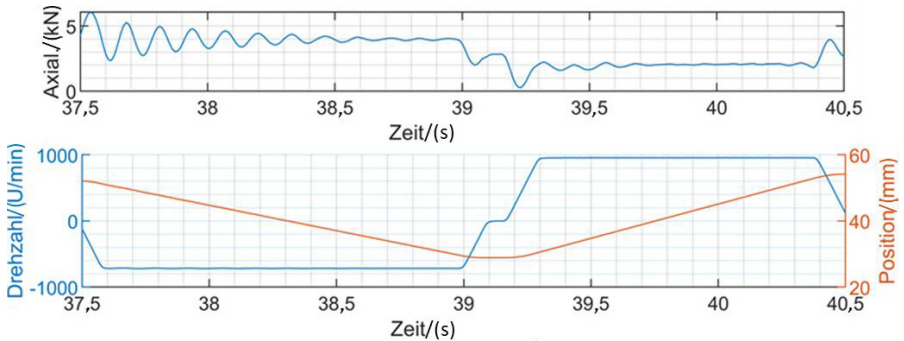


Abbildung 55 Auszug Versuche mit PWG15x3: Axialkraft (oben), Antriebsdrehzahl der Spindel (unten, blau) und translatorische Position der Muttern zur Spindel (unten, rot)

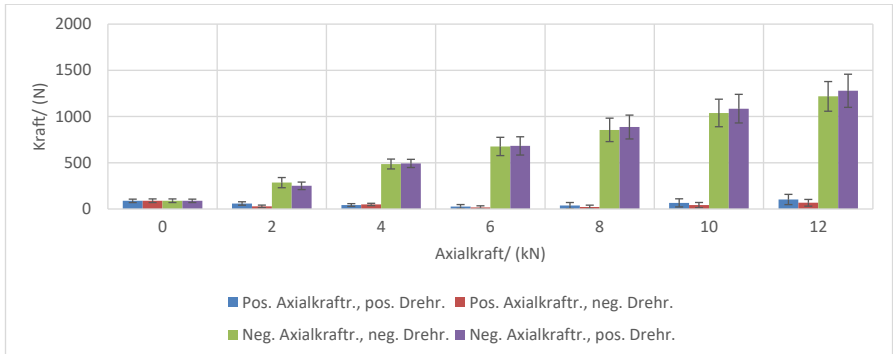
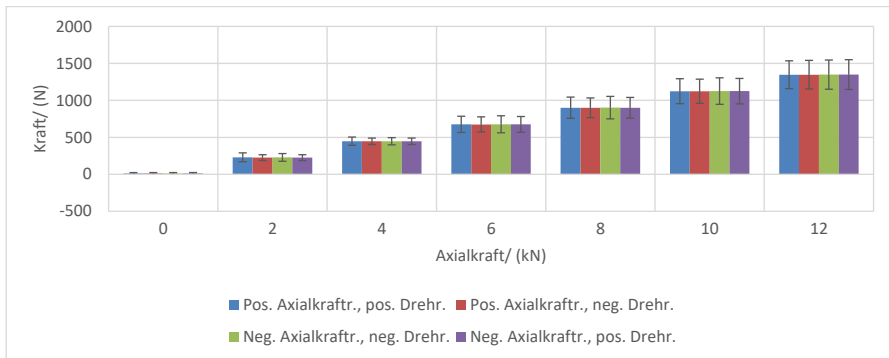


Abbildung 56 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft

Die zwischen Mutter 1 und den Planeten in x-Richtung wirkende Kraft nimmt in sehr guter Näherung mit der Axialkraft linear zu (vgl. Abbildung 56). Gleichzeitig nimmt die Standardabweichung dieser Kraft mit der Axialkraft von ca. 12 N auf 193N zu. Dies entspricht je nach Simulation zwischen 9,8 und 17,5% der Kraft, die der Planet bei gleichmäßiger Aufteilung der Axialkraft auf alle Planeten übertragen sollte. Mit steigender Axialkraft werden die Planeten beim Anheben der Last axial immer ungleichmäßiger belastet. Auffällig ist, dass bei 2kN Axialkraft die Planeten im Kontakt mit Mutter 1 beim Absenken der Last leicht höher belastet werden als beim Anheben. Begründet liegt dieser Unterschied in der Lastverteilung zwischen den Muttern und der Spindel:

Abhängig von den Kontaktkräften, Kontaktkraftrichtungen und dem Schrägen und Kippen der Planeten verschiebt sich diese. Die Vorspannung von 0,6kN ist bei 2,0kN Axialkraft bereits deutlich überdrückt – es wird, wie erwartet, bei einer Axialkraftrichtung hauptsächlich eine Mutter belastet. Für Mutter 1 ist dies wieder bei der negativen und für Mutter 2 bei der positiven Axialkraftrichtung der Fall. Die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 2 und den Planeten verhalten sich analog zu den Kräften an Mutter 1. Aufgrund der im Verhältnis äußerst geringen Kräfte wird hier und auch später bei Mutter 2 nicht näher auf die Bereiche eingegangen, in denen die jeweilige Mutter niedrig belastet ist.

Die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten unterscheiden sich nur aufgrund der Axialkraft und nicht aufgrund der Drehrichtung oder Axialkraftrichtung. Analog zu den Müttern nimmt die Standardabweichung mit steigender Axialkraft zu (vgl. Abbildung 57).



*Abbildung 57 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft*

Die mittleren radial wirkenden Kräfte zwischen den Müttern und den Planeten sind analog zu den in x-Richtung wirkenden Kräften. Diese radial wirkenden Kräfte sind dabei immer ca. 67% der in x-Richtung wirkenden Kräfte – genau passend zu den Erwartungen durch den Flankenwinkel der Referenzgeometrie. Obwohl die radial wirkenden Kräfte deutlich kleiner als die in x-Richtung wirkenden Kräfte sind, ist Standardabweichung beider gleich. (vgl. Abbildung 58 für Mutter 1)

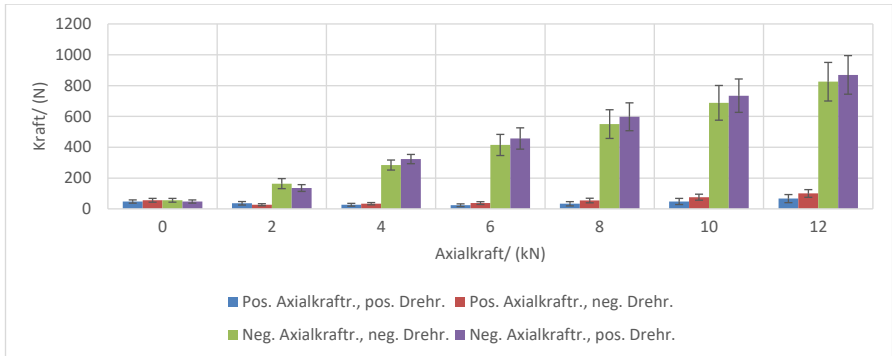


Abbildung 58 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft

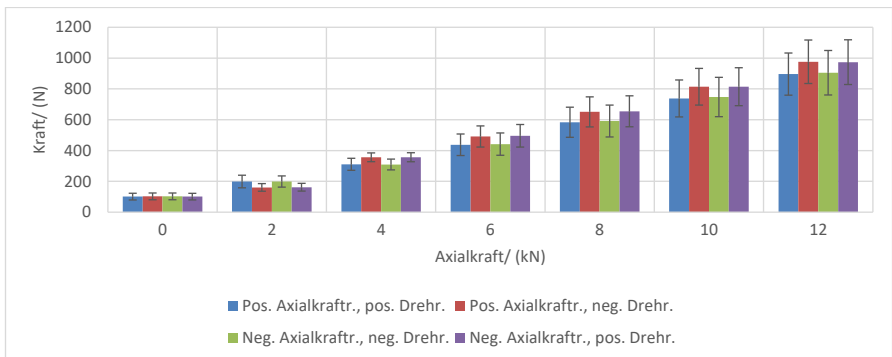
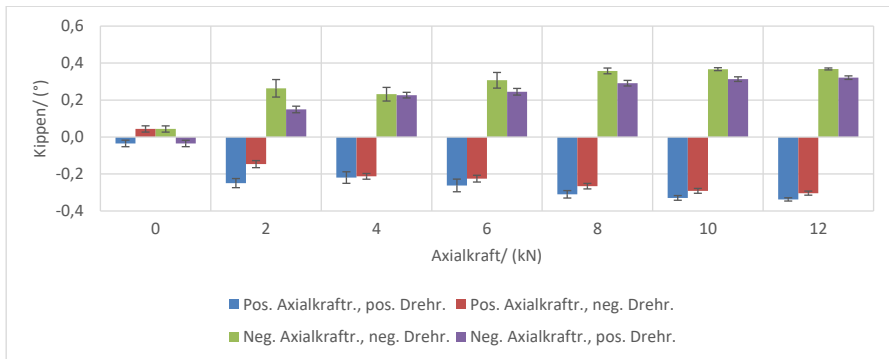


Abbildung 59 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft

Grundsätzlich sind die radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten sehr ähnlich in ihrem Verhalten zu den in x-Richtung wirkenden Kräfte zwischen diesen Körpern (vgl. Abbildung 59). Ähnlich zu den Kräften an den Müttern sind diese radial wirkenden Kräfte ca. 72% der in x-Richtung wirkenden Kräfte. Im Gegensatz zu den Kräften in x-Richtung zeigt sich bei den radial wirkenden Kräften zwischen Spindel und den Planeten ein großer Unterschied: Exklusiv der Simulation bei 0kN Axialkraft gibt es deutliche Unterschiede zwischen dem Anheben und dem Absenken der Last von rund 7 bis 13%. Begründet liegt dies im später diskutierten Schränken und Kippen der

Planeten. Ab 4kN Axialkraft ist die mittlere radiale Kraft zwischen Spindel und den Planeten beim Anheben der Last höher als beim Absenken der Last. Weiterhin verhält sich die Standardabweichung der radial wirkenden Kräfte gleich der in x-Richtung wirkenden Kräfte – analog zu den Muttern.

Das Kippen der Planeten (vgl. Abbildung 60) nimmt erwartungsgemäß mit ansteigender Axialkraft zu. Ohne eine wirkende Axialkraft ist das Kippen in seiner Richtung nur von der Drehrichtung abhängig. Sobald eine Axialkraft von mind. 2kN wirkt, ist es von deren Richtung abhängig. Dabei ist der Kippwinkel beim Absenken der Last immer größer als beim Anheben der Last.

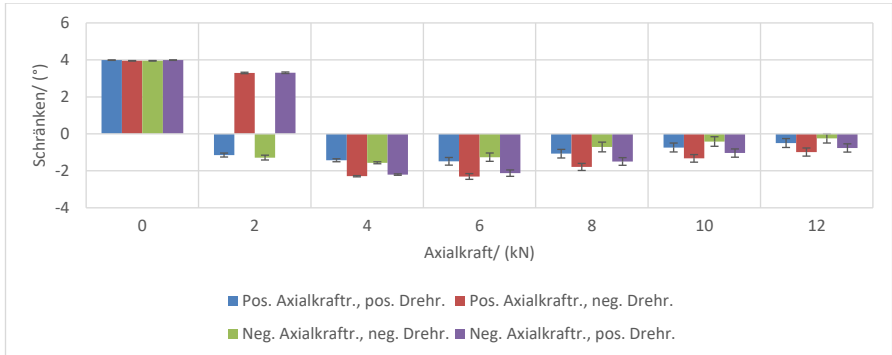


**Abbildung 60** Mittleres Kippen der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft

Wie bereits bei der Vorspannung verhalten sich Kippen und Schränken gegensätzlich: Beim Absenken der Last ist das Schränken deutlich kleiner als beim Anheben und die das Schränken der Planeten nimmt ab 4kN Axialkraft mit der Axialkraft ab (vgl. Abbildung 61). Begründet liegt dieses gegensätzliche Verhalten des Kippens und des Schränkens, wie bei der Untersuchung der Vorspannung, in dem für die Planeten zur Verfügung stehenden Bewegungsraum und den im jeweiligen Lastfall wirkenden Kontaktkräften und Kontaktkraftrichtungen. Die Unterschiede im Schränken und Kippen der Planeten beim Anheben und Absenken der Last, führen dabei zu den entsprechenden Unterschieden der radialen Kräfte – bspw. zwischen Spindel und den Planeten. Ohne eine wirkende Axialkraft schränken die Planeten konstant und unabhängig von den Richtungen der Axialkraft und der Drehrichtung mit relativ großen Winkeln gegen die Spindelsteigung. Bei niedrigen Axialkräften wie bspw. 2kN schränken die Planeten



abhängig von der Drehrichtung und unabhängig von der Axialkraftrichtung. Dabei schränken sie beim Anheben der Last fast genauso stark gegen die Spindelsteigung wie ohne eine wirkende Axialkraft.



**Abbildung 61** Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Axialkraft

Zusammenfassend ergeben sich folgende Einflüsse der Axialkraft auf den PWG:

- Das benötigte Antriebsmoment ist wie erwartet linear von der Axialkraft abhängig
- Je höher die Axialkraft desto größer werden die Kraftschwankungen der axialen und radialen Kräfte zwischen Spindel bzw. Muttern und den Planeten
- Bereits geringe Axialkräfte von 2kN reichen aus, damit hauptsächlich eine der beiden Muttern und nicht beide die Axialkraft von den Planeten aufnimmt.
- Die Bewegung der Planeten unter niedrigen (bis 2kN) bzw. gar keinen wirkenden Axialkräften unterscheidet sich insbesondere im Bezug zum Kippen und Schränken deutlich von ihrem Verhalten bei größeren Axialkräften. Aus dem Verhalten bei den größeren Axialkräften ist das Verhalten bei den niedrigen bzw. gar keiner wirkenden Axialkraft nicht vorhersehbar.
- Die Übersetzung des PWGs ist wie erwartet von der Axialkraft unabhängig. Die Planeten können sich aufgrund der hohen Steifigkeit und großen Menge an Kontakten weder in Simulation noch Versuch genügend bewegen, um ihre Wälzkreise und damit die Übersetzung messbar zu ändern.

### 5.4.3 Drehzahl

Neben der Vorspannung und der Axialkraft ist die Drehzahl des PWGs eine zentrale Größe der Anwendung und soll im Folgenden analysiert werden. Die Drehzahl wurde in 9 Simulationen zwischen 400 und 10000U/min simuliert. Die Berechnung mit 1706U/min ist dabei die Referenzsimulation.

In Abbildung 62 wird das mittlere benötigte Antriebsmoment in Abhängigkeit der Drehzahl, Drehzahlrichtung und Axialkraftrichtung dargestellt. Das benötigte Moment zum Absenken der Last nimmt mit steigender Drehzahl streng monoton von 3,39 bzw. 3,18 zu 2,23Nm ab, während es beim Anheben bis einschließlich 7500U/min von 3,78 zu 4,64 bzw. 4,67Nm streng monoton zunimmt. Es beeinflusst damit wie in der Simulation erwartet den Wirkungsgrad des PWG. Die stetige Erhöhung der Antriebsmomente bis 7500U/min beim Anheben und bis 10000U/min beim Absenken lässt sich durch die höheren Kräfte im PWG aufgrund der mit der Drehzahl steigenden Zentrifugalkraft erklären. Ab 5000U/min beginnen die Simulationen (siehe spätere Abbildung 68) instabil zu schränken. Dieser Effekt verstärkt sich mit steigender Drehzahl und tritt vor allem beim Anheben der Last auf. Dadurch dass in diesen Simulationen die Planeten beim Anheben der Last ihren Schränkwinkel extrem über den Hub verändern, sinkt das benötigte Antriebsmoment.

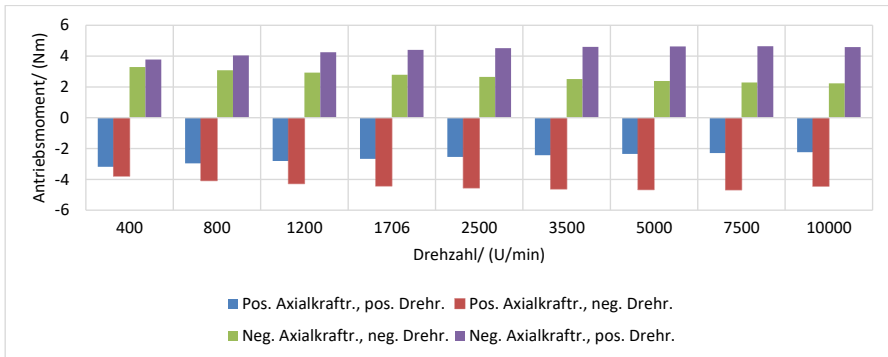


Abbildung 62 *Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Drehzahlrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben.*

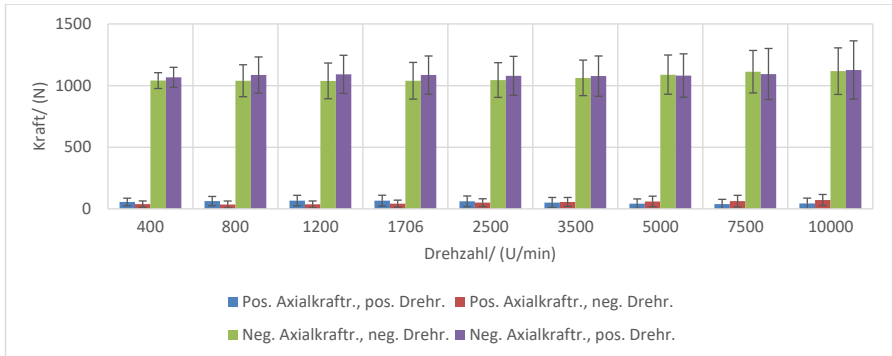


Abbildung 63 *Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Drehzahlrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl*

Für die in x-Richtung wirkenden mittleren Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten ergibt sich nur eine geringe Drehzahlabhängigkeit (vgl. Abbildung 63). Beispielsweise nehmen diese Kräfte für das Anheben der Last in dem hauptsächlich Mutter 1 belastet wird (negative Axialkrafttrichtung) von 1067 und 1126N zu. Diese Zunahme lässt sich mit der Erhöhung der Zentrifugalkraft der Planeten und der Zahngeometrie erklären: mit der Erhöhung der Drehzahl nimmt die Zentrifugalkraft an den Planeten zu. Diese rein radial wirkende Kraft wird bedingt durch die Zahngeometrie schräg in die Muttern eingeleitet und erzeugt dadurch auch eine in x-Richtung wirkende zusätzliche Kraft.

Die Standardabweichung nimmt in den Bereichen, in denen hauptsächlich Mutter 1 belastet wird, von 81 auf 236N deutlich zu. Dabei ist der mit Abstand größte Sprung zwischen 400 und 800U/min. Von 400 bis einschließlich 3500 und bei 10000U/min sind die Kräfte in x-Richtung, in denen die Mutter 1 hochbelastet ist, beim Anheben der Last um bis zu 53N größer als beim Absenken der Last. Bei 5000 und 7500U/min ist es genau umgekehrt. Aufgrund der im Verhältnis äußerst geringen Kräfte wird hier und auch später bei Mutter 2 nicht näher auf die Bereiche eingegangen, in denen die jeweilige Mutter niedrig belastet ist. Die Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 2 und den Planeten sind analog zu denen an Mutter 1 unter der Berücksichtigung, dass Mutter 2 bei positiver Axialkrafttrichtung hochbelastet ist anstatt bei negativer Axialkrafttrichtung.

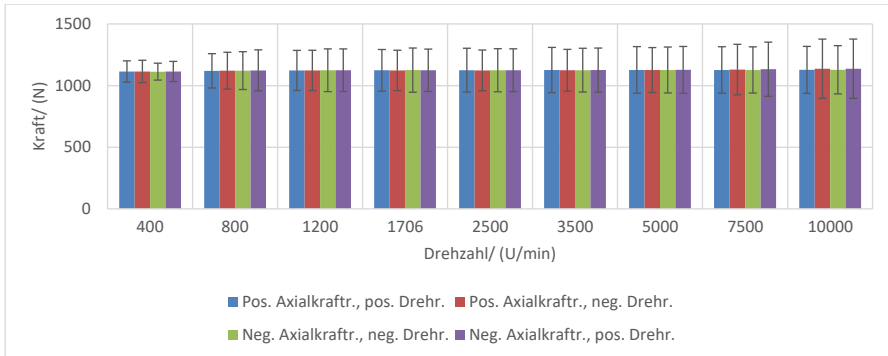
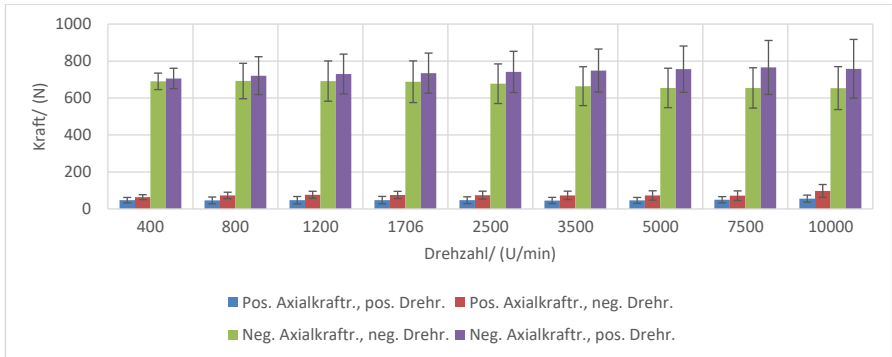


Abbildung 64 Quadratisches Mittel der in  $x$ -Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Drehzahlrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl

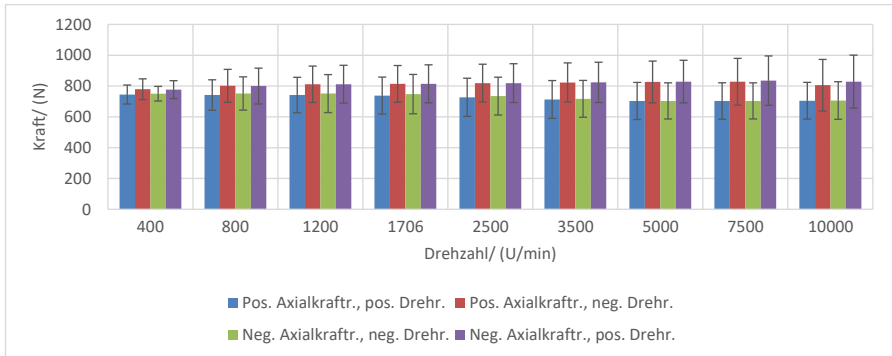
Im Gegensatz zu den Muttern sind die in  $x$ -Richtung wirkenden mittleren Kräfte an der Spindel unabhängig von der Drehzahl nahezu perfekt konstant (vgl. Abbildung 64). Die mit der Drehzahl zunehmende Zentrifugalkraft der Planeten wird an den Muttern abgestützt und die Spindel wird durch die hier in allen Simulationen gleiche Axialkraft gegen die Planeten in  $x$ -Richtung gedrückt. Analog zu den Muttern nehmen dabei die Standardabweichungen mit der Drehzahl zu.

Für die Bereiche, in denen Mutter 1 die hochbelastete Mutter ist, sind die mittleren radialen Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten analog zur Axialkraft bei rund 67% der in  $x$ -Richtung wirkenden Kräfte (vgl. Abbildung 65). Der Unterschied zwischen den radialen Kräften beim Anheben und Absenken der Last in den Bereichen in denen Mutter 1 hochbelastet ist, nimmt mit der Drehzahl von ca. 2,2 auf 14,6% im Bereich zwischen jeweils einschließlich 400 und 7500U/min zu. Je höher die Drehzahl desto höher die radialen Kräfte beim Anheben und desto geringer die radialen Kräfte beim Absenken der Last. Bei 10000U/min fällt er wieder leicht geringer aus. Auch hier liegt die Ursache der höheren Kräfte mit der Drehzahl beim Anheben der Last wieder in den steigenden Zentrifugalkräften. Die dabei auftretenden, mit der Drehzahl sinkenden radialen Kräfte beim Absenken der Last liegen in der Änderung der Planetenbewegung mit der Drehzahl begründet. Wie später gezeigt wird, ändern sich mit der Drehzahl die Winkel des Schränkens deutlich stärker beim Absenken der Last als beim Anheben der Last.

Die Standardabweichung der radialen zur Spindel wirkenden Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten ist nahezu perfekt gleich der Standardabweichung der Kräfte in x-Richtung. Damit ist auch bei den radialen Kräften eine extreme Zunahme der Standardabweichung mit der Drehzahl in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 ersichtlich. (vgl. Abbildung 65)



**Abbildung 65** Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Drehzahlrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl



**Abbildung 66** Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Drehzahlrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl

Die radialen Kräfte zwischen Mutter 2 und den Planeten verhalten sich in den hochbelasteten Bereichen analog zu den radialen Kräften an Mutter 1 deren hochbelasteten

Bereichen. Auffällig im Vergleich zu Mutter 1 sind bei Mutter 2 die im Vergleich zu den anderen Drehzahlen sehr niedrigen radialen Kräfte bei 10000U/min.

Aufgrund der Kinematik des PWGs entsprechen auch hier die radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten der Summe der radialen Kräfte zwischen den Müttern und den Planeten. Von jeweils einschließlich 400 bis 7500U/min nehmen daher mit der Drehzahl die radialen Kräfte beim Absenken der Last ab. Des Weiteren nimmt mit der Drehzahl auch die Standardabweichung zu.

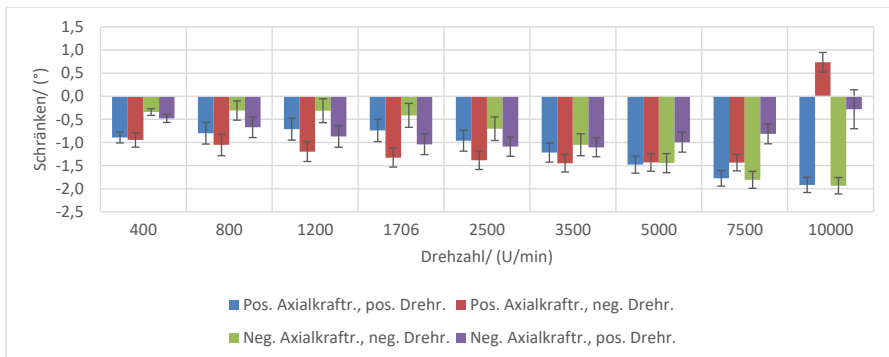


Abbildung 67 Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkrafttrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl

Das hier nicht dargestellte Kippen der Planeten nimmt grundsätzlich mit zunehmender Drehzahl stetig ab, während das Schränken hingegen stetig zunimmt. Dieser Effekt ist beim Senken der Last deutlich stärker ausgeprägt als beim Anheben der Last. Von 400 bis 5000U/min nimmt das Kippen beim Senken der Last von 0,32° bzw. 0,36° um bis zu 0,07° ab und beim Anheben der Last von 0,31° bzw. 0,34° um bis zu 0,03° ab. Abbildung 67 zeigt deutlich, dass sich bei unter 5000U/min die Winkel des Schränkens deutlich in Abhängigkeit der Axialkrafttrichtung und der Drehrichtung unterscheiden. Exklusiv der grundsätzlichen Zunahme des Schränkens mit der Drehzahl verhält sich dabei keiner der vier Lastfälle ähnlich zu einem anderen.

In der detaillierten Analyse der Drehzahl wurde ein auffälliges Verhalten des PWGs bei höheren Drehzahlen festgestellt: Bis 5000U/min ist das Schränken der Planeten sehr stabil (vgl. oberes Schaubild in Abbildung 68). Bei 7500U/min ändert sich der Schränkswinkel im quasistatischen Bereich beim Anheben der Last unter negativer Axialkrafttrichtung von -1,2° auf +0,6° und wieder auf -1,0°. Die Planeten schwingen damit bei

einer konstanten Drehzahl tangential zur Spindel über die Zahnflanken. Damit ist die Schrägbewegung zeitweise komplett gegenläufig zur Bewegung der Planeten um die Spindel. Die Folgen von einer Bewegung dieser Art sind erhöhte Bohrrreibung, erhöhter Verschleiß und verringerte Lebensdauer der Komponente. Bei 10000U/min ist dieser Effekt noch deutlich stärker ausgeprägt und tritt auch bei negativer Axialkraftrichtung auf. Hier bewegen sich die Planeten von  $-1,2^\circ$  auf  $+1,8^\circ$  und wieder auf  $-0,6^\circ$  (vgl. unteres Schaubild in Abbildung 68).

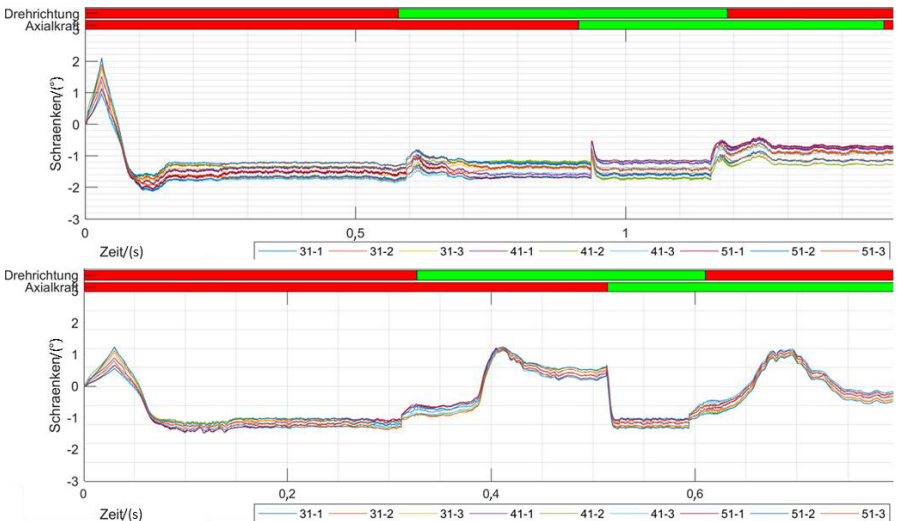


Abbildung 68 Schrägen aller Planeten: oben bei 5000 und unten bei 10000U/min

Zusammenfassend ergeben sich folgende Einflüsse der Drehzahl auf den PWG:

- Axial und radial wirkende Kräfte nehmen aufgrund der zunehmenden Zentrifugalkraft in den Muttern zu. In den Spindelkontakten bleiben die mittleren axialen Kräfte konstant. Die mittleren radialen Kräfte der Spindelkontakte nehmen beim Absenken der Last mit der Drehzahl ab und bleiben beim Anheben der Last konstant. Die Standardabweichungen aller radialen und axialen Kräfte zwischen den Planeten und den Muttern bzw. Spindeln nehmen mit der Drehzahl zu.
- Mit zunehmender Drehzahl nimmt das Kippen der Planeten ab und ihr schränken zu. Ab 5000U/min schränken die Planeten dabei zunehmend instabil.

#### 5.4.4 Wahl der Betriebsparameter für die Analyse der Geometrie

Im Folgenden sollen die Betriebsparameter (Vorspannung, Axialkraft und Drehzahl) für die Analyse der Geometrie gewählt werden. Mit diesem Satz an Betriebsparametern werden dann die Effekte einzelner Geometrieparameter untersucht.

In der Analyse der Vorspannung wurden die Effekte der Vorspannung geprüft. Sowohl bei X- als auch bei den O-Anordnungen waren möglichst niedrige Vorspannungen, bspw. 0,3 und 0,6kN, von Vorteil. Eine Vorspannung von 0N sollte dabei aber auf jeden Fall aufgrund möglicher undefinierter Übersetzung/ freifliegender Planeten bei keiner wirkender Axialkraft vermieden werden (vgl. Kapitel 2.1). In der Untersuchung der Vorspannung (Kapitel 5.4.1) zeigten sich in der O-Anordnung im Vergleich zur X-Anordnung hohe Kraftschwankungen aber niedrige Schwankungen des Kippens und Schränkens der Planeten. Nachdem die größeren Schwankungen des Kippens und Schränkens der Planeten in der X-Anordnung nachweislich keine messbaren Auswirkungen auf die Übersetzung haben, aber die Kräfte zwischen den Planeten mit deutlich geringeren Schwankungen verteilen und damit ausgleichend wirken, wird die X-Anordnung für die Vorspannung gewählt. Sowohl in den Simulationen als auch in der realen Anwendung ist es meist sinnvoll eine Komponente nicht an der Grenze eines stabilen Bereiches zu betreiben. Um einen hinreichenden Sicherheitsabstand zu 0N Vorspannung auch in Versuchen zu erhalten, wird als Vorspannung für die folgenden Simulation 0,6kN gewählt.

Die Vorspannung ist, im Gegensatz zur Axialkraft und der Drehzahl, ein Parameter der vom Hersteller des PWG unabhängig gewählt und eingestellt werden kann. Drehzahl und Axialkraft kommen immer aus der Anwendung. Für eine gute Vergleichbarkeit mit den Versuchen, wird als Drehzahl 1706U/min gewählt. 1706U/min zeigt bereits sehr gut die dynamischen Effekte und passt zum Anwendungsprofil der Komponente – hohe Kräfte bei im Vergleich zu anderen Linearantrieben geringen Vorschubgeschwindigkeiten. Mit dieser Drehzahl wird auch sichergestellt, dass ein großer Anteil des Hubes mit den in Kapitel 4.2.3 gezeigten Prüfständen mit konstanter Drehzahl zurückgelegt werden kann. Weiterhin wird damit in Lebensdauerversuchen eine punktuelle Überhitzung der Komponente verhindert. Um die hohen Kräfte in vielen Anwendung abzubilden, wurde als Betriebsparameter für die Axialkraft 10kN für die folgenden Simulationen gewählt. 10kN Axialkraft und 1706U/min führen mit dem gegebenen Wirkungsgrad des PWG zu 238W Abwärme. Dies entspricht beim Erreichen der rechnerischen



Lebensdauer einer Laufleistung von 83km unter einer Ausfallwahrscheinlichkeit <10%. (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020)

## 5.5 Variation der Geometrie

Nach der Analyse der Anwendung soll im Folgenden die Geometrie genauer untersucht werden. Für die folgenden Simulationen werden als Betriebsparameter die zuvor ausgewählten 0,6kN Vorspannung, 10kN Axialkraft und 1706U/min verwendet.

### 5.5.1 Radialspiel

Das Radialspiel ist definiert als mögliche radiale Bewegung, die ein zur Spindel achsparalleler Planet vom Spindelkontakt bis zum Mutterkontakt ausführen kann. In den folgenden Simulationen wurde das Radialspiel von -10 bis +70 $\mu\text{m}$  analysiert.<sup>13</sup> Dabei wurde die Verschiebung von Mutter 2 gegenüber Mutter 1 angepasst um bei dem jeweiligen Radialspiel eine Vorspannung von 0,6kN zu erreichen. Zur Anpassung des Radialspiels gibt es drei Möglichkeiten:

1. Anpassung des Durchmessers der Muttern
2. Anpassung der Durchmesser der Planeten
3. Anpassung des Durchmessers der Spindeln

Aufgrund der im Verhältnis zur Spindel und den Muttern kleinen Durchmesser der Planeten scheidet zur Analyse des Radialspiels eine Änderung der Planeten aus. Hier würde sich mit Abstand die Übersetzung des PWGs bei einer Durchmesseränderung am meisten ändern. In der Produktion des PWGs wird üblicherweise der Durchmesser der Spindel zum Einstellen des Radialspiels verändert. Daher wird auch hier – ausgehend von der Referenzgeometrie mit 36 $\mu\text{m}$  Radialspiel – der Durchmesser der Spindel für die Analyse des Radialspiels variiert.

Wie in Abbildung 69 ersichtlich hat das Radialspiel bei einer Vorspannung von 0,6kN nur sehr geringe Auswirkungen auf das benötigte Antriebsmoment. Die in Kapitel 5.1 vorgestellte Referenzgeometrie hat ein Radialspiel von 36 $\mu\text{m}$ .

Für die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen den Muttern und den Planeten nimmt mit dem Betrag des Radialspiels der Unterschied zwischen den hoch und den niedrig-belasteten Bereichen zu. Die hochbelasteten Bereiche werden mit zunehmendem

---

<sup>13</sup> Aufgrund der Definition des Radialspiels (vgl. Kapitel 2.1) ist ein negatives Radialspiel möglich.

Radialspiel immer höher und die niedrigbelasteten Bereiche werden immer niedriger belastet. Die Zunahme in den hochbelasteten Bereichen mit dem Radialspiel beträgt zwischen 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m, aber gerade einmal 3%. -10 $\mu$ m Radialspiel verhält sich bei den mittleren Kräften vergleichbar zu +10 $\mu$ m Radialspiel. (vgl. Abbildung 70 für Mutter 1)

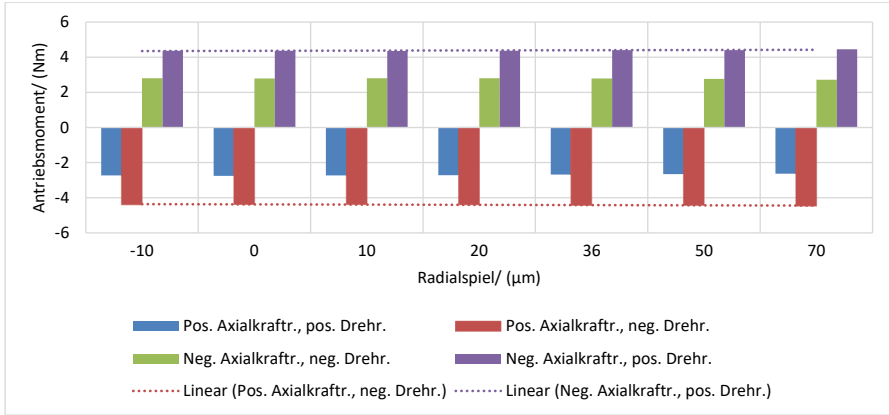


Abbildung 69 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben.

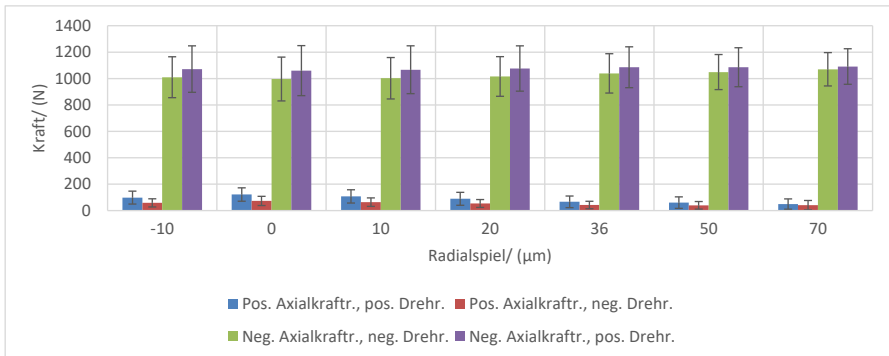
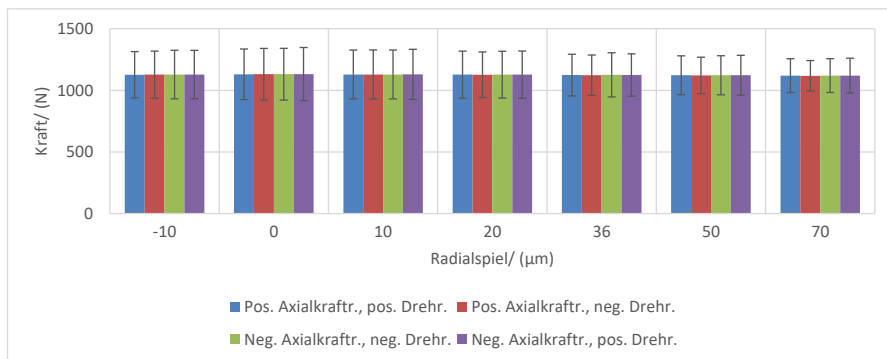


Abbildung 70 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels

Zusätzlich nimmt mit steigendem Radialspiel die Standardabweichung ab. Erklären lässt sich das Sinken der Standardabweichung durch die geringeren Kräfte in der jeweils niedrigbelasteten Mutter und den größeren Bewegungsraum der Planeten mit steigendem Radialspiel. Die Kontakte mit der jeweils niedrig belasteten Mutter sind die Kontakte, in denen der jeweilige Planet deutlich instabiler läuft (vgl. späteres Kapitel 0). Nehmen dort die Kräfte ab, so hat das instabile Verhalten auch weniger Auswirkungen für die hochbelasteten Kontakte mit der anderen Mutter und daher nimmt in den hochbelasteten Bereichen die Standardabweichung ab. Durch den mit zunehmenden Radialspiel größeren Bewegungsraum können die Planeten Kraftschwankungen durch größere Bewegungen ausgleichen. Die Abnahme der Standardabweichungen in den hochbelasteten Bereichen über das Radialspiel ist dabei ca. 35%.

Nachdem die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten von der Axialkraft und der Vorspannung abhängen und beide in dieser Simulationsreihe konstant sind, sind die mittleren Kräfte unabhängig vom Radialspiel. Die Summe der Kräfte an den Muttern ist auch die Summe der mittleren Kräfte an der Spindel. Daher nimmt die Standardabweichung mit dem Radialspiel auch bei den mittleren Kräften zwischen Spindel und den Planeten ab. (vgl. Abbildung 71)



**Abbildung 71** Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels

Die mittleren radialen Kräfte zwischen den Muttern und den Planeten nehmen mit dem Betrag des Radialspiels in den hochbelasteten Bereichen im Vergleich zu den Kräften in x-Richtung um den Faktor 4 stärker zu (12% Unterschied). Ursache ist dabei das mit dem Radialspiel zunehmend größere Kippen und Schränken der Planeten (vgl. spätere

Beschreibung des Kippens und Schränkens). Die Abnahme der Standardabweichung mit zunehmenden Radialspiel liegt zwischen  $0\mu\text{m}$  und  $+70\mu\text{m}$  Radialspiel bei 33% und liegt damit vergleichbar zu dem Verhalten bei den Kräften in x-Richtung. (vgl. Abbildung 72 für Mutter 1)

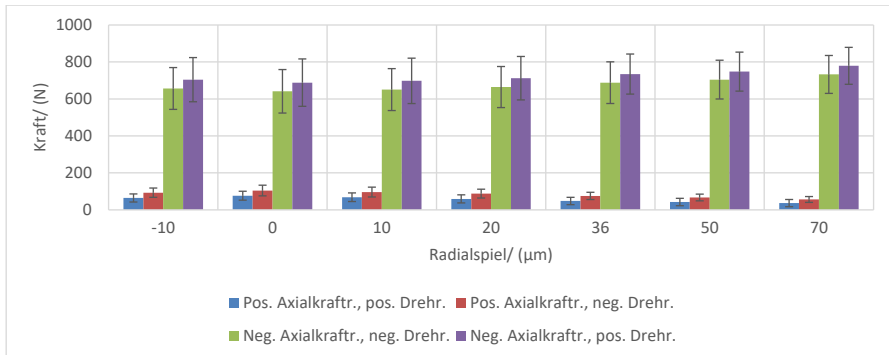


Abbildung 72 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkrafttrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels

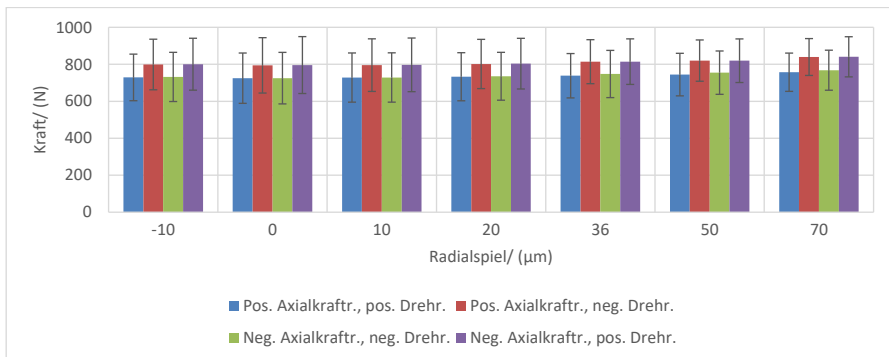


Abbildung 73 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkrafttrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels

Die mittleren radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten nehmen, wie in Abbildung 73 dargestellt, mit dem Radialspiel um ca. 5,4% zu. Nachdem die mittleren radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten der Summe der Kräfte zwischen den Müttern und den Planeten entsprechen, bedeutet dies, dass die mit dem

Radialspiel zunehmenden Kräfte in den hochbelasteten Bereichen stärker zunehmen als sie in den niedrigbelasteten abnehmen. Die Standardabweichung nimmt zwischen Spindel und den Planeten aber analog zu dem Verhalten an den Muttern um ca. 33% mit zunehmendem Radialspiel ab.

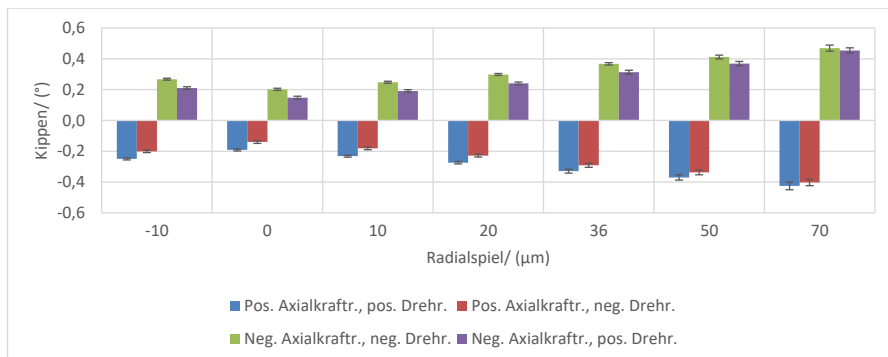


Abbildung 74 Mittleres Kippen der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels

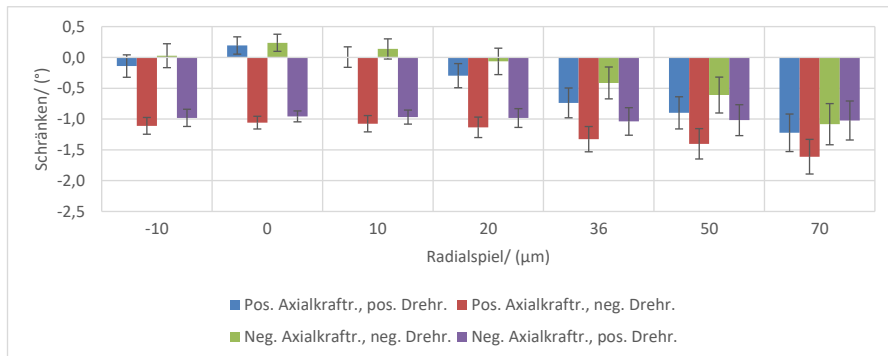


Abbildung 75 Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit des Radialspiels

Das Kippen der Planeten nimmt mit zunehmendem Betrag des Radialspiels von ca.  $0,2^\circ$  bei  $0\mu\text{m}$  Radialspiel auf  $0,4^\circ$  bei  $70\mu\text{m}$  Radialspiel im Mittel über alle Planeten zu (vgl. Abbildung 74). Ebenfalls nimmt die Schwankung des Kippens zwischen den Planeten mit dem Betrag des Radialspiels zu: bei  $-10\mu\text{m}$  Radialspiel betrug diese noch ca.

0,07°. Die Schwankung nimmt streng monoton mit dem Radialspiel zu – bis sie bei +70µm Radialspiel 0,40° erreicht.

Das Schränken der Planeten verschiebt sich mit zunehmendem Betrag des Radialspiels in größere negative Winkel (vgl. Abbildung 75). Gleichzeitig nimmt die Schwankung zwischen den Planeten streng monoton von ca. 0,7° auf ca. 1,1° zu und der Unterschied zwischen den Drehrichtungen bei gleicher Axialkraftichtung streng monoton ab.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Einflüsse des Radialspiels auf den PWG:

- Mit zunehmenden Radialspiel nehmen die Standardabweichungen der axialen und radialen Kräfte ab
- Mit zunehmendem Betrag des Radialspiel nimmt der Betrag des Schränkens und des Kippens sowie die Schwankung dieser Bewegungen zu. Dabei nehmen auch die Unterschiede zwischen den Drehrichtungen ab

### 5.5.2 Planetenlänge

In diesem Kapitel soll die Beeinflussung des PWGs durch die Länge der Planeten untersucht werden. Dazu werden die Planeten in dem gelb markierten Bereich in Abbildung 76 verlängert. Eine Verkürzung würde die Anzahl an Windungen minimieren und wird aufgrund der daraus resultierenden Minimierung der Tragfähigkeit des PWGs nicht untersucht. Die Verlängerung schiebt die Muttern nach außen. Durch die damit längeren Abstände können die Planeten weniger Schränken und Kippen, verhalten sich also ähnlicher zu zur Spindel achsparallelen Planeten. Würden die längeren Planeten mit den gleichen Winkeln schränken und kippen wie im Referenzmodell, so müssten sie die Mutter stärker durchdringen. Die dabei entstehende Kraft ist durch die höhere Durchdringung größer als beim Referenzmodell und damit schränken und kippen die längeren Planeten weniger.

In dieser Simulationsreihe werden die Planeten jeweils in den gelb markierten Bereichen in Abbildung 76 zwischen 0,1 und 10mm verlängert. Zusätzlich gibt es die Simulationsreihe „10\*“ in der an den Planeten und Muttern weitere Windungen hinzugefügt wurden. Um die Leistungsdichte des PWGs zu erhöhen, würde man bei verlängerten Planeten mehr Windungen an den Planeten und Muttern einfügen. In jedem der in Abbildung 76 gelb markierten Bereiche wurde deshalb in der Simulation „10\*“ jeweils die

Hälfte der maximal zusätzlich möglichen Windungen an den Mutterkontakten und die andere Hälfte an den Spindelkontakten hinzugefügt.

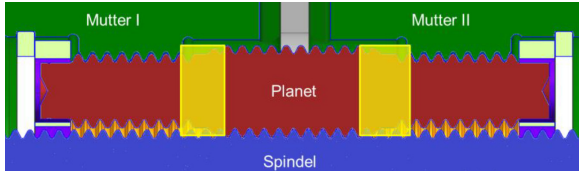


Abbildung 76 Längung der Planeten

In Abbildung 77 ist das Mittel des Antriebsmoments dargestellt. Dabei zeigen sich nur geringfügige Unterschiede zwischen den benötigten Momenten. Selbst die zusätzlichen Windungen in der Simulation 10\* erhöhen das Moment im Vergleich zur Simulation „10“ mit der gleichen Verlängerung von 10mm aber ohne zusätzliche Windungen nur marginal.

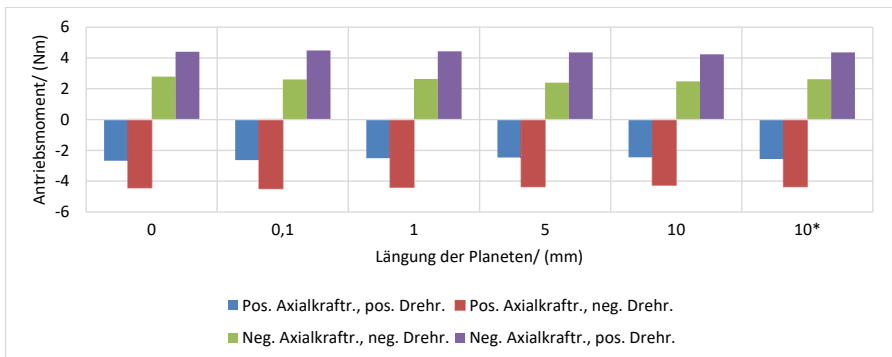


Abbildung 77 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben. Bei 10\* wurden weitere Windungen ergänzt.

Für die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 bzw. Mutter 2 und den Planeten zeigen sich für die Verlängerungen von 5 und 10mm deutliche Unterschiede zu den kleinen Verlängerungen. Ausgehend von der Simulation mit 1mm Verlängerung – bei der nur geringe Unterschiede zur Referenzsimulation sichtbar sind – wird mit zunehmender Verlängerung die hochbelastete Mutter entlastet und die niedrigbelastete Mutter höher belastet (vgl. Abbildung 78 für Mutter 1). Für die Simulation mit 10mm

Verlängerung ohne weitere Windungen sinkt die Kraft beim Anheben an der hochbelasteten Mutter 1 um 19,7% (ca. 213N) und an Mutter 2 um 17,8% (ca. 193N). Die Standardabweichung sinkt dabei an Mutter 1 um 14,2% (ca. 22N) und an Mutter 2 um 6% (ca. 9N). Die Kräfte beim Senken der Last sind an der hochbelasteten Mutter 1 immer marginal niedriger als beim Anheben der Last. Durch die Verlängerung der Planeten sinkt die Standardabweichung in den hochbelasteten Bereichen beim Senken der Last deutlich stärker als beim Anheben – für Mutter 1 sinkt sie um 25,6% (ca. 38N) und für Mutter 2 um 32,9% (ca. 52N). Die gleichmäßigere Belastung der Muttern entsteht durch den axial größeren Abstand der Mutterkontakte zueinander und ab einer Verlängerung der Planeten von 5mm, zusätzlich durch die daraus resultierende Minimierung des Schränkens und Kippens der Planeten.

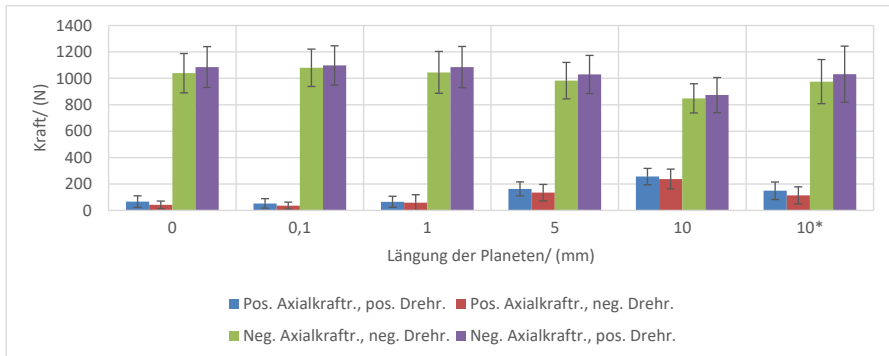


Abbildung 78 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10\* wurden weitere Windungen ergänzt.

Die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen den Muttern und den Planeten für die Simulation mit einer Verlängerung von 10mm und weiteren Windungen sind vergleichbar mit der Simulation mit einer Verlängerung von 5mm ohne weitere Windungen. Dabei ist die Standardabweichung der Simulation mit den weiteren Windungen deutlich größer als bei den anderen Simulationen, wodurch die Spitzenkräfte vergleichbar mit der Referenzsimulation sind. Begründet liegt die höhere Standardabweichung dabei in der höheren Anzahl an gleichzeitig auftretenden Kontakten.

Die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten ändern sich aufgrund der Verlängerung der Planeten nur marginal (vgl. Abbildung 79). Dies bestätigt, dass durch die Verlängerung der Planeten die Kräfte zwischen den Muttern



verschoben werden. Die dazugehörigen Standardabweichungen erhöhen sich geringfügig durch die Verlängerung der Planeten und deutlich durch die weiteren Windungen in der Simulation mit einer Verlängerung von 10mm und weiteren Windungen.

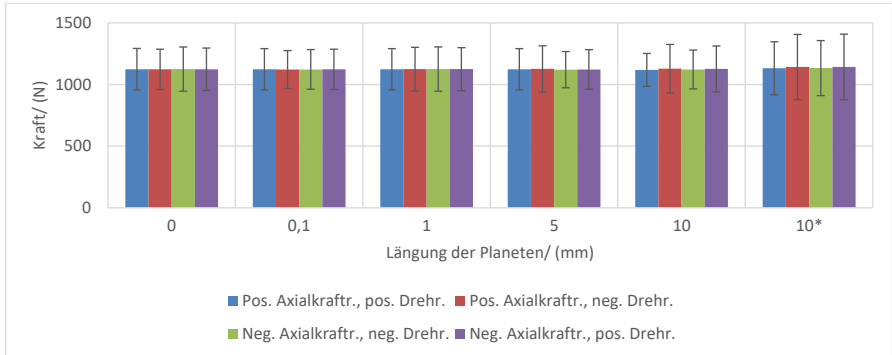


Abbildung 79 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10\* wurden weitere Windungen ergänzt.

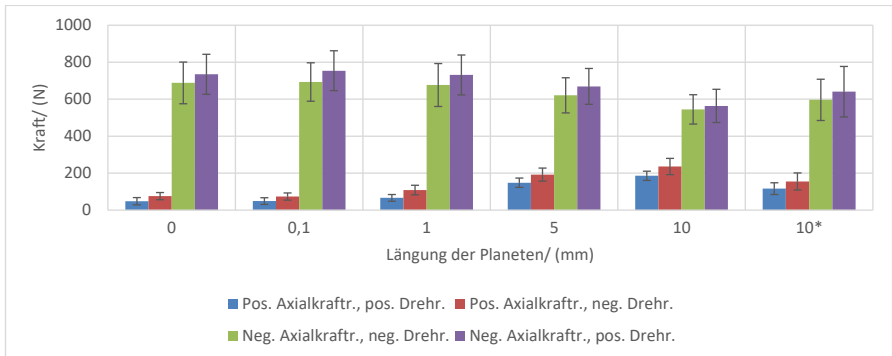
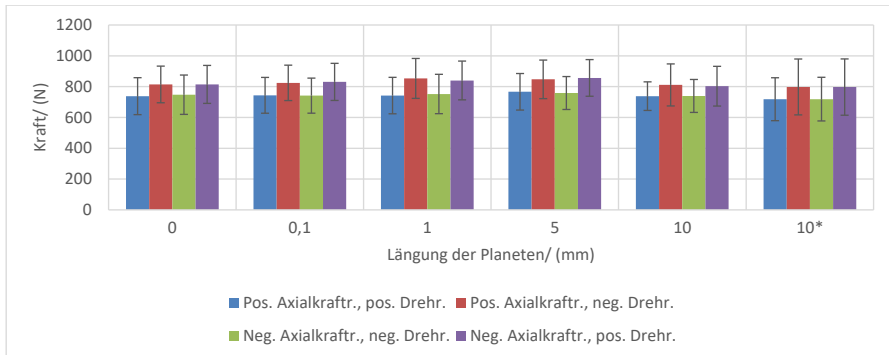


Abbildung 80 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10\* wurden weitere Windungen ergänzt.

Analog zu den Kräften in x-Richtung zwischen den Muttern und den Planeten verhalten sich auch die radialen Kräfte zwischen den Muttern und den Planeten (vgl. Abbildung 80 für Mutter 1). In den hochbelasteten Bereichen der jeweiligen Muttern sinken mit zunehmender Verlängerung der Planeten die radialen Kräfte und die dazugehörigen Standardabweichungen sehr stark. In den niedrigbelasteten Bereichen erhöhen sich

die Kräfte und Standardabweichungen um den in den hochbelasteten Bereichen eingesparten Kräfte und Standardabweichungen. Auch hier erhöhen die weiteren Windungen die Kräfte und die Standardabweichungen in der Simulation mit einer Verlängerung um 10mm.

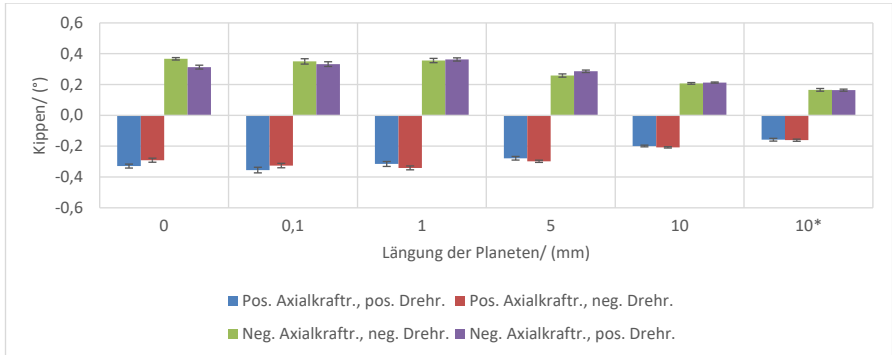


*Abbildung 81 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10\* wurden weitere Windungen ergänzt.*

Die radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten verhalten sich nicht mehr so unabhängig von der Verlängerung wie die Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten (vgl. Abbildung 79 und Abbildung 81): Mit zunehmender Verlängerung der Planeten – bis zu einer Verlängerung von 5mm – nehmen die radialen Kräfte geringfügig zu. In der Simulation mit einer Verlängerung von 10mm sinken sie dann wieder auf das Niveau der Referenzsimulation. Die Ursache dieses Verhaltens ist das später diskutierte Schränken und Kippen der Planeten. Durch dabei auftretende Änderungen der Richtungen der wirkenden Kräfte in den Kontakten werden die radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten beeinflusst. Bei der Simulation mit weiteren Windungen bleiben die mittleren Kräfte auf dem Niveau der Simulation mit 10mm Verlängerung ohne weitere Windungen. Jedoch nehmen bei dieser Simulation die Standardabweichungen deutlich zu. Bei allen Simulationen ist die mittlere radiale Kraft zum Senken der Last um einen vergleichbaren Wert niedriger als beim Anheben der Last.

Mit zunehmender Länge der Planeten nimmt der Betrag des Winkels des Kippens der Planeten erwartungsgemäß ab (vgl. Abbildung 82). Bei dem Vergleich der Simulation mit 10mm Verlängerung mit und ohne weitere Windungen zeigt sich, dass durch die

weiteren Windungen der Betrag des Kippens weiter reduziert wird. Mit zunehmender Verlängerung der Planeten nimmt die Standardabweichung des Kippens ab. Durch weitere Windungen nimmt die Standardabweichung des Kippens leicht zu.



**Abbildung 82** Mittleres Kippen der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten

Das Schränken der Planeten zeigt zwei unterschiedliche Verläufe: bis zu einer Verlängerung der Planeten um  $+0,1^\circ$  ist der Schränkswinkel beim Anheben der Last immer bei größeren negativen Winkeln als beim Absenken der Last (vgl. Abbildung 83). Ab einschließlich einer Verlängerung der Planeten um  $+1\text{mm}$  dreht sich dieses Verhalten. Beginnend ab einer Verlängerung der Planeten um  $+1\text{mm}$  steigen, wie zuvor in Abbildung 78 und Abbildung 80 dargestellt, an der geringbelasteten Mutter die übertragenen Kräfte an. Diese geringen mittleren Kraftänderungen mit aber einem für den PWG großen Hebelarm sind die Ursache für die deutliche Änderung des Schränkens ab einer Verlängerung der Planeten um  $+1\text{mm}$ . Diese Kraftänderungen beeinflussen dabei das Schränken sowohl beim Anheben als auch beim Absenken der Last. Dabei ist durch die starke Abnahme des Kippens mit zunehmender Verlängerung bis  $5\text{mm}$  der Planeten noch ein starkes Schränken möglich. Beim Absenken der Last ist dieses auch deutlich sichtbar. Bei der Verlängerung der Planeten um  $10\text{mm}$  verringert sich das Kippen zwar noch weiter, es muss aber Geometriebedingt dann auch das Schränken deutlich eingeschränkt werden. Der ab der Verlängerung der Planeten um  $1\text{mm}$  extreme Unterschied des Schränkens zwischen dem Anheben und dem Absenken der Last entsteht durch die dabei unterschiedlichen Richtungen der Tangentialkräfte in den Kontakten. Mit zunehmender Verlängerung der Planeten (inkl. der Simulation mit weiteren

Windungen) nimmt die Schwankung des Schränkens von ca.  $0,8^\circ$  der Referenzgeometrie auf ca.  $0,4^\circ$  ab.

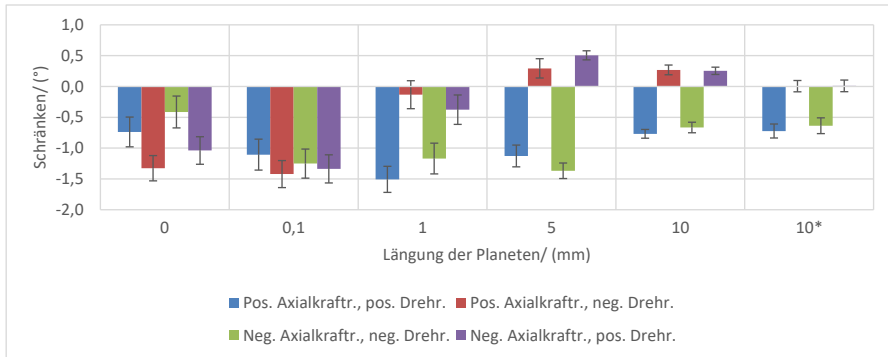


Abbildung 83 Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkrafttrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten

Zusammenfassend ergeben sich folgende Einflüsse durch eine Verlängerung der Planeten auf den PWG:

- Mit zunehmender Verlängerung der Planeten wird deren Bewegungsraum eingeschränkt. Dies reduziert vor allem das Kippen der Planeten. Ab einer hinreichenden Verlängerung wird auch das Schränken der Planeten reduziert. In Folge des eingeschränkten Bewegungsraumes werden dabei ab einer hinreichenden Verlängerung der Planeten die wirkenden Kräfte gleichmäßiger auf beide Muttern verteilt.
- Bereits geringfügig höhere Kräfte an der niedrig belasteten Mutter durch die bessere Gleichverteilung der Kräfte zwischen den Muttern ändern das Schränken der Planeten deutlich und reduzieren dabei vor allem das Schränken beim Anheben der Last.

### 5.5.3 Flankenwinkel

Zur Variation der Flankenwinkel werden die Laufflächen an den Planeten um ihren Mittelpunkt gedreht (vgl. Abbildung 84). Dabei werden die Laufflächen beider Partner also z.B. die Laufflächen an der Mutter und die dazugehörigen Laufflächen an den Planeten immer gleich variiert. Durch die gleiche Variation gibt es zwei variierte Flankenwinkel: jeweils an den Muttern- und an den Spindelkontakten. Dazu wurden die Winkel

ausgehend von der Referenzgeometrie um  $\pm 1,0^\circ$ ,  $\pm 2,5^\circ$  und  $\pm 5,0^\circ$  geändert. Zum einen wurden die Winkel nur an den Muttern- als auch an den Spindelkontakten einzeln als auch in Kombination der beiden variiert. Eine positive Änderung des Flankenwinkels bedeutet eine Änderung des Flankenwinkels der linken Flanke je Windung im mathematisch negativen Drehsinn und der rechten Flanke je Windung im mathematisch positiven Drehsinn – der Zahnkopf wird dabei also schmaler.

Aufgrund des tangentialen Übergangs der Rundungen des Zahnkopfes und des Zahnfußes ändern sich bei Änderung des Flankenwinkels auch die Kopf- und Fußkreisdurchmesser der Windungen. Zusätzlich wird durch die Änderung des Flankenwinkels auch das Radialspiel geändert. Deshalb wurde bei den Simulationen mit einer Variation des Flankenwinkels auch der Spindeldurchmesser angepasst, um das Radialspiel gleich zu halten.

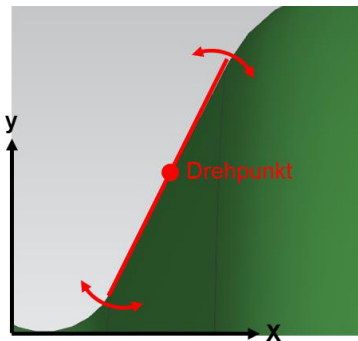


Abbildung 84 Variation der Flankenwinkel

Bei der Referenzgeometrie von Schaeffler wurden die Wälzkreise auf einen für die Zahnflankengeometrie optimalen Bereich eingestellt. Wird der Flankenwinkel an beiden Partnern gleich verändert, so werden sich aufgrund der Geometrie die Wälzkreise deutlich weniger verschieben als bei einer unterschiedlichen Änderung des Flankenwinkels beider Partner. Damit verbleiben die Wälzkreise bei einer gleichen Änderung an beiden Partnern näher am Optimum. Die Wälzkreise werden später in Kapitel 6.2 diskutiert.

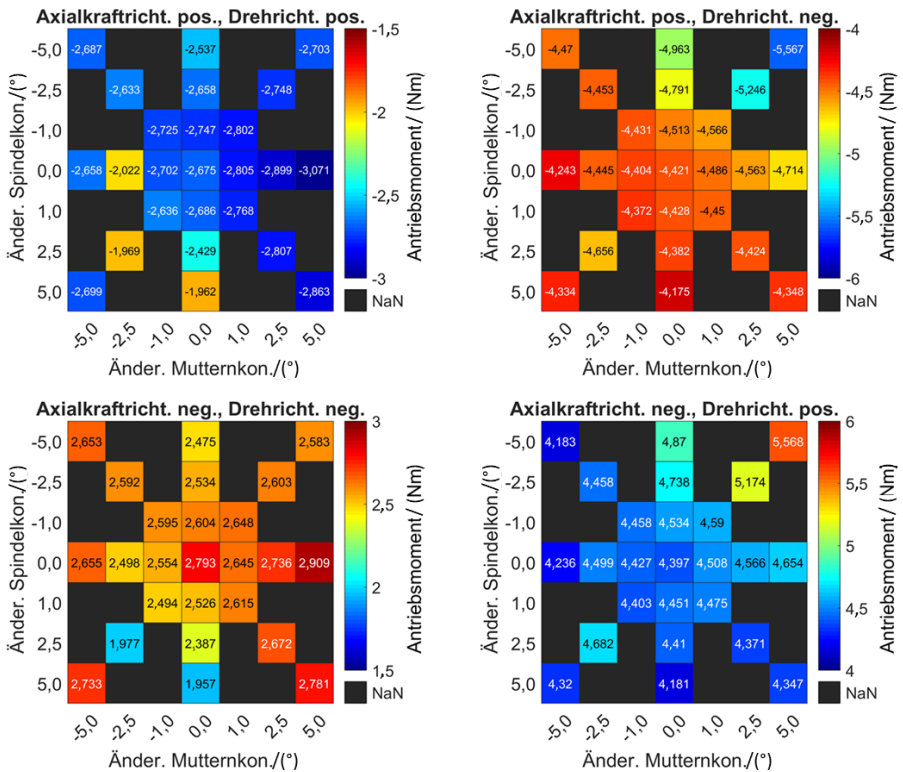


Abbildung 85 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben.

Für das Mittel der Drehmomente ergibt sich das in Abbildung 85 dargestellte Bild. Die linken beiden darin gezeigten Schaubilder zeigen das Senken und die rechten beiden das Anheben der Last. Über alle vier Graphen zum Drehmoment gibt es zwei besonders auffällige Effekte: Werden bei unverändertem Mutterkontakt die Spindelkontakte mit positiven Winkeln geändert, so nimmt der Betrag des benötigten Antriebsmomentes mit der Änderung ab. In den Kräften (radial und in Richtung der x-Achse) zeigen sich in diesem Bereich später keine Abnahmen, sondern eher leichte Zunahmen. Ursache für diese Senkung des benötigten Antriebsmomentes ist die geänderte Bewegung der Planeten (spätere Abbildung 94 und Abbildung 96): Werden bei unverändertem

Mutternkontakt die Spindelkontakte mit positiven Winkeln geändert, so nimmt der Betrag des Kippwinkels der Planeten stark ab und das Schränken der Planeten ändert sich stark. Das Schränken beim Senken der Last steigert sich dabei zu hohen negativen Winkeln und beim Anheben der Last zu hohen positiven Winkeln.

Werden bei unverändertem Spindelkontakt die Mutternkontakte mit einem positiven Winkel geändert, so nimmt der Betrag des benötigten Antriebsmomentes mit der Änderung zu. Ursache für diesen Effekt ist die später in Abbildung 90 und Abbildung 92 gezeigten Zunahmen der radialen Kräfte an den Muttern und der Spindel mit der Änderung der Mutternkontakte um einen positiven Winkel. Werden diese beiden zuvor genannten Variationen kombiniert – also sowohl die Spindel- als auch die Mutternkontakte um positive Winkel geändert, so ändert sich das Drehmoment nur wenig. Dieser eher geringe Einfluss auf das Drehmoment ist auch in die Gegenrichtung der Fall – wenn die Winkel der Muttern und Spindelkontakte also gemeinsam in negative Richtung geändert werden.

Bleibt der Winkel an den Mutternkontakten unverändert oder wird er mit einem positiven Winkel geändert und gleichzeitig die Spindelkontakte um einen negativen Winkel geändert, so nimmt das Drehmoment beim Anheben der Last mit den Änderungen deutlich zu. Für das Absenken der Last ergeben sich dabei keine besonderen Tendenzen. Ursache hierfür ist wieder die Bewegung der Planeten und die wirkenden radialen Kräfte: Zum einen ändern sich die mittleren Winkel des Schränkens der Planeten bei diesen Änderungen der Winkel in den Kontakten extrem. Zum anderen nehmen bei einer Änderung der Mutternkontakte um einen positiven Winkel die Beträge des Kippwinkels der Planeten und die radialen Kräfte stark zu. (vgl. spätere Abbildung 90, Abbildung 92, Abbildung 94 und Abbildung 96)

Wird der Flankenwinkel der Muttern im Vergleich zur Referenzgeometrie um einen negativen Winkel geändert und verbleiben die Spindelkontakte dabei unverändert oder werden die Spindelkontakte in positive Richtung verändert, so zeigt sich ein sehr wechselhaftes Verhalten in Abhängigkeit der Winkeländerungen. Ursache dafür ist die bei diesen Änderungen sehr stark wechselnde Bewegung der Planeten (vgl. spätere Abbildung 94 und Abbildung 96)

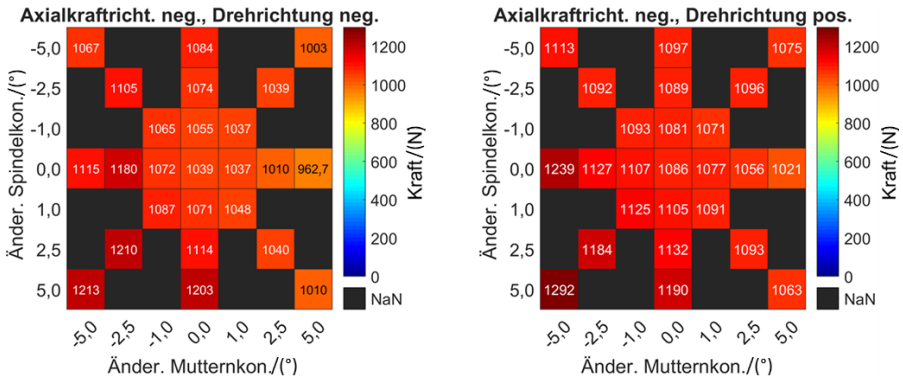


Abbildung 86 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

Die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten werden, für die Bereiche der Simulation in denen hauptsächlich Mutter 1 belastet wird, in Abbildung 86 dargestellt. Bei Mutter 1 sind dies die Bereiche mit negativer Äxialkraftrichtung. Dabei bewegen sich die hier dargestellten Kräfte zwischen 963 und 1292N. Die dazugehörigen Standardabweichungen sind in der Abbildung 87 zu finden. Hier gibt es die drei folgenden grundsätzlichen Tendenzen für die mittleren Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten:

1. Über den gesamten Bereich der Änderung der Mutterkontakte nehmen die mittleren Kräfte in x-Richtung ausgehend von der Änderung  $-5,0^\circ$  zur Änderung um  $+5,0^\circ$  in den hochbelasteten Bereichen mit wenigen Ausnahmen kontinuierlich ab. Die Kräfte nehmen im Schaubild also von links nach rechts ab. Ursache für diese Reduktion der Kräfte ist das Kippen der Planeten. Der Betrag des Kippens nimmt ebenfalls fast genau gleich in der späteren Abbildung 94 mit dieser Änderung der Mutterkontakte von  $-5,0^\circ$  zu  $+5,0^\circ$  bis auf wenige Ausnahmen zu. Das Schränken der Planeten zeigt diese Tendenz nicht.
2. Werden die Mutterkontakte gar nicht oder in positive Richtung geändert, so nehmen die Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten mit dem Betrag der Änderung der Spindelkontakte zu. Begründet liegt dies wieder in der Bewegung der Planeten: In den meisten Fällen wird der Betrag des Schränkswinkels der Planeten mit dem steigenden Betrag der Änderung der Spindelkontakte für



diese Tendenz größer. In den wenigen Ausnahmen davon wird der Betrag des Kippens größer. (vgl. Abbildung 94 und Abbildung 96)

3. Wird der Mutterkontakt mit negativen Winkeln geändert, so erhöhen sich die Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten in Richtung der Änderung der Spindelkontakte von  $-5,0^\circ$  zu  $+5,0^\circ$ . Ursache ist hierfür das Kippen der Planeten – diese nehmen in dieser Änderungsrichtung von negativen Kippwinkeln bis auf wenige Ausnahmen stetig ab. (vgl. Abbildung 94)

Die Standardabweichungen zwischen den Simulationen schwanken in den hier gezeigten Bereichen der Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten zwischen 59 und 227N (vgl. Abbildung 87). Die Standardabweichungen haben größtenteils die gleichen Tendenzen wie die mittleren Kräfte.

Jegliche hier genannte Änderung der mittleren Kräfte in x-Richtung an Mutter 1 wirkt sich aufgrund des Kräftegleichgewichtes gegenteilig auf Mutter 2 aus. Eine Entlastung von Mutter 1 führt somit zu einer Erhöhung der Last an Mutter 2. Die an den Kräften in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten beschriebenen Effekte treten gleichermaßen an den hier nicht gezeigten Kräften in x-Richtung zwischen Mutter 2 und den Planeten auf.

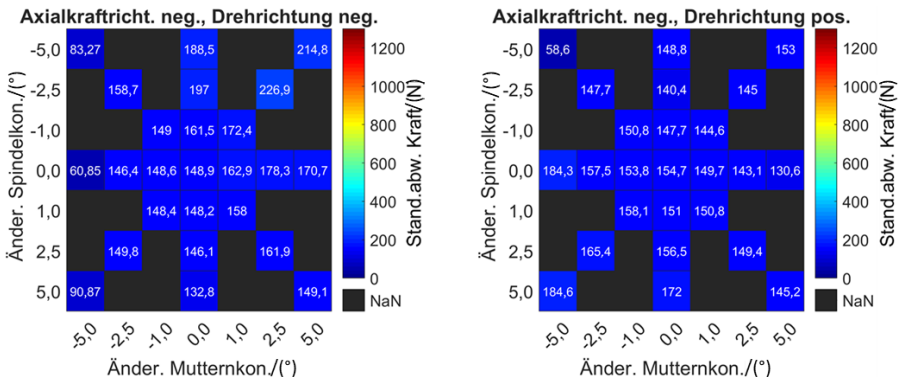


Abbildung 87 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

Im Gegensatz zu den mittleren Kräften in x-Richtung zwischen den Müttern und den Planeten gibt es an den mittleren Kräften zwischen der Spindel und den Planeten durch

die Änderung der Flankenwinkel an den Muttern und/oder Spindelkontakten keine signifikanten Unterschiede. Dies wird in Abbildung 88 für die negative Axialkraftrichtung dargestellt. Die positive Axialkraftrichtung wird mangels Unterschiede zur negativen Axialkraftrichtung nicht dargestellt.

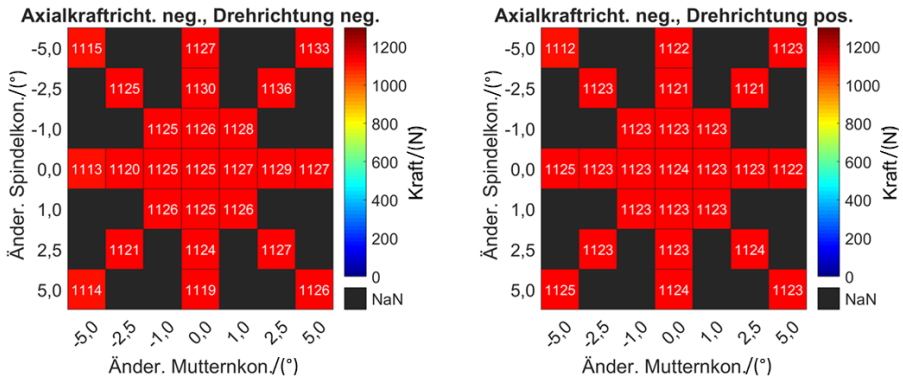


Abbildung 88 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraftrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte

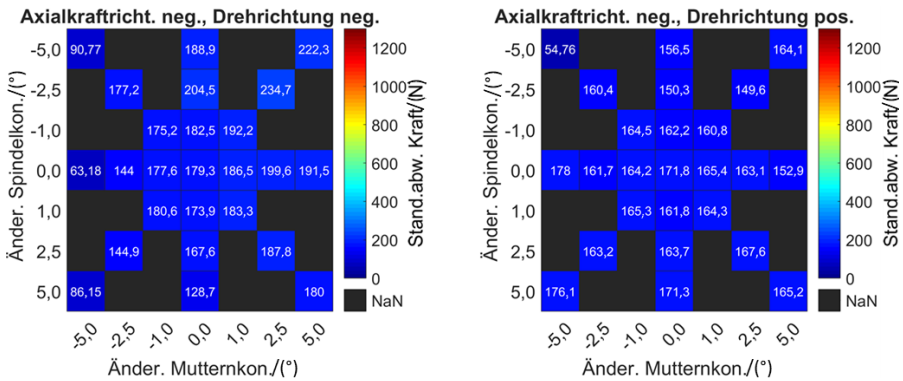


Abbildung 89 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraftrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte

Im Unterschied dazu gibt es bei den dazugehörigen Standardabweichungen große Unterschiede (vgl. Abbildung 89). Zwischen den unterschiedlichen Axialkraftrichtungen

sind dabei die gleichen Tendenzen ersichtlich, allerdings unterscheiden sich die erreichten Werte teils deutlich. Deshalb werden im Folgenden für die erreichten Werte der Standardabweichungen an der Spindel Maxima und Minima beider Axialkraftrichtungen verwendet. Die Standardabweichungen liegen je nach Simulation zwischen 55 und 335N. Auffällig ist dabei, dass die Unterschiede der Standardabweichungen einer Simulation je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung beim Referenzmodell am geringsten sind. Die Standardabweichungen sind u.a. dort stark schwankend, wo die Kräfte an den Muttern am niedrigsten waren. Z.B. liegen die Standardabweichungen für 5,0° Winkeländerung an den Mutterkontakten – ohne eine Änderung an den Spindelkontakten – zwischen ca. 153 und 231N. Beim Referenzmodell liegen diese zwischen ca. 164 und 179N. Damit unterscheiden sich die Werte der unterschiedlichen Lastfälle – also der unterschiedlichen Kombinationen aus Axialkraftrichtung und Drehrichtung – bei der Referenzgeometrie am wenigsten. Die Referenzgeometrie zeigt damit im Vergleich zu den anderen simulierten Geometrien die geringste Abhängigkeit von der Axialkraftrichtung und der Drehrichtung. Begründet liegt eine derartige Stabilität bzw. geringe Werte der Standardabweichungen in jeweils geringen Schwankungen des Kippens und des Schränkens der Planeten (vgl. Abbildung 95 und der Abbildung 97).

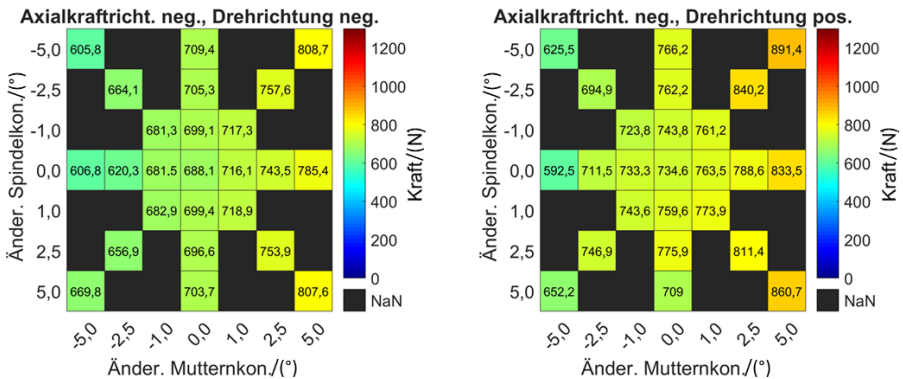


Abbildung 90 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je Drehrichtung in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte

In Abbildung 90 sind die mittleren radialen Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten in Abhängigkeit der Variation der Flankenwinkel an den Muttern- bzw. Spindelkontakten zu sehen. Diese Kräfte bewegen sich in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1

zwischen 593 und 891N. Die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Abbildung 91 dargestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Untersuchungen wie bspw. zum Radialspliel und der Vorspannungen verhalten sich die radialen Kräfte nicht mehr immer analog zu den Kräften in x-Richtung. Die radialen Kräfte zeigen zwei grundsätzliche Tendenzen:

1. Die radialen Kräfte nehmen bis auf wenige Ausnahmen mit dem Betrag der Änderung der Flankenwinkel in den Spindelkontakten zu. Diese Tendenz ist analog zu den Kräften in x-Richtung und liegt auch hier in dem Kippen der Planeten begründet (vgl. Abbildung 94).
2. Die radialen Kräfte nehmen bei der Änderung der Flankenwinkel der Mutterkontakte von  $-5,0^\circ$  zu  $+5,0^\circ$  stetig zu. Im Gegensatz zu den Kräften in x-Richtung gilt diese Tendenz für die radialen Kräfte auch bei Änderungen des Flankenwinkels an den Mutterkontakten in negative Richtung. Für diese Tendenz ist analog zu den anderen Tendenzen die Bewegung der Planeten – ihr kippen und schränken verantwortlich.

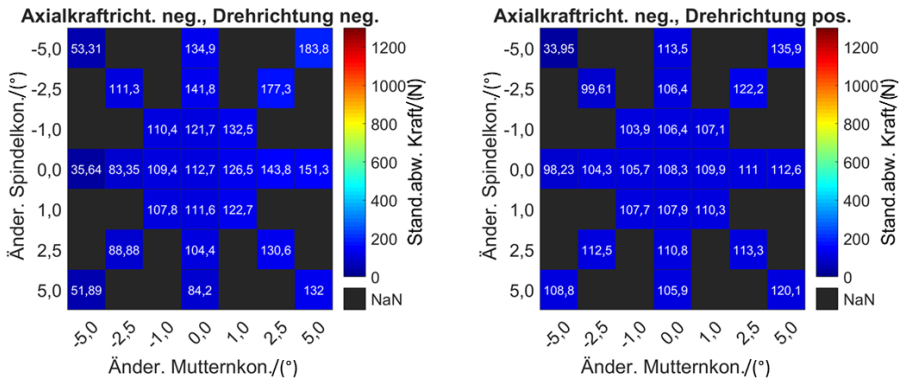


Abbildung 91 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je Drehrichtung in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

Die Standardabweichungen für die radialen Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten weisen ein sehr ähnliches Verhalten zu den mittleren radialen Kräften selbst auf (vgl. Abbildung 91). Sie befolgen die gleichen Tendenzen allerdings nicht so streng – es gibt punktuell einige Simulationen, bei denen sie deutlich abweichen. Ursache dafür sind

die bei diesen Simulationen geringen Schwankungen des Kippens und des Schränkens der Planeten (vgl. Abbildung 95 und Abbildung 97). Die Standardabweichungen der radialen Kräfte in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 bewegen sich zwischen 36 und 184N. Es verhalten sich die mittleren radialen Kräfte und die dazugehörigen Standardabweichungen zwischen Mutter 2 und den Planeten unter Berücksichtigung der hochbelasteten Bereiche genau gleich wie jene zwischen Mutter 1 und den Planeten.

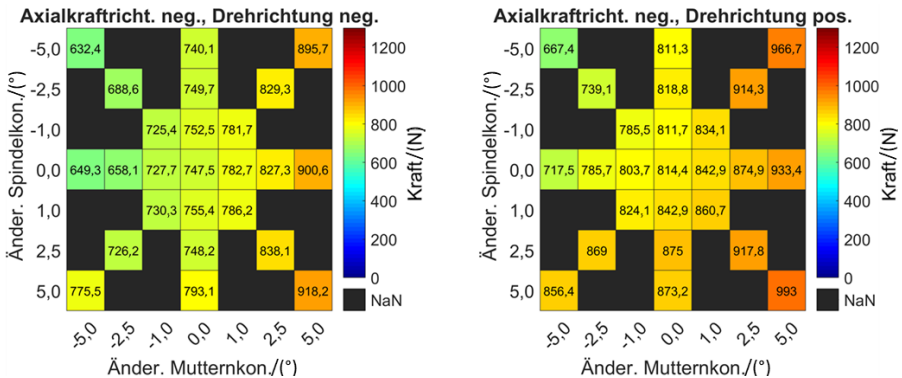


Abbildung 92 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkrafttrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

Im Gegensatz zu den Kräften in x-Richtung zwischen den Planeten und der Spindel unterscheiden sich die dazugehörigen mittleren radialen Kräfte deutlich je nach Variation der Flankenwinkel an den Spindel- und den Mutterkontakten (vgl. Abbildung 92 für negative Axialkrafttrichtung). Die mittleren radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten entsprechen aufgrund des Kräftegleichgewichtes der Summe der radialen Kräfte zwischen beiden Müttern und den Planeten. Je nach Variation der Flankenwinkel in den Müttern oder Spindelkontakten entstehen dabei radiale Kräfte zwischen 616 und 997N. Beide Grenzwerte 616 und 997N sind in der hier nicht im Schaubild dargestellten positiven Axialkrafttrichtung zu finden.

Die Minima der radialen Kräfte liegen bei einer Änderung der Winkel sowohl an den Mutter- als auch an den Spindelkontakten von  $-5,0^\circ$ . Die Maxima sind genau gegenüberliegend bei einer Änderung der Winkel an beiden Kontakten von  $+5,0^\circ$ . Die radialen Kräfte zwischen den Spindeln und den Planeten zeigen die gleichen Tendenzen wie

die radialen Kräfte zwischen den Muttern und den Planeten. Vereinzelt kommt es allerdings zu Abweichungen zu diesen Tendenzen aufgrund der niedrigbelasteten Mutter. In diesen Fällen hat die niedrigbelastete Mutter gegenläufige Tendenzen zur hochbelasteten Mutter.

Auch bei den Standardabweichungen der radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten zeigt sich ein zu den Standardabweichungen der radialen Kräfte zwischen den Muttern und den Planeten ähnliches Verhalten (vgl. Abbildung 93). Je nach Axialkraft- und Drehrichtung bewegen sich die Standardabweichungen zwischen ca. 33 und 273N. Die 273N treten unter der hier im Schaubild nicht dargestellten positiven Axialkraft-richtung auf. Maßgeblich abhängig sind diese Standardabweichungen wieder von der Schwankung des Kippens und des Schränkens der Planeten (vgl. Abbildung 95 und Abbildung 97).

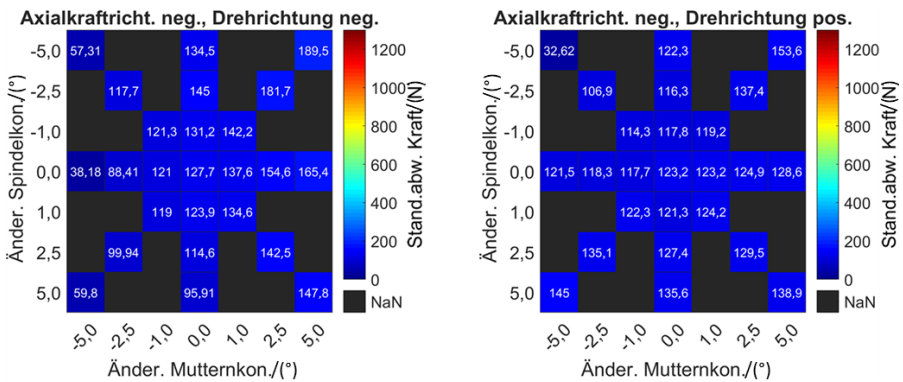


Abbildung 93 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraft-richtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

Das Kippen der Planeten bewegt sich in den hier gezeigten Simulationen zwischen  $-0,5^\circ$  und  $+0,5^\circ$  (vgl. Abbildung 94). Der Betrag des Kippens der Planeten nimmt bis auf wenige Ausnahmen mit der Änderung der Mutterkontakte von der Änderung um  $-5,0^\circ$  zur Änderung um  $+5,0^\circ$  stetig zu. Analog zu den vorherigen Untersuchungen – bspw. in der Variation der Anwendung – ist die Richtung des Kippens auch bei der Variation des Flankenwinkels bis auf wenige Ausnahmen von der Axialkraft-richtung abhängig. D.h. bei positiver Axialkraft-richtung kippen die Planeten in die negative Richtung und

bei negativer Axialkraftrichtung kippen die Planeten in die positive Richtung. Bei den wenigen Ausnahmen in der Variation der Flankenwinkel, in denen dies nicht zutrifft, ist der Winkel des Kippens kleiner 0,07°. In den meisten Fällen nimmt der Betrag des Kippens bei einer Änderung des Spindelkontaktes um  $-5,0^\circ$  zur Änderung um  $+5,0^\circ$  stetig zu, sofern dabei die Mutterkontakte mit negativen Winkeln geändert wurden. Die zum Kippen gehörende Standardabweichungen sind in Abbildung 95 dargestellt. Die maximal erreichte Standardabweichung ist  $0,03^\circ$ .

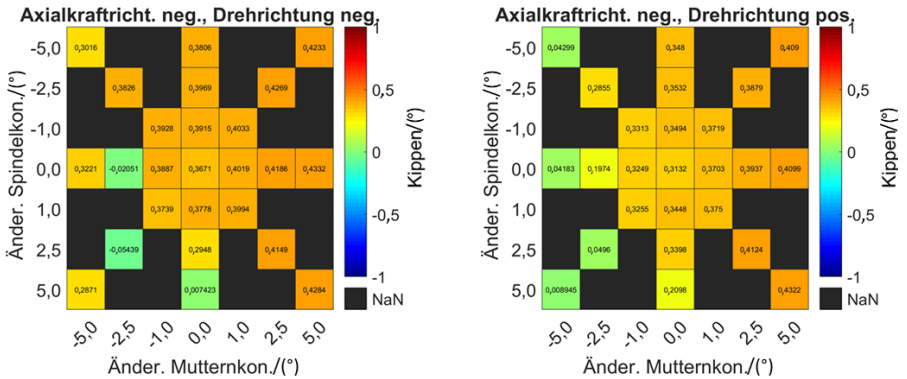


Abbildung 94 Mittleres Kippen der Planeten je Drehrichtung für negative Axialkraftrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

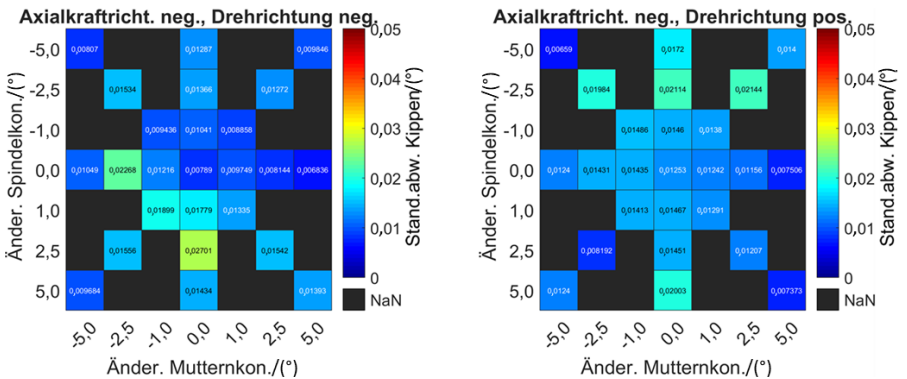


Abbildung 95 Standardabweichung des Kippens der Planeten je Drehrichtung für negative Axialkraftrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkontakte

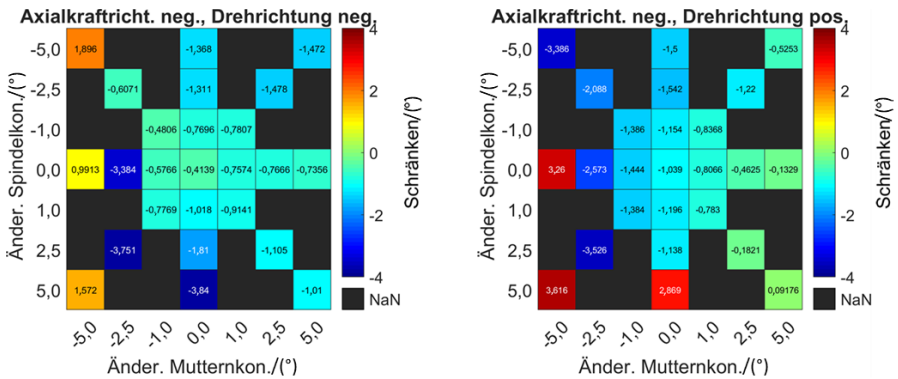


Abbildung 96 Mittleres Schränken der Planeten je Drehrichtung für negative Äxialkraft- richtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mutter- und Spindelkon- takte

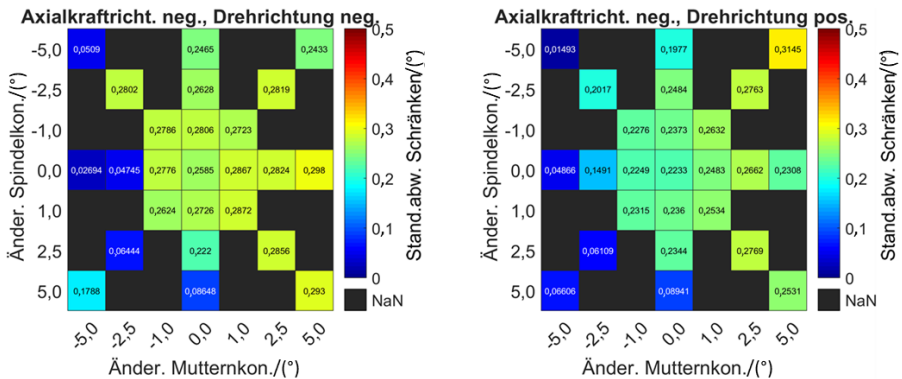


Abbildung 97 Standardabweichung des Schränkens der Planeten je Drehrichtung für negative Äxialkraft- richtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Mut- tern- und Spindelkontakte

Im Vergleich zum Kippen der Planeten ist es beim Schränken der Planeten schwieriger einheitliche Tendenzen zu finden (vgl. Abbildung 96). Das Schränken der Planeten bewegt sich in den hier gezeigten Simulationen zwischen  $-4,0^\circ$  und  $+4,0^\circ$ . Bis auf wenige Ausnahmen schränken die Planeten in Richtung der Spindelsteigung. Mit dem Betrag der Änderung des Spindelkontaktes nimmt meist der Betrag des Winkels des Schränkens der Planeten zu. Weiterhin nimmt beim Anheben der Last der Betrag des Schränkens mit der Änderung der Mutterkontakte von  $-5,0^\circ$  in Richtung  $+5,0^\circ$  stetig ab. In



Abbildung 97 sind die zum Schränken der Planeten gehörende Standardabweichungen dargestellt. Die maximale Standardabweichung beim Schränken ist im Vergleich zum Kippen deutlich größer und liegt bei  $0,33^\circ$  bei einer hier nicht dargestellten Simulation im Bereich einer positiven Axialkraftichtung.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Einflüsse durch die Änderung der Flankenwinkel auf den PWG:

- Durch die Änderung der Flankenwinkel kann das benötigte Antriebsmoment und der Wirkungsgrad des PWG deutlich verändert werden
- Durch die Änderung der Flankenwinkel können die radialen Kräfte zwischen den Muttern bzw. der Spindel und den Planeten in hohem Maße geändert werden. Gleichmaßen lassen sich dadurch auch die übertragenen axialen Kräfte zwischen den Muttern verschieben. Durch die Änderung der Flankenwinkel wird das Verhalten der Planeten bzgl. Schränken und Kippen verändert. Durch die Änderung der Schränk- und Kippwinkel ändern sich wiederum die übertragenen Kräfte.
- Aus der Änderung des Kippens und Schränkens der Planeten aufgrund der Variation der Flankenwinkel resultieren allerdings nur Verschiebungen der Kräfte – eine Optimierung bzgl. den radialen Kräften in einem Lastfall erfolgt bspw. auf einer Verschlechterung der axialen Kräfte oder eines anderen Lastfalles.
- Die Stabilität der Kräfte ist hauptsächlich von der Schwankung des Kippens und des Schränkens der Planeten abhängig. Mit zunehmender Schwankung dieser Bewegungen nehmen die Standardabweichungen zu. In den hochbelasteten Bereichen der Muttern – bzw. in den übertragenen Kräften zwischen der Spindel und den Planeten werden abhängig von den Schwankungen des Kippens und des Schränkens Standardabweichungen zwischen 59 und 382N erreicht. Diese Schwankungen der Kräfte sind bei der Referenzgeometrie über alle vier Kombinationen aus Axialkraftichtung und Drehrichtung am ähnlichsten.

#### **5.5.4 Übersetzungsverhältnis**

Um die Übersetzung des PWGs bei möglichst gleicher Geometrie zu variieren, ist es sinnvoll, die Durchmesser der Planeten in den Spindel- bzw. Mutterkontakten zu variieren. Diese Variation wird in Abbildung 98 dargestellt.

Die Planeten haben im Vergleich zu den Muttern und der Spindel die kleinsten Durchmesser. Daher führt bei ihnen eine im Vergleich kleine Änderungen zu großen

Auswirkungen auf die Übersetzung des PWGs. Ausgehend von der Referenzgeometrie wurden die Durchmesser der mit den Müttern in kontaktstehenden Rillen der Planeten vergrößert und in gleichem Maße die Rillen der Planeten, die in Kontakt mit der Spindel stehen, verkleinert. Durch die im Betrag gleiche Änderung an den Rillen mit Mütternkontakt und Spindelkontakt bleibt das Radialspiel weiterhin bei 36µm. Die Durchmesser wurden dabei um bis zu 0,3mm im Vergleich zur Referenzgeometrie geändert.

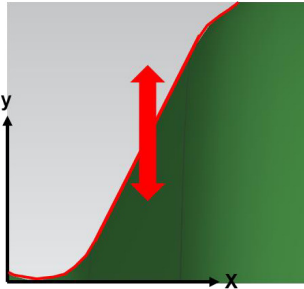


Abbildung 98 Änderung des Übersetzungsverhältnisses

Linear mit der Änderung des Durchmessers und analog zur Änderung der Übersetzung nimmt das benötigte Antriebsmoment, wie in Abbildung 99 dargestellt, beim Anheben der Last von ca. 4,4 auf 5,0Nm zu. Analog und mit dem gleichen Verhältnis nehmen auch die benötigten Drehmomente zum Absenken der Last zu.

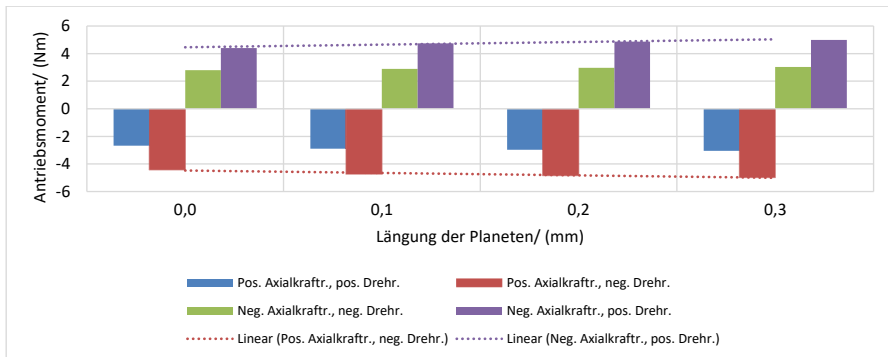
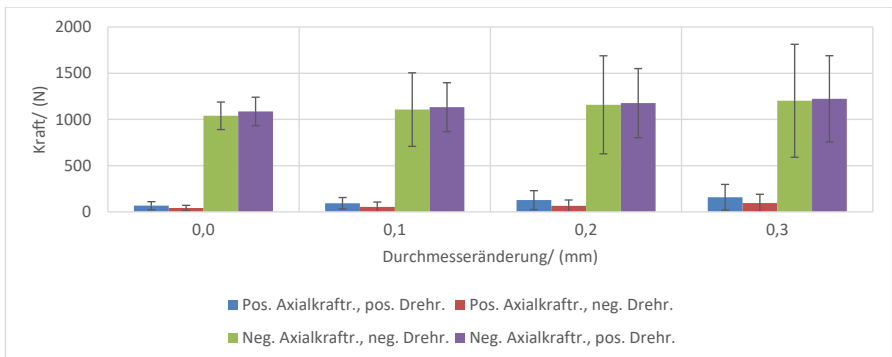


Abbildung 99 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Durchmesseränderung. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben.

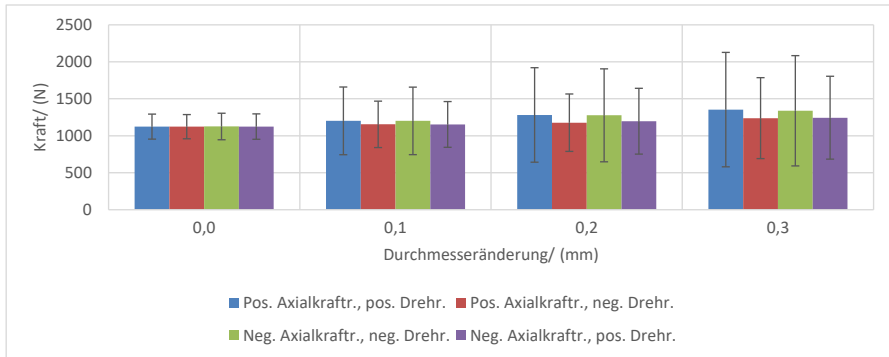
Die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten nehmen mit der Durchmesseränderung sowohl für das Anheben als auch das Absenken der Last deutlich in den niedrig und in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 zu. (vgl. Abbildung 100) Analog zum Drehmoment ist dieses Verhalten linear. Die Zunahme in den hochbelasteten Bereichen beträgt ca. 10% beim Anheben und 20% beim Absenken der Last. Die Standardabweichungen nehmen dabei um ca. 316% beim Anheben und 400% beim Absenken der Last zu. Die Ursache dafür ist die mit der Durchmesseränderung zunehmende Instabilität des Kippens und des Schränkens der Planeten. Dies wird später in diesem Kapitel näher ausgeführt. Damit ist beim Absenken der Last die Standardabweichung bei 0,3mm Durchmesseränderung deutlich größer als beim Anheben der Last. Beim Referenzmodell (0,0mm Durchmesseränderung) sind diese beiden Standardabweichungen gleich groß. Schon 0,1mm Durchmesseränderung führen dabei im Vergleich zum Referenzmodell in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 zu Erhöhungen der Standardabweichung beim Anheben der Last um 166% und beim Absenken der Last um 266%. Es verhalten sich die mittleren Kräfte in x-Richtung für Mutter 2 unter Berücksichtigung der höchstbelasteten Bereiche bei positiver statt negativer Axialkraftrichtung analog zu den Kräften zwischen Mutter 1 und den Planeten.



*Abbildung 100 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Durchmesseränderung*

Das quadratische Mittel der Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten und die dazugehörigen Standardabweichungen nehmen mit der Durchmesseränderung analog zu den Muttern deutlich zu (vgl. Abbildung 101). Auch hier ist die Zunahme beim Absenken der Last deutlich höher als beim Anheben der Last. Im

Unterschied zu den Muttern gehen an der Spindel aber die mittleren quadratischen Kräfte beim Absenken der Last über jene beim Anheben der Last deutlich hinaus.



*Abbildung 101 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel je nach Axialkraftichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Durchmesseränderung*

Analog zu vorherigen Simulationsreihen, wie bspw. dem Radialspiel und den verlängerten Planeten, verhalten sich die radialen Kräfte zwischen den Muttern bzw. der Spindel und den Planeten ähnlich zu den Kräften in x-Richtung. Auch hier sind die mittleren radialen Kräfte bei ca. 70% der Kräfte in x-Richtung. Der Unterschied zwischen Absenken und Anheben der Last ist allerdings absolut bei den radialen Kräften gleich zu den Kräften in x-Richtung. Weiterhin sind die radialen Kräfte bei der maximalen Durchmesseränderung beim Absenken der Last im Vergleich zu den Kräften in x-Richtung nur leicht und nicht mehr deutlich größer als beim Anheben der Last. Die Standardabweichungen der radialen Kräfte sind ebenfalls wieder gleich groß wie jene der Kräfte in x-Richtung.

Das mittlere Kippen der Planeten nimmt, wie in Abbildung 102 dargestellt wird, bis einschließlich einer Durchmesseränderung der Planeten von 0,2mm linear zu. Dabei steigen die Winkel des Kippens um bis zu 0,1° an. Bei der Durchmesseränderung von 0,3mm bleibt das mittlere Kippen der Planeten vergleichbar zur Durchmesseränderung von 0,2mm bzw. nimmt in einzelnen Lastfällen um ca. 0,02° ab. Mit der Durchmesseränderung nimmt allerdings auch die Standardabweichung des Kippens extrem zu.

Beim Schränken der Planeten verhält sich das mittlere Schränken der Planeten vergleichbar zu ihrem Kippen (vgl. Abbildung 103). Zusätzlich nimmt die

Standardabweichung des Schränkens der Planeten deutlich mit der Durchmesseränderung streng monoton von ca.  $0,23^\circ$  auf  $0,60^\circ$  zu. Diese Änderung des Schwankens des Schränkens liegt in den geänderten Wälzkreisen an den Planeten begründet. Legt man eine Gerade durch die Kontaktpunkte der höchstbelasteten Muttern und Spindelwindung so wird diese mit steigender Durchmesseränderung immer achsparalleler zur Spindelachse. Je achsparalleler zur Spindelachse diese Gerade wird, desto weniger wird der Planet radial in die höchstbelastete Mutter gedrückt und damit umso weniger in seiner Position stabilisiert.

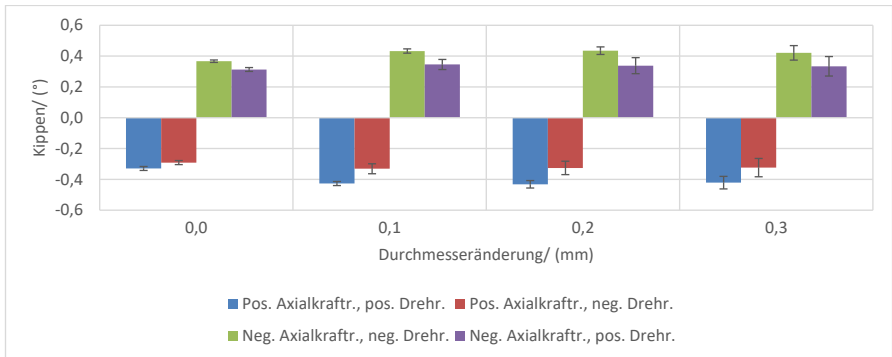


Abbildung 102 Mittleres Kippen der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Durchmesseränderung

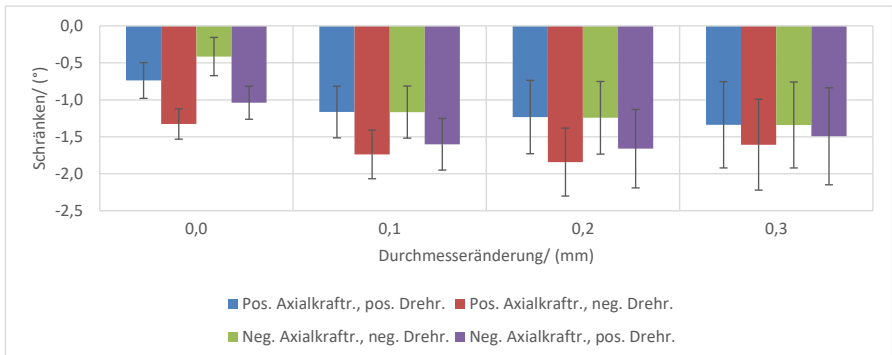


Abbildung 103 Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Durchmesseränderung

Zusammenfassend ergibt sich folgender Einfluss durch die Änderung der Übersetzung des PWGs mittels einer Änderung der Durchmesser der Planeten auf den PWG: Bei der gezeigten Änderung der Übersetzung steigen die Standardabweichungen der Kräfte in x-Richtung und der radialen Kräfte mit der Änderung des Durchmessers aufgrund der hohen Schwankung des Kippens und des Schränkens der Planeten extrem an. Daher ist diese Veränderung des Systems nicht zu empfehlen. Eine Änderung in die Gegenrichtung der hier gezeigten Durchmesseränderungen – also die Verkleinerung der Durchmesser an den Mutterkontakten und die Vergrößerung der Durchmesser an den Spindelkontakten ist nicht für alle Anwendungsfälle sinnvoll. Dabei würden die tragenden Querschnitte im Verhältnis stark an den geometriebedingten Kerben sinken und deshalb die durch die Planeten übertragbaren Zug-Druckkräfte deutlich verringert.

### 5.5.5 Steigung an den Planeten

Weder die Muttern noch die Planeten besitzen eine Steigung. In den Mutter-Planetenkontakten werden die Planeten daher in eine zur Mittelachse der Komponente parallele Achse gedrückt. In den Kontakten zwischen der Spindel und den Planeten folgt aufgrund der Steigung der Spindel in Kombination mit den steigungslosen Planeten eine Bevorzugung einer zur Mittelachse schiefen Planetenstellung. Nachdem die Mutter-Planetenkontakte unabhängig von den Spindel-Planetenkontakten sind, soll im Folgenden untersucht werden, wie sich eine Steigung der Planeten im mittleren nur auf der Spindel abrollenden Teil auswirkt. Aufgrund der Geometrie der Planeten können dabei nur Steigungen  $\geq$  der Zahnbreite von 1,03mm an den Planeten gewählt werden. Um die Zahngeometrie vergleichbar zu halten ist es sinnvoll, die Steigung an den Planeten auf ein Vielfaches der Zahnbreite festzulegen.

Die Spindel besitzt eine Steigung von 3,09mm und ist dreigängig. Ihre Windungen und die der Planeten besitzen die gleiche Breite von 1,03mm. Die Planeten besitzen an den Windungen im Kontakt mit der Spindel einen Wälzkreisdurchmesser der ca. 1/3 des der Spindel ist. Um an den Planeten einen mit der Spindel vergleichbaren Steigungswinkel zu erhalten, muss deshalb die Steigung 1,03mm an den Planeten an den Windungen für die Spindel für eine gleichbleibende Zahnbreite gewählt werden.

Werden die Planeten mit einer Steigung im Spindelkontakt bei einer Nenndrehzahl von 1706U/min, 10kN Axialkraft und einer Vorspannung von 621N simuliert, so ergeben sich beispielsweise die in Abbildung 104 dargestellten Verläufe für die Kräfte in axialer

Richtung zwischen den Planeten und der Mutter. Es zeigt sich ein äußerst instabiles und für die Lebensdauer der Komponente ungünstiges Verhalten. Bei gleichbleibender Axialkrafttrichtung Übertragen einzelne Planeten die ganze Kraft, bei anderen fällt die Kraft auf näherungsweise 0 ab. Im Vergleich dazu sind die Kräfte in einer Simulation unter den gleichen Randbedingungen aber mit Planeten ohne eine Steigung deutlich geringer und stabiler. Dargestellt wird dies in Abbildung 105.

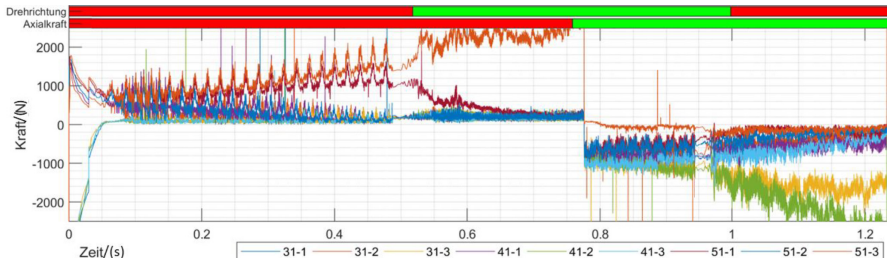


Abbildung 104 Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und steigungsbehafteten Planeten

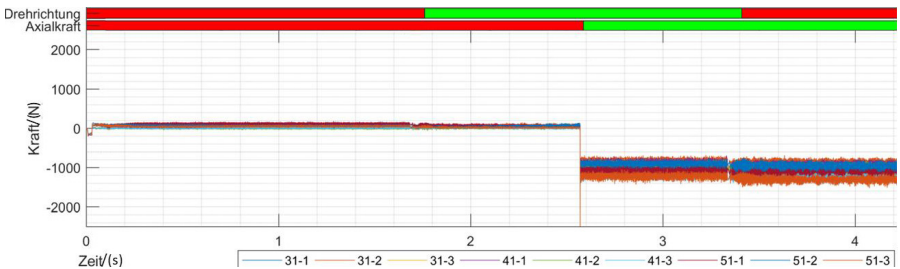


Abbildung 105 Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und Planeten ohne Steigung (Referenzgeometrie)

Ursache für dieses Verhalten in der Kraftübertragung der Planeten mit einer Steigung in den Spindelkontakten sind geometriebedingt geänderte Richtungen der in den Kontakten wirkenden Kräfte und ein ganz anderes Schrägen und Kippen der Planeten als bei der Referenzgeometrie. Wie aus Abbildung 106 deutlich sichtbar ist, schwankt das Schrägen und Kippen extrem. Analog zur Untersuchung des Übersetzungsverhältnisses in Kapitel 5.5.4 entstehen daher extreme Kraftschwankungen in den von den einzelnen Planeten übertragenen Kräften. Es ist daher ausgehend von Referenzgeometrie nicht zu empfehlen die Planeten im Spindelkontakt mit einer Steigung zu versehen.

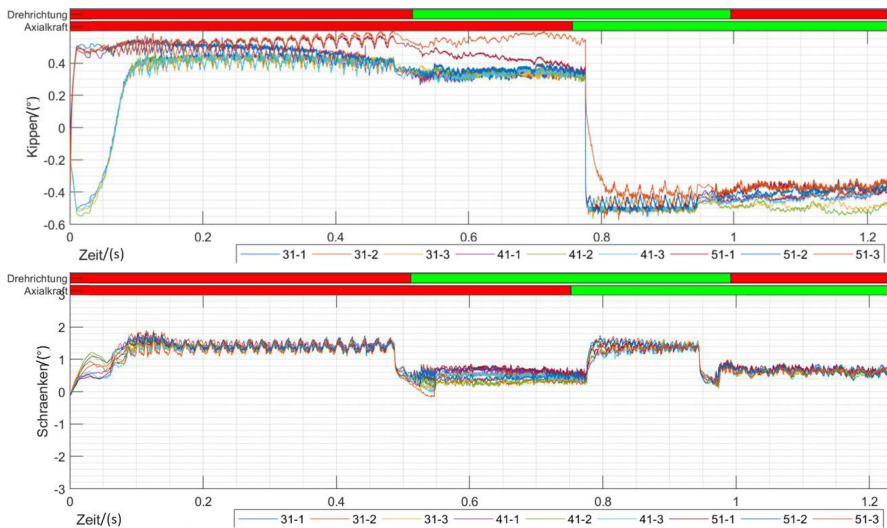


Abbildung 106 Kippen (oben) und Schränken (unten) der Planeten mit steigungsbehafteten Planeten

## 5.6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Baugrößen

In dieser Simulationsreihe soll untersucht werden, ob die Ergebnisse der Variation der Anwendung und der Variation der Geometrie anhand der Referenzgeometrie allgemeingültig – auf andere PWGs übertragbar – sind. Wie in Kapitel 5.3 ausgewählt, werden dazu die Baugrößen PWG09x3 und PWG25x2 untersucht. Die wichtigsten geometrischen Kenngrößen dieser PWGs sind in der folgenden Tabelle 8 dargestellt. Bei der Einbaurichtung der Planeten wird dabei durch jeweils ein „+“ bzw. „-“ die Einbaurichtung eines Planeten angegeben. D.h. „+ + +“ bedeutet es werden drei Planeten in der als positiv bezeichneten Einbaulage verbaut.

Nachdem in den Variationen der Anwendung und der Geometrie unterschiedlichste Parameter auf ihre Auswirkungen auf Kinematik und Kinetik des PWG untersucht wurden, soll nun daraus ein geeigneter Parameter zum Nachweis der Übertragbarkeit der gezeigten Ergebnisse auf andere Baugrößen ausgewählt werden. Um eine Vergleichbarkeit mit verfügbaren Datenblätter zu ermöglichen und nachweislich funktionierende PWGs in Versuchen verwenden zu können, soll der zu wählende Parameter einer der untersuchten Parameter der Anwendung sein. Damit verbleiben als mögliche Parameter die Vorspannung, die Axialkraft und die Drehzahl. Die Vorspannung und die



Axialkraft beeinflussten in den hier gezeigten Untersuchungen die Kinematik und Kinetik des PWGs deutlich stärker als die Drehzahl. Für den hier durchzuführenden Vergleich wird die Axialkraft gewählt, da sie im Vergleich zur Vorspannung bei ihrer Variation vor allem linear zu- oder abnehmende Effekte an Kräften und Bewegungen erzeugt. Aus den sich linear verhaltenen Effekten wird bei der Überprüfung der unterschiedlichen Baugrößen ein gutmütigeres Verhalten erwartet.

*Tabelle 8 Geometrische Kenngrößen PWG09x3, PWG15x3 und PWG25x2*

Baugröße	<b>PWG09x3</b>	<b>PWG15x3</b>	<b>PWG25x2</b>
Systemsteigung/ (mm/U)	2,25	2,11	1,31
Spindeldurchmesser/ (mm)	9	15	25
Gängigkeit Spindel	3	3	2
Steigungswinkel Spindel/ (°)	6,3	3,8	1,5
Radialspiel/ ( $\mu\text{m}$ )	21	36	0
Anzahl Planeten	6	9	12
Verwendete Planetentypen	31, 51	31, 41, 51	31, 41, 51
Einbaurichtung Planeten 31	+++	+++	+ - + -
Einbaurichtung Planeten 41		---	+ - + -
Einbaurichtung Planeten 51	---	+++	+ - + -

Nachdem die Axialkraft zuvor für den PWG15x3 in Kapitel 5.4.2 bereits im Detail untersucht wurde, sollen hier für den Nachweis der Übertragbarkeit auf andere Baugrößen zwei Betriebspunkte untersucht werden: zum einen das Verhalten ohne eine wirkende Axialkraft und zum anderen das Verhalten bei einer wirkenden Axialkraft. Für Simulation bei einer wirkenden Axialkraft des PWG15x3 wird die Referenzsimulation (vgl. Kapitel 5.1) gewählt. Für diese liegen bereits die meisten Erkenntnisse vor und sie ist die Basis für die Variationen der Anwendung und der Geometrie. Um die Planetenbelastung zum PWG15x3 vergleichbar zu halten, werden in den Simulationen mit einer Axialkraft die Axialkräfte für die PWG09x3 auf 6,66kN und für den PWG25x2 auf 13,33kN gesetzt. Gleichzeitig werden deshalb auch die Vorspannung beim PWG09x3 auf 0,46kN und beim PWG25x2 auf 0,84kN gesetzt. Es ergeben sich zusammenfassend die in der Tabelle 9 dargestellten zu simulierenden Anwendungen zum Nachweis der Übertragbarkeit der zuvor gezeigten Ergebnisse der Variationen der Anwendung und Geometrie auf andere Baugrößen.

Tabelle 9 Simulierte Anwendungen des PWG09x3, PWG15x3 und PWG25x2

Baugröße	PWG09x3	PWG15x3	PWG25x2
Simulierte Vorspannung/ (kN)	0,46	0,63	0,84
	0	0	0
Simulierte Axialkräfte/ (kN)	6,66	10,00	13,33
Simulierte Drehzahl/ (U/min)	1706	1706	1706

Bevor die Ergebnisse dieser Simulationen diskutiert werden, soll noch bestimmt werden anhand welcher Kriterien der Nachweis der Übertragbarkeit der am PWG15x3 ermittelten Erkenntnisse auf andere Baugrößen erfolgt. Eine Übertragbarkeit der am PWG15x3 ermittelten Erkenntnisse auf andere Baugrößen ist nur gewährleistet, wenn die am PWG15x3 parametrisierten Kontaktmodelle für PWGs allgemeingültig sind. D.h. bei der Simulation der Baugrößen PWG09x3 und PWG25x2 mit den Parametern der Kontaktmodelle des PWG15x3 müssen die für diese Baugrößen korrekten Übersetzungen und Antriebsmomente entstehen. Weiterhin müssen bei allen Baugrößen die wirkenden Kräfte und Bewegungen der Planeten qualitativ ähnlich sein. Aufgrund der zuvor in Tabelle 8 gezeigten geometrischen Unterschiede der Baugrößen im Radialspiel, der Systemsteigung, der Anzahl an Planeten, den verbauten Planetentypen und den unterschiedlichen Einbaurichtungen dieser Planeten sind hier allerdings deutliche Unterschiede zwischen den Baugrößen zu erwarten.

Die korrekte Übersetzung des PWGs in den Simulationen soll über die in den Simulationen erreichte Systemsteigung nachgewiesen werden. Dabei ist zu prüfen, ob die Parametrierung der Kontaktmodelle des PWG15x3 auch für die Baugrößen PWG09x3 und PWG25x2 gilt. Für 1706U/min ergeben sich für den PWG09x3 aus der Nennsteigung nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32) eine translatorische Geschwindigkeit der Muttern zur Spindel von 63,98mm/s. Für den PWG25x2 ist diese Geschwindigkeit nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32) 37,25mm/s. Für den PWG09x3 wurden zusätzlich eigene Versuche am PWG-Prüfstand mit einer Spindeldrehzahl von 1331U/min und damit einer translatorischen Geschwindigkeit der Muttern zur Spindel von 49,92mm/s durchgeführt.

In der folgenden Tabelle 10 sind die Unterschiede zwischen der Geschwindigkeit aus der Simulation bzw. Versuch im Vergleich zum Datenblatt für die hier zu prüfenden PWG09x3 und PWG25x2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten und damit auch die Systemsteigungen in der Simulation des PWG25x2 nur geringfügig

(Betrag des Fehlers  $\leq 2,2\%$ ) von denen des Datenblatts abweichen. Die Simulation bildet in Bezug auf die Systemsteigung sehr gut den PWG25x2 ab. Beim PWG09x3 sind die Unterschiede deutlich größer. Hier weichen die Geschwindigkeiten und Systemsteigungen in den Simulationen vom Datenblatt im Betrag um bis zu 8,8% ab. Analog zu den Versuchen mit dem PWG15x3 (gezeigt in Kapitel 4.1.4) sind die Systemsteigungen im Versuch beim PWG09x3 immer größer als nach dem Datenblatt. Beim PWG15x3 waren die Geschwindigkeiten beim Absenken der Last zwischen 3,1 und 3,6% und beim Anheben zwischen 1,2 und 2,1% höher als nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32). Der PWG09x3 liegt damit beim Absenken der Last mit 3,2% Abweichung im Bereich des PWG15x3, beim Anheben der Last liegt er aber mit 3,0% deutlich über dem PWG15x3. Die Simulation des PWG09x3 bildet damit die Realität im Bezug zur Systemsteigung gut, aber schlechter als beim PWG15x3 bzw. PWG25x2 ab.

*Tabelle 10 Erreichte Geschwindigkeiten in der Simulation bzw. Versuchen im Vergleich zu den Geschwindigkeiten aus dem Datenblatt nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32)*

Simulation Axialkraftrichtung positiv					
Baugröße	Geschwindigkeit/ (mm/s)		Fehler/ (%) zum Datenblatt		
	Anheben d. Last	Absenken d. Last	Anheben d. Last	Absenken d. Last	
PWG09x3	58,3	67,2	-8,8		5,1
PWG25x2	36,7	37,3	-1,6		0,1
Simulation Axialkraftrichtung negativ					
Baugröße	Geschwindigkeit/ (mm/s)		Fehler/ (%) zum Datenblatt		
	Anheben d. Last	Absenken d. Last	Anheben d. Last	Absenken d. Last	
PWG09x3	60,2	68,3	-5,9		6,8
PWG25x2	36,4	37,9	-2,2		1,7
Versuch Axialkraftrichtung negativ (Prüfling 5)					
Baugröße	Geschwindigkeit/ (mm/s)		Fehler/ (%) zum Datenblatt		
	Anheben d. Last	Absenken d. Last	Anheben d. Last	Absenken d. Last	
PWG09x3	51,4	51,5	3,0		3,2

In Abbildung 107 werden die benötigten Antriebsmomente für jede Baugröße mit und ohne wirkende Axialkraft dargestellt. Betrachtet man die Leerlaufmomente – also die Simulationen ohne Axialkraft – so benötigt der PWG09x3 0,06Nm, der PWG15x3 0,23Nm und der PWG25x2 0,63Nm. Durch Systemsteigungen, die Planetenanzahl und der an die Planetenanzahl angepassten Vorspannungen würde man erwarten, dass der Unterschied im Antriebsmoment zwischen PWG09x3 zu PWG15x3 größer als der von PWG15x3 zu PWG25x2 ist. Es verhält sich aber genau entgegengesetzt. Dies kann

u.a. durch einen schlechteren Wirkungsgrad des PWG25x2 erklärt werden und deckt sich mit dem Wissen zur Komponente: nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020) hat der PWG09x3 einen Wirkungsgrad von 82%, der PWG15x3 einen von 83% und der PWG25x2 nur einen von 59%. Ohne eine wirkende Axialkraft verhalten sich die PWGs qualitativ perfekt gleich: das benötigte Antriebsmoment ist rein von der Drehrichtung abhängig und der Betrag des Antriebsmomentes ist für alle Kombinationen aus Drehrichtung und Axialkraft für den jeweiligen PWGs genau gleich.

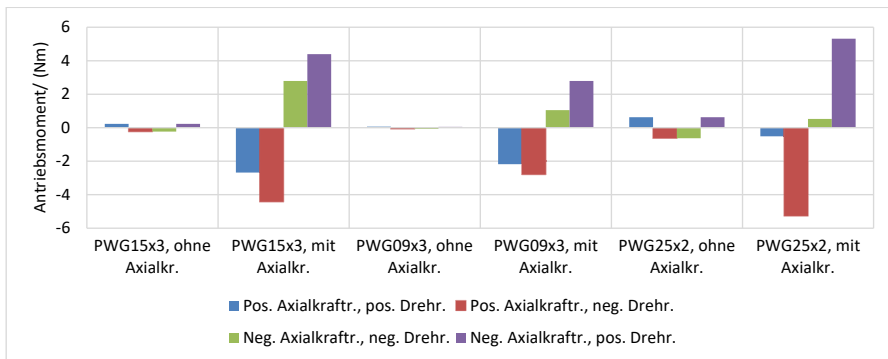


Abbildung 107 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft. Durch das Vorzeichen wird die Richtung des Momentes um die Spindelachse (x-Achse) angegeben.

Unter einer wirkenden Axialkraft verhalten sich die PWGs dahingegen ähnlich, dass das benötigte Antriebsmoment beim Absenken der Last deutlich kleiner als beim Anheben ist. In der Simulationsreihe zur Axialkraft (siehe Kapitel 5.4.2) nahm dieser Unterschied zwischen dem Anheben und dem Absenken der Last mit der Axialkraft zu. Dies ist beim Vergleich der Baugrößen hier ebenfalls der Fall. Im Vergleich ist dieser Effekt bei gleichzeitig unterschiedlichen Baugrößen aber deutlich stärker ausgeprägt (vgl. Abbildung 107). Zu beachten ist dabei, dass bei zunehmender Baugröße und Axialkraft das benötigte Moment beim Anheben der Last immer zunimmt. Beim Absenken der Last hingegen nimmt es vom PWG09x3 mit 6,66kN Axialkraft zum PWG15x3 mit 10kN Axialkraft zu, wohingegen es vom PWG15x3 zum PWG25x2 abnimmt. Vom PWG15x3 zum PWG25x2 nimmt es um ca. Faktor 5,2 ab. Berücksichtigt man die Systemsteigungen, Wirkungsgrade und die jeweils wirkenden Axialkräfte müsste das Moment nur um ca. 70% abnehmen. Der Wirkungsgrad des PWG25x2 befindet sich mit 59% nicht weit

von der Selbsthemmung entfernt. Nachdem unter einer wirkenden Axialkraft bei diesem PWG die Momente beim Absenken der Last geringer als die in der Simulation ohne Axialkraft sind, ist die wahrscheinlichste Ursache für die starke Änderung des Antriebsmomentes des PWG25x2 im Vergleich zum PWG15x3 eine Selbsthemmung – und damit ein Wirkungsgrad  $< 50\%$  – des PWG25x2 beim Absenken der Last.

Beim PWG09x3 ist im Vergleich zu den beiden anderen PWGs bei einer wirkenden Axialkraft beim Absenken der Last eine deutliche Abhängigkeit von der Axialkraft-richtung zu sehen: je nach Axialkraft-richtung sind es 0,33 oder 0,16Nm. Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, 16, 32-33) bräuchte der PWG09x3 ein Antriebsmoment von 2,91Nm für eine Axialkraft von 6,66kN und der PWG25x2 ein Antriebsmoment von 4,71Nm für eine Axialkraft von 13,33kN. In eigenen Versuchen am PWG-Prüfstand mit dem PWG09x3 wurde für 6,50kN Axialkraft ein Antriebsmoment von 3,0Nm ermittelt. Dies deckt sich gut mit dem Datenblatt und sehr gut mit der Simulation. Wie aus Abbildung 107 ersichtlich sind die Momente zum Anheben einer Last beim PWG09x3 um 4,2% niedriger als nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020). Nachdem die Systemsteigungen und die Momente gut im Bezug zu den Werten aus den Versuchen und dem Datenblatt passen, ist die gewählte Parametrierung des Kontaktmodells auch für andere PWGs gültig.

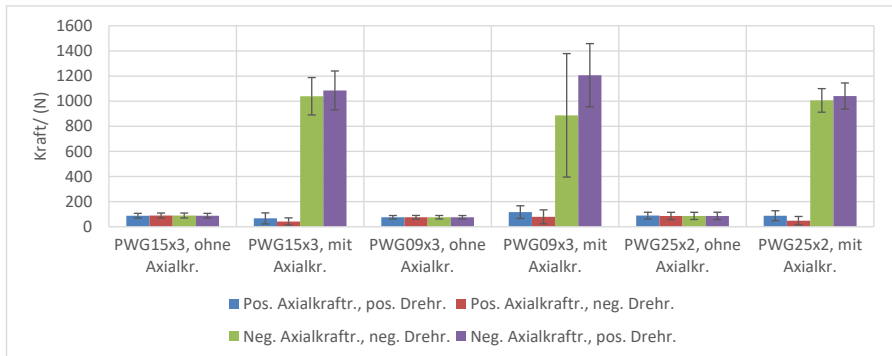


Abbildung 108 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraft-richtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft

Betrachtet man die in x-Richtung wirkenden Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten (vgl. Abbildung 108), so verhalten sich die unterschiedlichen PWG-Baugrößen sehr ähnlich. Wirkt keine Axialkraft und nur die an die Planetenanzahl angepasste

Vorspannung, so ist diese Kraft und die Standardabweichung dieser Kraft genau gleich. Wirkt hingegen eine Axialkraft, so sind sich alle Baugrößen in Bezug auf die mittleren Kräfte pro Planeten ähnlich. Bei allen Baugrößen wird abhängig von der Axialkraft-richtung eine Mutter hochbelastet und eine niedrigbelastet. Dabei sind sich der PWG15x3 und der PWG25x2 deutlich ähnlicher als beide im Vergleich zum PWG09x3. Der PWG09x3 zeigt in den hochbelasteten Bereichen viel größere Standardabweichungen als die beiden anderen Baugrößen. Ursache dafür sind hohe Schwankungen der in den einzelnen Kontakten übertragenen Kräfte. Die Kräfte in x-Richtung zwischen den Planeten und Mutter 2 verhalten sich gleich zu jenen zwischen Mutter 1 und den Planeten. Die Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten sind wieder eine Überlagerung der Kräfte zwischen den Müttern und den Planeten.

Bei allen Baugrößen sind die radial wirkenden Kräfte zwischen Mutter 1 und den Planeten ca. 70% der in x-Richtung wirkenden Kräfte (vgl. Abbildung 109). Die radialen Kräfte verhalten sich dabei genau gleich zu den in x-Richtung wirkenden Kräfte. Ebenfalls analog zu den jeweiligen Kräften in x-Richtung verhalten sich die radialen Kräfte zwischen Mutter 2 und den Planeten bzw. der Spindel und den Planeten.

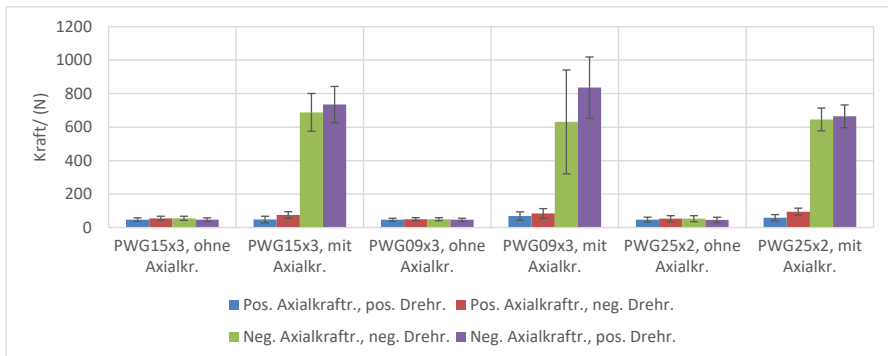
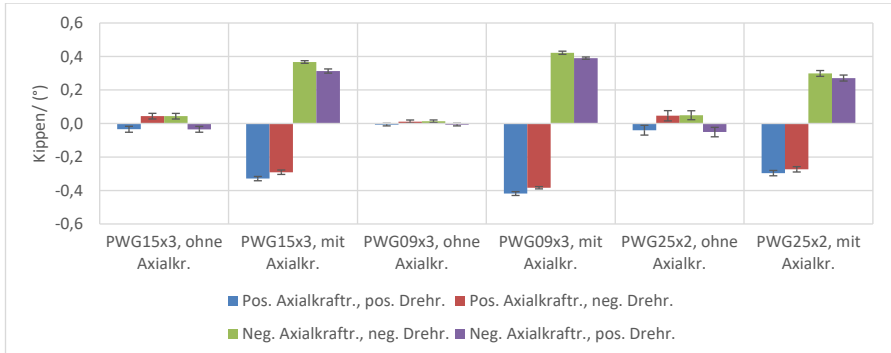


Abbildung 109 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je nach Axialkraft-richtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft

Das Kippen ohne wirkende Axialkräfte ist bei allen Baugrößen vergleichbar (vgl. Abbildung 110). Das mittlere Kippen der Planeten ist dabei nur von der Drehrichtung abhängig und nimmt mit der Baugröße zu. Dabei nimmt die Schwankung des Kippens mit der Baugröße zu: Beim PWG09x3 schwankt die Kippbewegung der Planeten um  $0,07^\circ$ , beim PWG15x3 um  $0,15^\circ$  und beim PWG25x2 um  $0,25^\circ$ . Wahrscheinliche Ursache für

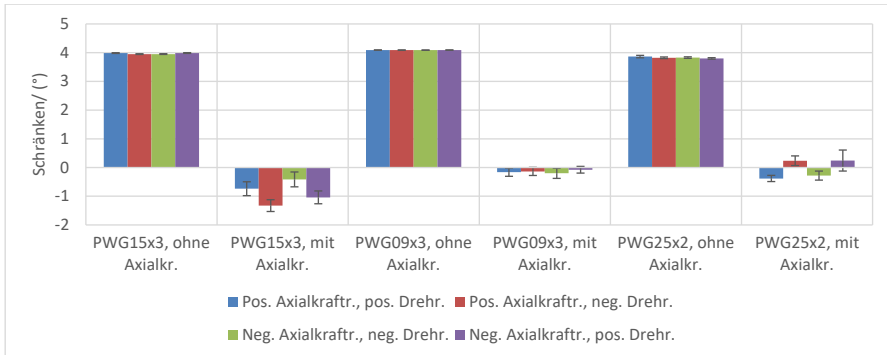
die Zunahme des Kippens und der Schwankung des Kippens ist die deutliche Abnahme der Krümmung in den Muttern mit der Baugröße bzw. ihrem Durchmesser. Beim PWG09x3 hat die Mutter einen Außendurchmesser von 28mm und beim PWG25x2 von 53mm.



*Abbildung 110 Mittleres Kippen der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft*

Wirkt eine Axialkraft, so bilden sich wieder qualitativ gleiche Verhaltensweisen aller Baugrößen beim Kippen aus. Dabei nimmt das mittlere Kippen im Unterschied zu den Simulationen ohne Axialkraft mit der Baugröße ab, aber seine Schwankung nimmt weiterhin mit der Baugröße zu.

Die Abnahme des Kippens vom PWG15x3 zum PWG25x2 lässt sich durch die unterschiedlichen Radialspele dieser Baugruppen erklären. Der PWG15x3 besitzt ein Radialspiel von 36µm und der PWG25x2 von 0µm. Analog zu Diskussion des Radialspeles in Kapitel 5.5.1 wird daher eine deutliche Abnahme des mittleren Kippens erwartet, die sich hier auch zwischen den Baugrößen zeigt. Der PWG09x3 besitzt ein Radialspiel von 21µm und müsste mit dieser Argumentation geringer Kippen als der PWG15x3. Im Schaubild kippt er hingegen stärker als der PWG15x3. Dieser Widerspruch klärt sich bei der Analyse des Schränkens (vgl. Abbildung 111): Das Schränkens des PWG09x3 ist überproportional kleiner als beim PWG15x3 als es durch den Unterschied im Radialspiel zu erwarten wäre. Das höhere Kippen bei geringerem Radialspiel wird also beim PWG09x3 in diesem Fall durch ein deutlich reduziertes Schränkens ermöglicht. Begünstigt wird diese Verschiebung durch die deutliche Abnahme der Krümmung in den Muttern mit der Baugröße bzw. ihrem Durchmesser.



*Abbildung 111 Mittleres Schränken der Planeten je nach Axialkraftrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft*

Das Schränken der Planeten ist ohne eine wirkende Axialkraft bei allen Baugruppen bei ca.  $4,0^\circ$  (vgl. Abbildung 111). Wirkt eine Axialkraft, so schränken die Planeten des PWG15x3 am stärksten. Der PWG25x2 und der PWG09x3 schränken aufgrund ihres geringeren Radialspiels weniger. Auffällig ist, dass der PWG25x2 beim Anheben der Last unter einer wirkenden Axialkraft im Mittel sogar leicht gegen die Spindelsteigung schränkt. Durch seinen im Vergleich zu den anderen Baugrößen geringere Gängigkeit und den größeren Spindeldurchmesser ist sein Steigungswinkel des Gewindes beim PWG25x2 deutlich geringer als bei den anderen Baugrößen (vgl. Tabelle 8). Dadurch ist ein Schränken gegen die Spindelsteigung deutlich einfacher möglich.

Weiterhin bestätigt (A\_Liang 2018, S. 74) in seiner Arbeit, dass am PWG09x3 die gleichen Schadensmechanismen wie am PWG15x3 in den Untersuchungen von (A\_Zürn 2017) auftreten. In Summe kann also gesagt werden, dass sich anderen Baugrößen sehr ähnlich zum PWG15x3 in den Simulationen und Versuchen verhalten. Damit kann das Verhalten des PWG15x3 mindestens qualitativ auf andere PWGs übertragen werden.

## 5.7 Vergleich der Auswirkungen der Parameter aus Anwendung u. Geometrie

Nachdem die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Untersuchungen der Parameter der Anwendung und der Geometrie auf andere Baugrößen nachgewiesen wurde, sollen in diesem Kapitel die aufgetretenen Einflüsse der Parameter zusammengefasst werden. Nachdem in Kapitel 4 das Verhalten des PWGs als Blackbox und in Kapitel 5 eine



Ebene tiefer die Bewegungen der Komponenten des PWGs und die Summenkräfte zwischen diesen Komponenten diskutiert wurden, werden im anschließenden Kapitel 6 auftretende Kontaktkräfte und Wälzkreise diskutiert. Ziel ist es dabei die Ursachen und Zusammenhänge für die Auswirkungen der Parameter in den Kontakten zu identifizieren. Jegliche Bewegung und Kraftübertragung im PWG basiert schlussendlich auf seinen Kontakten.

Im Folgenden sollen die Auswirkungen der Vorspannung, der Axialkraft, der Drehzahl des Radialspiels, der Länge der Planeten und der Flankenwinkel in den Muttern und Spindelkontakten auf die Kinematik und Kinetik des PWGs und auf ihre Gemeinsamkeiten und Unterschiede untersucht werden. Der hier gezeigte Vergleich gliedert sich in drei Teile: Auswirkungen dieser Parameter auf die Kräfte im PWG, Auswirkungen dieser Parameter auf die Bewegungen im PWG und zuletzt die aus beiden resultierenden Wirkungsgrade eines PWG unter dem Einfluss dieser Parameter.

Die Änderung der Übersetzung und die Planeten mit Steigung an den Spindelkontakten werden in diesen Vergleich nicht aufgenommen. Beide letztgenannten Parameter führten im Vergleich zur Referenzgeometrie und den anderen Parametern zu einer extrem instabilen Bewegung der Planeten. In Folge treten bei beiden extrem hohe Kraftschwankungen auf – weshalb mit ihnen keine in einer Anwendung verwendbaren Systeme entstehen.

Die mittleren Kräfte werden von allen der hier diskutierten Parametern beeinflusst. Einer der wichtigsten Auswirkungen ist dabei die Aufteilung der Last zwischen den Muttern. Diese Lastverteilung zwischen den Muttern kann durch die Parameter Vorspannung, Axialkraft, die Länge der Planeten und die Flankenwinkel stark beeinflusst werden. Im Gegensatz dazu beeinflussen die Drehzahl und das Radialspiel diese Lastverteilung nur geringfügig. Die Analysen der Vorspannung und der Axialkraft zeigen, dass für jede Geometrie eine Gleichbelastung beider Muttern möglich ist. Dazu müssen Axialkraft und Vorspannung in einer passenden Kombination gewählt werden. Die Lastverteilung zwischen den Muttern ist dabei in allen Simulationen durch die Lage der Planeten – durch ihr Schränken und Kippen bestimmt.

Die Axialkraft ist der Einzige, der hier diskutierten Parameter, der die mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten signifikant ändert. Diese als auch die mittleren Kräfte in x-Richtung an den hochbelasteten Muttern nehmen erwartungsgemäß mit der Axialkraft zu. Die mittleren Kräfte in x-Richtung an den Muttern werden

durch die Vorspannung, die Länge der Planeten als auch durch den Flankenwinkel aufgrund der Änderung der Lastverteilung zwischen den Muttern und damit aufgrund des Schränkens und Kippens der Planeten stark beeinflusst. Die Summe der mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen beiden Muttern und den Planeten entspricht dabei zwangsweise der Summe der mittleren Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den Planeten und damit der Axialkraft. Die Änderung der Drehzahl oder des Radialspiels beeinflusst nur geringfügig die an den Muttern wirkenden Kräfte in x-Richtung.

Die mittleren radialen Kräfte zwischen einer Mutter bzw. der Spindel und den Planeten liegen meist in der Größenordnung von  $2/3$  der jeweiligen axialen Kräfte. Diese mittleren radialen Kräfte werden zum einen von den zuvor beschriebenen Effekten auf die Kräfte in x-Richtung beeinflusst und zum anderen zusätzlich durch das Schränken und Kippen der Planeten verstärkt. Dadurch bewirkt das Kippen bspw. eine deutlich stärkere Änderung der mittleren radialen Kräfte als es die mittleren Kräfte in x-Richtung ändert.

Auch bei der Variation der Vorspannung wirkt sich das aufgrund der Vorspannung geänderte Kippen und Schränken stärker auf die mittleren radialen Kräfte als auf die mittleren Kräfte in x-Richtung aus. Gleichmaßen ist die stärkere Beeinflussung der radialen Kräfte als der Kräfte in x-Richtung durch das Kippen und Schränken auch bei der Variation der Länge der Planeten zu sehen: im Vergleich zu den mittleren Kräften in x-Richtung nehmen die mittleren radialen Kräfte zwischen einer Mutter bzw. der Spindel und den Planeten deutlich stärker durch das reduzierte Schränken und Kippen der Planeten mit zunehmender Planetenlänge ab.

Die Drehzahl und das Radialspiel haben die mittleren Kräfte in x-Richtung nur geringfügig beeinflusst. Bei den radialen Kräften zeigen sich aber deutliche Einflüsse. Mit zunehmendem Betrag des Radialspiels nimmt das Kippen und Schränken der Planeten zu. In Folge erhöhen sich die wirkenden mittleren radialen Kräfte zwischen einer Mutter bzw. der Spindel und den Planeten deutlich. Mit steigender Drehzahl nimmt die Zentrifugalkraft zu, das Kippen der Planeten ab und das Schränken der Planeten zu. In Folge nehmen die mittleren radialen Kräfte beim Anheben der Last mit der Drehzahl zwischen der hochbelasteten Mutter und den Planeten zu und zwischen der Spindel und den Planeten geringfügig zu. Beim Absenken der Last nehmen die mittleren radialen Kräfte mit der Drehzahl zwischen der hochbelasteten Mutter bzw. der Spindel und den Planeten ab.

Im Gegensatz zu den zuvor diskutierten Parametern sind die radialen Kräfte zwischen einer Mutter bzw. der Spindel und den Planeten bei der Variation der Flankenwinkel nicht grundsätzlich bei  $2/3$  der jeweiligen axialen Kräfte. Durch die Änderung der Flankenwinkel wird erwartungsgemäß deutlich das Verhältnis zwischen axialen und radialen Kräften geändert. Gleichbleibend zu den anderen Parametern sind auch bei der Variation der Flankenwinkel die radialen Kräfte stark von dem Schränken und Kippen der Planeten und der Lastverteilung der axialen Kräfte zwischen den Müttern abhängig.

Bei den Variationen der Axialkraft, der Drehzahl, der Länge der Planeten und der Flankenwinkel erhöhen sich mit zunehmender Schwankung der Planetenbewegung – also des Kippens und des Schränkens der Planeten – die Schwankung der Kräfte in x-Richtung und der radialen Kräfte zwischen einer Mutter bzw. der Spindel und den Planeten deutlich. Die Variationen des Radialspiel und der Vorspannung verhalten sich dazu umgekehrt: zwar steigt mit dem Betrag des Radialspiels die Schwankung des Kippens und des Schränkens der Planeten an, doch die Kraftschwankungen nehmen ab. Ursache für diesen Effekt beim Radialspiel ist der mit dem Radialspiel zunehmende mögliche Bewegungsraum der Planeten. In den Variationen des Radialspiels steigt der mögliche Bewegungsraum der Planeten deutlich stärker an als die Schwankung der Planetenbewegung zunimmt. D.h. dabei nimmt also die Ausnutzung des Bewegungsraumes ab und deshalb sinken mit steigendem Radialspiel die Schwankungen der Kräfte.

Bei der Variation der Vorspannung sind die höchsten Schwankungen des Schränkens im Bereich zwischen  $0,3$  und  $1,0\text{kN}$  leicht vorgespannter X-Anordnungen. Das mittlere Kippen und Schränken der Planeten sind in diesem Bereich der Vorspannung weit von den deutlich höheren Winkeln bei hohen Vorspannungen entfernt. In Folge führen die höheren Schwankungen des Kippens und des Schränkens nicht zu einem Verspannen, sondern zu einem Kraftausgleich zwischen den Planeten.

In Tabelle 11 sind die wichtigsten Kipp- und Schränkbewegungen der Planeten in Abhängigkeit der hier diskutierten, variierten Parameter zusammengefasst. Diese Bewegungen und ihre Schwankungen sind die zentralen Ursachen für die zuvor diskutierten Effekte bei den Kräften und Kraftschwankungen. Bei der Variation des Radialspiels ändert sich das Schränken und Kippen der Planeten mit der Variation in die gleiche Richtung – beide nehmen mit dem Radialspiel zu. Auch bei der Verlängerung der Planeten ändert sich das Schränken und Kippen gleich. Hingegen ändern sich bei den Variationen der Axialkraft und der Drehzahl das Schränken und Kippen der Planeten gegenläufig mit der Änderung – wenn das Schränken bspw. zunimmt, nimmt das Kippen ab.

Bei der Vorspannung ändert sich abhängig von der Anordnung, ob sich maßgeblich das Kippen oder das Schränken der Planeten mit steigender Vorspannung ändert. Für die Diskussion der Bewegung der Planeten muss beachtet werden, dass der mögliche Bewegungsraum der Planeten nur bei der Variation der Axialkraft und der Drehzahl unverändert verbleibt. Hingegen wird er bei den Variationen der Geometrie – u.a. Radialspiel, Länge der Planeten, Flankenwinkel – sowie durch die Verschiebung der Muttern bei der Variation der Vorspannung verändert.

*Tabelle 11 Wichtigste Planetenbewegungen in Abhängigkeit des variierten Parameters*

Variation	Kippen der Planeten	Schränken der Planeten
<b>Vorspannung</b>	Mit zunehmender Vorspannung in O-Anordnung nimmt das Kippen zu.	Mit zunehmender Vorspannung in X-Anordnung nimmt das Schränken zu.
<b>Axialkraft</b>	Mit zunehmender Axialkraft nimmt das Kippen zu.	Mit zunehmender Axialkraft ab 4kN nimmt das Schränken ab.
<b>Drehzahl</b>	Mit zunehmender Drehzahl nimmt das Kippen ab.	Mit zunehmender Drehzahl nimmt das Schränken zu.
<b>Radialspiel</b>	Mit zunehmendem Betrag des Radialspiels nimmt das Kippen zu.	Mit zunehmendem Betrag des Radialspiels nimmt das Schränken zu.
<b>Länge der Planeten</b>	Mit zunehmender Verlängerung der Planeten ab 1mm nimmt das Kippen ab.	Mit zunehmender Verlängerung der Planeten ab 1mm nimmt das Schränken ab.
<b>Flankenwinkel</b>	Der Betrag des Kippens der Planeten nimmt bis auf wenige Ausnahmen mit der Änderung der Mutterkontakte von der Änderung um $-5,0^\circ$ zur Änderung um $+5,0^\circ$ stetig zu. In den meisten Fällen nimmt der Betrag des Kippens bei einer Änderung des Spindelkontaktes um $-5,0^\circ$ zur Änderung um $+5,0^\circ$ stetig zu, sofern dabei die Mutterkontakte mit negativen Winkeln geändert wurden.	Mit dem Betrag der Änderung des Spindelkontaktes nimmt meist der Betrag des Winkels des Schränkens der Planeten zu. Beim Anheben der Last nimmt der Betrag des Schränkens mit der Änderung der Mutterkontakte von $-5,0^\circ$ in Richtung $+5,0^\circ$ meist stetig ab.

Der Wirkungsgrad eines PWGs wird bei Variation der Parameter Vorspannung, Drehzahl und Flankenwinkel durch deren Auswirkungen auf die radial im PWG wirkenden Kräfte und auf die Bewegung der Planeten eingestellt. Die Parameter Axialkraft,

Radialspiel und Länge der Planeten beeinflussen den Wirkungsgrad des PWG in nur sehr geringem Maße.

Bei den, den Wirkungsgrad des PWG beeinflussenden, Parametern Vorspannung, Drehzahl und Flankenwinkel führt ein Anstieg der radialen Kräfte erwartungsgemäß zu einem Sinken des Wirkungsgrades. Der Wirkungsgrad eines PWG sinkt dabei, wenn aufgrund der Parameter Vorspannung und Drehzahl das Schränken der Planeten zu und das Kippen der Planeten abnimmt. Bei der Variation des Flankenwinkels ist der Wirkungsgrad des PWGs zwar auch eindeutig vom Schränken und Kippen der Planeten abhängig doch zeigt sich dort nicht der klare Zusammenhang wie bei der Variation der Vorspannung und der Drehzahl.

Ursache für diesen letztgenannten Unterschied ist die Anpassung des Spindeldurchmessers für ein konstantes Radialspiel bei unterschiedlichsten Flankenwinkeln. Das Radialspiel ist definiert als der radiale Weg den zur Spindel achsparallele Planeten in einem vorspannungsfreien PWG beim Wechsel vom Kontakt mit den Muttern zum Kontakt mit der Spindel zurücklegen können. Werden die Flankenwinkel in Kontakten des PWG geändert so ändert sich zwangsweise durch diese Winkeländerung immer das Radialspiel. Passt man das Radialspiel wieder durch eine Durchmesseränderung der Spindel auf den ursprünglichen Wert an so ändert man allerdings den möglichen Bewegungsraum der Planeten und damit ihr mögliches Kippen und Schränken.

Nachdem nun die Summenkräfte zwischen den PWG-Komponenten – bspw. die mittleren, radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten – sowie die Bewegung der Planeten diskutiert wurde, sollen im folgenden Kapitel die dafür zugrunde liegenden Ursachen diskutiert werden: Die Position eines jeden Planeten und die Kräfte zwischen ihm und den anderen PWG-Komponenten basieren auf dem Kräftegleichgewicht seiner Kontakte mit den anderen Komponenten und seiner Wälzkreise.

## 6 Kontaktanalyse – Auswirkungen von untersuchten Parametern

In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen ausgewählter Parameter der Variation der Anwendung und der Variation der Geometrie auf ihre Auswirkungen auf die Kontakte im PWG analysiert werden. Dazu werden zuerst die Kontaktkräfte bzw. die Wälzkreise auf Auswirkungen von jedem Parameter einzeln analysiert und anschließend die Auswirkungen der Parameter vergleichend zusammengefasst. Abschließend erfolgt eine Validierung der Auswirkungen eines Parameters auf die Kontakte mittels Versuche und die Diskussion der Anwendungsgrenzen der Auswirkungen der untersuchten Einflussfaktoren.

Im Folgenden sollen die Auswirkungen der Parameter Vorspannung, Axialkraft, Drehzahl, Radialspiel und Planetenlänge auf die Kontakte in PWGs diskutiert werden. Die Variation der Flankenwinkel zeigte vor allem eine Verschiebung von axialen zu radialen bzw. je nach Variation von radialen zu axialen Kräften. Eindeutig vorteilhafte Geometrien konnten hier nicht ermittelt werden. Daher wird die Variation der Flankenwinkel in der Kontaktanalyse nicht weiterverfolgt. Die Variation des Übersetzungsverhältnisses und die Simulation von Planeten mit Steigung im Spindelkontakt zeigten nur Nachteile und werden deshalb ebenfalls nicht weiterverfolgt.

Bei allen in dieser Arbeit untersuchten Einflussfaktoren traten die höchsten Kräfte maßgeblich beim Anheben der Last auf. Bis auf sehr wenige Ausnahmen unterscheiden sich die Kräfte und Bewegung der Planeten dabei nur vernachlässigbar zwischen den unterschiedlichen Axialkraftrichtungen. Es sollen daher in diesem Kapitel bevorzugt die Kontaktkräfte und Wälzkreise für die quasistatischen Bereiche mit einer positiven Axialkraftrichtung beim Anheben der Last untersucht werden. In Einzelfällen werden zum Nachweis einzelner Effekte aus Kapitel 5 auch negative Axialkraftrichtungen beim Anheben der Last oder das Absenken der Last untersucht. Im Anhang befindet sich eine Untersuchung der Kontaktkräfte und der Wälzkreise für die Referenzgeometrie für alle vier maßgeblichen Lastfälle: für das Anheben sowie für das Absenken der Last jeweils mit positiver als auch mit negativer Axialkraftrichtung.

In Tabelle 12 werden die auf Basis der Ergebnisse in Kapitel 5 die in diesem Kapitel anhand der Kontakte zu untersuchenden Effekten aufgeführt. Ziel ist es dabei die Ursache dieser Effekte in den Kontakten der Planeten zu identifizieren. Die stabile

Übersetzung des PWGs trotz schwankender Planetenbewegung bzw. variiertes Parameter wird nur anhand der Vorspannung analysiert. Bei den anderen variierten Parametern zeigte sich diesbezüglich ein gleiches Verhalten und es wird deshalb auf die Darstellung dieser immer gleichen Ergebnisse verzichtet.

*Tabelle 12 Übersicht der in den Kontakten untersuchten Effekte von zuvor variierten Parametern der Anwendung und der Geometrie*

Variierter Parameter	In den Kontakten zu untersuchende Effekte	Untersuchung in Analyse der	
		Kontaktkräfte	Wälzkreise
Vorspannung	Verschiebung der Lastverteilung zwischen den Muttern	x	
Vorspannung	Änderung des Wirkungsgrades	x	
Vorspannung	Kraftschwankungen der Kräfte	x	
Vorspannung	Richtung des Kippens der Planeten	x	
Vorspannung	Stabile Übersetzung trotz schwankender Planetenbewegung		x
Vorspannung	Maximum des Schwankens des Schränkens		x
Axialkraft	Zunahme der mittleren Kräfte	x	
Axialkraft	Zunahme der Kraftschwankungen	x	
Axialkraft	Unterschiedliche Planetenbewegungen bei hohen und bei niedrigen Axialkräften		x
Drehzahl	Zunahme der mittleren radialen Kräfte beim Anheben der Last	x	
Drehzahl	Abnahme der mittleren radialen Kräfte beim Absenken der Last	x	
Drehzahl	Änderung Wirkungsgrad	x	
Drehzahl	Instabile Planetenbewegung		x
Radialspiel	Zunahme der mittleren radialen Kräfte	x	
Radialspiel	Abnahme der Kraftschwankungen	x	
Radialspiel	Zunahme des Schränkens und des Kippens		x
Radialspiel	Zunahme der Schwankung der Planetenbewegung ohne Erhöhung der Kraftschwankungen		x
Planetenlänge	Verschiebung der Lastverteilung zwischen den Muttern	x	
Planetenlänge	Abnahme der Kraftschwankungen	x	
Planetenlänge	Höhere Kräfte und Kraftschwankungen durch zusätzliche Windungen	x	
Planetenlänge	Abnahme des Schränkens und des Kippens		x

## 6.1 Auswirkungen von Einflussfaktoren auf die Kontaktkräfte

Adams (vgl. Kapitel 2.5) modelliert die Kontakte mit einem vereinfachten Hertz'schen Pressungsmodell. Für jeden Kontakt zu jedem Zeitpunkt der Simulation wird u.a. die im Kontakt wirkende Normalkraft sowie die Schubkraft ermittelt. Die von Adams ermittelten Kräfte verhalten sich in der Theorie ähnlich zu den im Kontakt auftretenden Spannungen. Aufgrund des vereinfachten Kontaktmodells in Adams und der Abweichung des Modells aufgrund der Verwendung von Starrkörpern ist die Rückrechnung der wirkenden Normal- und Schubkräfte in Spannungsverteilungen nicht sinnvoll. Der PWG besitzt Kontakte, die ähnlich zu jenen von profilierten Zylinderrollen in Zylinderrollenlagern sind. Für diese stimmen die Hertz'schen Gleichungen nur näherungsweise (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019, S. 171). Die Rückrechnung in Spannungen über die Hertz'schen Gleichungen bietet damit nur einen sehr geringen Mehrwert gegenüber der qualitativen, zwischen den Simulationen vergleichenden, Analyse der Normal- und Schubkräfte. Aus der Analyse der Referenzgeometrie für alle Lastfälle im Anhang ist ersichtlich, dass sich die Schubkräfte analog zu den Normalkräften verhalten. Dabei sind die Schubkräfte maßgeblich zwischen 60-75% der Normalkräfte. Aufgrund des vergleichbaren Verhaltens der Schubkräfte wird deshalb in diesem Kapitel nur auf das Verhalten der Normalkräfte eingegangen.

Bevor im Folgenden auf die einzelnen Einflussfaktoren eingegangen wird, soll die Schwankung der Kontaktkräfte zwischen den Planeten anhand der Referenzsimulation dargestellt werden. Dies dient dazu, die Schwankung zwischen den Planeten einordnen zu können, damit später in der Analyse der Einflussfaktoren anhand eines einzelnen Planeten diskutiert werden kann. In Abbildung 112 ist die Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte in Abhängigkeit der Windung für die Normalkräfte zwischen Mutter 2 und allen neun Planeten für den quasistatischen Bereich mit positiver Axialkrafttrichtung und negativer Drehrichtung dargestellt. In diesem quasistatischen Bereich ist die Mutter 2 die hochbelastete Mutter. Im oberen Teil eines jeden Schaubildes wird die Verteilung in einem 3D-Balkendiagramm dargestellt und im unteren Teil des Schaubildes als Heatmap. Aus Abbildung 112 ist ersichtlich, dass das Verhalten der Planeten vom Individuum und nicht vom Planetentyp abhängt. Für die späteren Abbildungen wird der Planet 31-1 ausgewählt – untersucht werden aber aufgrund der großen Unterschiede zwischen den Planeten immer alle Planeten.



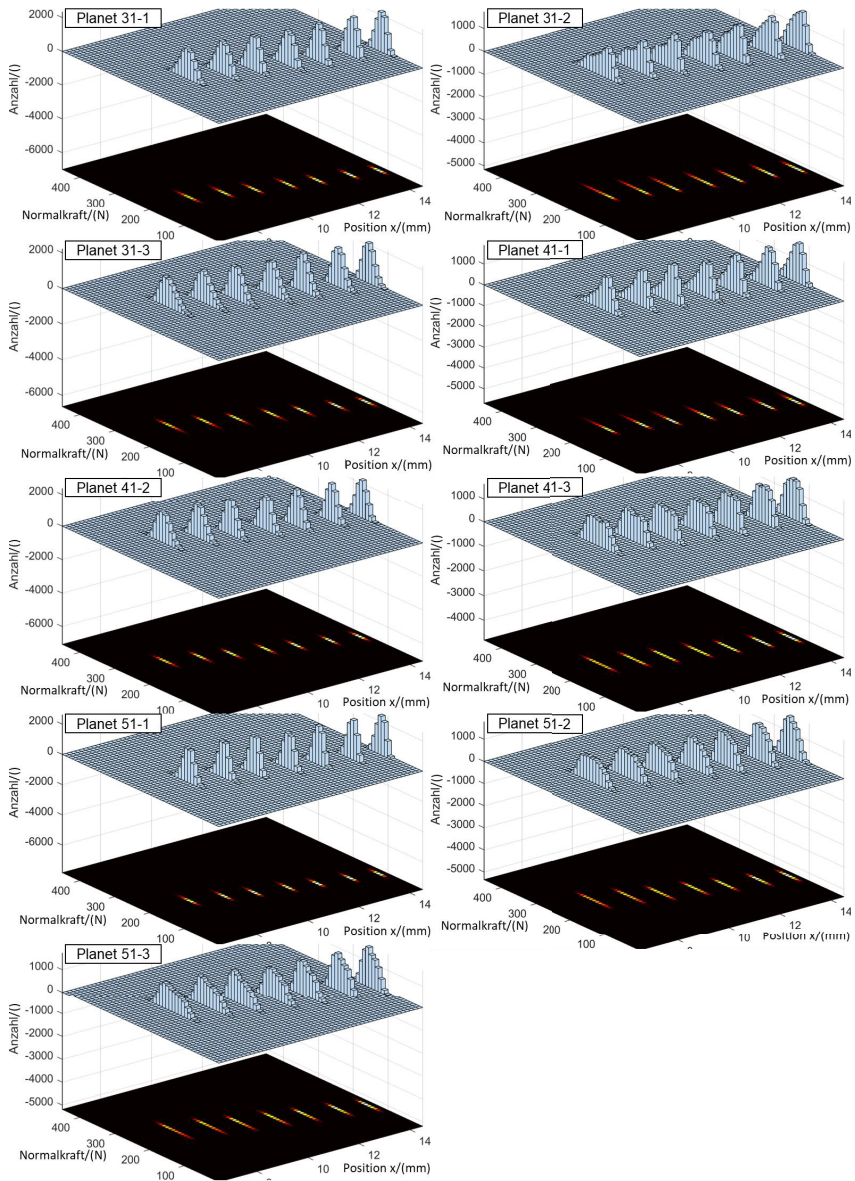


Abbildung 112 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und den Planeten im Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftrichtung.

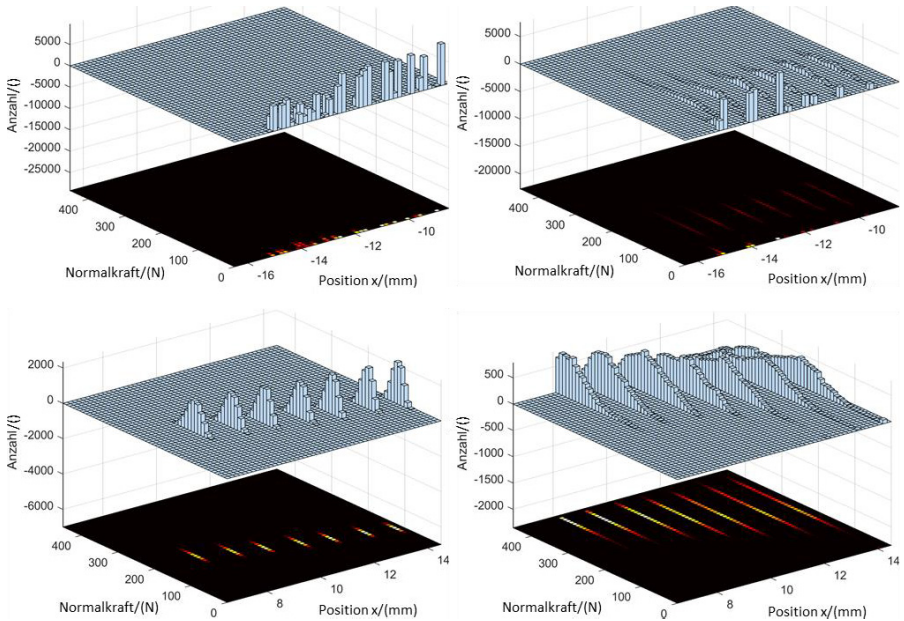
Aus den x-Positionen der Verteilungen ist ersichtlich, dass zwischen allen Planeten und der Mutter 2 die Flanken einseitig belastet werden. Für eine einseitige Belastung der Windungen müssen die Häufigkeitsverteilungen in ihrer x-Position einen Abstand von ca. 1mm aufweisen. Die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Planeten schwankt bei der Referenzsimulation zwischen 50 und 100N. Je näher eine Windung dem äußeren Rand des PWGs ist – hier für Mutter 2 je größer die x-Position der Windung – desto eher ähnelt sie einer Gaußverteilung und je näher sie der Mitte des PWGs (x-Position 0mm) ist, desto mehr bilden sich unterschiedlichste Formen der Verteilungen aus.

Dabei ist zu beachten, dass die Windungen zur Mitte des PWGs die höchstbelasteten Windungen sind. Es bilden sich insbesondere bei den mittleren Windungen drei Arten an Häufigkeitsverteilungen aus: Gaußverteilungen, Verteilungen ähnlich zu Gaußverteilungen mit deutlich außermittigem Maximum und eher trapezförmige Verteilungen ohne eindeutiges Maximum. Die Maxima bzw. Mittelpunkte der Verteilungen schwanken je nach Planeten bei den gleichen Windungen um ca. 70N. Die Maxima bzw. Mittelpunkte der Verteilungen der einzelnen Windungen eines jeden Planeten unterscheiden sich zwischen der jeweils höchst- und niedrigstbelasteten Windung um 50 bis 100N. Das in der Abbildung gezeigte Gefälle zwischen den Windungen, welches bereits in einer Simulation mit Starrkörpern auftritt, ist somit ein Maß für das im Vergleich zu einer achsparallelen Verschraubung noch höhere Gefälle zwischen der Lastübertragung der einzelnen Windungen. Die äußerste Windung aller Planeten ist in ihrer Geometrie leicht kleiner als die anderen Zähne und daher wird diese Windung leicht anders, als man aus der Tendenz der anderen Windungen erwarten würde, belastet.

### **6.1.1 Auswirkung der Vorspannung auf die Kontaktkräfte**

In dieser Analyse der Auswirkungen der Vorspannung sollen die Ursachen der Summenkräfte zwischen den PWG-Komponenten und die Bewegung der Planeten durch die Analyse der Kontaktkräfte für die folgenden Effekte aufgezeigt werden:

- Verschiebung der Lastverteilung zwischen den Muttern durch die Vorspannung
- Änderung des Wirkungsgrades mit der Vorspannung
- Hohe Kraftschwankungen bei hohen Vorspannungen der O- und X-Anordnung insbesondere beim Anheben der Last
- Hohe Kraftschwankungen beim Absenken der Last bei O-Anordnungen
- Unterschiedliche Richtungen des Kippens in Abhängigkeit der Vorspannung



*Abbildung 113 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 (erste Zeile) bzw. Mutter 2 (zweite Zeile) und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0,6kN (erste Spalte) bzw. 4,0kN (zweite Spalte) Vorspannung in der X-Anordnung*

In der Abbildung 113 sind die Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte zwischen den Müttern und dem Planeten 31-1 für die Vorspannungen 0,6 und 4,0kN in der X-Anordnung dargestellt. In der Abbildung 114 sind die entsprechenden Pendanten für die O-Anordnung zu sehen. Wie in Kapitel 5.4.1 gezeigt ist für O-Anordnungen mit Vorspannungen zwischen -0,6 und -4,0kN Mutter 1 die hochbelastete Mutter. Bei allen X-Anordnungen sowie ohne eine Vorspannung und bei der O-Anordnung mit -0,3kN Vorspannung ist Mutter 2 die hochbelastete Mutter. Diese Änderung der hochbelasteten Mutter führt auch gleichzeitig zu einer Veränderung der Lastverteilung zwischen den Müttern. Besonders gut ist dies an der annähernd gleichen Belastung beider Müttern bei der O-Anordnung mit -0,6kN Vorspannung im Vergleich zur sehr ungleichmäßigen Belastung der Müttern bei der X-Anordnung mit 0,6kN Vorspannung zu sehen. Ursache für diesen Wechsel der hochbelasteten Mutter und die Verschiebung der Lastverteilung ist die zwangsweise mit der Vorspannung unterschiedliche Verschiebung der Müttern

zueinander, um die gewünschte Vorspannung zu erreichen. Damit ändert sich in den Simulationen die Lage der möglichen Kontakte an Mutter 2 in ihrer x-Position – wie es in Abbildung 113 deutlich zu sehen ist. Weiterhin wird damit der mögliche Bewegungsraum der Planeten verändert.

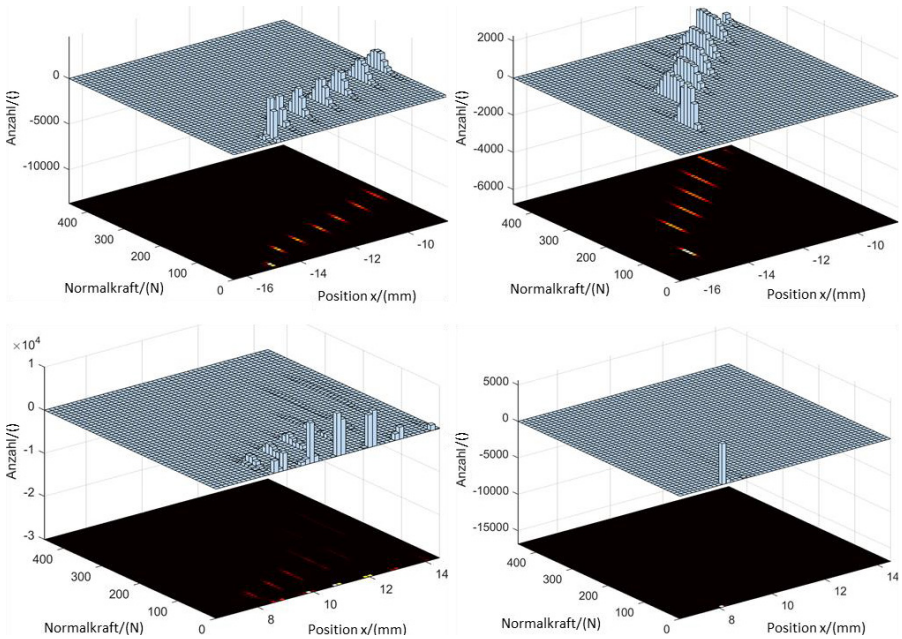
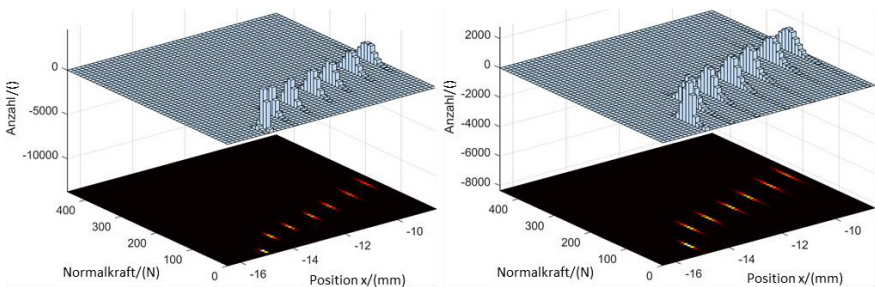


Abbildung 114 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 (erste Zeile) bzw. Mutter 2 (zweite Zeile) und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftrichtung bei -0,6kN (erste Spalte) bzw. -4,0kN (zweite Spalte) Vorspannung in der O-Anordnung

Wie die O-Anordnung mit -4,0kN Vorspannung deutlich zeigt, kann es dabei auch zur nahezu vollständigen Entlastung der Kontakte zwischen einer Mutter und einem Planeten kommen. Auffällig ist dabei auch, dass wenn die niedrigbelastete Mutter belastet wird, dort beide Flanken einer Windung belastet werden und die Spannweiten der Häufigkeitsverteilungen deutlich größer als bei der hochbelasteten Mutter sind. Die beidseitige Belastung der Flanken zeigt sich durch die Kräfte in der Nähe von 0N, die sich in den x-Positionen zwischen den stark ausgeprägten Häufigkeitsverteilungen der höheren Kräfte befinden. Wird immer nur eine Flankenseite der Windungen belastet, so

muss der Abstand der x-Positionen zwischen den einzelnen Häufigkeitsverteilungen bedingt durch die Breite der Windungen bei ca. 1mm liegen.

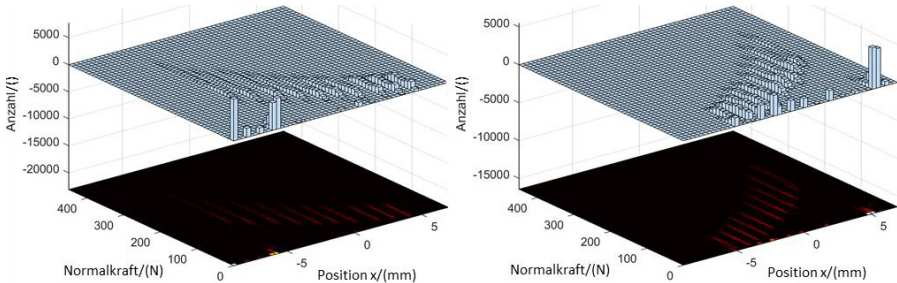
Summiert man die gezeigten Häufigkeitsverteilungen der Normalkräfte beider Muttern für die jeweilige Vorspannung auf, so wird deutlich dass das Mittel der daraus entstehenden Verteilung mit dem Betrag der Vorspannung zunimmt. Nachdem die Reibkraft im PWG von den Normalkräften in den Kontakten abhängt, nehmen deshalb die Reibkräfte in den Kontakten mit dem Betrag der Vorspannung zu und damit sinkt der Wirkungsgrad des PWG. Analysiert man diese Häufigkeitsverteilungen an der Spindel so ist dort ebenfalls eine Zunahme des Mittels der Häufigkeitsverteilungen mit dem Betrag der Vorspannung zu sehen.



*Abbildung 115 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens (links) bzw. Absenkens (rechts) der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0,6kN Vorspannung in der O-Anordnung*

Mit dem Betrag der Vorspannung nimmt auch die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen der Normalkräfte in den Kontakten zwischen den Muttern bzw. der Spindel und den Planeten zu. Diese Zunahme erklärt die Zunahme der Kraftschwankungen mit der Vorspannung beim Anheben der Last. Abbildung 115 zeigt die Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 für das Anheben und Absenken der Last. Die dabei im Vergleich deutlich größeren Spannweite der Häufigkeit für das Absenken der Last sind die Ursache für die erhöhten Kraftschwankungen der Summenkräfte beim Absenken der Last im Vergleich zum Anheben der Last bei den O-Anordnungen. An den hier nicht dargestellten Häufigkeitsverteilungen der Normalkräfte zwischen der Spindel und den Planeten zeigen sich die gleichen Zunahmen der Kraftschwankungen wie an den Muttern.

Die Häufigkeitsverteilung mit dem starken Versatz zu den anderen Verteilungen bei hochbelasteten Müttern der O-Anordnungen gehört zur einer der beiden äußersten Windungen der Planeten. Diese sind fertigungsbedingt etwas kleiner als die anderen Windungen. Meist ist dieser Zahn nicht in Kontakt. Sollte er wie hier in Kontakt kommen, so überträgt er durch seinen kleineren Durchmesser deutlich weniger Kraft als die anderen Windungen.



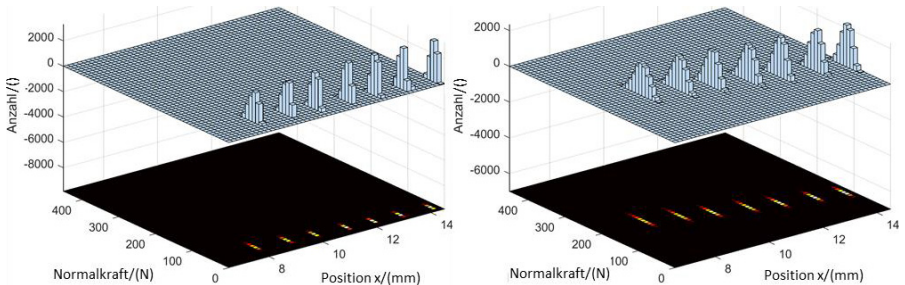
*Abbildung 116 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des der Last mit positiver Axialkraftrichtung bei 0,6kN Vorspannung in der O-Anordnung (links) und in der X-Anordnung (rechts)*

Zuletzt soll in dieser Analyse der Auswirkungen der Vorspannung auf die Kontaktkräfte noch die Ursache der unterschiedlichen Kipprichtungen bei O- und X-Anordnung aufgezeigt werden. In den Schaubildern davor wurde bereits gezeigt, dass bei der O-Anordnung mit Vorspannungen zwischen -4,0kN und -0,6kN Mutter 1 statt wie bei den anderen Vorspannungen Mutter 2 hoch belastet wird. Die höchstbelastete Windung der hochbelasteten Mutter ist, wie die vorherigen Schaubilder zeigen, immer die innerste Windung der jeweiligen Mutter – d.h. in den Schaubildern die Windung der jeweiligen Mutter, die am nächsten zum Nullpunkt der x-Position ist. Für die Spindelkontakte ist die höchstbelastete Windung diejenige Windung, die am nächsten zur hochbelasteten Mutter ist (vgl. Abbildung 116). Grundsätzlich drücken die Kräfte der Spindelkontakte die Planeten radial nach außen, während die Kräfte der Mutterkontakte diese radial nach innen drücken. Aufgrund dieser Kraftverhältnisse muss der Drehpunkt des Kippens und des Schränkens sich zwischen den Müttern befinden. Dabei ist davon auszugehen, dass sich der Drehpunkt zwischen der höchstbelasteten Windung der Spindelkontakte und der höchstbelasteten Windung der hochbelasteten Mutter befindet. Wechselt aufgrund der Vorspannung die hochbelastete Mutter muss sich unter dieser

Annahme des Drehpunktes die Richtung des Kippens und die Position des Drehpunktes ändern. Die Annahme des Drehpunktes wird später in Kapitel 6.2.1 bestätigt.

### 6.1.2 Auswirkung der Axialkraft auf die Kontaktkräfte

Wie aufgrund des bereits zuvor gezeigten linearen Verhaltens (vgl. Kapitel 5.4.2) mit zunehmender Axialkraft, steigen auch die Kontaktnormalkräfte zwischen Mutter 2 und den Planeten linear mit der Axialkraft an (vgl. Abbildung 117 als Beispiel für Planeten 31-1). Mit steigender Axialkraft nimmt dabei auch die Spannweite der Verteilungen der Normalkräfte an den Windungen zu. Sie steigt für alle Planeten zwischen 2kN und 10kN Axialkraft um ca. 50%.



*Abbildung 117 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei 2kN (links) und 10kN Axialkraft (rechts)*

Ähnlich zu den Normalkräften der Kontakte zwischen Mutter 2 und den Planeten nehmen auch die Normalkräfte der Kontakte zwischen der Spindel und den Planeten zu. Wie in Abbildung 118 ersichtlich, gibt es einen deutlichen Unterschied zu dem Verhalten an der Mutter: Bei 2kN Axialkraft werden noch alle Windungen der Spindelkontakte gleich belastet. Bei höheren Axialkräften bildet sich aber ein exponentieller Verlauf aus. Dieser verschiebt sich mit höheren Axialkräften zu immer höheren Normalkräften. Diese Verschiebung ist im Faktor sehr ähnlich zur Verschiebung an den Mutternkontakten mit zunehmender Axialkraft. Gleichzeitig nimmt mit der Axialkraft die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen analog zur Mutter zu. Die Kontakte in der Nähe von 0N sind dabei Kontakte an den Flanken, die die Axialkraft abstützen, gegenüber liegen.

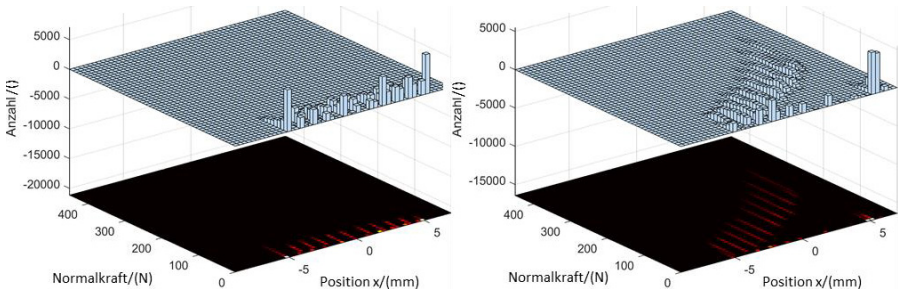


Abbildung 118 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei 2kN (links) und 10kN Axialkraft (rechts)

### 6.1.3 Auswirkung der Drehzahl auf die Kontaktkräfte

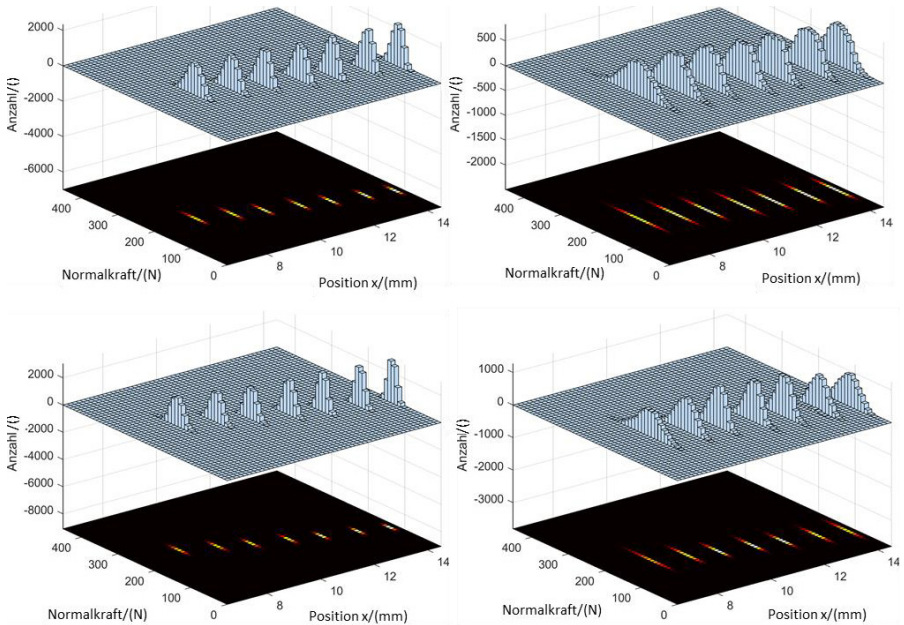
Im Bezug zur Drehzahl zeigt sich bei den Kontaktnormalkräften zwischen Mutter 2 und den Planeten zwei wichtige Effekte: die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen der Normalkräfte nimmt mit der Drehzahl sehr stark zu. Sie verdoppelt sich von 1706U/min zu 7500U/min (vgl. Abbildung 119 – Beispiel Planet 31-1). Die hier nicht dargestellten Kontaktnormalkräfte zwischen der Spindel und den Planeten verhält sich gleichermaßen. Dieser Effekt tritt an den anderen Planeten in den Kontakten mit der Spindel und der Mutter 2 genau gleich auf. Ursache für diese hohen Kraftschwankungen sind die in Kapitel 6.2.3 auftretenden beidseitigen Kontakte.

Als zweiter wichtiger Effekt ändert sich mit der Drehzahl das Gefälle zwischen der am höchsten und der geringsten belasteten Windung an der hochbelasteten Mutter (vgl. Abbildung 119 – Beispiel Planet 31-1). Es werden damit mit steigender Drehzahl zwar die höchst belasteten Windungen der hochbelasteten Mutter nicht deutlich höher belastet, aber die niedrig belasteten Windungen dieser Mutter werden deutlich höher belastet. Damit nimmt die Summe der in den Kontakten wirkenden Kräfte zu - es kommt zu den in Kapitel 5.4.3 gezeigten deutlichen Erhöhung der mittleren radialen Kräfte zwischen den Müttern und den Planeten und der eher geringen Erhöhung der Kräfte in x-Richtung zwischen den Müttern und den Planeten.

Die Zentrifugalkraft auf die Planeten erhöht sich mit der Drehzahl des PWGs. Folglich wird der Masseschwerpunkt eines jeden Planeten stärker nach außen gedrückt. Um den Drehpunkt des Kippens eines jeden Planeten entsteht damit ein mit der Drehzahl zunehmendes Moment, welches den Planeten im Bezug zum Kippen in eine möglichst



zur Spindel achsparallele Lage zieht. In Folge werden die Windungen der Muttern gleichmäßiger durch die Planeten belastet und es reduziert sich dann, wie in Kapitel 5.4.3 gezeigt, das Kippen der Planeten. Durch das reduzierte Kippen ist es dem Planeten möglich stärker zu Schränken.



*Abbildung 119 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens (erste Zeile) bzw. Absenkens der Last (zweite Zeile) mit positiver Axialkraftrichtung bei 1706U/min (erste Spalte) und 7500U/min Spindeldrehzahl (zweite Spalte)*

Beim Absenken der Last ist – im Gegensatz zum Anheben der Last – eine Abnahme des Gefälles zwischen der geringst- und der höchstbelasteten Windung der Windungen der Spindel mit zunehmender Drehzahl zu sehen (vgl. Abbildung 120 – Beispiel Planet 31-1). Durch die geänderte Richtung der Kraftvektoren und ein in den Spindelkontakten geringeres Gefälle der Kräfte mit der Drehzahl beim Absenken im Vergleich zum Anheben der Last sinken beim Absenken der Last die mittleren radialen Kräfte. In Folge wird auch mit der Änderung der Drehzahl beim Absenken der Last das Schränken und Kippen deutlich stärker geändert als beim Anheben der Last (vgl. Kapitel 5.4.3). Die hier

gezeigten Änderungen der Kontaktkräfte beim Anheben und Absenken der Last sind auch die Ursachen für die Änderungen des Wirkungsgrades des PWG mit der Drehzahl.

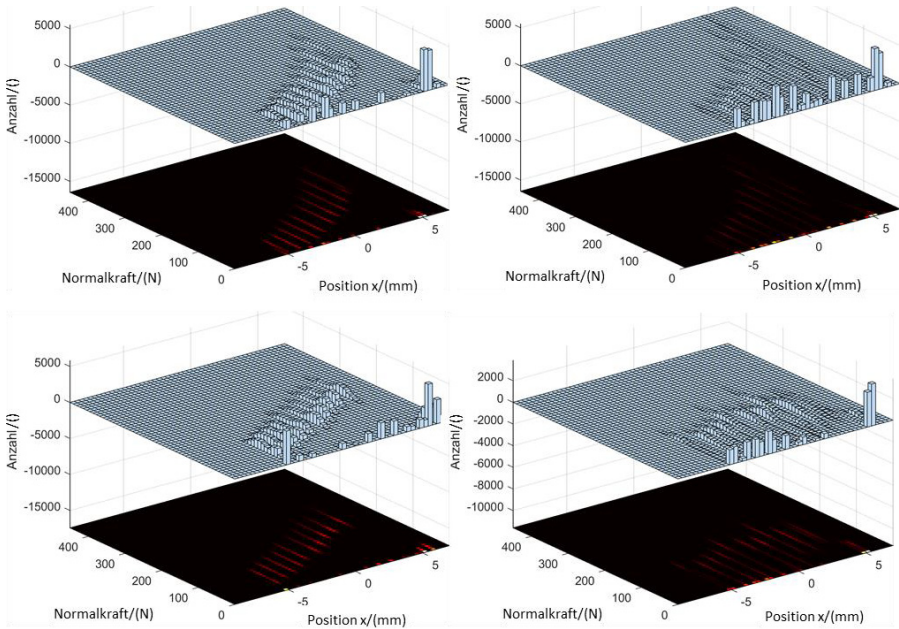


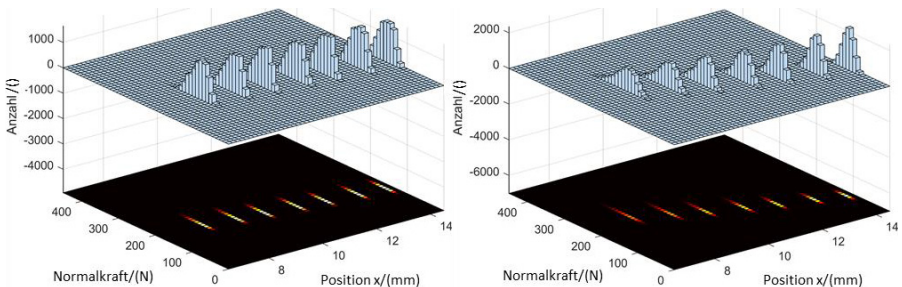
Abbildung 120 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen der Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens (erste Zeile) bzw. Absenken der Last (zweite Zeile) mit positiver Axialkrafttrichtung bei 1706U/min (erste Spalte) und 7500U/min Spindeldrehzahl (zweite Spalte)

### 6.1.4 Auswirkung des Radialspiels auf die Kontaktkräfte

Im Folgenden sollen die Ursachen der in Kapitel 5.5.1 gezeigten Zunahme der radialen Kräfte und der sinkenden Standardabweichungen der Kräfte in x-Richtung und der radialen Kräfte zwischen den Müttern bzw. der Spindel und den Planeten aufgezeigt werden. Wie in Abbildung 121 beispielhaft für die Kontakte zwischen Planet 31-1 und Mutter 2 dargestellt wird, nimmt das Gefälle zwischen den Kontaktnormalkräften der höchstbelasteten und der niedrigstbelasteten Windung zwischen den Planeten und der Mutter 2 mit dem Radialspiel sehr stark zu. Es steigert sich von ca. 30N bei 0µm zu ca. 150N bei 70µm Radialspiel. Bei der Analyse aller Planeten zeigt sich, dass zwar in einzelnen Fällen, die am niedrigsten belasteten Windungen der hochbelasteten Mutter

durch das mit ansteigendem Radialspiel steigende Gefälle teilweise leicht entlasteten werden doch steigt dabei die Kraft an den hochbelasteten Windungen der hochbelasteten Mutter stärker an. In Summe kommt es damit über die Kontakte aller Windungen der Planeten mit den Müttern zu höheren mittleren radialen Kräften (vgl. Kapitel 5.5.1).

Die Schwankung der Spannweiten der Häufigkeitsverteilungen mit dem Radialspiel ist bis  $36\mu\text{m}$  innerhalb der Schwankung der Planeten und deshalb keine Folge des unterschiedlichen Radialspiels. Erst bei noch größerem Radialspiel nimmt die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen leicht zu – bis sie bei  $70\mu\text{m}$  Radialspiel ca. 20% höher ist. Die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen nimmt zwar zu, doch die Anzahl der Kontaktkräfte in der Nähe des Erwartungswertes nimmt stärker zu und in Folge sinkt die Standardabweichung der Kräfte in den Kontakten. Dies ist die Ursache für die in Kapitel 5.5.1 sinkenden Standardabweichungen der Kräfte in x-Richtung und der radialen Kräfte zwischen den Müttern und den Planeten.



*Abbildung 121 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei  $0\mu\text{m}$  (links) und  $70\mu\text{m}$  Radialspiel (rechts)*

Das stärkere Gefälle zwischen den Windungen zeigt sich auch in den Kräften zwischen der Spindel und den Planeten. Analog zum Verhalten der Kontaktnormalkräfte zwischen der Spindel und den Planeten bei der Variation der Axialkraft, verhält sich die Variation des Radialspiels (vgl. Abbildung 122 als Beispiel für den Planeten 31-1). Bei  $0\mu\text{m}$  Radialspiel gibt es analog zur Axialkraft von 2kN eine eher lineare Lastverteilung der Axialkraft zwischen den Windungen. Mit zunehmendem Radialspiel wird dies zu einer zunehmend stärkeren Exponentialfunktion. Gleichmaßen zum Verhalten der Kontaktnormalkräfte an Mutter 2 bei der Variation des Radialspiels nimmt die Spannweite einzelner Häufigkeitsverteilungen mit zunehmendem Radialspiel bis  $36\mu\text{m}$  Radialspiel nicht zu und von  $36\mu\text{m}$  bis  $70\mu\text{m}$  Radialspiel leicht zu. Über alle Kontakte und

Planeten gesehen steigt dabei die Anzahl der Kontaktkräfte in der Nähe des Erwartungswertes stärker an als die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen zunimmt. In Folge sinken die Standardabweichungen der in Kapitel 5.5.1 gezeigten Kräfte in x-Richtung und der radialen Kräfte zwischen der Spindel und den Planeten. Dieses Verhalten ist dabei vergleichbar zum zuvor gezeigten Verhalten an den Müttern.

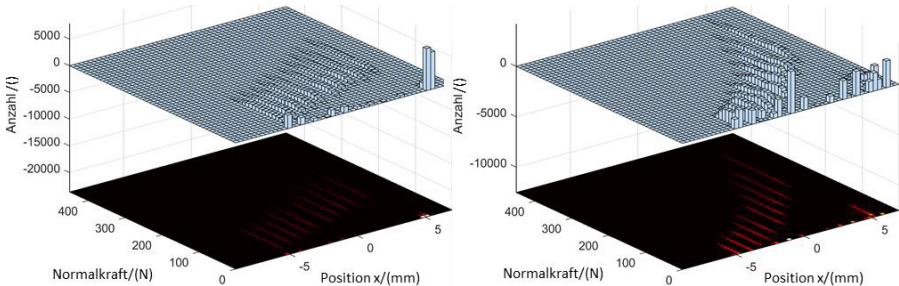
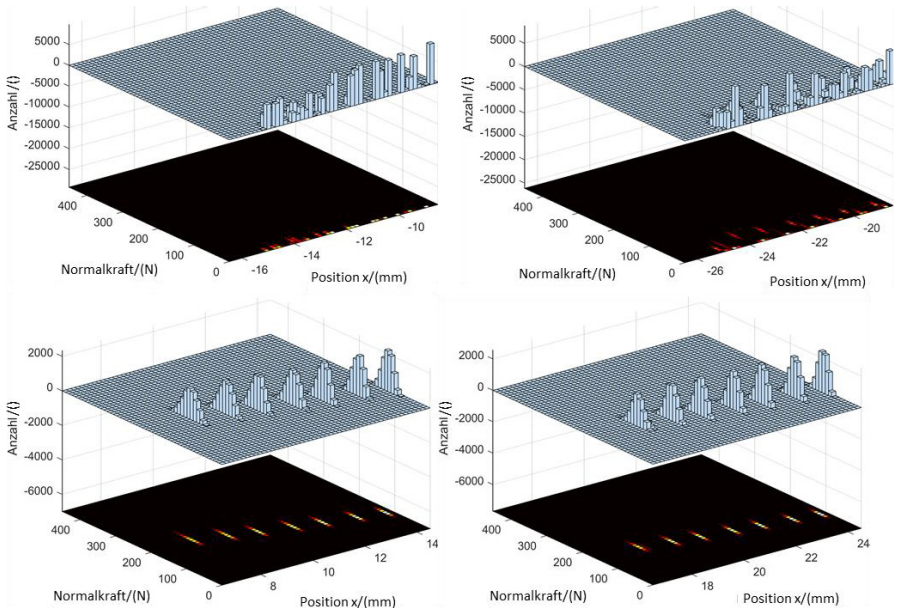


Abbildung 122 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei  $0\mu\text{m}$  (links) und  $70\mu\text{m}$  Radialspiel (rechts)

### 6.1.5 Auswirkung der Planetenlänge auf die Kontaktkräfte

Im Folgenden soll der Nachweis in den Kontakten, für die mit zunehmender Länge der Planeten gleichmäßigere Belastung der Müttern erbracht werden. Dazu werden in Abbildung 123 als Beispiel die Kräfte zwischen den Müttern und Planet 31-1 aufgezeigt. Bei der Variation der Planetenlänge nimmt in den Kontakten zwischen den Planeten und Mutter 2 mit zunehmender Planetenlänge das Gefälle der Häufigkeitsverteilungen der Kontaktnormalkräfte ab. Zwischen der dabei jeweils am höchsten und der jeweils am geringsten belasteten Windung sinkt das Gefälle von ca. 70N bei der Referenzgeometrie auf ca. 50N bei einer Verlängerung von 10mm. Bei einer Verlängerung der Planeten um 10mm nimmt zusätzlich die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen der Windungen für alle Planeten im Mittel im Vergleich zur Referenzgeometrie um ca. 15% ab. Dies deckt sich mit den in Kapitel 5.5.2 ermittelten geringeren Kräften an Mutter 2 und die Abnahme der Kraftschwankungen. Gleichermaßen ist in der Abbildung 123 die mit der Planetenlänge zunehmende Belastung von Mutter 1 durch den Planeten 31-1 zu sehen. Es werden dabei durch die Änderung des Gefälles mit der Planetenlänge vor allem Kräfte von den höchstbelasteten Windungen der hochbelasteten Mutter zur niedrig belasteten Mutter verschoben. Die niedrigbelasteten Windungen der hochbelasteten Mutter werden weiterhin vergleichbar belastet. Weitere Ursache für dieses Verhalten

ist der mit der Planetenlänge geänderte Bewegungsraum der Planeten nachdem dafür für eine Verlängerung der Planeten die Muttern weiter auseinandergeschoben werden.



*Abbildung 123 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 (erste Zeile) bzw. Mutter 2 (zweite Zeile) und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftfrichtung bei der Referenzgeometrie (erste Spalte) und 10mm Verlängerung der Planeten (zweite Spalte)*

Deutlicher als an den Mutternkontakten zeigen sich die Vorteile von längeren Planeten an den Spindelkontakten. Mit zunehmend längeren Planeten wird der exponentielle Anstieg der Kontaktnormalkräfte von der niedrigst- zur höchstbelasteten Windung zu einem linearen Verhalten (vgl. Abbildung 124 als Beispiel für den Planeten 31-1). Analog zum Verhalten zwischen Mutter 2 und den Planeten nehmen auch an der Spindel die Spannweiten der Häufigkeitsverteilungen bei 10mm Verlängerung im Mittel über alle Planeten um ca. 15% ab. Dadurch sinken ebenfalls die Kraftschwankungen.

Zum Abschluss der Untersuchung der Kontaktnormalkräfte in Abhängigkeit der Planetenlänge soll noch auf die Simulation mit einer Verlängerung von 10mm und weiteren Windungen eingegangen werden. Im Vergleich zur Simulation mit einer Verlängerung

von 10mm ohne weitere Windungen nehmen die mittleren Kontaktnormalkräfte zwischen Mutter 2 und den Planeten um ca. 25% ab. Gleichermäßen verhält es sich mit den Kontaktnormalkräften an den Kontakten zwischen der Spindel und den Planeten. An letzteren nimmt durch die weiteren Windungen zusätzlich die Spannweite der Häufigkeitsverteilungen um ca. 20% ab. Im Bezug zu Kapitel 5.5.2 nehmen die einzelnen Kontaktnormalkräfte zwischen Mutter 2 bzw. der Spindel und den Planeten deutlich ab, die Summe dieser Kräfte über die Körper aufgrund der zusätzlichen Kontakte aber im Vergleich zur Simulation mit einer Verlängerung von 10mm ohne weitere Windungen zu. (vgl. Abbildung 125 als Beispiel für den Planeten 31-1)

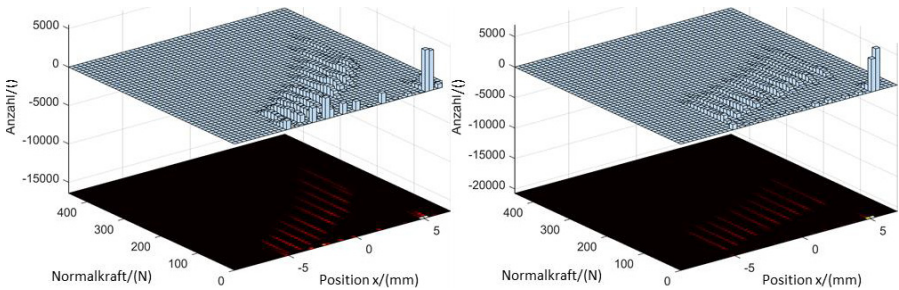


Abbildung 124 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftfrichtung bei der Referenzgeometrie (links) und 10mm Verlängerung der Planeten (rechts)

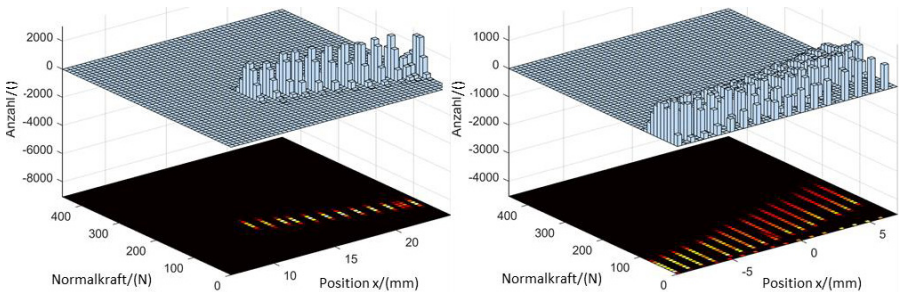


Abbildung 125 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 (links) bzw. Spindel (rechts) und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftfrichtung bei 10mm Verlängerung der Planeten mit zusätzlichen Windungen

## 6.2 Auswirkungen von Einflussfaktoren auf die Wälzkreise

Im Folgenden werden analog zu den Kontaktnormalkräften die Wälzkreise an den hochbelasteten Mutterkontakten und an den Spindelkontakten an der Mutter 2, der Spindel und den Planeten für den quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftichtung beim Anheben der Last untersucht. Für das grundsätzliche Verhalten beim Absenken der Last, sowie an den niedrigbelasteten Mutterkontakten sei auf die Analyse der Referenzgeometrie im Anhang für alle Lastfälle verwiesen.

### 6.2.1 Auswirkung der Vorspannung auf die Wälzkreise

In dieser Analyse der Auswirkungen der Vorspannung sollen die Ursachen der Summenkräfte zwischen den PWG-Komponenten und die Bewegung der Planeten durch die Analyse der Wälzkreise für die folgenden Effekte aufgezeigt werden:

- Stabile Übersetzung des PWGs trotz schwankendem Kippen und Schränken der Planeten
- Maximum des Schwanken des Schränkens bei den Vorspannungen der X-Anordnung zwischen 0,3 und 1,0kN Vorspannung

Abbildung 126 zeigt die Wälzkreisradien am Planet 31-1 in seinen Kontakten mit Mutter 1 und Mutter 2 für die O-Anordnung mit -0,6kN und die X-Anordnung mit 0,6kN Vorspannung. In Kapitel 6.1.1 wurden als hochbelastete Mutter, für diesen Lastfall, bei dieser O-Anordnung Mutter 1 und dieser X-Anordnung Mutter 2 identifiziert. Die Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit der jeweiligen hochbelasteten Mutter zeigen sehr schmale Häufigkeitsverteilungen. Die Unterschiede der Maxima der Häufigkeitsverteilungen der Wälzkreisradien kommen dabei durch das Schränken und Kippen der Planeten zustande.

Im Gegensatz dazu sind die gleichen Häufigkeitsverteilungen an der niedrig belasteten Mutter häufig sehr breit und es sind dabei auch Kontakte an beiden Seiten der Windungen zu sehen. Erwartungsgemäß gleicht der Planet Kraftschwankungen an der niedrig belasteten Mutter durch Bewegungen aus und läuft an der hochbelasteten Mutter nahezu unverändert.

Bedingt durch das Kräftegleichgewicht folgt die Übersetzung des PWGs vor allem denjenigen Kontakten mit der höchsten Last. Anhand der X-Anordnungen mit 0,6 und 4,0kN Vorspannungen soll nun die Stabilität der Wälzkreise in den Kontakten mit der höchsten Last aufgezeigt werden, um die Stabilität der PWG-Übersetzung nachzuweisen. Diese

Wälzkreise werden in Abbildung 127 für die Kontakte mit der Mutter 2 und Abbildung 128 für die Kontakte mit der Spindel am Beispiel des Planeten 31-1 dargestellt.

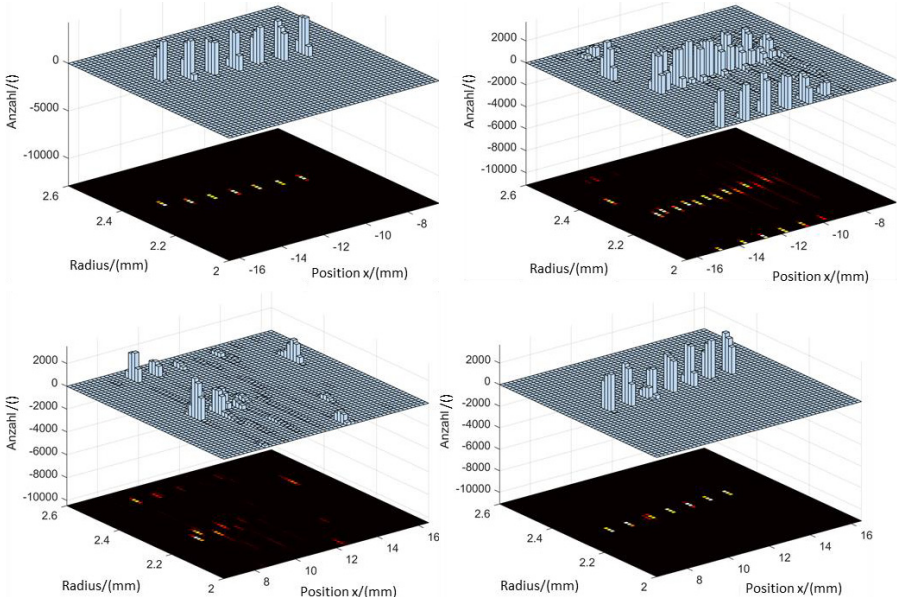


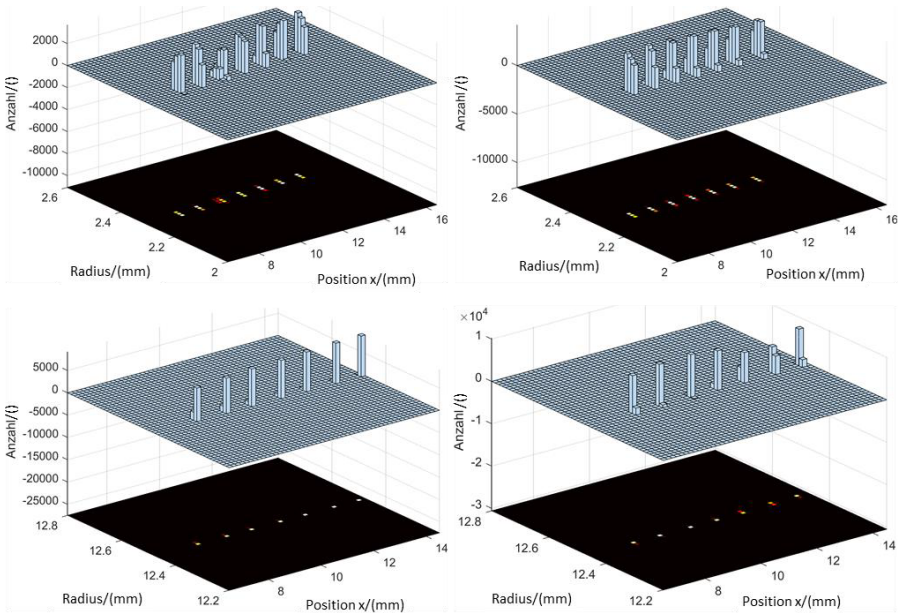
Abbildung 126 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien an Planet 31-1 in den Kontakten mit Mutter 1 (erste Zeile) und Mutter 2 (zweite Zeile) bei positiver Axialkraftrichtung und Drehrichtung bei -0,6kN Vorspannung in der O-Anordnung (erste Spalte) und 0,6kN Vorspannung in der X-Anordnung (zweite Spalte)

An den Kontakten zwischen Mutter 2 und den Planeten werden die Windungen einseitig belastet. Dabei bilden sich am Planeten Wälzkreisradien von rund 2,30mm und an der Mutter 2 von rund 12,45mm aus. An den Kontakten zwischen der Spindel und den Planeten werden gerade bei der hohen Vorspannung von 4,0kN beide Seiten der Windungen belastet. Die Seiten der Windungen, die die wirkende Axialkraft übertragen, bilden Wälzkreisradien von rund 2,90mm an den Planeten und von rund 7,30mm an der Spindel aus.

Die Wälzkreisradien an den Planeten von rund 2,60mm oder der Spindel von rund 7,60mm gehören zu Kontakten an den Seiten der Windungen, die die Axialkraft nicht übertragen. Trotz des großen Unterschiedes der Vorspannung sind die Wälzkreisradien an den Kontakten, die die Axialkraft maßgeblich übertragen, nur minimal



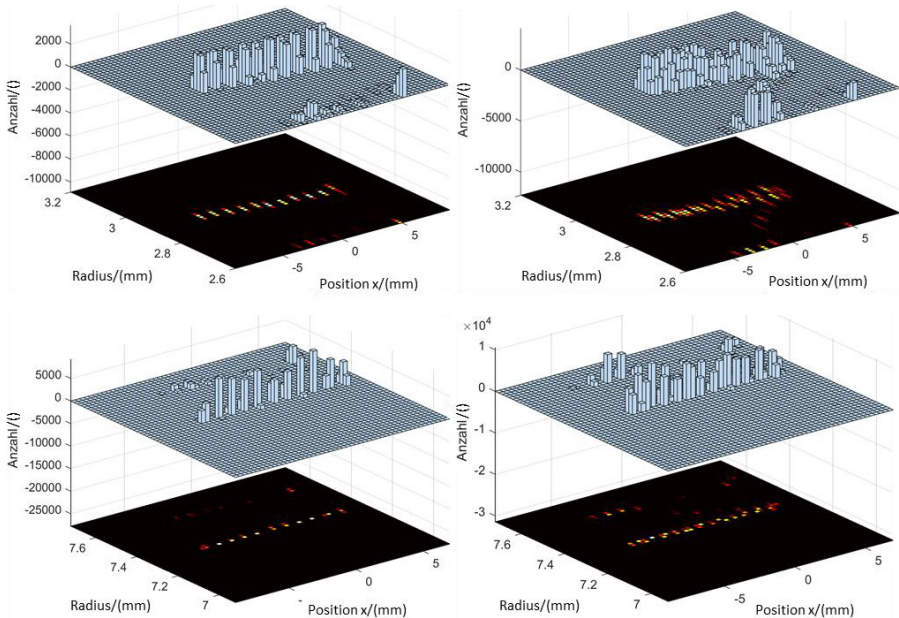
unterschiedlich. Damit ist die Stabilität der Übersetzung des PWGs trotz schwankendem Kippen und Schränken der Planeten nachgewiesen.



*Abbildung 127 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten (erste Zeile) bzw. an der Mutter 2 (zweite Zeile) für die Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei 0,6kN (erste Spalte) bzw. 4,0kN (zweite Spalte) Vorspannung in der X-Anordnung*

Zuletzt soll in diesem Kapitel die Ursache für das hohe Schwanken des Schränken bei Vorspannungen der X-Anordnung zwischen 0,3 und 1,0kN Vorspannung ermittelt werden. In Abbildung 129 sind die Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreise am Planeten für die Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 als Beispiel dargestellt. Vergleicht man Abbildung 127, Abbildung 128 und Abbildung 129 so zeigt sich, dass bei 0,6kN Vorspannung durchgehend beidseitige Kontakte an den Windungen von Mutter 1 auftreten aber nur kaum an den Kontakten mit der Spindel und in keinem Fall an den Kontakten mit Mutter 2. Für die Vorspannung von 4,0kN gibt es hingegen kaum beidseitige Kontakte der Windungen an Mutter 1 aber durchgehend beidseitige Kontakte an der Spindel.

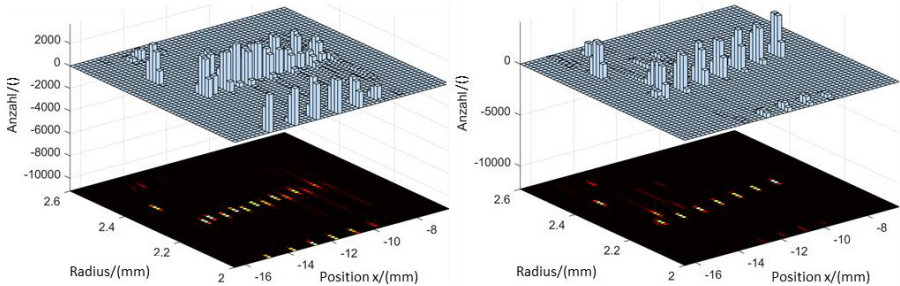
Berücksichtigt man dazu das in Kapitel 5.4.1 deutlich geringere Schränken der Planeten bei 0,6kN Vorspannung im Vergleich zu 4,0kN Vorspannung so bestätigt sich die These der Ausnutzung des möglichen Bewegungsraumes: bei 4,0kN Vorspannung sorgt die hohe Vorspannung zusammen mit den hochbelasteten Kontakten an Mutter 2 und der Spindel dafür, dass die Planeten stark in das maximal mögliche Schränken gedrückt werden und daher kaum in ihrer Bewegung schwanken können. Die Kräfte an Mutter 1 und an Windungen der Spindel, die nicht die Axialkraft abstützen, sind dabei zu schwach, um den Planeten aus diesem Maximum hinauszudrücken.



*Abbildung 128 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten (erste Zeile) bzw. an der Spindel (zweite Zeile) für die Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0,6kN (erste Spalte) bzw. 4,0kN (zweite Spalte) Vorspannung in der X-Anordnung*

Bei der niedrigeren Vorspannung von 0,6kN wird der Planet nicht gewaltsam in das maximale Schränken gedrückt. Bedingt durch Kraftschwankungen, wie beispielsweise die Querkraftschwingungen, oszilliert der Planet dann zwischen den beiden möglichen Endlagen – beide Flanken der Windungen an Mutter 1. Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass die Vorspannung durch die axiale Verschiebung der

Muttern zueinander erzeugt wird und sich damit auch in Abhängigkeit der Vorspannung der mögliche Bewegungsraum der Planeten ändert.



*Abbildung 129 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten für die Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei 0,6kN (links) bzw. 4,0kN (rechts) Vorspannung in der X-Anordnung*

## 6.2.2 Auswirkung der Axialkraft auf die Wälzkreise

Im Folgenden soll die Ursache der unterschiedlichen Bewegung der Planeten ohne bzw. bei geringen Axialkräften von 2kN im Vergleich zur Bewegung bei höheren Axialkräften aufgezeigt werden. Weder die Wälzkreisradien in den Spindelkontakten an Planeten und Spindel noch an den Planeten und der hochbelasteten Mutter 2 in den Kontakten zwischen Mutter 2 und den Planeten zeigen mögliche Ursachen für dieses unterschiedliche Verhalten. Verantwortlich für dieses Verhalten sind die Kontakte in der niedrigbelasteten Mutter 1. In Abbildung 130 sind die Wälzkreise zwischen Mutter 1 und dem Planeten als Beispiel für die Axialkräfte 2 und 10kN dargestellt.

Mit zunehmender Axialkraft treten dabei zwischen Mutter 1 und den Planeten vermehrt beidseitige Kontakte auf, die zu dem Wälzkreisradius 12,25mm an der Mutter führen. Ohne eine Axialkraft treten sie gar nicht auf, bei 2kN Axialkraft sind drei der dazugehörigen Verteilungen zu sehen und bei 4kN Axialkraft treten bereits fünf der dazugehörigen Verteilungen auf. Ab 4kN Axialkraft sind die Kräfte in den Kontakten beim Wälzkreisradius 12,25mm an der Mutter 1 groß genug, um die Richtung des Schränkens beim Anheben der Last zu im Vergleich zu den niedrigeren Axialkräften zu ändern. Für das Absenken der Last reicht bereits eine Axialkraft von 2kN aus um die Richtung des Schränkens im Vergleich zur Simulation ohne Axialkraft zu ändern.

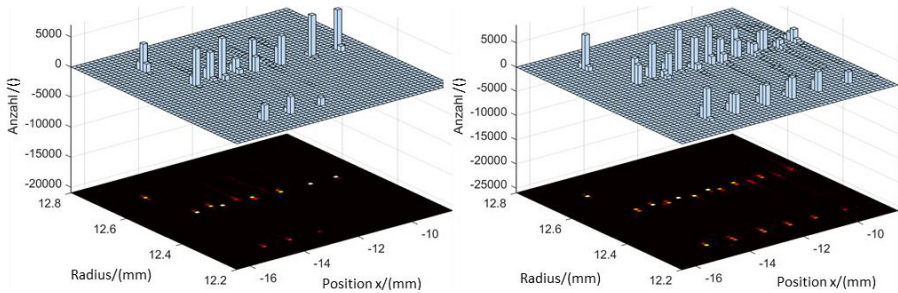


Abbildung 130 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten für die Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei 2kN (links) bzw. 10kN (rechts) Axialkraft

### 6.2.3 Auswirkung der Drehzahl auf die Wälzkreise

Analog zur Axialkraft konnte weder an den Wälzkreisradien an Mutter 2 noch an den Wälzkreisen der Planeten eine Beeinflussung durch die Drehzahl festgestellt werden. Mit zunehmender Drehzahl tauchen aber an den Spindelkontakten immer mehr in ihren Wälzkreisen sehr stark schwankende Wälzkreisradien an den Flanken auf, die die Axialkraft nicht abstützen. Es gibt damit mit steigender Drehzahl immer häufiger beidseitig auftretende Kontakte. (vgl. Abbildung 131 und Abbildung 132 am Beispiel des Planeten 31-1). Diese sind die Ursachen für die mit steigender Drehzahl instabile Bewegung der Planeten.

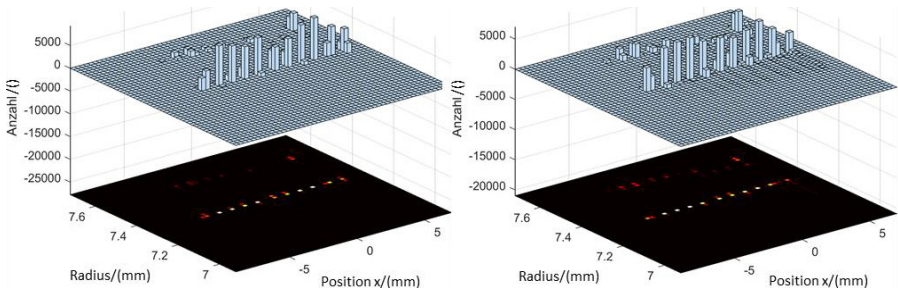


Abbildung 131 Wälzkreisradien an der Spindel in den Kontakten mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft bei Drehzahlen von 1706U/min (links) und 7500U/min (rechts)

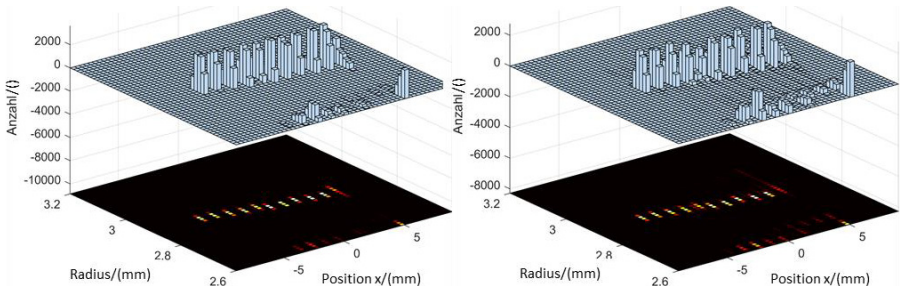


Abbildung 132 Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit der Spindel im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei Drehzahlen von 1706U/min (links) und 7500U/min (rechts)

### 6.2.4 Auswirkung des Radialspiels auf die Wälzkreise

Im Folgenden soll die Ursache des mit dem Radialspiel zunehmendem Schwanken des Schränkens und Kippens der Planeten bei abnehmender Standardabweichung der Kräfte in x-Richtung bzw. der radialen Kräfte zwischen den Muttern bzw. der Spindel und den Planeten ermittelt werden. Im Gegensatz zur Variation der Axialkräfte und der Drehzahl, ändern sich bei der Variation des Radialspiels auch die Wälzkreise an der Mutter 2 im Kontakt mit den Planeten deutlich.

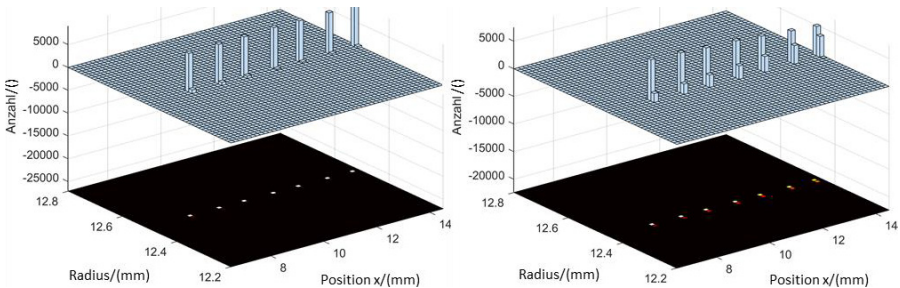


Abbildung 133 Wälzkreisradien an der Mutter 2 in den Kontakten mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei  $0\mu\text{m}$  (links) und  $70\mu\text{m}$  Radialspiel (rechts)

Wie Abbildung 133 am Beispiel des Planeten 31-1 verdeutlicht, werden die Wälzkreisradien an der hochbelasteten Mutter mit zunehmendem Radialspiel kleiner. Sie sinken dabei von 12,50mm bei  $0\mu\text{m}$  auf 12,45mm bei  $70\mu\text{m}$  Radialspiel. Bei höherem Radialspiel kann der Planet logischerweise mehr radial wandern. Nachdem der Durchmesser der Spindel variiert wurde, kann der Planet bei höherem Radialspiel mehr in Richtung

der Spindelachse wandern und dadurch reduzieren sich natürlich auch in der Simulation die Wälzkreisradien an der Mutter. Die Schwankung der Wälzkreisradien an der Mutter bleiben aber unabhängig vom Radialspiel unverändert.

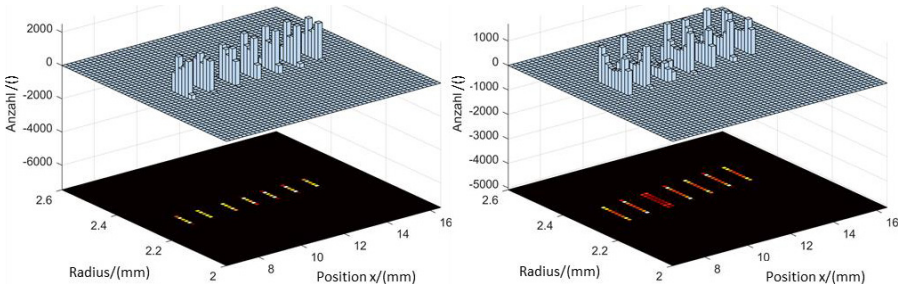
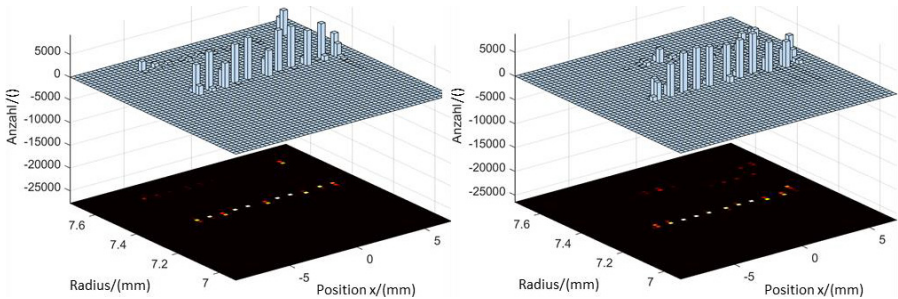


Abbildung 134 Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit Mutter 2 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftrichtung bei 0µm (links) und 70µm Radialspiel (rechts)

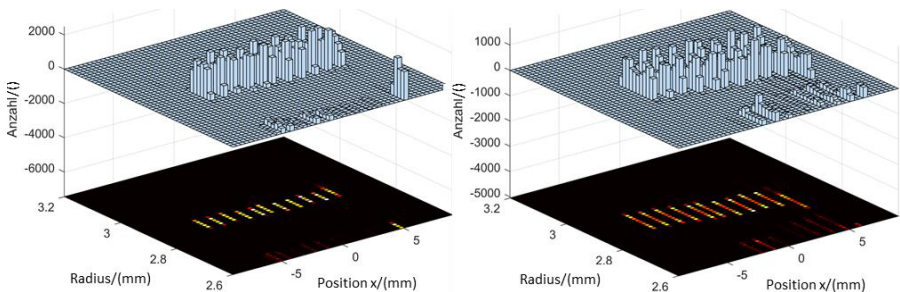
Die Wälzkreisradien an den Planeten an den Windungen im Kontakt mit Mutter 2 verschieben sich ebenfalls abhängig vom Radialspiel. Sie bewegen sich an der höchstbelasteten Windung von ca. 2,28mm bei 0µm zu 2,34mm bei 70µm Radialspiel. Die Schwankung der Wälzkreise an den einzelnen Kontakten ändert sich ebenfalls abhängig vom Radialspiel. Sie hat allerdings von den hier gezeigten Simulationen ihr Minimum von ca. 48µm bei einem Radialspiel von 36µm. Bei 0µm Radialspiel ist die Schwankung der Wälzkreise ca. 72µm und bei 70µm Radialspiel ist sie ca. 96µm. (vgl. Abbildung 134 am Beispiel des Planeten 31-1) Diese Schwankung der Position nur an den Planeten aber nicht am dazugehörigen Wälzpartner – der Mutter 2 – ist der erste Teil der gesuchten Ursache.

Die Reduzierung der Wälzkreisradien aufgrund zunehmendem Radialspiels ist an der Spindel deutlich stärker als an Mutter 2. Hier reduzieren sich die Wälzkreisradien an den Windungen, welche die Axialkraft abstützen, von ca. 7,4mm bei 0µm auf ca. 7,3mm bei 70µm Radialspiel. Analog zu den Müttern bleibt die Schwankung der Wälzkreise an den axialkraftabstützenden Windungen konstant. (vgl. Abbildung 135 am Beispiel des Planeten 31-1) Folge sind die geänderten Kipp- und Schrägkinkel der Planeten, wie es bereits in Kapitel 5.5.1 dargelegt wurde.



**Abbildung 135** Wälzkreisradien an der Spindel in den Kontakten mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftrichtung bei  $0\mu\text{m}$  (links) und  $70\mu\text{m}$  Radialspiel (rechts)

Die Streuung der Wälzkreise der einzelnen Windungen mit Kontakt zur Spindel an den Planeten verhält sich analog zur Streuung der Wälzkreise an den Kontakten mit Mutter 2. Im Vergleich zu den Mutterkontakten ändern sich aber die Wälzkreise an den Planeten in den Spindelkontakten zwischen den einzelnen Windungen stärker. Mit zunehmendem Radialspiel werden die Wälzkreisradien umso kleiner je größer die x-Position der dazugehörigen Windung ist. Sie werden immer größer je kleiner die x-Position der dazugehörigen Windung ist. Der Unterschied zwischen den Windungen mit der zweithöchsten negativen und der zweithöchsten positiven Position steigert sich dabei von  $23\mu\text{m}$  bei  $0\mu\text{m}$  Radialspiel auf  $100\mu\text{m}$  bei  $70\mu\text{m}$  Radialspiel. Die Windungen mit der höchsten negativen Position und die Windung mit der höchsten positiven Position sind kleiner ausgeprägte Windungen als alle anderen Windungen der Spindelkontakte und weisen daher andere Wälzkreisradien auf.



**Abbildung 136** Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit der Spindel im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraftrichtung bei  $0\mu\text{m}$  (links) und  $70\mu\text{m}$  Radialspiel (rechts)

Zusammenfassend ändern sich mit dem Radialspiel die Schwankungen die Wälzkreise an den Planeten aber nicht an ihren Wälzpartnern – der Spindel und den Muttern. Wichtig ist dabei, dass sich auch die Wälzkreise der Spindeln und Muttern nicht an den Flanken ändern, die die Axialkraft nicht abstützen. Dies ist die Ursache dafür, dass die Planeten stärker schwankend schränken und kippen ohne dabei wie bei der Variation der Axialkraft, der Drehzahl oder der Länge der Planeten die Kraftschwankungen der Kräfte in x-Richtung oder der radialen Kräfte zwischen den Muttern bzw. der Spindel und den Planeten stark zu erhöhen. Damit wird durch das zunehmende Radialspiel der Stabilitätsbereich des Bewegungsraums der Planeten größer in dem sie sich bewegen können ohne die wirkenden Kräfte zu ändern.

### 6.2.5 Auswirkung der Planetenlänge auf die Wälzkreise

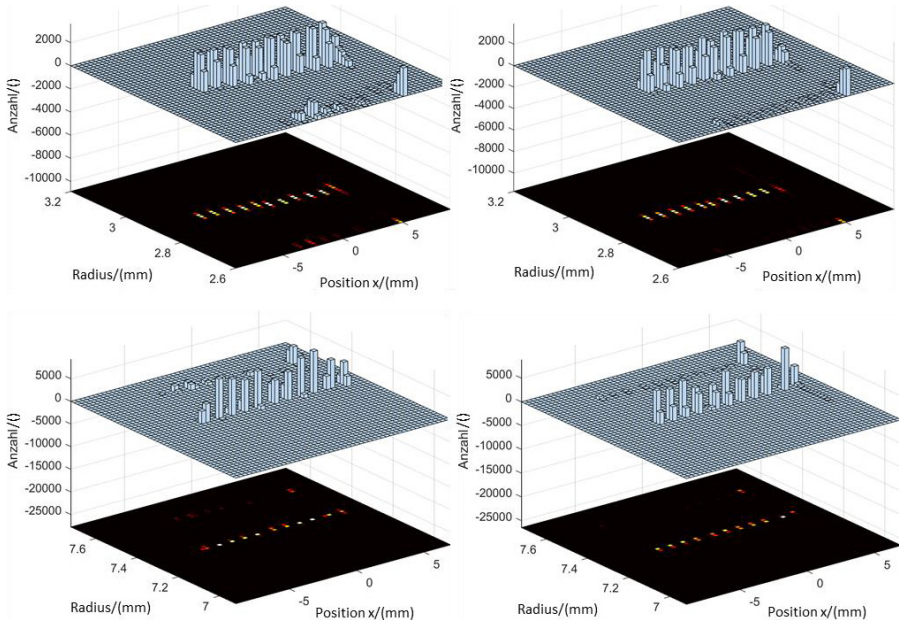


Abbildung 137 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten 31-1 (erste Zeile) bzw. der Spindel (zweite Zeile) in den Kontakten zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei der Referenzgeometrie (erste Spalte) und 10mm Verlängerung der Planeten (zweite Spalte)



Die Änderung des Schränkens und Kippens der Planeten mit der Planetenlänge zeigt sich gut an den Kontakten zwischen der Spindel und den Planeten. Abbildung 137 zeigt am Beispiel des Planeten 31-1, dass die Abnahme des Schränkens und des Kippens mit der Planetenlänge wie erwartet in den Kontakten auf einer Abnahme des Gefälles der Wälzkreisradien an der den Planeten beruht. Dabei ändert sich, wie auch im Schaubild für den Planeten 31-1 zu sehen, das Gefälle der Wälzkreise an der Spindel nicht.

### **6.3 Vergleich der Auswirkungen untersuchter Parameter auf die Kontakte**

Im Folgenden sollen die in den Kapiteln 6.1 und 6.2 ermittelten Ursachen der Effekte der variierten Parameter vergleichend zusammengefasst werden. Es werden dazu die Ursachen in den Kontakten für die Änderungen der Lastverteilung zwischen den Muttern, der mittleren Kräfte, der Kraftschwankungen, des Wirkungsgrades und der Planetenbewegung in der genannten Reihenfolge diskutiert. Damit werden auch die Grundlagen für eine Validierung mittels Lebensdauerversuchen der Auswirkungen eines Parameters auf die Kontakte in Kapitel 6.4 gelegt.

Grundsätzlich wird die Lastverteilung zwischen den Muttern vor allem durch die Parameter Vorspannung, Axialkraft und die Planetenlänge beeinflusst. Dabei wird die Lastverteilungen zwischen den Muttern durch die Axialkraft nur in kleinen Bereichen der für den PWG möglichen Axialkraft beeinflusst: Wirkt keine Axialkraft so werden beide Muttern aufgrund der Vorspannung gleichmäßig beansprucht. Mit zunehmender Axialkraft wird aufgrund der X- oder O-Anordnung im PWG immer eine Mutter zunehmend entlastet und die andere zunehmend belastet. Diese Verschiebung der Last durch die Axialkraft geschieht, bis die Axialkraft größer als die Vorspannung ist und damit die Vorspannung überdrückt hat. Ab einer Axialkraft größer der Vorspannung von hier meist 0,6kN wird im möglichen Axialkraftbereich des PWG eine Mutter nur mit einer annähernd konstanten Minimallast belastet. (vgl. Kapitel 5.4.2 und Kapitel 2.1 bzgl. der Vorspannung)

Die Änderung der Lastverteilung zwischen den Muttern wird durch die Variationen der Vorspannung und der Planetenlänge insbesondere durch die Verschiebung von in den einzelnen Kontakten wirkenden Kräften verursacht. Dabei unterscheiden sich deutlich die betroffenen Windungen und die Art der Verschiebung. Durch die Variation der Planetenlänge werden vor allem die höchstbelasteten Windungen der hochbelasteten Mutter entlastet und dafür die Windungen der niedrig belasteten Mutter höher belastet.

Gleichzeitig sinken dabei die Kontaktnormalkräfte der hochbelasteten Spindelwindungen und die niedrigbelasteten Spindelwindungen werden höher belastet.

Bei der Variation der Vorspannung ändert sich hingegen je nach Vorspannung im Gegensatz zur Variation der Planetenlänge die hochbelastete Mutter. Ursache für diesen Wechsel der hochbelasteten Mutter und die Verschiebung der Lastverteilungen zwischen den Windungen ist die zwangsweise mit der Vorspannung unterschiedliche Verschiebung der Mütter zueinander, um die gewünschte Vorspannung zu erreichen. Damit ändert sich die Lage der möglichen Kontakte der Mütter in ihrer x-Position zueinander und damit die in den einzelnen Windungen wirkenden Kräfte. Wie bei der Variation der Planetenlänge ändert sich das Kraftgefälle der Kontaktnormalkräfte zwischen den an der hochbelasteten Mutter bzw. der Spindel hoch und niedrigbelasteten Windungen. Im Gegensatz zur Variation der Planetenlänge ändert sich durch die Vorspannung aufgrund des Tausches der hochbelasteten Mutter auch die höchstbelastete Windung der Spindel. Als weitere Ursache beeinflussen die Variationen der Vorspannung und der Planetenlänge beide die Lastverteilungen zwischen den Müttern durch die für ihre Variation notwendige Änderung des Bewegungsraumes der Planeten.

Neben der Lastverteilung zwischen den Müttern werden die mittleren Kräfte durch weitere Ursachen in den Kontakten durch die Variation der Parameter Axialkraft, Drehzahl, Radialspiel und Planetenlänge beeinflusst. Die Kontaktkräfte und damit die mittleren Kräfte in x-Richtung bzw. die mittleren radialen Kräfte nehmen wie erwartet mit der Axialkraft zu. Allerdings wird durch die Axialkraft auch das Kraftgefälle zwischen den höchst- und niedrigstbelasteten Windungen in jeder Komponente des PWG beeinflusst. Bei einer Erhöhung der Axialkraft werden die hochbelasteten Windungen überproportional höher belastet. Insbesondere in den Spindelkontakten ändert sich das Kraftgefälle von einem eher linearen Verhalten zu einem exponentiellen Verhalten.

Auch durch die Variation der Drehzahl und des Radialspiels ändern sich die Kraftgefälle zwischen höchst- und niedrigstbelasteten Windungen in jeder Komponente des PWGs. Mit zunehmender Drehzahl nehmen vor allem die mittleren radialen Kräfte an den Müttern beim Anheben der Last zu und beim Absenken der Last ab. Mit zunehmender Drehzahl werden beim Anheben der Last vor allem die niedrigbelasteten Windungen der hoch belasteten Mutter und die Windungen der niedrigbelasteten Mutter höher belastet. Ursache ist dafür das gegen das Kippmoment durch die Axialkraft wirkende Moment durch die Zentrifugalkraft. Die Häufigkeitsverteilungen der Kontaktkräfte der Windungen der Spindel werden durch die Drehzahl beim Anheben der Last nur in

ihrer Spannweite verändert. Beim Absenken der Last hingegen ändert sich das Kraftgefälle zwischen der höchst- und niedrigstbelasteten Windung der Spindel. Dadurch können die Planeten ihr Kippen und Schränken ändern wodurch beim Absenken der Last die Kontaktnormalkräfte zwischen den Muttern und den Planeten sinken. In Folge nehmen deshalb beim Absenken der Last die radialen Kräfte zwischen den Muttern und den Planeten ab.

Durch die Variation des Radialspiels ändert sich das Kraftgefälle der Kontaktkräfte zwischen den jeweils höchst- und niedrigstbelasteten Windungen der Spindel- und der Mutterkontakte. Mit zunehmendem Radialspiel nehmen dabei die Kontaktkräfte in den hochbelasteten Windungen zu, während die niedrigbelasteten Windungen mit nahezu unveränderten Kontaktkräften verbleiben.

Zusätzliche Windungen, wie in der Variation der Planetenlänge gezeigt, senken die Kontaktkräfte in jeder Windung der Spindel- und Mutterkontakte. Die Summe der Kontaktkräfte der zusätzlichen Windungen an der hochbelasteten Mutter ist jedoch größer als die Summe der Minderung der Kontaktkräfte der bereits vorhandenen Windungen. In Folge steigen durch die zusätzlichen Windungen die mittleren Kräfte in x-Richtung und die mittleren radialen Kräfte zwischen der hochbelasteten Mutter und den Planeten.

Die Kraftschwankungen der mittleren Kräfte in x-Richtung und der mittleren radialen Kräfte zwischen den Muttern bzw. der Spindel und den Planeten ändern sich in der Variation der Vorspannung, der Axialkraft, des Radialspiels und der Planetenlänge jeweils aufgrund der Änderung der Standardabweichungen der Häufigkeitsverteilungen der Kontaktkräfte. So wie sich die Standardabweichungen der Kontaktkräfte mit der Variation im Mittel ändern, so ändern sich erwartungsgemäß analog die Standardabweichungen der mittleren Kräfte in x-Richtung und der mittleren radialen Kräfte zwischen den zu diesen Kontaktkräften gehörenden PWG-Komponenten.

Bei den hier untersuchten Variationen der Vorspannung und der Drehzahl zeigten sich in den Kapiteln 5.4.1 und 5.4.3 deutliche Änderungen des Wirkungsgrades des PWGs. Diese liegen erwartungsgemäß in den Kontaktkräften begründet: steigen die Kontaktkräfte in Summe bei gleichbleibender Axialkraft an, so sinkt der Wirkungsgrad.

Die Ursachen für die unterschiedlichen Planetenbewegungen in den Variationen der Vorspannung, der Axialkraft, der Drehzahl dem Radialspiel und der Planetenlänge beruhen auf den unterschiedlichsten Ursachen. Gemeinsam haben sie allerdings alle die sehr in ihrem Wert stabile Übersetzung einer Drehzahl in einen Vorschub des PWGs

trotz schwankender und unterschiedlicher Planetenbewegungen. Wie am Beispiel der Vorspannung ausgeführt wurde, bewegt sich der Planet vor allem in der niedrig belasteten Mutter und folgt in seiner Bewegung äußerst stabil den Wälzkreisen der im PWG jeweils am höchsten belasteten Mutter- und Spindelwindung. An den hochbelasteten Windungen waren daher im Verhältnis immer nur sehr geringe Unterschiede der Wälzkreise zu sehen und in Folge ist die Übersetzung des PWG äußerst stabil.

In den untersuchten Variationen zeigte sich auch, dass die Wälzkreise an den von der Axialkraft belasteten Flanken der Windungen der hochbelasteten Mutter und der Spindel kaum schwanken. Deutlich stärker schwanken allerdings die Wälzkreise an den dazugehörigen Flanken der Planeten. Die Schwankung des Schränkens und des Kippens der Planeten führen also zu schwankenden Wälzkreisen an den Planeten aber nicht zu schwankenden Wälzkreisen an den von der Axialkraft belasteten Flanken der Windungen der hochbelasteten Mutter und der Spindel.

Die in der Variation der Vorspannung geänderte Richtung des Kippens hat ihre Ursache im Wechsel der hochbelasteten Mutter. Das Kräftegleichgewicht um den Drehpunkt zwischen der am höchsten belasteten Mutter- und Spindelwindung führt dabei erwartungsgemäß beim Wechsel der hochbelasteten Mutter zu einem Wechsel der Richtung des Kippens der Planeten. Die maximale Varianz des Schränkens in der Variation der Vorspannung bei niedrigen Vorspannungen der X-Anordnung liegt im Kräftegleichgewicht der Kontakte begründet: Bei diesen Vorspannungen werden die Planeten nicht in eine Extremlage gedrückt und können deshalb zwischen beiden Flanken der niedrig belasteten Mutter pendeln.

Der Unterschied in der Richtung des Schränkens zwischen niedrigen und höheren Axialkräften liegt in den Kontakten der niedrigbelasteten Mutter begründet. Mit zunehmender Axialkraft treten dabei vermehrt Kontakte in Richtung der Zahnköpfe der Windungen dieser Mutter an den Flanken auf, die nicht die Axialkraft abstützen. Es kommt also zu einem beidseitigen Kontakt. Ab 2kN Axialkraft sind die in diesen Kontakten wirkende Kräfte groß genug, um die Richtung des Schränkens beim Absenken der Last zu ändern. Ab 4kN Axialkraft sind diese Kräfte auch groß genug, um die Richtung des Schränkens auch beim Anheben der Last zu ändern.

Die instabile Bewegung der Planeten bei hohen Drehzahlen wird durch einen zunehmenden beidseitigen Kontakt in den Spindelwindungen hervorgerufen. Dabei schwanken die dazugehörigen Wälzkreisradien der Windungen, die nicht die Axialkraft

abstützen, mit zunehmender Drehzahl immer stärker, wodurch die Planetenbewegung zunehmend instabil im Bezug zum Kippen und Schränken der Planeten wird.

Bei der Variation des Radialspiels zeigte sich die größte Varianz der Wälzkreise an den Planeten in den hochbelasteten Kontakten. Obwohl daraus starke Schwankungen des Kippens und des Schränkens erfolgen, führt dies nicht wie an den anderen variierten Parametern gezeigt zu erhöhten Kraftschwankungen. Ursache dafür sind die unveränderten Wälzkreise und Kontakte mit der Spindel und den Muttern bei der Variation des Radialspiels. Bei den anderen variierten Parametern ändern sich die Wälzkreise der niedrig belasteten Kontakte – es kommt dort bspw. je nach Variation zu einer Änderung ob beidseitige Kontakte auftreten.

Die Abnahme des Schränkens und Kippens der Planeten mit zunehmender Planetenlänge beruht auf dem mit der Variation geänderten Bewegungsraum der Planeten und der Abnahme des Gefälles zwischen den Wälzkreisen an den Planeten in den Spindelkontakten. Durch die Variation der Planetenlänge ändert sich dabei aber nicht das Gefälle der Wälzkreise an der Spindel.

Im Folgenden sollen die Effekte in den Kontakten bei einem ausgewählten Parameter mittels Lebensdauerversuchen validiert werden. Abschließend werden dann die Anwendungsgrenzen der Ergebnisse dieser Arbeit aufgezeigt.

## **6.4 Validierung von Auswirkungen eines Parameters auf die Kontakte**

Im Folgenden sollen Auswirkungen eines der variierten Parameter auf die Kontakte über die Lebensdauer validiert werden. Nach (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020, S. 32) wird der PWG zeitfest ausgelegt. Verschiebt sich die Belastung zwischen einzelnen Windungen zu einem größeren Ungleichgewicht zwischen den Windungen, so sinkt deshalb die Lebensdauer der damit höher belasteten Windungen. Damit sinkt auch die Lebensdauer des gesamten PWGs. Für die Bewertung des PWGs ist damit die Lastverteilung auf die Windungen von besonderer Bedeutung.

Verschleißmechanismen wie Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung benötigen eine Relativbewegung der zwei ineinander in Kontakt stehenden Körper. (Sommer & Heinz et al. 2014) Bei einem idealen Wälzen ist diese Relativbewegung nicht vorhanden. Bilden sich am PWG unterschiedliche Wälzkreise am gleichen Planeten und seinen Kontakten mit der Spindel bzw. den Muttern aus, so muss der Planet zwangsweise

an einem Teil seiner Kontakte schlupfen. Der Planet selbst hat nur eine Rotationsgeschwindigkeit müsste sich aber durch die unterschiedlichen Wälzkreise lokal unterschiedlich schnell drehen. Dies kann er nicht und daher muss er die unterschiedlichen Wälzkreise durch Schlupf ausgleichen. Damit entstehen in einzelnen Kontakten unterschiedliche Relativbewegungen in Richtung und Geschwindigkeit, wodurch wiederum ein zusätzlicher Verschleiß durch Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung ermöglicht wird. Damit ist für die Ermüdungslebensdauer die Gleichmäßigkeit der Wälzkreise von besonderer Bedeutung.

Für die Validierung der Effekte auf die Kontakte bietet sich daher besonders das Radialspiel an: mit steigendem Radialspiel werden die hochbelasteten Windungen immer stärker belastet und die Wälzkreise an den Planeten immer instabiler. In Folge wird mit zunehmendem Radialspiel ein starkes Absinken der Lebensdauer des PWGs erwartet.

Bezüglich der Variation des Radialspiels wurden von Seitens der Schaeffler Technologies AG & Co. KG Versuche durchgeführt und deren Ergebnisse zur Verfügung gestellt. Es wurden dabei Lebensdauerexperimente mit dem PWG15x3 und den in Tabelle 13 dargestellten Radialspielen bei 1706U/min und 8500N Axialkraft mit jeweils einem Prüfling durchgeführt. Dabei zeigt sich deutlich, dass die Lebensdauer mit niedrigem Radialspiel am höchsten ist. (Moser 2018; Moser 2019b; Moser 2019a) Das Optimum erreicht sie bei einem Radialspiel von  $-10\mu\text{m}$ . Bei dem Versuch mit  $-15\mu\text{m}$  Radialspiel ist die Lebensdauer deutlich geringer als bei  $-10\mu\text{m}$  Radialspiel, der PWG scheint bei diesem Radialspiel zu stark verspannt zu sein. In den Simulationen wurde der Bereich von  $-10\mu\text{m}$  Radialspiel bis  $70\mu\text{m}$  Radialspiel untersucht. In diesem Bereich kann in den Simulationen aufgrund der zuvor beschrieben zunehmenden Belastung der hoch belasteten Windungen und instabilen Wälzkreise eine mit zunehmendem Radialspiel deutlich sinkende Lebensdauer abgeleitet werden. Dies wird mit den hier gezeigten Ergebnissen aus den Versuchen bestätigt. Ein Ähnliches Verhalten im Bezug zum Radialspiel zeigt sich bspw. auch bei Rillenkugellagern. Nach (Oswald & Zaretsky et al. 2012, S. 254) sinkt beispielsweise die Lebensdauer bei Rillenkugellagern bei  $52\mu\text{m}$  Radialspiel im Vergleich zu  $2\mu\text{m}$  Radialspiel bei Lagern der Baugröße 210 um 35%.

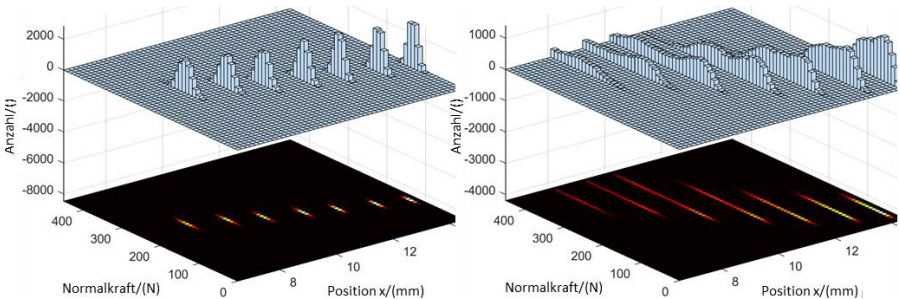
*Tabelle 13 Lebensdauer des PWG15x3 in Abhängigkeit des Radialspiels*

Radialspiel/ ( $\mu\text{m}$ )	-15	-10	13	18	36
Lebensdauer/ (%) zum Prüfling mit $36\mu\text{m}$ Radialspiel	239,50	1157,73	300,95	255,21	100,00

## 6.5 Anwendungsgrenzen der gezeigten Ergebnisse

Zum Abschluss dieser Arbeit sollen die Anwendungsgrenzen der gezeigten Ergebnisse aufgezeigt werden. Der PWG zeigt bei einer Vielzahl an Einflussfaktoren hochgradig nichtlineare Effekte. Eine Extrapolation der Ergebnisse über die in dieser Arbeit vorgestellten Bereiche der Einflussfaktoren sollte daher nur in Maßen geschehen. Wie die Versuche in Kapitel 6.4 mit dem Radialspiel  $-15\mu\text{m}$  zeigen, kann bereits bei einer Variation geringfügig außerhalb der in dieser Arbeit untersuchten Bereiche ein anderes Verhalten des PWG auftreten. Gleichmaßen bedeutet dies bei einer Interpolation, z.B. bei der Analyse der Flankenwinkel, dass zwischen den hier gezeigten Punkten der Einflussfaktoren kein lineares Verhalten vorliegen muss. Es können damit u.a. für die Lebensdauer deutlich bessere oder auch schlechtere Punkte der einzelnen Einflussfaktoren zwischen den hier gezeigten existieren.

In dieser Arbeit wurde rein auf ideale Lasten für den PWG eingegangen: die untersuchten Axialkräfte wirken deshalb immer koaxial zur Spindel. Bei Versuchen mit Prüflingen zum Einrichten des PWGs wurde festgestellt, dass schon geringe Fehler der Ausrichtung und Krafteinleitung zu u.a. deutlich erhöhten Antriebsmomenten führen. Nichtideale Lasten und Ausrichtungen führen zu weiteren signifikanten aber noch nicht untersuchten Einflussfaktoren.



*Abbildung 138 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Absenkens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung mit Starrkörperplaneten (links) und flexiblen Planeten (rechts)*

Die hier in dieser Arbeit gezeigten Simulationen wurden bis auf angegebene Ausnahmen mit Starrkörpern gerechnet, um die Simulationszeiten auf ein für die Anzahl an Simulation vertretbares Maß zu senken. Dadurch sind die Ergebnisse dieser Arbeit insbesondere im Bezug zu den Lastverteilungen qualitativ zu sehen. Mögliche

Auswirkungen von flexiblen Planeten sind sehr gut in Abbildung 138 ersichtlich. Dabei wurde ein Auszug der reinen Starrkörpersimulation mit flexiblen Planeten gerechnet. Unterschiede zeigten sich auch in den FEM-Simulationen von (A\_Breining 2016; A\_Arnarson 2018).

Gerade die Bewertung der Kontakte ist immer im Bezug zu den Kontaktmodellen zu sehen. Durch verhältnismäßig einfache Modelle ist mit einem erhöhten Fehler zu rechnen. Für die Verwendung genauerer Modelle wäre aber das erst in dieser Arbeit ermittelte Verhalten des PWGs nötig gewesen. Eine detaillierte, sehr genaue Analyse der Kontakte im Bezug zu den Einflussfaktoren benötigt daher genau auf den jeweiligen Einflussfaktor zugeschnittene Versuche und Simulationen.

Auswirkungen, wie z.B. eine Änderung des Schmierstoffes oder das Temperaturverhalten des PWG, wurden in dieser Arbeit nicht untersucht und können ein anderes Verhalten der Einflussfaktoren erzeugen. Gleichmaßen wurden in dieser Arbeit keine Fertigungsungenauigkeiten im PWG untersucht. Aufgrund der hochgradigen Überbestimmtheit des PWGs wird mit großen Auswirkungen der Fertigungsungenauigkeiten gerechnet. Diese konnten von (A\_Zhang 2018) nachgewiesen werden. In dieser Masterarbeit wurde die Planetengeometrie aus CT-Messungen in die MKS integriert und es konnten dadurch die Auswirkungen der Fertigungsabweichungen genau dieser Geometrie untersucht werden. Für weitere Schwingungsanalysen in der MKS für den PWG15x3 sei auf die Arbeit von (A\_He 2018) verwiesen. In dieser, ebenfalls vom Autor dieser Arbeit betreuten Masterarbeit, wurden allerdings schlechtere Kontaktparameter verwendet, die deutlich stärker von den Versuchen als jene in dieser Arbeit abweichen.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist die Analyse des dynamischen Verhaltens von Planetenwälzgewindetrieben und dessen Auswirkungen auf die Lebensdauer. Dazu muss das Systemverständnis erweitert und Einflussfaktoren auf die Lebensdauer ermittelt werden. Aufgrund der im Vergleich weit höheren Leistungsdichte bei maximaler Übersetzung, ist der PWG mit am besten als Wandlungsgetriebe für Anwendungen mit hoher benötigter axialer Tragfähigkeit geeignet. Seine Eignung als intelligenter elektromechanischer Zylinder wird bspw. von (A\_Valev 2017) dargelegt. Der PWG kombiniert Eigenschaften von Wälzlagern, Planetengetriebe, Verschraubungen und Reibradgetrieben. Er unterscheidet sich dabei durch die freie, nur durch die wirkenden Kontakte eingeschränkte Bewegung seiner Planeten – den Wälzkörpern im System – von funktionsahnlichen Antrieben wie dem PRGT und dem RGT. Dadurch sind Erkenntnisse von den funktionsahnlichen Antrieben nur schwerlich übertragbar.

Aus dem Stand der Technik wird klar deutlich, dass die gröſsten Defizite zum PWG in der Kenntnis seiner Kinematik, Kinetik und Dynamik liegen. Bekannte Schadensanalysen und bisherige Arbeiten zum PWG zeigen aber genau einen großen Einfluss derselben auf. Bedeutend ist dafür maßgeblich die freie Bewegung der Planeten – die Planeten können schränken und kippen und die im PWG wirkenden Kontakte. Nach dem heutigen Stand der Technik sind weiterhin keinerlei Einflussfaktoren auf den PWG im Bezug zur Lebensdauer untersucht.

In Folge werden in dieser Arbeit Mehrkörpersimulationen (MKS) zum PWG aufgebaut und Versuche zur Validierung und zur Ermittlung von Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik des PWG durchgeführt. Für die Versuche werden Prüfstände entwickelt, aufgebaut sowie Versuchsabläufe geplant. Zusätzlich wird ein Sensorsystem zur hochgenauen Überwachung der Bewegung der Planeten im  $\mu\text{m}$  Bereich entwickelt. Mittels der kalibrierten Simulation wird die Anwendung des PWGs anhand der wichtigsten Faktoren – Vorspannung, Axialkraft und Drehzahl untersucht sowie Referenzwerte dieser Faktoren für nachfolgende Simulationen abgeleitet. In den nachfolgenden Untersuchungen der Geometrie werden die Auswirkungen des Radialspiels, der Planetenlänge, der Flankenwinkel an Muttern- und Spindelkontakten, des ubersetzungsverhaltnisses an den Planeten und einer Steigung an den Planeten an den Spindelkontakten untersucht. Zusätzlich wird die Baugröße des PWGs variiert und bei der Untersuchung der

Axialkraft nachgewiesen, dass die zuvor am PWG15x3 untersuchten Einflussfaktoren sich auch vergleichbar auf andere PWGs auswirken. Versuche bestätigen diese Ergebnisse.

Aus den zuvor ermittelten Einflussfaktoren werden die Parameter Vorspannung, die Axialkraft, die Drehzahl, das Radialspiel und die Planetenlänge ausgewählt und deren Kontakte analysiert, um die Auswirkungen dieser Einflussfaktoren auf die Kontakte aufzuzeigen und die Ursachen der auftretenden Effekte der Kinematik und Kinetik des PWGs zu ermitteln. Bestimmte Auswirkungen der Parameter auf Kontakte können gut mittels Lebensdauerversuchen nachgewiesen werden. In den Simulationen wird gezeigt, dass das Radialspiel aufgrund seines Verhaltens in den Kontaktkräften und Wälzkreisen große Auswirkungen auf die Lebensdauer hat. Versuche von Schaeffler Technologies bestätigen dies und zeigen je nach Radialspiel einen Unterschied um Faktor 11 in der Lebensdauer. Die Arbeit schließt mit den Anwendungsgrenzen der gezeigten Ergebnisse.

## 7.2 Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Forschung am PWG, gerade im Vergleich zu etablierten und weitverbreiteten Komponenten wie KGTs, noch ganz am Anfang steht. Es ist daher eine Vielzahl an weiteren Untersuchungen zum PWG nötig.

Die vorliegende Arbeit erweitert das Systemverständnis zum PWG zu einer Vielzahl an Einflussfaktoren auf die Kinematik und Kinetik des PWG. In nachfolgenden Arbeiten können auf dieser Basis bessere Kontaktmodelle gewählt, an den PWG angepasst und weitere Einflussfaktoren untersucht werden. In Folge können auch genauere Auswirkungen auf die Kinematik und Kinetik des PWG der bisher untersuchten Einflussfaktoren ermittelt werden. Durch FEM-Simulationen und weitere Versuche von in dieser Arbeit ermittelten Betriebspunkten zu unterschiedlichsten quasistatischen Betriebsfällen können die Auswirkungen der Einflussfaktoren genau auf Verformung und Verschleiß untersucht werden.

Weiterhin sollten Schmierkonzepte und Schmierstoffe für den PWG untersucht werden. Das thermische Verhalten des PWGs wurde bisher durch nur in ersten, sehr groben Ansätzen durch (A\_Luo 2016) untersucht und sollte weiter vertieft werden. Gerade für die Anwendung in der Messtechnik ist die Entwicklung der Reibungswärme nach (Ma & Liu et al. 2013) von besonderer Bedeutung. Auf Basis von Untersuchungen der Fertigungsketten wie z.B. durch (A\_Kiefer 2016) und auf weitergehende simulative

Untersuchungen der Fertigungsungenauigkeiten auf Basis von (A\_Zhang 2018) sollten die Auswirkungen der Fertigungsungenauigkeiten ermittelt und für die Produktion sinnvolle Grenzen abgeleitet werden.

Insbesondere durch die Anwendung des hier gezeigten Sensorarrays oder ähnlicher Sensorik können die Bewegungen der Planeten in den Versuchen genau nachverfolgt werden und damit die Einflussfaktoren auch in Versuchen oder Anwendungen genau analysiert werden. Mit den gerade aufgezählten Untersuchungen können dann genauere Lebensdauermodelle für den PWG aufgebaut werden.

In dieser Arbeit wurden 68 von 245 berechneten Simulationen vorgestellt. Zu jeder davon gibt es Daten von zumeist 426 Kontakten – PWG09x3 und PWG25x2 unterscheiden sich – für je 4 quasistatische Betriebsfälle sowie 4 unterschiedliche Änderungen von Drehzahl- und Axialkraftichtung. Gerade hier bietet sich ein Datamining und eine Untersuchung mittels maschinellen Lernens an. Erste Ansätze dazu wurden von (A\_Yu 2018) aufgezeigt. Auf Basis der hier gezeigten MKS-Simulationen kann auch ein Modell zur automatischen Optimierung des PWGs – beispielsweise durch KI – aufgebaut werden. Die wenigen bisherigen Untersuchungen zum PWG lassen auf ein sehr großes Optimierungspotenzial schließen.

## Publikationsliste

(1)	Fleischer, J.; Klee, B.; Spohrer, A. & Merz, S. (2018), <i>Leitfaden Sensorik für Industrie 4.0 - Wege zu kostengünstigen Sensorsystemen</i> , VDMA Forum Industrie 4.0, Frankfurt.
(2)	Möhring, H.; Fleischer, J.; Maier, W.; Spiller, Q.; Baumann, F. & Merz, S. (2018), "Die additive Fertigung als vollständige Prozesskette auf der Online Plattform 3D-Print-Cloud Baden-Württemberg". <i>Werkstoffe und Additive Fertigung - Tagungsband</i> , eds. DGM, pp. 84-89.
(3)	Merz, S.; Maier, W.; Baumann, F.; Spiller, Q.; Möhring, H. & Fleischer, J. (2018), "3D-Print-Cloud Baden-Württemberg", <i>wt-online</i> , pp. 537-542.
(4)	Merz, S.; Baumann, F. & Dittus, J. (2018), "3D-Print-Cloud BW". <i>Additive Manufacturing – Vom Fertigungsverfahren zum Produktionssystem</i> , eds. Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer, P. D. H. V. S., pp. 108-125.

## Literaturverzeichnis

Verweise gemäß Schema (A\_Nachname, Vorname (Jahr)) beziehen sich auf studentische Arbeiten des wbk, die durch den Verfasser der vorliegenden Dissertation angeleitet wurden.

(A\_Arnarson 2018)

A\_Arnarson, E. (2018), *Finite element simulation and a contact analysis on a new linear drive*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Breining 2016)

A\_Breining, T. (2016), *Untersuchung der Eingriffsverhältnisse von wälzkörpergetriebenen Linearantrieben durch Finite-Elemente-Analyse in Abaqus*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Chilakalar 2018)

A\_Chilakalar, A. (2018), *Development of a sensor array to monitor the movement and the rotation of rolling elements in a novel linear drive*. Masterarbeit, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, Karlsruhe, Electrical Engineering & Information Technology.

(A\_di Noia 2017)

A\_di Noia, U. D. (2017), *Enhancement of multibody simulation for the examination of dynamics of new rolling elements driven linear drives*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_He 2018)

A\_He, J. (2018), *Schwingungsanalyse von Linearantrieben mittels MKS in Adams*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Heider 2017)

A\_Heider, I. (2017), *Aufbau eines parametrischen Modells für Mehrkörpersimulationen von neuartigen, wälzkörpergetriebenen Linearantrieben*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Hess 2018)

A\_Hess, F. (2018), *Entwicklung einer hochintegrierten Messeinheit für neuartige Linearantriebe*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Ji 2016)

A\_Ji, C. (2016), *Mehrkörpersimulation zur Analyse des dynamischen Verhaltens von neuartigen Linearantrieben*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Kiefer 2016)

A\_Kiefer, L. (2016), *Untersuchung von Fertigungsketten für Planeten-Wälz-Gewindetriebe (PWG)*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Institut für Produktionstechnik (wbk).

(A\_Liang 2018)

A\_Liang, F. (2018), *Erweiterung des Verschleißmodelles von neuartigen wälzkörpergetriebenen Linearantrieben*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Liu 2019)

A\_Liu, Z. (2019), *Adaptation of a 3D printer as a fully automatic test stand for new sensor arrays and extension by a high-precision, contactless calibration*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Luo 2016)

A\_Luo, C. (2016), *Simulation des thermischen Verhaltens von neuartigen wälzkörpergetriebenen Linearantrieben*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Ma 2017)

A\_Ma, T. (2017), *Coupling of FEM and multibody simulation of new rolling elements driven linear drives*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Mußnug 2016)

A\_Mußnug, F. (2016), *Entwicklung einer hochintegrierten Messdose zur Überwachung der Vorspannung von Planeten-Wälz-Gewindetrieben (PWG)*.

Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Rodsiri 2019)

A\_Rodsiri, K. (2019), *Materialuntersuchung von Dielektrika für eine kapazitive Kraftmessung*. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Valev 2017)

A\_Valev, K. (2017), *Entwicklung eines intelligenten Aktors auf Basis von neuartigen wälzkörpergetriebenen Linearantrieben*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Widemann 2015)

A\_Widemann, D. (2015), *Messtechnische Qualifizierung und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes zur messtechnischen Untersuchung von wälzkörpergetriebenen Vorschubantrieben*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Xu 2019)

A\_Xu, M. (2019), *Commissioning of a hexapod and construction of a corresponding test bench for high-precision sensor calibration*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Yang 2019)

A\_Yang, Z. (2019), *Development and experimental analysis of a capacitive sensor design for multidimensional force measurement*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Yu 2018)

A\_Yu, Y. (2018), *Machine Learning Applications in the Correlation Analysis of a Nove Linear Drive*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Zhang 2018)

A\_Zhang, Z. (2018), *Übertragung von in CT-Messungen erfassten Geometriefehlern in MKS-Simulationen*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Zhang 2019)

A\_Zhang, H. (2019), *Algorithm-Development for auto-calibration of sensors and data fusion for anovel sensor array*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Zhao 2016)

A\_Zhao, H. (2016), *Design of a parametric Model with scripting to analyze new rolling elements driven linear drives*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(A\_Zürn 2017)

A\_Zürn, M. (2017), *Verschleißuntersuchung eines neuartigen wälzkörpergetriebenen Linearantriebs*. Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, wbk Institut für Produktionstechnik.

(Balázs 1999)

Balázs, M. (1999), *Analyse und Modellbildung einer Planeten-Wälz-Gewindespindel*. Dissertation, Technische Universität München, München, DLR Insitut für Robotik und Systemdynamik.

(Bartz 1999)

Bartz, W. J. (Hrsg.) (1999), *Schäden an geschmierten Maschinenelementen. Gleitlager, Wälzlager, Zahnräder; mit 45 Tabellen*, Expert-Verl., Renningen-Malmsheim. ISBN: 3-8169-1656-2.

(Baumer Holding AG 2017)

Baumer Holding AG (03.2017), *Induktiver Hochpräziser Wegaufnehmer. Datenblatt IPRM 12I9504/S14*.

(Bosch Rexroth AG 2020)

Bosch Rexroth AG (10.2020), *Gewindetriebe. Kugelgewindetriebe BASA / Planetengewindetriebe PLSA. Datenblatt R999001184/2020-10*.

(Brecher & Weck 2017)

Brecher, C. & Weck, M. (2017), *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 2. Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-46567-7.

(Broszeit 1982)

Broszeit, E. (1982), „Verschleiß durch Oberflächen-Zerrüttung an



wälzbeanspruchten Bauteilen“ in *Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen. Ursachen, Analyse, Optimierung*, Hrsg. H. Czichos, Expert-Verlag, Grafenau, S. 109–148.

(Budynas & Nisbett et al. 2011)

Budynas, R. G.; Nisbett, J. K. & Shigley, J. E. (2011), *Shigley's mechanical engineering design*, McGraw-Hill, New York. ISBN: 978-0-07-352928-8.

(Coulomb 1809)

Coulomb, C. A. (1809), *Théorie des machines simples, en ayant égard au frottement de leurs parties, et à la roideur des cordages*, Bachelier, Paris.

(Czichos & Habig 2015)

Czichos, H. & Habig, K.-H. (2015), *Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 3834822361.

(Deppler 2017)

Deppler, J. (2017), *Ein Beitrag zur viskoelastischen Modellierung nichtholonomer Bindungsgleichungen*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. ISBN: 9783731505488.

(Deters 2012)

Deters, L. (2012), „Reibung, Verschleiß und Schmierung“ in *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben*, Hrsg. B. Sauer, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 1–68.

(Dietrich & Gombert 1988)

Dietrich, J. & Gombert, B., *Apparatus for converting rotary motion into axial motion*(1988), Vereinigte Staaten von Amerika US4926708.

(Flores & Lankarani 2016)

Flores, P. & Lankarani, H. M. (2016), *Contact Force Models for Multibody Dynamics*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 978-3-319-30896-8.

(Font-Llagunes 2016)

Font-Llagunes, J. M. (Hrsg.) (2016), *Multibody dynamics. Computational methods and applications*, Springer International Publishing, Cham, s.l. ISBN: 978-3-319-30612-4.

(GfT 2002)

GfT (2002), „Arbeitsblatt 7: Tribologie-Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung“, *Gesellschaft für Tribologie eV (GfT)*.

(Goldsmith 1960)

Goldsmith, W. (1960), „Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids.“, *The Journal of the Royal Aeronautical Society*, 65(606), S. 443.

(Haber Kern 1998)

Haber Kern, A. (1998), *Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 1998, Inst. für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Univ. (TH), Karlsruhe.

(Hähnle 1995)

Hähnle, M. (1995), *Spannungs und Verformungsanalyse an einer Planeten-Wälz-Gewindespindel mit physikalischen (spannungsoptischen) und numerischen Modellen*. Diplomarbeit, Technische Universität München, München, DLR Institut für Robotik und Systemdynamik.

(Hunt & Crossley 1975)

Hunt, K. H. & Crossley, F. R. E. (1975), „Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact“, *Journal of Applied Mechanics*, 42(2), S. 440–445.

(Johnson 1982)

Johnson, K. L. (1982), „One Hundred Years of Hertz Contact“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 196(1), S. 363–378.

(Johnson 2003)

Johnson, K. L. (2003), *Contact mechanics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge. ISBN: 0521347963.

(Klein 2015)

Klein, B. (2015), *FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-365-80605-4-1.

(Ma, S.; Liu, G. & Tong, R. 2013), „The frictional moment and transmission efficiency of planetary roller screw“, *Journal of Harbin Institute of Technology* 11.2013.

(Melaxis NV 2017)

Melaxis NV (09.2017), *Datasheet MLX90393 Triaxis Magnetic Node Revision 003*.

(Moser 2018)

Moser, S. (11.2018), *Baukasten-PWG 15x2.11 nach F-611485.01.PWG15x2.11 - Laufversuch mit optimierter Spindel und reduziertem Radialspiel. Versuchsbericht 003-143-945/001/00, Schaeffler Technologies AG & Co. KG.*

(Moser 2019a)

Moser, S. (04.2019), *Baukasten-PWG 15x2.11 nach F-611485.PWG15x2.11 - Laufversuch M3 mit neuester Spindelcharge. Versuchsbericht 003-535-647/001/00, Schaeffler Technologies AG & Co. KG.*

(Moser 2019b)

Moser, S. (08.2019), *Baukasten-PWG 15x2.11 nach F-611485 - Laufversuch zur Serienfreigabe. Versuchsbericht 003-750-492/001/00, Schaeffler Technologies AG & Co. KG.*

(Nasdala 2015)

Nasdala, L. (2015), *FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks*, Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-365-80663-0-7.

(NSK Europe Ltd. 2009)

NSK Europe Ltd. (Hrsg.) (2009), *Wälzlager-Doktor. Wartung von Wälzlagern.*

(Ortlieb Präzisionssysteme GmbH & Co. KG 2016)

Ortlieb Präzisionssysteme GmbH & Co. KG (2016), *Antriebssysteme. SERAC® Elektrozyylinder ASCA Servospindel.*

(Oswald & Zaretsky et al. 2012)

Oswald, F. B.; Zaretsky, E. V. & Poplawski, J. V. (2012), „Effect of Internal Clearance on Load Distribution and Life of Radially Loaded Ball and Roller Bearings“, *Tribology Transactions*, 55(2), S. 245–265.

(Popov 2009)

Popov, V. L. (2009), *Kontaktmechanik und Reibungsphysik*, Verlag der Polytechnischen Universität Tomsk. ISBN: 5-98298-449-3.

(Rabinowicz 1965)

Rabinowicz, E. (1965), *Friction and wear of materials*, Wiley, New York. ISBN: 0-471-70340-0.

(Ravn 1998)

Ravn, P. (1998), „A Continuous Analysis Method for Planar Multibody Systems with Joint Clearance“, *Multibody System Dynamics*, 2(1), S. 1–24.

(Rill & Schaeffer et al. 2020)

Rill, G.; Schaeffer, T. & Borchsenius, F. (2020), *Grundlagen und computergerechte Methodik der Mehrkörpersimulation. Vertieft in Matlab-Beispielen, Übungen und Anwendungen*. ISBN: 978-3-658-28912-6.

(Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2000)

Schaeffler Technologies AG & Co. KG (Hrsg.) (2000), *Wälzlagerschäden. Schädenerkennung und Begutachtung gelaufener Wälzlager*.

(Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2015)

Schaeffler Technologies AG & Co. KG , *Smart Aktor für höchste Tragfähigkeit. Innovativer Gewindetrieb für elektromechanische Linearaktoren*, Frankfurt a. M., Schweinfurt.

(Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2019)

Schaeffler Technologies AG & Co. KG (2019), *Wälzlagerpraxis. Handbuch zur Gestaltung und Berechnung von Wälzlagerungen*, Vereinigte Fachverlage GmbH, Mainz. ISBN: 978-37830-0415-1.

(Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2020)

Schaeffler Technologies AG & Co. KG (09.2020), „Planetenwälzgewindetriebe. Datenblatt TPI 254“.

(Schumann & Mán et al. 2015)

Schumann, L.; Mán, L. & Greb, P., *Planetenwälzgewindetrieb (PWG) und Aktor mit einem Planetenwälzgewindetrieb*(2015), DE 10 2015 205 963 B3 2016.05.19.

(Schumann & Mán et al. 2015)

Schumann, L.; Mán, L. & Greb, P., *Planetenwälzgewindespindeltrieb und Aktor mit selbigem*(2015), DE 10 2015 212 333 A1 2017.01.05.

(SIKO GmbH 2020)

SIKO GmbH (10 August), *Datenblatt Magnetic sensor LEC100*.

(SKF Group 2014)

SKF Group (2014), *Roller Screws. Datenblatt PUB MT/P1 14489 EN*.

(Sommer & Heinz et al. 2014)

Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.; Zipsner, T. & Klabunde, E. (2014), *Verschleiss metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Germany. ISBN: 383482464X.

(Straffelini 2015)

Straffelini, G. (2015), *Friction and Wear. Methodologies for Design and Control*, Springer International Publishing, Cham, s.l. ISBN: 978-3-319-05893-1.

(VDI3822)

VDI 3822(2017), *Schadensanalyse*, Beuth Verlag GmbH, 03.100.40, 77.040.01.

(Weck & Brecher 2006)

Weck, M. & Brecher, C. (2006), *Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose*, Springer, Berlin. ISBN: 978-3-642-38746-3.

(Whiteley 2017)

Whiteley, J. (2017), *Finite Element Methods. A Practical Guide*, Springer International Publishing, Cham. ISBN: 978-3-319-49970-3.

(Wilhelm Narr GmbH & Co. KG 2005)

Wilhelm Narr GmbH & Co. KG (2005), *Datenblatt NARR-SERVOSPINDEL PWG*.

(Wittel & Roloff et al. 2009)

Wittel, H.; Roloff, H. & Matek, W. (2009), *Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8348-0689-5.

(Zum Gahr 1987)

Zum Gahr, K.-H. (1987), *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, Amsterdam (u.a.). ISBN: 0-444-42754-6.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einteilung von Linearantrieben anhand ihrer Übersetzung	1
Abbildung 2 Halbschnitt durch einen PWG	3
Abbildung 3 Schnitt durch einen PWG und Ansicht der Stirnseite	8
Abbildung 4 Durch Vorspannung sich in Kontakt befindende Wirkflächen der Planeten.	10
Abbildung 5 Überhöhte Darstellung des Kippens eines Planeten und des Schränkens eines Planeten	11
Abbildung 6 Planetentypen im hier diskutierten PWG	12
Abbildung 7 Darstellung der Bewegungen Gleiten, Wälzen und Bohren	16
Abbildung 8 Auszug aus Mikroskop-Bildern eines PWGs der Baugröße 15 nach Lebensdauerversuchen.	18
Abbildung 9 Resultierender Reibkoeffizient $\mu$ durch Coulomb'sche Reibung in Adams	30
Abbildung 10 Vorgehensweise zur Modellbildung des PWG	36
Abbildung 11 Vorgehensweise zur Systemanalyse der Einflüsse auf Kinematik und Kinetik des PWG	38
Abbildung 12 Vorgehensweise zur Kontaktanalyse bzgl. der Auswirkungen von zuvor untersuchten Parametern der Anwendung und der Geometrie	40
Abbildung 13 Komponenten des PWG15x3 im Hauptkraftfluss	44
Abbildung 14 Randbedingungen der PWG-Komponenten in den MKS	46
Abbildung 15 Auszug der Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und den Planeten des Typs 31 für eine freie Bewegung der Planeten und für eine koaxiale Bewegung der Planeten zur Spindel.	48
Abbildung 16 In der Simulation abgebildete Lastfälle	50
Abbildung 17 Bewegung der Spindel in x-Richtung für eine MKS mit der Referenzgeometrie als Beispiel.	52
Abbildung 18 Axialkräfte und benötigte Antriebsmomente aus Versuchen	54

---

Abbildung 19 Auszug des Antriebsmomentes aus der Simulation für 10kN Axialkraft und 1706U/min Spindeldrehzahl für den Haftreibungskoeffizienten von 0,30 und den Gleitreibungskoeffizienten von 0,15.	55
Abbildung 20 Benötigtes Antriebsmoment für die Variation von Gleit- und Haftreibungskoeffizienten in zueinander gleichem Verhältnis	56
Abbildung 21 Einzelzyklus von Versuchen mit einem PWG09x3: Position der Muttern zur Spindel, auf den PWG durch Hydraulik wirkende Axialkraft, das benötigte Antriebsmoment und das benötigte Moment/ Belastung	57
Abbildung 22 Vergleich zwischen den mittleren Antriebsmomenten aus Simulation und Versuch für unterschiedliche Axialkräfte für die bei 10kN Axialkraft abgeglichenen Reibkoeffizienten.	58
Abbildung 23 Position der Spindel für PWG15x3 unter 10kN Axialkraft, 1706 U/min Spindeldrehzahl und Gleit- und Haftreibungskoeffizienten von 0,036 bzw. 0,045	59
Abbildung 24 PWG-Prüfstand	63
Abbildung 25 Schnitt durch die PWG-Aufnahmen im PWG-Prüfstand	64
Abbildung 26 Magnetisierung der Planeten und Integration der Sensorarrays: 1 und 2 zeigen den Bauraum für die Sensorarrays, links axiale und rechts radiale Magnetisierung der Planeten.	66
Abbildung 27 Magnetfeld ( $\mu\text{T}$ ) über den Abstand zum Sensor, Bewegungsgeschwindigkeit 240mm/min	67
Abbildung 28 Zweite Version des Sensorarrays bestückt mit 12 Sensoren	68
Abbildung 29 Auszug aus der Kalibrierung eines Sensorarrays: Magnetfeldstärke in x, y und z für einen Sensor	69
Abbildung 30 Prüfstand zur Bewertung von magnetischen Einflüssen auf die Messung der Sensorarrays	70
Abbildung 31 Auszug benötigtes Antriebsmoment der Spindel in Abhängigkeit der Drehrichtung und der Richtung der Axialkraft	72
Abbildung 32 Auszug Kräfte in x-Richtung zwischen der Spindel und den neun Planeten	72

---

Abbildung 33 Auszug Kräfte in x-Richtung zwischen der Mutter 1 und den neun Planeten	73
Abbildung 34 Auszug Kräfte in y-Richtung zwischen der Spindel und den neun Planeten	74
Abbildung 35 Bewegung des Mittelpunktes der Planetenscheibe 1 um die x-Achse	75
Abbildung 36 Auszug Bewegung der Planeten des Typs 31 in x-Richtung	76
Abbildung 37 Auszug Bewegung der Planeten des Typs 41 in x-Richtung	76
Abbildung 38 Auszug Kippen der Planeten	77
Abbildung 39 Auszug Schränken der Planeten	78
Abbildung 40 Auszug FFT der Schwingungen entlang der x-Achse für das Anheben und für das Absenken der Last	80
Abbildung 41 Vorspannung eines PWGs aus Versuchen mit 100 bis 800N Vorspannung, Drehzahl von 20 U/min ohne eine wirkende Axialkraft	81
Abbildung 42 Kippen des überwachten Planeten aus Versuchen mit 100 bis 800N Vorspannung, Drehzahl von 20 U/min ohne eine wirkende Axialkraft	81
Abbildung 43 Kippen aus Simulation mit 0,6kN Vorspannung, 1706U/min und ohne Axialkraft.	82
Abbildung 44 Mögliche Einflussfaktoren der Anwendung auf Kinematik und Kinetik des PWG bei idealer Integration	85
Abbildung 45 Viertelschnitt durch PWG15x3	87
Abbildung 46 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit der Vorspannung.	91
Abbildung 47 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Vorspannung	92
Abbildung 48 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 2 in Abhängigkeit der Vorspannung	93
Abbildung 49 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel j in Abhängigkeit der Vorspannung	94



---

Abbildung 50	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Vorspannung	95
Abbildung 51	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Vorspannung	96
Abbildung 52	Mittleres Kippen der Planeten in Abhängigkeit der Vorspannung	97
Abbildung 53	Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit der Vorspannung	98
Abbildung 54	Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit der Axialkraft.	99
Abbildung 55	Auszug Versuche mit PWG15x3: Axialkraft, Antriebsdrehzahl der Spindel und translatorische Position der Muttern zur Spindel	100
Abbildung 56	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Axialkraft	100
Abbildung 57	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Axialkraft	101
Abbildung 58	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Axialkraft	102
Abbildung 59	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Axialkraft	102
Abbildung 60	Mittleres Kippen der Planeten in Abhängigkeit der Axialkraft	103
Abbildung 61	Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit der Axialkraft	104
Abbildung 62	Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments je nach Drehzahlrichtung und Drehrichtung in Abhängigkeit der Drehzahl.	105
Abbildung 63	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Drehzahl	106
Abbildung 64	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Drehzahl	107
Abbildung 65	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Drehzahl	108

---

Abbildung 66	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Drehzahl	108
Abbildung 67	Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit der Drehzahl	109
Abbildung 68	Schränken aller Planeten: oben bei 5000 und unten bei 10000U/min	110
Abbildung 69	Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit des Radialspiels.	113
Abbildung 70	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit des Radialspiels	113
Abbildung 71	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit des Radialspiels	114
Abbildung 72	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit des Radialspiels	115
Abbildung 73	Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit des Radialspiels	115
Abbildung 74	Mittleres Kippen der Planeten in Abhängigkeit des Radialspiels	116
Abbildung 75	Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit des Radialspiels	116
Abbildung 76	Längung der Planeten	118
Abbildung 77	Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten.	118
Abbildung 78	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 j in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10* wurden weitere Windungen ergänzt.	119
Abbildung 79	Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10* wurden weitere Windungen ergänzt.	120

Abbildung 80 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10* wurden weitere Windungen ergänzt.	120
Abbildung 81 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten. Bei 10* wurden weitere Windungen ergänzt.	121
Abbildung 82 Mittleres Kippen der Planeten in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten	122
Abbildung 83 Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit der Verlängerung der Planeten	123
Abbildung 84 Variation der Flankenwinkel	124
Abbildung 85 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte.	125
Abbildung 86 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	127
Abbildung 87 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	128
Abbildung 88 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraftichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	129
Abbildung 89 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraftichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	129
Abbildung 90 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je Drehrichtung in den	

---

hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	130
Abbildung 91 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 je Drehrichtung in den hochbelasteten Bereichen von Mutter 1 in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	131
Abbildung 92 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraftfrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	132
Abbildung 93 Standardabweichung des quadratischen Mittels der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und der Spindel je Drehrichtung für negative Axialkraftfrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	133
Abbildung 94 Mittleres Kippen der Planeten je Drehrichtung für negative Axialkraftfrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	134
Abbildung 95 Standardabweichung des Kippens der Planeten je Drehrichtung für negative Axialkraftfrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	134
Abbildung 96 Mittleres Schränken der Planeten je Drehrichtung für negative Axialkraftfrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	135
Abbildung 97 Standardabweichung des Schränkens der Planeten je Drehrichtung für negative Axialkraftfrichtung in Abhängigkeit der Änderung der Flankenwinkel der Muttern- und Spindelkontakte	135
Abbildung 98 Änderung des Übersetzungsverhältnisses	137
Abbildung 99 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit der Durchmesseränderung.	137

---

Abbildung 100 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der Durchmesseränderung	138
Abbildung 101 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft zwischen jedem der Planeten und der Spindel in Abhängigkeit der Durchmesseränderung	139
Abbildung 102 Mittleres Kippen der Planeten in Abhängigkeit der Durchmesseränderung	140
Abbildung 103 Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit der Durchmesseränderung	140
Abbildung 104 Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und steigungsbehafteten Planeten	142
Abbildung 105 Kräfte in x-Richtung zwischen Mutter 1 und Planeten ohne Steigung	142
Abbildung 106 Kippen und Schränken der Planeten mit steigungsbehafteten Planeten	143
Abbildung 107 Quadratischer Mittelwert des Antriebsmoments in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft.	147
Abbildung 108 Quadratisches Mittel der in x-Richtung wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft	148
Abbildung 109 Quadratisches Mittel der in radial zur Spindel wirkenden Kraft (N) zwischen jedem der Planeten und Mutter 1 in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft	149
Abbildung 110 Mittleres Kippen der Planeten in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft	150
Abbildung 111 Mittleres Schränken der Planeten in Abhängigkeit der PWG-Baugröße und der Axialkraft	151
Abbildung 112 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und den Planeten im Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung.	160

---

Abbildung 113 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 bzw. Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 0,6kN bzw. 4,0kN Vorspannung in der X-Anordnung	162
Abbildung 114 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 bzw. Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei -0,6kN bzw. -4,0kN Vorspannung in der O-Anordnung	163
Abbildung 115 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens bzw. Absenkens der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 0,6kN Vorspannung in der O-Anordnung	164
Abbildung 116 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 0,6kN Vorspannung in der O-Anordnung und in der X-Anordnung	165
Abbildung 117 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 2kN und 10kN Axialkraft	166
Abbildung 118 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 2kN und 10kN Axialkraft	167
Abbildung 119 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens bzw. Absenken der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 1706U/min und 7500U/min Spindeldrehzahl	168
Abbildung 120 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen der Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens bzw. Absenken der Last mit positiver Axialkraft-richtung bei 1706U/min und 7500U/min Spindeldrehzahl	169

---

Abbildung 121 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m Radialspiel	170
Abbildung 122 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m Radialspiel	171
Abbildung 123 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 1 bzw. Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei der Referenzgeometrie und 10mm Verlängerung der Planeten	172
Abbildung 124 Verteilungen der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei der Referenzgeometrie und 10mm Verlängerung der Planeten	173
Abbildung 125 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 bzw. Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 10mm Verlängerung der Planeten mit zusätzlichen Windungen	173
Abbildung 126 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien an Planet 31-1 in den Kontakten mit Mutter 1 und Mutter 2 bei positiver Axialkrafttrichtung und Drehrichtung bei -0,6kN Vorspannung in der O-Anordnung und 0,6kN Vorspannung in der X-Anordnung	175
Abbildung 127 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten bzw. an der Mutter 2 für die Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0,6kN bzw. 4,0kN Vorspannung in der X-Anordnung	176
Abbildung 128 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten bzw. an der Spindel für die Kontakte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkrafttrichtung bei 0,6kN bzw. 4,0kN Vorspannung in der X-Anordnung	177
Abbildung 129 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten für die Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 im quasistatischen	

---

Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei 0,6kN bzw. 4,0kN Vorspannung in der X-Anordnung	178
Abbildung 130 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten für die Kontakte zwischen Mutter 1 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei 2kN bzw. 10kN Axialkraft	179
Abbildung 131 Wälzkreisradien an der Spindel in den Kontakten mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei Drehzahlen von 1706U/min und 7500U/min	179
Abbildung 132 Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit der Spindel im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei Drehzahlen von 1706U/min und 7500U/min	180
Abbildung 133 Wälzkreisradien an der Mutter 2 in den Kontakten mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m Radialspiel	180
Abbildung 134 Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit Mutter 2 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m Radialspiel	181
Abbildung 135 Wälzkreisradien an der Spindel in den Kontakten mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m Radialspiel	182
Abbildung 136 Wälzkreisradien am Planeten 31-1 in den Kontakten mit der Spindel im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei 0 $\mu$ m und 70 $\mu$ m Radialspiel	182
Abbildung 137 Verteilungen der Häufigkeit der Wälzkreisradien am Planeten 31-1 bzw. der Spindel in den Kontakten zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Anhebens der Last mit positiver Axialkraft- richtung bei der Referenzgeometrie und 10mm Verlängerung der Planeten	183
Abbildung 138 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte der Kontakte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich des Absenkens der Last mit positiver Axialkraft- richtung mit Starrkörperplaneten und flexiblen Planeten	190



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich RGT, PRGT und PWG.	4
Tabelle 2 Beispiele Leistungsdichte für PRGT und PWG	5
Tabelle 3 erlaubte Freiheitsgrade der Körper in den MKS-Simulationen	49
Tabelle 4 Prüfling 3a, 3b und 4 ermittelte Geschwindigkeiten im Vergleich zur aus der Systemsteigung des Datenblattes geforderten Geschwindigkeit	60
Tabelle 5 Benötigte Antriebsmomente für die Referenzsimulation in den quasistatischen Bereichen	72
Tabelle 6 Übersicht Validierung der Kinematik und Kinetik des PWGs	79
Tabelle 7 Simulationsplan der Mehrkörpersimulationen	90
Tabelle 8 Geometrische Kenngrößen PWG09x3, PWG15x3 und PWG25x2	144
Tabelle 9 Simulierte Anwendungen des PWG09x3, PWG15x3 und PWG25x2	145
Tabelle 10 Erreichte Geschwindigkeiten in der Simulation bzw. Versuchen im Vergleich zu den Geschwindigkeiten aus dem Datenblatt	146
Tabelle 11 Wichtigste Planetenbewegungen in Abhängigkeit des variierten Parameters	155
Tabelle 12 Übersicht der in den Kontakten untersuchten Effekte von zuvor variierten Parametern der Anwendung und der Geometrie	158
Tabelle 13 Lebensdauer des PWG15x3 in Abhängigkeit des Radialspiels	189

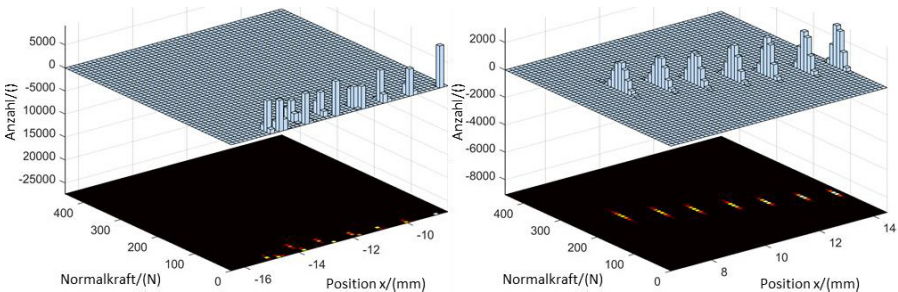
## Anhang

### Analyse der Kontakte in der Referenzsimulation

Im Folgenden soll zuerst auf die in den Kontakten wirkenden Normal- und Schubkräfte sowie anschließend auf die Wälzkreisradien zur Analyse der Referenzgeometrie (vgl. Kapitel 5.1) eingegangen werden. Exemplarisch werden im Folgenden immer die Schaubilder zum Planeten 31-1 gezeigt.

In Abbildung 139 ist die Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte in Abhängigkeit der Windung für die Normalkräfte zwischen Mutter 1 bzw. Mutter 2 und dem Planet 31-1 für den quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftichtung und Drehrichtung dargestellt. Im oberen Teil des Schaubildes wird diese Verteilung in einem 3D-Balkendiagramm dargestellt und im unteren Teil des Schaubildes als Heatmap.

Jeder Planet hat in den Mutterkontakten acht Windungen. Drückt die Mutter nur jeweils gegen eine Flankenseite so berührt sie sieben Windungen. Die äußersten Windungen der Planeten – die sogenannten Krüppelzähne – sind fertigungsbedingt etwas kleiner als die anderen Zähne. Wie in Abbildung 139 aufgrund der Position in x-Richtung ersichtlich werden bei beiden Müttern sechs vollausgeprägte Zähne und der Krüppelzahn belastet. Bei Mutter 1 werden die äußersten, sich in Kontakt befindlichen Windungen zusätzlich beidseitig belastet.



*Abbildung 139 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte zwischen Mutter 1 (linkes Schaubild) bzw. Mutter 2 (rechtes Schaubild) und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftichtung und positiver Drehrichtung*

Die Normalkräfte in den Kontakten zwischen Mutter 1 und dem Planeten 31-1 (vgl. Abbildung 139) sind gemäß der geringen Belastung von Mutter 1 bei positiver Axialkraftichtung und Drehrichtung ebenfalls sehr gering. Die Windung der zu Null am nächsten

Position in x-Richtung befindet sich am nächsten zu den Spindelwindungen. Die Kräfte nehmen nach außen an Mutter 1 mit Ausnahme der äußersten Windung – dem Krüppelzahn – zu.

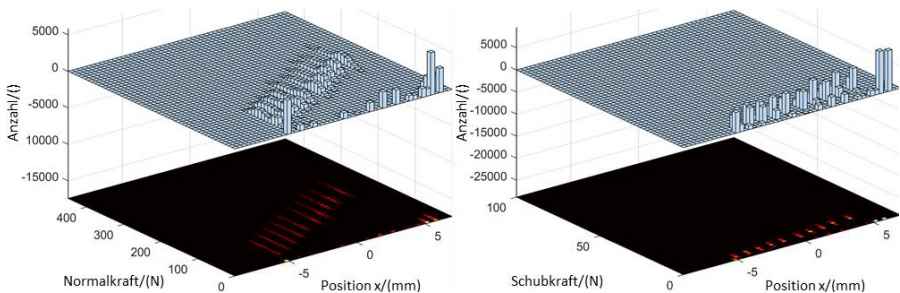
Erwartungsgemäß durch das Kippen und Schränken ist die Windung am nächsten zu Null für Mutter 2 am höchsten belastet. Im Mittel der Gaußverteilung sind dies ca. 240N. Von der höchstbelasteten Windung nimmt die übertragene Kraft nach außen (mit steigender Position in x) ab. Die niedrigstbelastete Windung wird in der Mitte der Gaußverteilung mit ca. 120N belastet. Der Planet dreht sich also an den äußeren Windungen aus dem Kontakt durch Kippen und Schränken heraus. Würde er in Ideallage achsparallel verbleiben, so müssten in der Simulation all seine Windungen gleich belastet sein, denn er ist ein Starrkörper. In den Lebensdauerberechnungen (Kapitel 0) wird zwischen den Windungen der Mutter ein Übertragungsverhalten analog zu einer Verschraubung angenommen – jede Windung trägt weniger als die vorherige.

Nachdem aber in der Simulation mit Starrkörpern durch das Kippen und Schränken auch eine Abnahme zwischen den Windungen entsteht, ist zu folgern, dass beim PWG das Gefälle zwischen der Belastung der höchst- und der geringstbelasteten Windung noch deutlich höher als bei Schrauben ausfällt. Das in der Abbildung gezeigte Gefälle zwischen den Windungen ist somit ein Maß für das im Vergleich zu einer Verschraubung noch höhere Gefälle zwischen der Lastübertragung der einzelnen Windungen. Für den hier dargestellten Planeten 31-1 ist das ein zusätzlicher Verlust von ca. 50% von der höchst- zur niedrigstbelasteten Windung – also ca. 14,2% die jede Windung im Vergleich zu einer Verschraubung zusätzlich weniger trägt als die vorherige. In der Abschlussarbeit von (A\_Ma 2017) wurde ein PWG15x3 mit einem flexiblen Planeten und acht Starrkörperplaneten simuliert. Der sehr hohe Unterschied beim flexiblen Planeten zwischen der höchstbelasteten und der zweithöchstbelasteten Windung im Vergleich zu einem der Starrkörperplaneten bestätigt dieses hohe Gefälle der Kräfte zwischen den Windungen. (Ma 2017, S. 47) In seinen FEM-Simulationen hat (A\_Arnarson 2018) auch Planetenpositionen und Orientierungen aus Mehrkörpersimulationen des Autors dieser Arbeit übernommen. Hier zeigt sich, dass die Streuung der maximalen von Mises Spannung zwischen den Planeten durch die Verlagerung noch deutlich stärker zunimmt als ohne die Zwangsverschiebung der Planeten: Statt 833 bis 1110MPa liegt diese nun bei 1002 bis 1728MPa (A\_Arnarson 2018, S. 45).

Zu Abbildung 139 analoge Schaubilder ergeben sich auch für die anderen Planeten für die Kontakte mit Mutter 2. Die Breite der Verteilungen der Häufigkeiten je Windung ist

bei den anderen Planeten zum Planeten 31-1 gleich, jedoch schwanken ihre übertragenen Kräfte deutlich. Es gibt Planeten deren höchstbelastete Windung im Mittel der Gaußverteilung ca. 280N als Normalkraft überträgt und deren höchstbelastete Windung im Mittel der Gaußverteilung ca. 180N als Normalkraft überträgt. Bei den Planeten 31 und 51 nimmt die äußerste, am geringsten belastete Windung ca. die Hälfte der Kraft der höchstbelasteten auf. Bei den Planeten 41 nimmt die am niedrigstbelastete Windung ca. 57% der Kraft der am höchstbelasteten Windung auf.

Für die Spindel zeigt sich, analog zu den Muttern und wie in Abbildung 140 dargestellt, eine Zunahme der Belastung der Windungen hin zur höchstbelasteten Mutter. Dabei werden zehn Windungen belastet. Diese besitzen deutlich breitere Verteilungen der Normalkräfte als zwischen den Muttern und den Planeten. Die Verteilungen sind keine klassischen Normalverteilungen mehr – sie besitzen jeweils zwischen ein bis zwei lokale Maxima. Das Maximum der Normalkräfte der höchstbelasteten Windung liegt bei rund 200N und die Mitte der beiden Maxima der niedrigstbelasteten Windung liegt bei rund 50N. Wie im Schaubild an den x-Positionen ersichtlich, werden die Windungen, wenn auch nur in mit geringen Kräften, beidseitig belastet. Die äußersten Zähne der Planeten im Bereich des Kontaktes mit der Spindel sind ebenfalls fertigungsbedingt verkleinerte Krüppelzähne. Wie im Schaubild ersichtlich wird der Krüppelzahn neben Mutter 2 ebenfalls – wenn auch in sehr geringem Maße belastet.



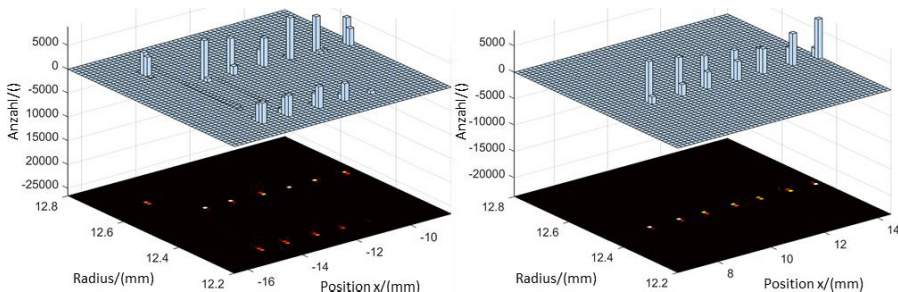
*Abbildung 140 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte (linkes Schaubild) bzw. Schubkräfte (rechtes Schaubild) zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkrafttrichtung und positiver Drehrichtung*

Die in Abbildung 140 dargestellten mittleren Schubkräfte der Kontakte verhalten sich analog zu den Normalkräften. Mit maximal 12 N sind sie aber massiv geringer als die Normalkräfte. Hierbei ist zu beachten das Adams nicht die maximalen Schubkräfte innerhalb der Kontakte, sondern nur die Mittelung über den jeweiligen Kontakt für jeden

Zeitpunkt der Simulation bestimmt. Die vorherrschenden Maxima und Minima innerhalb der Kontakte zu einem Zeitpunkt sind damit nicht erfasst.

Sowohl Normalkräfte als auch die Schubkräfte verhalten sich für die anderen Planeten im Kontakt zur Spindel analog zum hier aufgeführten Planet 31-1. Die Schwankungen zwischen den Planeten sind aber an der Spindel geringer als bei den Kontakten zu den Muttern. So schwanken beispielsweise die Maxima Normalkräfte der höchstbelasteten Windung ca. zwischen 150 und 220N. Die ebenfalls hier nicht dargestellten Schubkräfte an den Muttern verhalten sich zu den Normalkräften an den Muttern analog zum Verhalten der Schubkräfte zu den Normalkräften an der Spindel.

Durch das Kippen und Schränken werden den Planeten in den einzelnen Kontakten unterschiedliche Wälzkreisradien ermöglicht. Nachdem jeder Planet aber nur mit einer Drehzahl um die eigene Achse drehen kann, die unterschiedlichen Wälzkreise aber unterschiedliche Drehzahlen erfordern muss der Planet in den unterschiedlichen Kontakten unterschiedlich stark schlupfen. Dies führt in Abhängigkeit der im jeweiligen Kontakt wirkenden Normalkraft zu zusätzlichem Verschleiß.

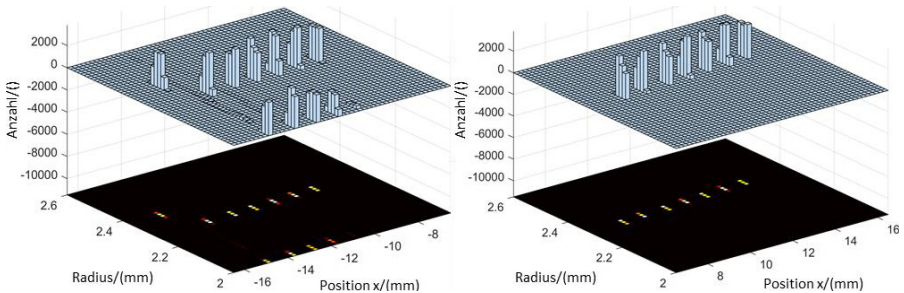


**Abbildung 141** Verteilung der Häufigkeit der Wälzkreisradien an Mutter 1 (linkes Schaubild) bzw. Mutter 2 (rechtes Schaubild) durch den Kontakt mit Planet 31-1 im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraft- und Drehrichtung

In Abbildung 141 werden die Wälzkreisradien von Planet 31-1 an Mutter 1 bzw. Mutter 2 dargestellt. An Mutter 1, der im Vergleich zu Mutter 2 in diesem quasistatischen Bereich gering belasteten Mutter, bilden sich 3 Hauptwälzkreisradien aus. Sie befinden sich ca. bei den Radien 12,25, 12,50 und 12,65mm. An den x-Positionen der Kontakte wird ersichtlich, dass sich die Radien 12,25 und 12,65mm an in gleiche Richtung zeigenden Flanken der Windungen befinden. Der Radius 12,50mm tritt an den in die andere Richtung zeigenden Flanken der Windung auf. Der Radius 12,65 ist nur am

Krüppelzahn. Der Radius 12,50mm tritt auch bei den anderen Planeten in diesem Bereich an genau den gleichen Flanken der Windungen auf. Im Gegensatz zu Planet 31-1 sind dies aber auch bei den meisten Planeten Flanken beider Richtungen. Teilweise treten an allen Flanken und Windungen von Mutter 1 je nach Planeten alle möglichen Radien zwischen 12,25 und 12,65mm in geringer Anzahl breitgefächert auf.

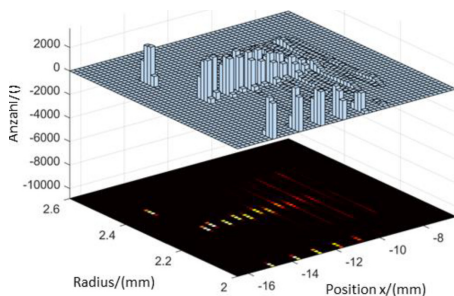
Für die im Vergleich zu Mutter 1 hochbelastete Mutter 2 sind bei allen Planeten die Wälzkreisradien aller Windungen bei ca. 12,43mm. Im Gegensatz zu Mutter 1 gibt es hier keine Schwankungen bei keinem der Planeten. Bei allen Planeten wird durch das Kippen und Schränken an der höchstbelasteten Mutter 1 Wälzkreisradius bei allen Windungen an jeweils einer Flankenseite verwendet. Damit läuft der Planet in Mutter 2 sehr gleichmäßig und schwankt in seiner Bewegung in Mutter 1 massiv. Dies führt zu einem in Mutter 2 für diesen quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftichtung und Drehrichtung sehr minimierten Schlupf.



**Abbildung 142** Verteilung der Häufigkeit der Wälzkreisradien an Planet 31-1 durch den Kontakt mit Mutter 1 (linkes Schaubild) bzw. Mutter 2 (rechtes Schaubild) im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftichtung und positiver Drehrichtung

Die Wälzkreise auf den Müttern führen zu Wälzkreisen auf den Planeten. Die dabei vorhandenen Wälzkreisradien am Planet 31-1 sind in Abbildung 142 dargestellt. Analog zu den Wälzkreisradien an Mutter 1 bilden sich auch an den mit in Mutter 1 in Kontakt stehenden Windungen des Planeten 3 Hauptwälzkreisradien aus. Diese befinden sich bei ca. 2,01, 2,25 und 2,37mm. Ebenfalls analog zur dazugehörigen Mutter hat der Planet an den mit Mutter 2 in Kontakt stehenden Windungen ähnliche Wälzkreisradien an allen Windungen. Diese nehmen von der innersten Windung mit 2,30mm leicht auf 2,34mm an der äußersten Windung zu. Beim Vergleich der Wälzkreisradien aller Planeten in ihrem Kontakt zu Mutter 2 zeigt sich, dass diese je nach Planeten um bis zu 0,02mm größer als für den hier dargestellten Planeten 31-1 sind. Je nach Planeten

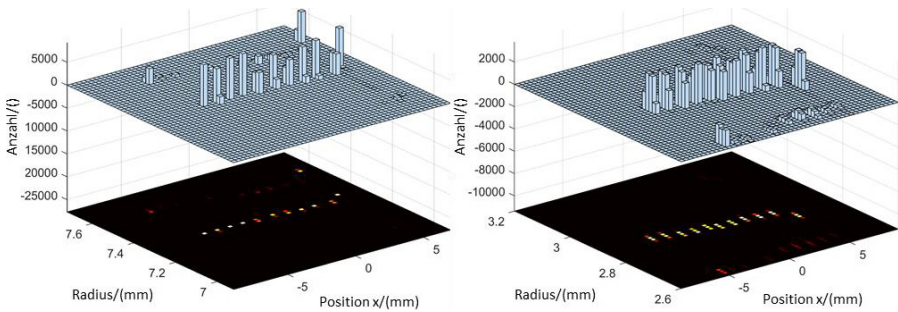
streut dieses Band um 2,30mm massiv in x-Richtung. Es kommt dabei teilweise zu einem beidseitigen Kontakt der Flanken auf diesem Band – wie es in Abbildung 143 beispielsweise für den Planeten 41-3 dargestellt ist. Wie zuvor bei den Kräften ist dieses Verhalten unabhängig vom Planetentyp.



*Abbildung 143 Verteilung der Häufigkeit der Wälzkreisradien an Planet 41-3 durch den Kontakt mit Mutter 1 im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftrichtung und positiver Drehrichtung*

Für die Wälzkreisradien an der Spindel zeigt sich ein zu den Muttern ähnliches Verhalten – wie in Abbildung 144 dargestellt. An der Spindel bildet sich für den Kontakt mit Planet 31-1 ein Hauptwälzkreis bei rund 7,30mm aus. Daneben bilden sich an der Spindel ein relativ breites Band an Wälzkreisen um 7,50mm sowie für einen Krüppelzahn eine Verteilung um 7,00mm aus. Planet 31-1 bilden an den mit der Spindel in Kontakt stehenden Windungen ähnliche Wälzkreisradien aus. Diese nehmen von der Windung an der negativsten x-Position bis zur letzten vollausgebildeten Windung mit der größten x-Position im Mittel von ca. 2,85mm auf 2,81mm ab. Diese Abnahme zwischen den Windungen ist nicht linear, sondern im Verlauf über die x-Position eher vergleichbar zu einer logistischen Funktion. Dies zeigt sich besonders am Planeten 41-3.

Der Krüppelzahn von Planet 31-1 weist einen um ca. 0,05mm geringeren Wälzkreisradius als die nächste vollausgeprägte Windung auf. Je nach Planeten sind die Wälzkreisradien dieses Bandes um bis zu 0,02mm geringer als beim hier gezeigten Planeten 31-1. Daneben bildet sich an Planet 31-1 ein Band an Wälzkreisen um 2,62mm aus. Der Versatz in x-Richtung zeigt, dass es sich hierbei um die entgegengesetzt orientierten Flanken des Bandes um 2,85mm handelt. Teilweise bildet sich an den Planeten bei den Windungen mit positiver x-Position auch ein schwaches Band bei 3,10mm aus.



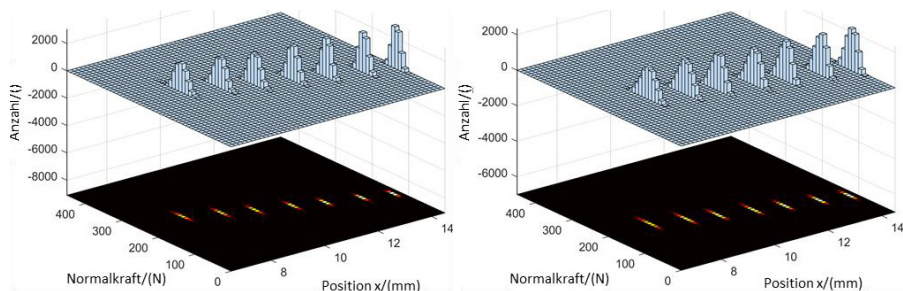
*Abbildung 144 Verteilung der Häufigkeit der Wälzkreisradien an der Spindel durch den Kontakt mit Planet 31-1 (linkes Schaubild) bzw. an Planet 31-1 durch den Kontakt mit der Spindel (rechtes Schaubild) im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkrafttrichtung und positiver Drehrichtung*

Vergleicht man alle Wälzkreisradien, so kann gesagt werden, dass an Mutter 1 und an der Spindel Windungen an ihren beiden Flanken belastet werden, während an den Kontakten mit Mutter 2 nur eine Flanke der Windungen belastet wird. Dieses Verhalten gilt für den quasistatischen Fall mit positiver Axialkrafttrichtung und positiver Drehrichtung. Im Folgenden soll nun auf das Verhalten in den anderen drei quasistatischen Fällen bei denen die Axialkrafttrichtung und bzw. oder die Drehrichtung negativ ist eingegangen werden.

Nun soll auf den quasistatischen Bereich eingegangen werden in dem analog zum gerade beschriebenen die Axialkrafttrichtung positiv ist, aber die Drehrichtung dazu unterschiedlich negativ. Eine positive Drehrichtung entspricht bei positiver Axialkrafttrichtung einem Absenken und eine negative einem Anheben einer Last. Bedingt durch die gleichbleibende Axialkrafttrichtung wird damit weiterhin Mutter 2 um ein Vielfaches höher als Mutter 1 belastet. In Abbildung 145 werden beispielhaft die Normalkräfte zwischen Planeten 31-1 und der Mutter 2 dargestellt. Vergleicht man die Normalkraft zwischen allen Planeten und Mutter 2, so zeigt sich, dass bei negativer Drehrichtung im Vergleich zur positiven Drehrichtung die Breite der Häufigkeitsverteilungen um Faktor 1,3 bis 2,0 größer ist. Die einzige Ausnahme davon ist der Planet 51-1 bei dem diese Breite gleichbleibt. Die Schwankung der Maxima zwischen den unterschiedlichen Planeten ist unabhängig von der Drehrichtung und vergleichbar. Zu beachten ist beim Vergleich der Schaubilder der unterschiedlichen Drehrichtungen, dass unterschiedliche Planeten im jeweiligen Bereich höher oder niedriger belastet werden. Wie zuvor bei den



Kräften zwischen den Körpern beschrieben, kann sich dies auch innerhalb eines quasistatischen Bereiches ändern.



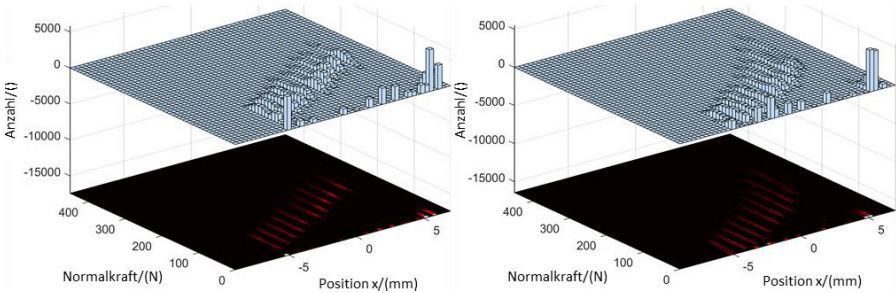
*Abbildung 145 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte zwischen Mutter 2 und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkrafttrichtung. Die Drehrichtung ist im linken Schaubild positiv und im rechten negativ.*

Vergleicht man die Normalkräfte zwischen der Spindel und den Planeten in Abhängigkeit der Drehrichtung unter positiver Axialkrafttrichtung, so erkennt man den Wechsel im Verhalten der übertragenen Normalkraft je Windung. Bei positiver Drehrichtung nimmt das Maximum pro Windung näherungsweise linear von der am niedrigsten zur höchstbelasteten Windung zu. Bei negativer Drehrichtung ist dies ein eher exponentielles Verhalten. Gleichzeitig nimmt bei negativer Drehrichtung die Streuung der Verteilungen mit der Belastung der Windung zu. Im Vergleich zur positiven Drehrichtung ist die Streuung bei der höchstbelasteten Windung unter negativer Drehrichtung je nach Planeten zwischen Faktor 1,5 und 2,5 breiter. In Summe führt dies dazu, dass bei negativer Drehrichtung die höchstbelastete Windung höher und die niedrigstbelastete Windung niedriger als bei positiver Drehrichtung belastet wird. Beispielhaft ist diese Abhängigkeit der Normalkraft je Windung von der Drehrichtung für den Planeten 31-1 in Abbildung 146 dargestellt.

Das Verhalten der Schubkraft ist unabhängig von der Drehrichtung analog zur Normalkraft. Somit erfolgt auch hier bei der negativen Drehrichtung eine exponentielle Zunahme und bei der positiven Drehrichtung eine lineare Zunahme der Belastung der Windungen zu sehen. Dennoch sind die Schubkräfte selbst bei negativer Drehrichtung mit maximal 30N im Vergleich zu den Normalkräften verschwindend gering.

Bei negativer Drehrichtung sind die Wälzkreisradien an den Müttern durch den Kontakt mit den Planeten gleich zu denen bei positiver Drehrichtung. Analog dazu verhalten

sich auch die Wälzkreisradien der Planeten an den Windungen im Kontakt zu den jeweiligen Müttern unabhängig von der Drehrichtung. Gleichmaßen sind auch die Wälzkreise an der Spindel und den Planeten in den Kontakten zueinander unabhängig von der Drehrichtung.



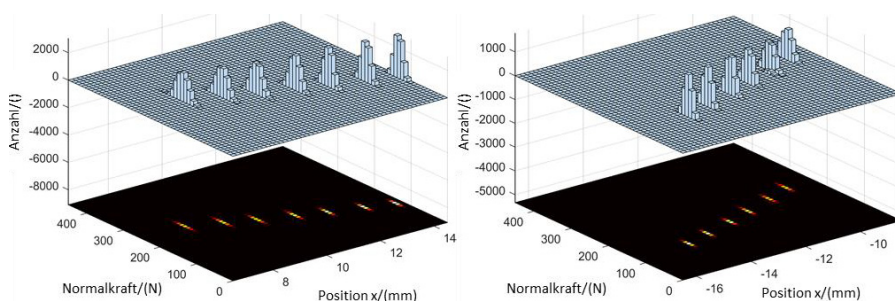
*Abbildung 146 Verteilung der Häufigkeit der Normalkräfte zwischen Spindel und Planet 31-1 im quasistatischen Bereich mit positiver Axialkraftrichtung. Die Drehrichtung ist im linken Schaubild positiv und im rechten negativ.*

Zusammengefasst kann für den Vergleich der Drehrichtungen bei positiver Axialkraftrichtung gesagt werden, dass die Kräfte und ihre Streuungen deutlich von der Drehrichtung abhängen. Die Wälzkreise an den Komponenten bleiben aber unverändert. Im Folgenden soll das Verhalten für eine negative Axialkraftrichtung dem Verhalten bei positiver Axialkraftrichtung gegenübergestellt werden.

Nachdem beide Drehrichtungen unter positiver Axialkraftrichtung untersucht wurden, soll nun auf die negative Axialkraftrichtung eingegangen werden. Grundsätzlich wird aufgrund der Symmetrien des PWGs ein ähnliches Verhalten erwartet. Im Bezug zur überrollten Geometrie ändern sich durch die gedrehte Axialkraftrichtung nur die x-Komponenten der Hebelarme zwischen Mutterwindungen und Spindelwindungen. Dies wurde zuvor bereits in Kapitel 2.1 aufgezeigt.

Jeweils eine Kombination aus Drehrichtung und Axialkraftrichtung entspricht dem Anheben einer Last und dem Senken einer Last. Bei positiver Axialkraftrichtung ist das Anheben einer Last in den hier aufgeführten Simulationen eine negative Drehrichtung und bei einer negativen Axialkraftrichtung eine positive Drehrichtung. Bedingt durch die negative Axialkraftrichtung wird bei dieser im Vergleich zur Positiven die Mutter 1 deutlich höher als Mutter 2 belastet. Für den Vergleich des Absenkens einer Last in

Abhängigkeit der Axialkraftrichtung müssen also die Mutter 1 der einen Axialkraftrichtung mit der Mutter 2 der anderen Axialkraftrichtung verglichen werden.

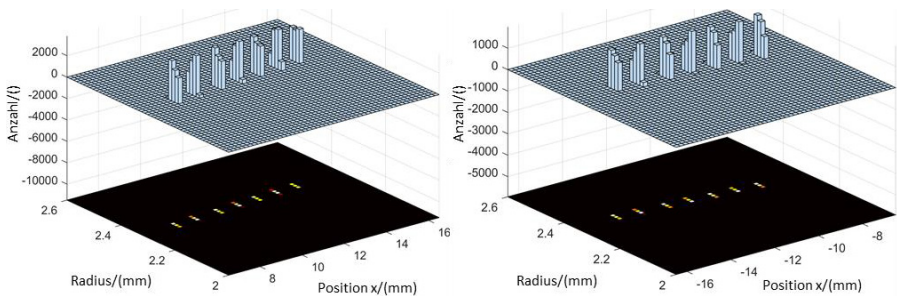


*Abbildung 147 Normalkräfte an den hochbelasteten Müttern beim Absenken einer Last: links Mutter 2 bei positiver Axialkraftrichtung und Drehrichtung, rechts Mutter 1 bei negativer Axialkraftrichtung und Drehrichtung*

Vergleicht man die Normalkräfte der hochbelasteten Müttern beim Absenken einer Last so fällt auf, dass die Maxima der einzelnen Windungen bei vergleichbaren Kräften liegen und die Streuung zwischen den Planeten unter Berücksichtigung der Axialkraftrichtung ebenfalls vergleichbar ist. Die Drehung der Axialkraftrichtung führt gemäß den Erwartungen zu gespiegelten Verläufen: z.B. wird bei der jeweils hochbelasteten Mutter 1 immer die innerste Windung am höchsten und die äußerste am niedrigsten belastet. Es gibt zwischen den Axialkraftrichtungen allerdings zwei bedeutende Unterschiede: Zum einen ist die Breite bei den Verteilungen unter negativer Axialkraftrichtungen um ca. 30% geringer als bei der positiven und zum zweiten wird bei negativer Axialkraftrichtung der äußere Krüppelzahn im Vergleich zur positiven Axialkraftrichtung nicht belastet. Beispielhaft wird dies in Abbildung 147 für den Planeten 31-1 dargestellt.

Im Gegensatz zu den zwei genannten Unterschieden an den Müttern, führt die Normalkraftrichtung beim Absenken einer Last nur zu marginalen Unterschieden in den Normalkräften zwischen Spindel und den Planeten unter Berücksichtigung der Spiegelung der Schaubilder aufgrund der gedrehten Axialkraftrichtung. Dabei müssen, wie bereits zuvor ausgeführt, aufgrund der unterschiedlichen Lastverteilungen zwischen den Planeten die Schaubilder aller Planeten verglichen werden. Auch im Verhalten der Schubkräfte gibt es keinerlei signifikanten Unterschiede durch die Axialkraftrichtung beim Absenken einer Last.

Signifikante Unterschiede zwischen den Wälzkreisradien der hochbelasteten Mutter, der niedrigbelasteten Mutter oder der Spindel aufgrund der Normalkraftrichtung konnten unter Berücksichtigung der Spiegelung durch die Axialkraftrichtung nicht ermittelt werden. Die gespiegelten Verläufe der Wälzkreisradien entstehen aufgrund der Änderung der Kipprichtung der Planeten in Abhängigkeit der Axialkraftrichtung. (vgl. Abbildung 38 auf der Seite 77) Durch die Änderung der Kipprichtung in Abhängigkeit der Axialkraftrichtung erhält an der höchstbelasteten Mutter die äußerste Windung immer den größten Wälzkreisradius und die innerste Windung dieser Mutter immer den kleinsten Radius für die jeweilige Mutter. Dieser Effekt ist in Abbildung 148 exemplarisch für die Wälzkreisradien an dem Planeten 31-1 mit der jeweils hochbelasteten Mutter dargestellt. Nachdem es sich bei den Planeten in der Simulation um Starrkörper handelt, ist diese Spiegelung der Schaubilder auch an den Wälzkreisradien an den Kontakten mit der Spindel und der niedrigbelasteten Mutter sichtbar.



**Abbildung 148** Wälzkreisradien am Planeten 31-1 an den Windungen mit Kontakt zur jeweils hochbelasteten Mutter beim Anheben einer Last: links Kontakte mit Mutter 2 bei positiver Axialkraftrichtung und Drehrichtung, rechts Kontakte mit Mutter 1 bei negativer Axialkraftrichtung und Drehrichtung



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

Bisher erschienene Bände:

---

Band 0

Dr.-Ing. Wu Hong-qi

**Adaptive Volumenstromregelung mit Hilfe von drehzahlgeregelten Elektroantrieben**

Band 1

Dr.-Ing. Heinrich Weiß

**Fräsen mit Schneidkeramik - Verhalten des System  
Werkzeugmaschine-Werkzeug-Werkstück und Prozessanalyse**

Band 2

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Stierle

**Entwicklung und Untersuchung hydrostatischer Lager für die  
Axialkolbenmaschine**

Band 3

Dr.-Ing. Herbert Hörner

**Untersuchung des Geräuschverhaltens druckgeregelter Axialkolbenpumpen**

Band 4

Dr.-Ing. Rolf-Dieter Brückbauer

**Digitale Drehzahlregelung unter der besonderen Berücksichtigung  
von Quantisierungseffekten**

Band 5

Dr.-Ing. Gerhard Staiger

**Graphisch interaktive NC-Programmierung von Drehteilen im Werkstattbereich**

Band 6

Dr.-Ing. Karl Peters

**Ein Beitrag zur Berechnung und Kompensation von Positionierfehlern an  
Industrierobotern**

Band 7

Dr.-Ing. Paul Stauss

**Automatisierte Inbetriebnahme und Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen**

Band 8

Dr.-Ing. Günter Möckesch

**Konzeption und Realisierung eines strategischen, integrierten Gesamtplanungs- und -bearbeitungssystems zur Optimierung der Drehteilorganisation für auftragsbezogene Drehereien**

Band 9

Dr.-Ing. Thomas Oestreicher

**Rechnergestützte Projektierung von Steuerungen**

Band 10

Dr.-Ing. Thomas Selinger

**Teilautomatisierte werkstattnahe NC-Programmerstellung im Umfeld einer integrierten Informationsverarbeitung**

Band 11

Dr.-Ing. Thomas Buchholz

**Prozessmodell Fräsen, Rechnerunterstützte Analyse, Optimierung und Überwachung**

Band 12

Dr.-Ing. Bernhard Reichling

**Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern**

Band 13

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lesser

**Rechnergestützte Methoden zur Auswahl anforderungsgerechter Verbindungselemente**

Band 14

Dr.-Ing. Hans-Jürgen Lauffer

**Einsatz von Prozessmodellen zur rechnerunterstützten Auslegung von Räumwerkzeugen**

Band 15

Dr.-Ing. Michael C. Wilhelm

**Rechnergestützte Prüfplanung im Informationsverbund moderner Produktionssysteme**

Band 16  
Dr.-Ing. Martin Ochs

**Entwurf eines Programmsystems zur wissensbasierten Planung und Konfigurierung**

Band 17  
Dr.-Ing. Heinz-Joachim Schneider

**Erhöhung der Verfügbarkeit von hochautomatisierten Produktionseinrichtungen mit Hilfe der Fertigungsleittechnik**

Band 18  
Dr.-Ing. Hans-Reiner Ludwig

**Beanspruchungsanalyse der Werkzeugschneiden beim Stirnplanfräsen**

Band 19  
Dr.-Ing. Rudolf Wieser

**Methoden zur rechnergestützten Konfigurierung von Fertigungsanlagen**

Band 20  
Dr.-Ing. Edgar Schmitt

**Werkstattsteuerung bei wechselnder Auftragsstruktur**

Band 21  
Dr.-Ing. Wilhelm Enderle

**Verfügbarkeitssteigerung automatisierter Montagesysteme durch selbsttätige Behebung prozessbedingter Störungen**

Band 22  
Dr.-Ing. Dieter Buchberger

**Rechnergestützte Strukturplanung von Produktionssystemen**

Band 23  
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

**Rechnerunterstützte Technologieplanung für die flexibel automatisierte Fertigung von Abkantteilen**

Band 24  
Dr.-Ing. Lukas Loeffler

**Adaptierbare und adaptive Benutzerschnittstellen**

Band 25  
Dr.-Ing. Thomas Friedmann

**Integration von Produktentwicklung und Montageplanung durch neue rechnergestützte Verfahren**



Band 26

Dr.-Ing. Robert Zurrin

**Variables Formhonen durch rechnergestützte Hornprozesssteuerung**

Band 27

Dr.-Ing. Karl-Heinz Bergen

**Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischem Vorschubsystem**

Band 28

Dr.-Ing. Andreas Liebisch

**Einflüsse des Festwalzens auf die Eigenspannungsverteilung und die Dauerfestigkeit einsatzgehärteter Zahnräder**

Band 29

Dr.-Ing. Rolf Ziegler

**Auslegung und Optimierung schneller Servopumpen**

Band 30

Dr.-Ing. Rainer Bartl

**Datenmodellgestützte Wissensverarbeitung zur Diagnose und Informationsunterstützung in technischen Systemen**

Band 31

Dr.-Ing. Ulrich Golz

**Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben**

Band 32

Dr.-Ing. Stephan Timmermann

**Automatisierung der Feinbearbeitung in der Fertigung von Hohlformwerkzeugen**

Band 33

Dr.-Ing. Thomas Noe

**Rechnergestützter Wissenserwerb zur Erstellung von Überwachungs- und Diagnoseexpertensystemen für hydraulische Anlagen**

Band 34

Dr.-Ing. Ralf Lenschow

**Rechnerintegrierte Erstellung und Verifikation von Steuerungsprogrammen als Komponente einer durchgängigen Planungsmethodik**

Band 35

Dr.-Ing. Matthias Kallabis

**Räumen gehärteter Werkstoffe mit kristallinen Hartstoffen**

Band 36

Dr.-Ing. Heiner-Michael Honeck

**Rückführung von Fertigungsdaten zur Unterstützung einer fertigungsgerechten Konstruktion**

Band 37

Dr.-Ing. Manfred Rohr

**Automatisierte Technologieplanung am Beispiel der Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszellen**

Band 38

Dr.-Ing. Martin Steuer

**Entwicklung von Softwarewerkzeugen zur wissensbasierten Inbetriebnahme von komplexen Serienmaschinen**

Band 39

Dr.-Ing. Siegfried Beichter

**Rechnergestützte technische Problemlösung bei der Angebotserstellung von flexiblen Drehzellen**

Band 40

Dr.-Ing. Thomas Steitz

**Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Werkzeugmaschinen mit Integration von funktionsbasierter Strukturierung und Kostenschätzung**

Band 41

Dr.-Ing. Michael Richter

**Wissensbasierte Projektierung elektrohydraulischer Regelungen**

Band 42

Dr.-Ing. Roman Kuhn

**Technologieplanungssystem Fräsen. Wissensbasierte Auswahl von Werkzeugen, Schneidkörpern und Schnittbedingungen für das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 43

Dr.-Ing. Hubert Klein

**Rechnerunterstützte Qualitätssicherung bei der Produktion von Bauteilen mit frei geformten Oberflächen**

Band 44

Dr.-Ing. Christian Hoffmann

**Konzeption und Realisierung eines fertigungsintegrierten Koordinatenmessgerätes**

Band 45

Dr.-Ing. Volker Frey

**Planung der Leittechnik für flexible Fertigungsanlagen**

Band 46

Dr.-Ing. Achim Feller

**Kalkulation in der Angebotsphase mit dem selbsttätig abgeleiteten Erfahrungswissen der Arbeitsplanung**

Band 47

Dr.-Ing. Markus Klaiber

**Produktivitätssteigerung durch rechnerunterstütztes Einfahren von NC-Programmen**

Band 48

Dr.-Ing. Roland Minges

**Verbesserung der Genauigkeit beim fünfachsigem Fräsen von Freiformflächen**

Band 49

Dr.-Ing. Wolfgang Bernhart

**Beitrag zur Bewertung von Montagevarianten: Rechnergestützte Hilfsmittel zur kostenorientierten, parallelen Entwicklung von Produkt und Montagesystem**

Band 50

Dr.-Ing. Peter Ganghoff

**Wissensbasierte Unterstützung der Planung technischer Systeme: Konzeption eines Planungswerkzeuges und exemplarische Anwendung im Bereich der Montagesystemplanung**

Band 51

Dr.-Ing. Frank Maier

**Rechnergestützte Prozessregelung beim flexiblen Gesenkbiegen durch Rückführung von Qualitätsinformationen**

Band 52

Dr.-Ing. Frank Debus

**Ansatz eines rechnerunterstützten Planungsmanagements für die Planung in verteilten Strukturen**

Band 53

Dr.-Ing. Joachim Weinbrecht

**Ein Verfahren zur zielorientierten Reaktion auf Planabweichungen in der Werkstattregelung**

Band 54

Dr.-Ing. Gerd Herrmann

**Reduzierung des Entwicklungsaufwandes für anwendungsspezifische Zellenrechnersoftware durch Rechnerunterstützung**

Band 55

Dr.-Ing. Robert Wassmer

**Verschleissentwicklung im tribologischen System Fräsen: Beiträge zur Methodik der Prozessmodellierung auf der Basis tribologischer Untersuchungen beim Fräsen**

Band 56

Dr.-Ing. Peter Uebelhoer

**Inprocess-Geometriemessung beim Honen**

Band 57

Dr.-Ing. Hans-Joachim Schelberg

**Objektorientierte Projektierung von SPS-Software**

Band 58

Dr.-Ing. Klaus Boes

**Integration der Qualitätsentwicklung in featurebasierte CAD/CAM-Prozessketten**

Band 59

Dr.-Ing. Martin Schreiber

**Wirtschaftliche Investitionsbewertung komplexer Produktionssysteme unter Berücksichtigung von Unsicherheit**

Band 60

Dr.-Ing. Ralf Steuernagel

**Offenes adaptives Engineering-Werkzeug zur automatisierten Erstellung von entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**

Band 62

Dr.-Ing. Uwe Schauer

**Qualitätsorientierte Feinbearbeitung mit Industrierobotern: Regelungsansatz für die Freiformflächenfertigung des Werkzeug- und Formenbaus**

Band 63

Dr.-Ing. Simone Loeper

**Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung**

Band 64

Dr.-Ing. Achim Raab

**Räumen mit hartstoffbeschichteten HSS-Werkzeugen**

Band 65,

Dr.-Ing. Jan Erik Burghardt

**Unterstützung der NC-Verfahrenskette durch ein bearbeitungs-elementorientiertes, lernfähiges Technologieplanungssystem**

Band 66

Dr.-Ing. Christian Tritsch

**Flexible Demontage technischer Gebrauchsgüter: Ansatz zur Planung und (teil-)automatisierten Durchführung industrieller Demontageprozesse**

Band 67

Dr.-Ing. Oliver Eitrich

**Prozessorientiertes Kostenmodell für die entwicklungsbegleitende Vorkalkulation**

Band 68

Dr.-Ing. Oliver Wilke

**Optimierte Antriebskonzepte für Räummaschinen - Potentiale zur Leistungssteigerung**

Band 69

Dr.-Ing. Thilo Sieth

**Rechnergestützte Modellierungsmethodik zerspantechnologischer Prozesse**

Band 70

Dr.-Ing. Jan Linnenbuerger

**Entwicklung neuer Verfahren zur automatisierten Erfassung der geometrischen Abweichungen an Linearachsen und Drehschwenkköpfen**

Band 71

Dr.-Ing. Mathias Klimmek

**Fraktionierung technischer Produkte mittels eines frei beweglichen Wasserstrahlwerkzeuges**

Band 72

Dr.-Ing. Marko Hartel

**Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem zur Beurteilung der Demontage- und Recyclingeignung von Produkten**

Band 73

Dr.-Ing. Jörg Schaupp

**Wechselwirkung zwischen der Maschinen- und Hauptspindeltriebsdynamik und dem Zerspanprozess beim Fräsen**

Band 74

Dr.-Ing. Bernhard Neisius

**Konzeption und Realisierung eines experimentellen Telemanipulators für die Laparoskopie**

Band 75

Dr.-Ing. Wolfgang Walter

**Erfolgsversprechende Muster für betriebliche Ideenfindungsprozesse. Ein Beitrag zur Steigerung der Innovationsfähigkeit**

Band 76

Dr.-Ing. Julian Weber

**Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in virtuellen Szenarien**

Band 77

Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Markus Posur

**Unterstützung der Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch Kommunikation über mobile Rechner**

Band 78

Dr.-Ing. Frank Fleissner

**Prozessorientierte Prüfplanung auf Basis von Bearbeitungsobjekten für die Kleinserienfertigung am Beispiel der Bohr- und Fräsbearbeitung**

Band 79

Dr.-Ing. Anton Haberkern

**Leistungsfähigere Kugelgewindetriebe durch Beschichtung**

Band 80

Dr.-Ing. Dominik Matt

**Objektorientierte Prozess- und Strukturinnovation (OPUS)**

Band 81

Dr.-Ing. Jürgen Andres

**Robotersysteme für den Wohnungsbau: Beitrag zur Automatisierung des Mauerwerkbaus und der Elektroinstallation auf Baustellen**

Band 82

Dr.-Ing. Dipl.Wirtschaftsing. Simone Riedmiller

**Der Prozesskalender - Eine Methodik zur marktorientierten Entwicklung von Prozessen**

Band 83

Dr.-Ing. Dietmar Tilch

**Analyse der Geometrieparameter von Präzisionsgewinden auf der Basis einer Least-Squares-Estimation**

Band 84

Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Oliver Stiefbold

**Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Software-Agenten**

Band 85

Dr.-Ing. Ulrich Walter

**Einfluss von Kühlschmierstoff auf den Zerspansprozess beim Fräsen: Beitrag zum Prozessverständnis auf Basis von zerspantechnischen Untersuchungen**

Band 86

Dr.-Ing. Bernd Werner

**Konzeption von teilautonomer Gruppenarbeit unter Berücksichtigung kultureller Einflüsse**

Band 87

Dr.-Ing. Ulf Osmers

**Projektieren Speicherprogrammierbarer Steuerungen mit Virtual Reality**

Band 88

Dr.-Ing. Oliver Doerfel

**Optimierung der Zerspantechnik beim Fertigungsverfahren Wälzstossen: Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung**

Band 89

Dr.-Ing. Peter Baumgartner

**Stufenmethode zur Schnittstellengestaltung in der internationalen Produktion**

Band 90  
Dr.-Ing. Dirk Vossmann

**Wissensmanagement in der Produktentwicklung durch Qualitätsmethodenverbund und Qualitätsmethodenintegration**

Band 91  
Dr.-Ing. Martin Plass

**Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung**

Band 92  
Dr.-Ing. Titus Konold

**Optimierung der Fünffachsfräsbearbeitung durch eine kennzahlenunterstützte CAM-Umgebung**

Band 93  
Dr.-Ing. Jürgen Brath

**Unterstützung der Produktionsplanung in der Halbleiterfertigung durch risikoberücksichtigende Betriebskennlinien**

Band 94  
Dr.-Ing. Dirk Geisinger

**Ein Konzept zur marktorientierten Produktentwicklung**

Band 95  
Dr.-Ing. Marco Lanza

**Entwurf der Systemunterstützung des verteilten Engineering mit Axiomatic Design**

Band 96  
Dr.-Ing. Volker Hüntrup

**Untersuchungen zur Mikrostrukturierbarkeit von Stählen durch das Fertigungsverfahren Fräsen**

Band 97  
Dr.-Ing. Frank Reinboth

**Interne Stützung zur Genauigkeitsverbesserung in der Inertialmesstechnik: Beitrag zur Senkung der Anforderungen an Inertialsensoren**

Band 98  
Dr.-Ing. Lutz Trender

**Entwicklungsintegrierte Kalkulation von Produktlebenszykluskosten auf Basis der ressourcenorientierten Prozesskostenrechnung**



Band 99

Dr.-Ing. Cornelia Kafka

**Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining**

Band 100

Dr.-Ing. Gebhard Selinger

**Rechnerunterstützung der informellen Kommunikation in verteilten Unternehmensstrukturen**

Band 101

Dr.-Ing. Thomas Windmüller

**Verbesserung bestehender Geschäftsprozesse durch eine mitarbeiterorientierte Informationsversorgung**

Band 102

Dr.-Ing. Knud Lembke

**Theoretische und experimentelle Untersuchung eines bistabilen elektrohydraulischen Linearantriebs**

Band 103

Dr.-Ing. Ulrich Thies

**Methode zur Unterstützung der variantengerechten Konstruktion von industriell eingesetzten Kleingeräten**

Band 104

Dr.-Ing. Andreas Schmälzle

**Bewertungssystem für die Generalüberholung von Montageanlagen –Ein Beitrag zur wirtschaftlichen Gestaltung geschlossener Facility- Management- Systeme im Anlagenbau**

Band 105

Dr.-Ing. Thorsten Frank

**Vergleichende Untersuchungen schneller elektromechanischer Vorschubachsen mit Kugelgewindetrieb**

Band 106

Dr.-Ing. Achim Agostini

**Reihenfolgeplanung unter Berücksichtigung von Interaktionen: Beitrag zur ganzheitlichen Strukturierung und Verarbeitung von Interaktionen von Bearbeitungsobjekten**

Band 107

Dr.-Ing. Thomas Barrho

**Flexible, zeitfenstergesteuerte Auftragseinplanung in segmentierten Fertigungsstrukturen**

Band 108

Dr.-Ing. Michael Scharer

**Quality Gate-Ansatz mit integriertem Risikomanagement**

Band 109

Dr.-Ing. Ulrich Suchy

**Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Mischkopfes für das Wasser Abrasivstrahlschneiden**

Band 110

Dr.-Ing. Sellal Mussa

**Aktive Korrektur von Verlagerungsfehlern in Werkzeugmaschinen**

Band 111

Dr.-Ing. Andreas Hühsam

**Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses**

Band 112

Dr.-Ing. Axel Plutowsky

**Charakterisierung eines optischen Messsystems und den Bedingungen des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine**

Band 113

Dr.-Ing. Robert Landwehr

**Konsequent dezentralisierte Steuerung mit Industrial Ethernet und offenen Applikationsprotokollen**

Band 114

Dr.-Ing. Christoph Dill

**Turbulenzreaktionsprozesse**

Band 115

Dr.-Ing. Michael Baumeister

**Fabrikplanung im turbulenten Umfeld**

Band 116

Dr.-Ing. Christoph Gönzheimer

**Konzept zur Verbesserung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) in Produktionssystemen durch intelligente Sensor/Aktor-Anbindung**

Band 117

Dr.-Ing. Lutz Demuß

**Ein Reifemodell für die Bewertung und Entwicklung von Dienstleistungsorganisationen: Das Service Management Maturity Modell (SMMM)**

Band 118

Dr.-Ing. Jörg Söhner

**Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode**

Band 119

Dr.-Ing. Judith Elsner

**Informationsmanagement für mehrstufige Mikro-Fertigungsprozesse**

Band 120

Dr.-Ing. Lijing Xie

**Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method**

Band 121

Dr.-Ing. Ansgar Blessing

**Geometrischer Entwurf mikromechatronischer Systeme**

Band 122

Dr.-Ing. Rainer Ebner

**Steigerung der Effizienz mehrachsiger Fräsprozesse durch neue Planungsmethoden mit hoher Benutzerunterstützung**

Band 123

Dr.-Ing. Silja Klinkel

**Multikriterielle Feinplanung in teilautonomen Produktionsbereichen – Ein Beitrag zur produkt- und prozessorientierten Planung und Steuerung**

Band 124

Dr.-Ing. Wolfgang Neithardt

**Methodik zur Simulation und Optimierung von Werkzeugmaschinen in der Konzept- und Entwurfsphase auf Basis der Mehrkörpersimulation**

Band 125

Dr.-Ing. Andreas Mehr

**Hartfeinbearbeitung von Verzahnungen mit kristallinen diamantbeschichteten Werkzeugen beim Fertigungsverfahren Wälzstoßen**

Band 126

Dr.-Ing. Martin Gutmann

**Entwicklung einer methodischen Vorgehensweise zur Diagnose von hydraulischen Produktionsmaschinen**

Band 127

Dr.-Ing. Gisela Lanza

**Simulative Anlaufunterstützung auf Basis der Qualitätsfähigkeiten von Produktionsprozessen**

Band 128

Dr.-Ing. Ulf Dambacher

**Kugelgewindetrieb mit hohem Druckwinkel**

Band 129

Dr.-Ing. Carsten Buchholz

**Systematische Konzeption und Aufbau einer automatisierten Produktionszelle für pulverspritzgegossene Mikroteile**

Band 130

Dr.-Ing. Heiner Lang

**Trocken-Räumen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten**

Band 131

Dr.-Ing. Daniel Nesges

**Prognose operationeller Verfügbarkeiten von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung von Serviceleistungen**

Im Shaker Verlag erschienene Bände:

---

Band 132

Dr.-Ing. Andreas Bechle

**Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen**

Band 133

Dr.-Ing. Markus Herm

**Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke auf Basis von Business Capabilities**

Band 134

Dr.-Ing. Hanno Tritschler

**Werkzeug- und Zerspanprozessoptimierung beim Hartfräsen von Mikrostrukturen in Stahl**

Band 135

Dr.-Ing. Christian Munzinger

**Adaptronische Strebe zur Steifigkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 136

Dr.-Ing. Andreas Stepping

**Fabrikplanung im Umfeld von Wertschöpfungsnetzwerken und ganzheitlichen Produktionssystemen**

Band 137

Dr.-Ing. Martin Dyck

**Beitrag zur Analyse thermische bedingter Werkstückdeformationen in Trockenbearbeitungsprozessen**

Band 138

Dr.-Ing. Siegfried Schmalzried

**Dreidimensionales optisches Messsystem für eine effizientere geometrische Maschinenbeurteilung**

Band 139

Dr.-Ing. Marc Wawerla

**Risikomanagement von Garantieleistungen**

Band 140

Dr.-Ing. Ivesa Buchholz

**Strategien zur Qualitätssicherung mikromechanischer Bauteile mittels multisensorieller Koordinatenmesstechnik**

Band 141

Dr.-Ing. Jan Kotschenreuther

**Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspannung auf den Bereich der Mikrobearbeitung**

Band 142

Dr.-Ing. Andreas Knödel

**Adaptronische hydrostatische Drucktascheneinheit**

Band 143

Dr.-Ing. Gregor Stengel

**Fliegendes Abtrennen räumlich gekrümmter Strangpressprofile mittels Industrierobotern**

Band 144

Dr.-Ing. Udo Weismann

**Lebenszyklusorientiertes interorganisationelles Anlagencontrolling**

Band 145

Dr.-Ing. Rüdiger Pabst

**Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung**

Band 146

Dr.-Ing. Jan Wieser

**Intelligente Instandhaltung zur Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen**

Band 147

Dr.-Ing. Sebastian Haupt

**Effiziente und kostenoptimale Herstellung von Mikrostrukturen durch eine Verfahrenskombination von Bahnerosion und Laserablation**

Band 148

Dr.-Ing. Matthias Schlipf

**Statistische Prozessregelung von Fertigungs- und Messprozess zur Erreichung einer variabilitätsarmen Produktion mikromechanischer Bauteile**

Band 149

Dr.-Ing. Jan Philipp Schmidt-Ewig

**Methodische Erarbeitung und Umsetzung eines neuartigen Maschinenkonzeptes zur produktflexiblen Bearbeitung räumlich gekrümmter Strangpressprofile**

Band 150

Dr.-Ing. Thomas Ender

**Prognose von Personalbedarfen im Produktionsanlauf unter Berücksichtigung dynamischer Planungsgrößen**

Band 151

Dr.-Ing. Kathrin Peter

**Bewertung und Optimierung der Effektivität von Lean Methoden  
in der Kleinserienproduktion**

Band 152

Dr.-Ing. Matthias Schopp

**Sensorbasierte Zustandsdiagnose und -prognose von Kugelgewindetrieben**

Band 153

Dr.-Ing. Martin Kipfmüller

**Aufwandsoptimierte Simulation von Werkzeugmaschinen**

Band 154

Dr.-Ing. Carsten Schmidt

**Development of a database to consider multi wear mechanisms  
within chip forming simulation**

Band 155

Dr.-Ing. Stephan Niggeschmidt

**Ausfallgerechte Ersatzteilbereitstellung im Maschinen- und Anlagenbau  
mittels lastabhängiger Lebensdauerprognose**

Band 156

Dr.-Ing. Jochen Conrad Peters

**Bewertung des Einflusses von Formabweichungen in der  
Mikro-Koordinatenmesstechnik**

Band 157

Dr.-Ing. Jörg Ude

**Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration  
globaler Wertschöpfungsnetzwerke**

Band 158

Dr.-Ing. Stefan Weiler

**Strategien zur wirtschaftlichen Gestaltung der globalen Beschaffung**

Band 159

Dr.-Ing. Jan Rühl

**Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung**

Band 160

Dr.-Ing. Daniel Ruch

**Positions- und Konturerfassung räumlich gekrümmter Profile auf Basis bauteilimmanenter Markierungen**

Band 161

Dr.-Ing. Manuel Tröndle

**Flexible Zuführung von Mikrobauteilen mit piezoelektrischen Schwingförderern**

Band 162

Dr.-Ing. Benjamin Viering

**Mikroverzahnungsnormal**

Band 163

Dr.-Ing. Chris Becke

**Prozesskrafttrichtungsangepasste Frässtrategien zur schädigungsarmen Bohrungsbearbeitung an faserverstärkten Kunststoffen**

Band 164

Dr.-Ing. Patrick Werner

**Dynamische Optimierung und Unsicherheitsbewertung der lastabhängigen präventiven Instandhaltung von Maschinenkomponenten**

Band 165

Dr.-Ing. Martin Weis

**Kompensation systematischer Fehler bei Werkzeugmaschinen durch self-sensing Aktoren**

Band 166

Dr.-Ing. Markus Schneider

**Kompensation von Konturabweichungen bei gerundeten Strangpressprofilen durch robotergestützte Führungswerkzeuge**

Band 167

Dr.-Ing. Ester M. R. Ruprecht

**Prozesskette zur Herstellung schichtbasierter Systeme mit integrierten Kavitäten**



Band 168

Dr.-Ing. Alexander Broos

**Simulationsgestützte Ermittlung der Komponentenbelastung für die Lebensdauerprognose an Werkzeugmaschinen**

Band 169

Dr.-Ing. Frederik Zanger

**Segmentspanbildung, Werkzeugverschleiß, Randschichtzustand und Bauteileigenschaften: Numerische Analysen zur Optimierung des Zerspanungsprozesses am Beispiel von Ti-6Al-4V**

Band 170

Dr.-Ing. Benjamin Behmann

**Servicefähigkeit**

Band 171

Dr.-Ing. Annabel Gabriele Jondral

**Simulationsgestützte Optimierung und Wirtschaftlichkeitsbewertung des Lean-Methodeneinsatzes**

Band 172

Dr.-Ing. Christoph Ruhs

**Automatisierte Prozessabfolge zur qualitätssicheren Herstellung von Kavitäten mittels Mikrobahnerosion**

Band 173

Dr.-Ing. Steven Peters

**Markoffsche Entscheidungsprozesse zur Kapazitäts- und Investitionsplanung von Produktionssystemen**

Band 174

Dr.-Ing. Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation – 3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation**

Band 175

Dr.-Ing. Adam-Mwanga Dieckmann

**Auslegung und Fertigungsprozessgestaltung sintergefügter Verbindungen für  $\mu$ MIM-Bauteile**

Band 176

Dr.-Ing. Heiko Hennrich

**Aufbau eines kombinierten belastungs- und zustandsorientierten Diagnose- und Prognosesystems für Kugelgewindetriebe**

Band 177

Dr.-Ing. Stefan Herder

**Piezoelektrischer Self-Sensing-Aktor zur Vorspannungsregelung in adaptiven Kugelgewindetrieben**

Band 178

Dr.-Ing. Alexander Ochs

**Ultraschall-Strömungsgreifer für die Handhabung textiler Halbzeuge bei der automatisierten Fertigung von RTM-Bauteilen**

Band 179

Dr.-Ing. Jürgen Michna

**Numerische und experimentelle Untersuchung zerspanungsbedingter Gefügeumwandlungen und Modellierung des thermo-mechanischen Lastkollektivs beim Bohren von 42CrMo4**

Band 180

Dr.-Ing. Jörg Elser

**Vorrichtungsfreie räumliche Anordnung von Fügepartnern auf Basis von Bauteilmarkierungen**

Band 181

Dr.-Ing. Katharina Klimscha

**Einfluss des Fügespalts auf die erreichbare Verbindungsqualität beim Sinterfügen**

Band 182

Dr.-Ing. Patricia Weber

**Steigerung der Prozesswiederholbarkeit mittels Analyse akustischer Emissionen bei der Mikrolaserablation mit UV-Pikosekundenlasern**

Band 183

Dr.-Ing. Jochen Schädel

**Automatisiertes Fügen von Tragprofilen mittels Faserwickeln**

Band 184

Dr.-Ing. Martin Krauße

**Aufwandsoptimierte Simulation von Produktionsanlagen durch Vergrößerung der Geltungsbereiche von Teilmodellen**

Band 185

Dr.-Ing. Raphael Moser

**Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung

Band 186

Dr.-Ing. Martin Otter

**Methode zur Kompensation fertigungsbedingter Gestaltabweichungen für die Montage von Aluminium Space-Frame-Strukturen**

Band 187

Dr.-Ing. Urs Leberle

**Produktive und flexible Gleitförderung kleiner Bauteile auf phasenflexiblen Schwingförderern mit piezoelektrischen 2D-Antriebsselementen**

Band 188

Dr.-Ing. Johannes Book

**Modellierung und Bewertung von Qualitätsmanagementstrategien in globalen Wertschöpfungsnetzwerken**

Band 189

Dr.-Ing. Florian Ambrosy

**Optimierung von Zerspanungsprozessen zur prozesssicheren Fertigung nanokristalliner Randschichten am Beispiel von 42CrMo4**

Band 190

Dr.-Ing. Adrian Kölmel

**Integrierte Messtechnik für Prozessketten unreifer Technologien am Beispiel der Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge**

Band 191

Dr.-Ing. Henning Wagner

**Featurebasierte Technologieplanung zum Preforming von textilen Halbzeugen**

Band 192

Dr.-Ing. Johannes Gebhardt

**Strukturoptimierung von in FVK eingebetteten metallischen Lasteinleitungselementen**

Band 193

Dr.-Ing. Jörg Bauer

**Hochintegriertes hydraulisches Vorschubsystem für die Bearbeitung kleiner Werkstücke mit hohen Fertigungsanforderungen**

Band 194

Dr.-Ing. Nicole Stricker

**Robustheit verketteter Produktionssysteme**

Robustheitsevaluation und Selektion des Kennzahlensystems der Robustheit

Band 195

Dr.-Ing. Anna Sauer

**Konfiguration von Montagelinien unreifer Produkttechnologien am Beispiel der Batteriemontage für Elektrofahrzeuge**

Band 196

Dr.-Ing. Florian Sell-Le Blanc

**Prozessmodell für das Linearwickeln unrunder Zahnspulen**

Ein Beitrag zur orthozyklischen Spulenwickeltechnik

Band 197

Dr.-Ing. Frederic Förster

**Geregeltes Handhabungssystem zum zuverlässigen und energieeffizienten Handling textiler Kohlenstofffaserzuschnitte**

Band 198

Dr.-Ing. Nikolay Boev

**Numerische Beschreibung von Wechselwirkungen zwischen Zerspanprozess und Maschine am Beispiel Räumen**

Band 199

Dr.-Ing. Sebastian Greinacher

**Simulationsgestützte Mehrzieloptimierung schlanker und ressourceneffizienter Produktionssysteme**

Band 200

Dr.-Ing. Benjamin Häfner

**Lebensdauerprognose in Abhängigkeit der Fertigungsabweichungen bei Mikroverzahnungen**

Band 201

Dr.-Ing. Stefan Klotz

**Dynamische Parameteranpassung bei der Bohrungsherstellung in faserverstärkten Kunststoffen unter zusätzlicher Berücksichtigung der Einspannsituation**

Band 202

Dr.-Ing. Johannes Stoll

**Bewertung konkurrierender Fertigungsfolgen mittels Kostensimulation und stochastischer Mehrzieloptimierung**

Anwendung am Beispiel der Blechpaketfertigung für automobiler Elektromotoren

Band 203

Dr.-Ing. Simon-Frederik Koch

**Fügen von Metall-Faserverbund-Hybridwellen im Schleuderverfahren**  
ein Beitrag zur fertigungsgerechten intrinsischen Hybridisierung

Band 204

Dr.-Ing. Julius Ficht

**Numerische Untersuchung der Eigenspannungsentwicklung für sequenzielle Zerspanungsprozesse**

Band 205

Dr.-Ing. Manuel Baumeister

**Automatisierte Fertigung von Einzelblattstapeln in der Lithium-Ionen-Zellproduktion**

Band 206

Dr.-Ing. Daniel Bertsch

**Optimierung der Werkzeug- und Prozessauslegung für das Wälzschälen von Innenverzahnungen**

Band 207

Dr.-Ing. Kyle James Kippenbrock

**Deconvolution of Industrial Measurement and Manufacturing Processes for Improved Process Capability Assessments**

Band 208

Dr.-Ing. Farboud Bejnoud

**Experimentelle Prozesskettenbetrachtung für Räumbauteile am Beispiel einer einsatzgehärteten PKW-Schiebemuffe**

Band 209

Dr.-Ing. Steffen Dosch

**Herstellungsübergreifende Informationsübertragung zur effizienten Produktion von Werkzeugmaschinen am Beispiel von Kugelgewindetrieben**

Band 210

Dr.-Ing. Emanuel Moser

**Migrationsplanung globaler Produktionsnetzwerke**

Bestimmung robuster Migrationspfade und risiko-effizienter Wandlungsbefähiger

Band 211

Dr.-Ing. Jan Hochdörffer

**Integrierte Produktallokationsstrategie und Konfigurationssequenz in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 212

Dr.-Ing. Tobias Arndt

**Bewertung und Steigerung der Prozessqualität in globalen Produktionsnetzwerken**

Band 213

Dr.-Ing. Manuel Peter

**Unwuchtminimale Montage von Permanentmagnetrotoren durch modellbasierte Online-Optimierung**

Band 214

Dr.-Ing. Robin Kopf

**Kostenorientierte Planung von Fertigungsfolgen additiver Technologien**

Band 215

Dr.-Ing. Harald Meier

**Einfluss des Räumens auf den Bauteilzustand in der Prozesskette  
Weichbearbeitung – Wärmebehandlung – Hartbearbeitung**

Band 216

Dr.-Ing. Daniel Brabandt

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels  
optischer Messtechnik**

Band 217

Dr.-Ing. Alexandra Schabunow

**Einstellung von Aufnahmeparametern mittels projektionsbasierter Qualitäts-  
kenngrößen in der industriellen Röntgen-Computertomographie**

Band 218

Dr.-Ing. Jens Bürgin

**Robuste Auftragsplanung in Produktionsnetzwerken**

Mittelfristige Planung der variantenreichen Serienproduktion unter Unsicherheit  
der Kundenauftragskonfigurationen

Band 219

Dr.-Ing. Michael Gerstenmeyer

**Entwicklung und Analyse eines mechanischen Oberflächenbehandlungs-  
verfahrens unter Verwendung des Zerspanungswerkzeuges**

Band 220

Dr.-Ing. Jacques Burtscher

**Erhöhung der Bearbeitungsstabilität von Werkzeugmaschinen durch  
semi-passive masseneinstellbare Dämpfungssysteme**

Band 221

Dr.-Ing. Dietrich Berger

**Qualitätssicherung von textilen Kohlenstofffaser-Preforms mittels prozess-  
integrierter Wirbelstromsensor-Arrays**

Band 222

Dr.-Ing. Fabian Johannes Ballier

**Systematic gripper arrangement for a handling device in lightweight production processes**

Band 223

Dr.-Ing. Marielouise Schäferling, geb. Zaiß

**Development of a Data Fusion-Based Multi-Sensor System for Hybrid Sheet Molding Compound**

Band 224

Dr.-Ing. Quirin Spiller

**Additive Herstellung von Metallbauteilen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiformen**

Band 225

Dr.-Ing. Andreas Spohrer

**Steigerung der Ressourceneffizienz und Verfügbarkeit von Kugelgewindetrieben durch adaptive Schmierung**

Band 226

Dr.-Ing. Johannes Fisel

**Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme**

Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage

Band 227

Dr.-Ing. Patrick Bollig

**Numerische Entwicklung von Strategien zur Kompensation thermisch bedingter Verzüge beim Bohren von 42CrMo4**

Band 228

Dr.-Ing. Ramona Pfeiffer, geb. Singer

**Untersuchung der prozessbestimmenden Größen für die anforderungsgerechte Gestaltung von Pouchzellen-Verpackungen**

Band 229

Dr.-Ing. Florian Baumann

**Additive Fertigung von endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit dem ARBURG Kunststoff-Freiform Verfahren**



Band 230  
Dr.-Ing. Tom Stähr

**Methodik zur Planung und Konfigurationsauswahl skalierbarer Montagesysteme – Ein Beitrag zur skalierbaren Automatisierung**

Band 231  
Dr.-Ing. Jan Schwennen

**Einbringung und Gestaltung von Lasteinleitungsstrukturen für im RTM-Verfahren hergestellte FVK-Sandwichbauteile**

Band 232  
Dr.-Ing. Sven Coutandin

**Prozessstrategien für das automatisierte Preforming von bebinderten textilen Halbzeugen mit einem segmentierten Werkzeugsystem**

Band 233  
Dr.-Ing. Christoph Liebrecht

**Entscheidungsunterstützung für den Industrie 4.0-Methodeneinsatz**  
Strukturierung, Bewertung und Ableitung von Implementierungsreihenfolgen

Band 234  
Dr.-Ing. Stefan Treber

**Transparenzsteigerung in Produktionsnetzwerken**  
Verbesserung des Störungsmanagements durch verstärkten Informationsaustausch

Band 235  
Dr.-Ing. Marius Dackweiler

**Modellierung des Fügewickelprozesses zur Herstellung von leichten Fachwerkstrukturen**

Band 236  
Dr.-Ing. Fabio Echsler Minguillon

**Prädiktiv-reaktives Scheduling zur Steigerung der Robustheit in der Matrix-Produktion**

Band 237  
Dr.-Ing. Sebastian Haag

**Entwicklung eines Verfahrensablaufes zur Herstellung von Batteriezellstapeln mit großformatigem, rechteckigem Stapelformat und kontinuierlichen Materialbahnen**

Band 238

Dr.-Ing. Raphael Wagner

**Strategien zur funktionsorientierten Qualitätsregelung in der Serienproduktion**

Band 239

Dr.-Ing. Christopher Ehrmann

**Ausfallfrüherkennung von Ritzel-Zahnstangen- Trieben mittels Acoustic Emission**

Band 240

Dr.-Ing. Janna Hofmann

**Prozessmodellierung des Fünf-Achs-Nadelwickelns zur Implementierung einer trajektoriebasierten Drahtzugkraftregelung**

Band 241

Dr.-Ing. Andreas Kuhnle

**Adaptive Order Dispatching based on Reinforcement Learning  
Application in a Complex Job Shop in the Semiconductor Industry**

Band 242

Dr.-Ing. Andreas Greiber

**Fertigung optimierter technischer Oberflächen durch eine Verfahrenskombination aus Fliehkraft-Tauchgleitschleifen und Laserablation  
Prozesseinflüsse und Prozessauslegung**

Band 243

Dr.-Ing. Jan Niclas Eschner

**Entwicklung einer akustischen Prozessüberwachung zur Porenbestimmung im Laserstrahlschmelzen**

Band 244

Dr.-Ing. Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen**

Band 245

Dr.-Ing. Sina Kathrin Peukert

**Robustheitssteigerung in Produktionsnetzwerken mithilfe eines integrierten Störungsmanagements**

Band 246

Dr.-Ing. Alexander Jacob

**Hochiterative Technologieplanung**

Rekursive Optimierung produkt- und fertigungsbezogener Freiheitsgrade am Beispiel der hybrid-additiven Fertigung

Band 247

Dr.-Ing. Patrick Moll

**Ressourceneffiziente Herstellung von Langfaser-Preforms im Faserblasverfahren**

Band 248

Dr.-Ing. Eric Thore Segebade

**Erhöhung der Verschleißbeständigkeit von Bauteilen aus Ti-6Al-4V mittels simulationsgestützter Zerspanung und mechanischer Mikrotexturierung**

Band 249

Dr.-Ing. Shun Yang

**Regionalized implementation strategy of smart automation within assembly systems in China**

Band 250

Dr.-Ing. Constantin Carl Hofmann

**Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion**

Band 251

Dr.-Ing. Paul Ruhland

**Prozesskette zur Herstellung von hybriden Faser-Metall-Preforms**

Modellbildung und Optimierung des Binderauftrags und der Drapierung für stabförmige Bauteile

Band 252

Dr.-Ing. Leonard Schild

**Erzeugung und Verwendung von Anwendungswissen in der industriellen Computertomographie**

Band 253

Dr.-Ing. Benedikt Klee

**Analyse von Phaseninformationen in Videodaten zur Identifikation von Schwingungen in Werkzeugmaschinen**

Band 254

Dr.-Ing. Bruno Vargas

**Wälzschälern mit kleinen Achskreuzwinkeln**

Prozessgrenzen und Umsetzbarkeit

Band 255

Dr.-Ing. Lucas Bretz

**Function-oriented in-line quality assurance of hybrid sheet molding compound**

Band 256

Dr.-Ing. Bastian Rothaupt

**Dämpfung von Bauteilschwingungen durch einstellbare Werkstückdirektspannung mit Hydrodehnspanntechnik**

Band 257

Dr.-Ing. Daniel Kupzik

**Robotic Swing Folding of three-dimensional UD-tape-based Reinforcement Structures**

Band 258

Dr.-Ing. Bastian Verhaelen

**(De-)Zentralisierung von Entscheidungen in globalen Produktionsnetzwerken**

Strategie- und komplexitätsorientierte Gestaltung der Entscheidungsautonomie

Band 259

Dr.-Ing. Hannes Wilhelm Weinmann

**Integration des Vereinzelnungs- und Stapelbildungsprozesses in ein flexibel und kontinuierlich arbeitendes Anlagenmodul für die Li-Ionen Batteriezellfertigung**

Band 260

Dr.-Ing. Florian Stamer

**Dynamische Lieferzeit-Preisgestaltung in variantenreicher Produktion**

Ein adaptiver Ansatz mithilfe von Reinforcement Learning

Band 261

Dr.-Ing. Patrick Neuenfeldt

**Modellbildung des Tauchgleitschleifens zur Abtrag- und Topografievorhersage an komplexen Geometrien**

Band 262

Dr.-Ing. Boris Matuschka

**Energieeffizienz in Prozessketten: Analyse und Optimierung von Energieflüssen bei der Herstellung eines PKW-Getriebebauteils aus 16MnCr5**

Band 263

Dr.-Ing. Tobias Schlagenhauf

**Bildbasierte Quantifizierung und Prognose des Verschleißes an Kugelgewindetriebspindeln**

Ein Beitrag zur Zustandsüberwachung von Kugelgewindetrieben mittels Methoden des maschinellen Lernens

Band 264

Dr.-Ing. Benedict Stampfer

**Entwicklung eines multimodalen Prozessmodells zur Oberflächenkonditionierung beim Außenlängsdrehen von 42CrMo4**

Band 265

Dr.-Ing. Carmen Maria Krahe

**KI-gestützte produktionsgerechte Produktentwicklung**

Automatisierte Wissensextraktion aus vorhandenen Produktgenerationen

Band 266

Dr.-Ing. Markus Netzer

**Intelligente Anomalieerkennung für hochflexible Produktionsmaschinen**

Prozessüberwachung in der Brownfield Produktion

Band 267

Dr.-Ing. Simon Raphael Merz

**Analyse der Kinematik und Kinetik von Planetenwälzgewindetrieben**



