
Zur Gestaltung von Gleitlinearführungen und Gewindetrieben aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Tribologie, Auslegung, Fertigung und Prüfung

Susanne Weidmann

Schriftenreihe: Konstruktiver Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zur Gestaltung von Gleitlinearführungen und Gewindetrieben aus Faser-Kunststoff-Verbunden

Tribologie, Auslegung, Fertigung und Prüfung

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Susanne Weidmann, M. Sc.

aus Weinheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Tag der Einreichung:	02.05.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	21.06.2017



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Susanne Weidmann

**Zur Gestaltung von Gleitlinearführungen und
Gewindetrieben aus Faser-Kunststoff-Verbunden**

Tribologie, Auslegung, Fertigung und Prüfung

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5822-2

ISSN 1439-7390

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen (KLuB)* an der TU Darmstadt sowie anschließend während des *EXIST-Gründerstipendiums* des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*.

Mein erster Dank geht an Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann, der mir ermöglicht hat, an seinem Fachgebiet zu promovieren. Er stand jederzeit sowohl mir als auch allen anderen wissenschaftlichen Mitarbeitern für sämtliche Fragen, Anregungen und Diskussionen zur Verfügung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner, Leiter der *Staatlichen Materialprüfanstalt Darmstadt* sowie des *Fachgebiets und Instituts für Werkstoffkunde (MPA/IfW)*, möchte ich sehr für die Übernahme des Korreferats danken, sowie dafür, dass er mir freundlicherweise verschiedene Prüfmöglichkeiten zur Verfügung gestellt hat.

Für die umfangreiche Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen sowie der Konstruktion diverser Prüfstände möchte ich Herrn Dr.-Ing. Erich Blohberger danken. Vor allem bei der Konstruktion und Inbetriebnahme des Reibverschleiß-Prüfstands hat er mich sehr unterstützt.

Herrn Thomas Kötting, Werkstattleiter des Fachgebiets, sowie Herrn Kevin Göttmann möchte ich ganz herzlich für die – zum Teil auch sehr spontane – Fertigung diverser Teile für meine Prüfstände danken. Die vielen Gespräche, für die sich stets ausreichend Zeit genommen wurde, habe mir sehr geholfen, meine Prüfstände fertigungstechnisch realisieren zu können und ich konnte sehr viele Anregungen und Tipps mitnehmen.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Martin Schwarz, Werkstattleiter der Chemie, Herrn Jochen Ott, Werkstattleiter des *Instituts für Angewandte Dynamik* sowie Herrn Mirko Feick, Werkstattleiter des *Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen*, die mir netterweise ebenfalls beim Anfertigen diverser Bauteile ausgeholfen haben.

Den Herren Hasan Dadak, Leiter der FKV-Werkstatt, sowie Volker Rosmann möchte ich ganz herzlich für die Anfertigung diverser CFK-Wellen und die immer hilfsbereite Unterstützung in sämtlichen Belangen der FKV-Werkstatt danken. Die Gespräche, auch über die Arbeit hinaus, waren immer sehr offen und herzlich.

Herrn Wolfgang Heß, Elektromechaniker am *Institut für Angewandte Dynamik*, möchte ich für die elektrotechnische Unterstützung meines Prüfstands danken.

Bei Herrn Markus König, wissenschaftlicher Mitarbeiter der *Staatlichen Materialprüfanstalt Darmstadt* möchte ich mich ganz herzlich für die prüf- und fertigungstechnische Unterstützung bei der *MPA* bedanken, durch die viele Untersuchungen erst möglich wurden.

Den Herren Christopher Praetzas und Thomas Heep, wissenschaftliche Mitarbeiter des *Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen*, möchte ich ebenfalls für die Unterstützung und das zur Verfügung stellen verschiedener Mikroskope und Messgeräte für meine Untersuchungen danken.

Ein herzlicher Dank geht ebenfalls an Frau Claudia Wasmund, Mitarbeiterin des Fachgebiets der *Physikalischen Metallkunde der Materialwissenschaften*, die mich bei diversen mikroskopischen Untersuchungen unterstützt hat.

Den Studierenden und Hilfwissenschaftlern, die mit ihren Arbeiten zu dieser beigetragen haben, gilt ebenfalls mein Dank.

Bei allen wissenschaftlichen Mitarbeitern des Fachgebiets *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* möchte ich mich für die sehr angenehme Zusammenarbeit bedanken. Der Zusammenhalt, das Miteinander und die Hilfsbereitschaft waren außergewöhnlich und ich habe die Zeit mit den Kollegen stets genossen. Vor allem meinen Bürokollegen und den Kollegen, mit denen sich über die Arbeit hinaus eine Freundschaft entwickelt hat, möchte ich für die schöne gemeinsame Zeit danken. Hierbei seien insbesondere erwähnt: Andreas Landmann, Dr.-Ing. Daniela Feldten, Dr.-Ing. Martin Klimach, Dr.-Ing. Tobias Dickhut, Dr.-Ing. Alexander Höhme, Dr.-Ing. Alexander Elter und Dr.-Ing. Christoph Schmidt. Ganz besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle meine Kollegen Dr.-Ing. Nils Meyer und Dr.-Ing. Jakob Katz, denen ich für die großartige Unterstützung – wissenschaftlich sowie privat – sehr dankbar bin.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und bei meinen Freunden bedanken, die mich immer auf meinem Weg unterstützt haben.

Darmstadt, im April 2017

Susanne Weidmann



Für meine Familie





Kurzfassung

In dieser Arbeit wird das Potenzial von Gleitlinearführungen, Trapez- und Kugelgewindetrieben aus Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) aufgezeigt.

Der Einstieg erfolgt mit dem Stand der Technik zu Führungen im Werkzeugmaschinenbau und einer Patentrecherche zu FKV-Komponenten. Im Anschluss wird auf die Tribologie im Allgemeinen sowie auf die Besonderheiten der Tribologie von FKV eingegangen und diese ausführlich diskutiert. Durch die umfangreiche Literaturrecherche wurde eine detaillierte Zusammenfassung verschiedenster Reib- und Verschleißwerte von FKV samt Angabe des tribologischen Systems zusammengetragen und für den künftigen Anwender im Anhang beigefügt.

Um die benötigten tribologischen Kennwerte für die gewählten Führungskomponenten zu ermitteln, wurde ein Reib-Verschleiß-Prüfstand konstruiert. Mit diesem wurden umfangreiche Versuchsreihen zur Ermittlung von Reib- und Verschleißwerten von FKV unter flächiger und punktförmiger Belastung durchgeführt. Aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen wurde im Anschluss eine T-Profil Gleitlinearführung, ein Trapez- sowie ein Kugelgewindetrieb aus FKV analytisch, numerisch und experimentell untersucht. Im Vergleich zu den gegenwärtigen Standardlösungen aus Stahl konnten erhebliche leichtbauspezifische Vorteile erzielt werden.

Abstract

In this thesis, the potential of sliding linear guides, trapezoidal screws and ball screws made of fiber-reinforced plastics (FRP) is demonstrated.

The introduction is carried out using the state of the art on guides for machine tool construction and a patent search for FRP components. Subsequently, the tribology in general as well as the peculiarities of the tribology of FRP are discussed in detail. The extensive literature review on the tribology of FRP has been used to compile a detailed summary of various friction and wear values, including the tribological system, and attached to the future user in the appendix.

In order to determine the required tribological characteristic values for the selected guide components, a friction and wear test rig was constructed. With this, extensive series of tests were carried out to determine friction and wear values of FRP under flat and punctiform loads. Based on the results obtained, a T-profile sliding linear guide, a trapezoidal screw and a ball screw drive from FRP was analyzed analytically, numerically and experimentally. Compared to the current standard steel solutions, significant lightweight advantages have been achieved.



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation – Führungen aus FKV	3
1.2 Stand der Technik – Führungen	4
1.2.1 Wälzführungen	4
1.2.2 Gleitlinearführungen	5
1.2.3 Gleitlager	8
1.2.4 Bewegungsgewinde	10
1.3 Zielsetzung der Arbeit	12
2 Grundlagen der Tribologie und Besonderheiten bei FKV	13
2.1 Allgemeine Definitionen und Begriffe der Tribologie	13
2.1.1 Das Tribologische System	13
2.1.2 Reibung – Definitionen, Messgrößen und Mechanismen . . .	13
2.1.3 Verschleiß – Definitionen, Messgrößen und Mechanismen . .	17
2.2 Besondere Merkmale der Tribologie von FKV	23
2.2.1 Einfluss werkstoffspezifischer Eigenschaften von FKV	23
2.2.2 Einfluss betriebsbedingter Eigenschaften	32
2.3 Zusammenfassung und Fazit	42
3 Entwicklung eines Reib-Verschleiß-Prüfstands für FKV	43
3.1 Prüfmethoden zur Untersuchung des tribologischen Verhaltens von Gleitlagerwerkstoffen	43
3.1.1 Allgemeine Grundlagen	43
3.1.2 Übersicht der Prüfmethoden	44
3.2 Konzeptentwicklung des Prüfstands	46
3.2.1 Anforderungen an einen Reib-Verschleiß-Prüfstand zur Un- tersuchung von FKV-Reibpartnern	46
3.2.2 Konzeptfindung des Prüfstands	47
3.3 Ausarbeitung des Prüfstands	48
3.3.1 FE-Optimierung des Prüfstands	51
3.3.2 Zur Reibwert-, Verschleiß- und Temperaturmessung	56

3.4	Validierung des Prüfstands	59
3.4.1	Vergleichbarkeit R und Wiederholbarkeit r	59
3.4.2	Versuche zur Validierung des Prüfstands	60
3.5	Zusammenfassung und Fazit	63
4	Experimentelle Reib- und Verschleißuntersuchungen von CFK	65
4.1	Herstellung der CFK-Probekörper	65
4.2	Bestimmung der Reibwerte μ und der spezifischen Verschleißraten k	67
4.3	Stift-Platte-Versuche von CFK-P (Stift) gegen Stahl (Platte)	68
4.3.1	Beschreibung der Stift-Platte-Versuche	68
4.3.2	Einfluss der Härte und Rauheit des Stahlgegenkörpers	69
4.4	Stift-Platte-Versuche von CFK gegen gehärteten Stahl	73
4.4.1	Einfluss der Faserorientierung und des Werkstoffs	73
4.4.2	Einfluss der DLC-Beschichtung	83
4.4.3	Einfluss von Schmierung	84
4.5	Stift-Platte-Versuche von CFK gegen CFK-P	85
4.6	Stift-Platte-Versuche von ZX-100K gegen CFK und gehärteten Stahl	87
4.7	Kugel-Platte-Versuche von Stahl gegen CFK	88
4.7.1	Versuchsbeschreibung der Kugel-Platte-Versuche	88
4.7.2	Einfluss der Faserorientierung	90
4.7.3	Einfluss der DLC-Beschichtung	91
4.7.4	Einfluss von Schmierung	96
4.8	Zusammenfassung und Fazit	98
4.8.1	Stift-Platte-Versuche von CFK (Stift) gegen Stahl (Platte) . .	98
4.8.2	Stift-Platte-Versuche von CFK (Stift) gegen CFK-P (Platte) . .	99
4.8.3	Kugel-Platte-Versuche von Stahl (Kugel) gegen CFK (Platte)	99
5	Konzeption und Gestaltung einer Gleitlinearführung aus FKV	101
5.1	Stand der Technik	101
5.1.1	Patentrecherche	101
5.2	Zielsetzung einer innovativen Gleitlinearführung aus FKV	106
5.3	Benchmark und Auswahl einer T-Profil Gleitlinearführung	107
5.4	Voruntersuchungen der Stahl T-Profil Gleitlinearführung	109
5.4.1	Analytische Abschätzung der Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten	110
5.4.2	Numerische Abschätzung der Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten	112
5.4.3	Experimentelle Abschätzung der Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten	118
5.4.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	121

5.5	Entwicklung und Konzeption einer Gleitlinearschiene aus CFK . . .	122
5.5.1	Gestellte Anforderungen	122
5.5.2	Funktionsstrukturen und Vorstellung prinzipieller Teillösungen	123
5.5.3	Übersicht der betrachteten Konzepte	126
5.6	2D Finite-Elemente-Analyse der CFK-Konzepte zur Bestimmung der Steifigkeiten	127
5.6.1	Spezifische Steifigkeiten unter Druck-, Zug- und Querkraftbelastung	128
5.6.2	Optimierung der Steifigkeiten durch den Einsatz von UHM-Fasern	129
5.6.3	Integration tribologischer Gleitelemente	130
5.6.4	Zusammenfassung und Fazit der 2D FEA	131
5.7	3D Finite-Elemente-Analyse der Stahl- und FKV-Gleitlinearschiene .	132
5.7.1	Grundlegende Annahmen zu den Simulationsmodellen . . .	132
5.7.2	Einfluss der Zweiteilung sowie der Verschraubung der Stahl-Gleitlinearführung	135
5.7.3	Spezifische Steifigkeiten der CFK-Gleitlinearschienen	136
5.7.4	Thermische Ausdehnung der CFK-Gleitlinearschienen	139
5.8	Fertigung von CFK-Gleitlinearschienen	141
5.8.1	Beschreibung des Presswerkzeugs	141
5.8.2	Übersicht gefertigter T-Profil CFK-Gleitlinearschienen	142
5.9	Experimentelle Untersuchungen der CFK-Gleitlinearschienen	145
5.9.1	Untersuchungen zum Vorspannkraftverlust der Verschraubung	145
5.9.2	Ergebnisse der Druck-, Zug- und Querkraftversuche	146
5.10	Zusammenfassung und Fazit	147
6	Konzeption und Gestaltung einer Trapezgewindespindel aus CFK	151
6.1	Stand der Technik	151
6.1.1	Definitionen und Berechnungsgrundlagen von Gewindetrieben	151
6.1.2	Allgemeine Grundlagen von Trapezgewindetrieben	156
6.1.3	Übersicht genormter Gewindearten	157
6.1.4	Patentrecherche	161
6.2	Zielsetzung	161
6.3	Voruntersuchungen zur Fertigung von Trapezgewindespindeln aus FKV	165
6.3.1	Fertigung der Spindel	165
6.3.2	Fertigung des Gewindes	165

6.3.3	Experimentelle Untersuchungen der Schubfestigkeit	168
6.3.4	Fazit zur Fertigung	169
6.4	Einfluss von Umgebungsmedien	169
6.4.1	Ergebnisse der Einlagerungsversuche	171
6.5	2D Finite-Elemente-Analyse der CFK-Ringe	174
6.5.1	Versuchsübersicht für die Validierung	174
6.5.2	Beschreibung des FE-Modells	175
6.5.3	Validierung des FE-Modells	176
6.6	Parameterdiskussion und Bestimmung der neuen Geometrie	181
6.6.1	Einfluss der Zahnhöhe h_3	181
6.6.2	Einfluss des Flankenwinkels α	181
6.6.3	Einfluss der Zahnbreite b_2	182
6.6.4	Einfluss des Radius R_2	182
6.6.5	Einfluss des Innendurchmessers d_i einer Hohl-Gewindespindel	183
6.6.6	Übersicht der CFK-Prototypen	183
6.7	2D Finite-Elemente-Analyse zur Bestimmung der Steifigkeit und Festigkeit	185
6.7.1	Beschreibung des FE-Modells	185
6.7.2	Numerische Ermittlung der Festigkeiten	186
6.7.3	Spezifische Steifigkeiten der CFK-Gewindespindeln	187
6.8	Experimentelle Untersuchungen der Bruchlast	188
6.8.1	Beschreibung des Prüfaufbaus	188
6.8.2	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	189
6.9	Zusammenfassung und Fazit	190
7	Konzeption und Gestaltung einer Kugelgewindespindel aus CFK	195
7.1	Stand der Technik	195
7.1.1	Definitionen und Berechnungsgrundlagen von Kugelgewin- detrieben	195
7.2	Zielsetzung	198
7.3	Ermittlung der Rahmenbedingungen	199
7.3.1	Bestimmung der Gewindeform	200
7.3.2	Berechnung der zulässigen dynamischen Kugellast $F_{K,dyn}$ für die Kugel-Platte-Versuche	200
7.3.3	Berechnung der zulässigen statischen Kugellast $F_{K,stat}$ des Gewindetribs	204
7.4	Zur punktförmigen Kontaktmechanik von FKV	205
7.4.1	Grundlagen zur Kontaktmechanik von isotropen Werkstoffen	205
7.4.2	Analytische Ansätze zur Kontaktmechanik von orthotropen Werkstoffen	208

7.4.3	Experimentelle Bestimmung des Eindringmoduls M verschiedener FKV	210
7.4.4	3D Modellierung der Kontaktmechanik zwischen Kugel/Ebene	212
7.4.5	Vergleich der Analytik, Versuche und FEA zur Kontaktmechanik von Kugel/CFK-Würfel	216
7.5	Spezifische Steifigkeiten der CFK-Kugelgewindespindeln	218
7.6	Fertigung von CFK-Kugelgewindespindeln	219
7.6.1	Betrachtung der Wicklungen	219
7.7	Experimentelle Untersuchungen der Bruchlast	221
7.7.1	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	221
7.8	Zusammenfassung und Fazit	222
8	Zusammenfassung und Ausblick	227
8.1	Zusammenfassung der Arbeit	227
8.2	Ausblick für weitere wissenschaftliche Arbeiten	231
	Literaturverzeichnis	233
A	Zu Kapitel 2 – Tribologie	261
A.1	Übersicht tribotechnischer Systeme	261
A.2	Polarität verschiedener Polymere	261
A.3	Bezogene Verschleißmessgrößen	262
A.4	Indirekte Verschleißmessgrößen	262
A.5	Reib- und Verschleißwerte aus der Literatur	263
B	Zu Kapitel 4 – Reibversuche	275
B.1	Werkstoffkennwerte <i>LY556</i> , <i>ZX-100K</i> , <i>RG7</i> und <i>CuSn12</i>	275
B.2	Eigenschaften des Schmierfetts <i>NEFF Grease 2</i> und <i>NEFF Grease 2/3</i>	276
C	Zu Kapitel 5 – Linearführung	277
C.1	Kennwerte anisotroper Werkstoffe für die FEA	277
C.2	Kennwerte anisotroper Werkstoffe für die FEA	278
C.3	Nachgiebigkeiten der geprüften Gleitlinearschienen	280
D	Zu Kapitel 6 – Trapezgewindetribe	281
D.1	Werkstoffkennwerte des 12° AWV Laminats (<i>T700-LY556</i>)	281
D.2	Werkstoffkennwerte des 12° AWV UHM Laminats (<i>UHM-LY556</i>)	282
E	Zu Kapitel 7 – Kugelgewindetribe	283
E.1	Werkstoffkennwerte	283