

Andreas Hirsch
Hans Georg Hoyer
Uwe Mahn

Lineare Wälzführungen

Anforderungen, Auswahl, Auslegung,
Ausführungsbeispiele, Schadensfälle

Lineare Wälzführungen

Andreas Hirsch · Hans Georg Hoyer · Uwe Mahn

Lineare Wälzführungen

Anforderungen, Auswahl, Auslegung,
Ausführungsbeispiele, Schadensfälle

Andreas Hirsch
Fakultät für Maschinenbau
TU Chemnitz
Chemnitz, Deutschland

Hans Georg Hoyer
Radeberg, Deutschland

Uwe Mahn
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Hochschule Mittweida
Mittweida, Deutschland

ISBN 978-3-658-26876-3 ISBN 978-3-658-26877-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-26877-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Verantwortlich im Verlag: Thomas Zipsner

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Seit Mitte der 1980iger Jahre haben die linearen Wälzführungen ihren Siegeszug in allen Bereichen des Maschinen- und Gerätebaus begonnen. Wurden vorher überwiegend Wälzführungen auf Basis von Rollen und Käfigführungen eingesetzt, ergaben sich jetzt durch Führungselemente mit Wälzkörperumlauf neue Anwendungsbereiche. Linearkugellager, Kugel- und Rollenlaufschuhe waren wichtige Entwicklungsschritte auf dem Weg zu den Kompaktführungen. Vor allem Fortschritte in der hochpräzisen Fertigung, die zuverlässige Bereitstellung der geforderten Werkstoffqualität und die steigenden Anforderungen an die linearen Wälzführungen führten zu einer Vielzahl von Innovationen und ermöglichten so die breite Anwendung dieser Führungsart.

Mit dem vorliegenden Fachbuch wird versucht den aktuellen Wissensstand auf dem Gebiet der linearen Wälzführungen zusammenfassend darzustellen. Nach einem allgemeinen Überblick zu Führungssystem im Maschinenbau und der Diskussion der Anforderungen an solche Systeme werden die physikalischen Grundlagen des Wälzens von Kugeln und Rollen erläutert. Auf dieser Basis werden die vielfältigen Modifikationen im inneren Aufbau der Führungselemente und die damit in der Anwendung verbundenen Eigenschaften tiefgründig dargelegt. Grundlagen der Auswahl und Auslegung sowie Hinweise zur Berechnung von Führungssystemen werden gegeben. Ein gesondertes Kapitel ist der konstruktiven Gestaltung und Montage komplexer Führungssysteme bei Anwendung von Kompaktführungen und der Schadenserkenkung gewidmet.

Das Buch wendet sich an Konstrukteure und Anwender von Maschinen und Geräten, in denen lineare Wälzführungen zur Anwendung kommen sollen bzw. kommen. Auf der Basis vorhandenen ingenieurtechnischen Wissens soll zum umfassenden Verständnis der Funktion, zur sicheren Auswahl und zum richtigem Einsatz der am Markt angebotenen Systeme beigetragen werden. Ziel ist es eine fachlich fundierte Kommunikation zwischen den Herstellern der Führungselemente und den Anwendern zu unterstützen. Das Buch ersetzt nicht das intensive Studium der Hinweise der Hersteller der Führungselemente sowie deren Beratung.

Betont werden muss, dass die Autoren auf Grund der Vielzahl möglicher Varianten von linearen Wälzführungssystemen nicht den Anspruch auf Vollständigkeit hatten. Bewusst ausgeklammert wurden Wälzführungssysteme, die als Schlitteneinheiten zum Teil mit Antrieben angeboten werden, alle Arten von Sonderelementen, wie Dämpfung-, Brems- und Klemmelemente sowie der Aufbau von Schmiersystemen.

Das Buch entstand in enger Zusammenarbeit mit dem Verlag. Vielen Dank dem Lektorat von Herrn Thomas Zipsner, der mit viel Geduld und praktischer Unterstützung das Erscheinen des Buches ermöglichte. Auch gilt unser Dank Frau Dipl.-Ing. (FH) Karin Eßbach, Frau Margitta Reymann, Frau Evelyn Seyffert und Frau Elke Porstmann für die mühsame Kleinarbeit bei der Erstellung des Manuskriptes und der zahlreichen Bilder.

Für des Bereitstellen von Bildmaterial möchten wir uns bei den beteiligten Firmen ausdrücklich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Die Bedeutung von Führungssystemen	1
2	Überblick zu Führungssystemen im Maschinenbau	4
2.1	Klassifizierung, Aufbau und Funktionsprinzipien	4
2.2	Gleitführungen	11
2.2.1	Hydrodynamische Gleitführungen	11
2.2.2	Hydrostatische Gleitführungen	14
2.3	Wälzführungen	16
2.3.1	Wälzführungen im Überblick	16
2.3.2	Wälzführungen mit begrenztem Verfahrensweg	17
2.3.3	Wälzführungen mit unbegrenztem Verfahrensweg	19
	Weiterführende Literatur	24
3	Anforderungen an und Auswahlkriterien für lineare Wälzführungen	25
3.1	Anforderungen und allgemeingültige physikalische Regeln	25
3.2	Auswahlkriterien	27
3.2.1	Belastbarkeit	27
3.2.2	Geschwindigkeit	28
3.2.3	Genauigkeit	28
3.2.4	Steifigkeit	30
3.2.5	Dämpfung	32
3.2.6	Umgebungsbedingungen	33
3.3	Anforderungen und Auswahlkriterien im Überblick	34
4	Wälzkörperverhalten	35
4.1	Hertzsche Pressung	35
4.1.1	Kontaktflächengeometrie zwischen Wälzkörper und ebener Fläche	35
4.1.2	Hertzsche Pressung bei Punktkontakt	37
4.1.3	Hertzsche Pressung bei Linienkontakt	39
4.2	Wälzkörper und Laufbahnkontaktgeometrie	40
4.2.1	Wälzkörper Kugel	40
4.2.2	Wälzkörper Rolle	41
4.2.3	Wälzkörper Tonne	42
4.3	Kontaktverhalten im Führungssystem	43
4.3.1	Rollen und Gleiten im Wälzkontakt	43
4.3.2	Reibverhältnisse beim Wälzen einer Kugel	44
4.3.3	Reibverhältnisse beim Wälzen einer Rolle	45

4.3.4	Reibungsverhältnisse von Käfigführungen	46
4.3.5	Dynamische Effekte im Wälzkörperumlauf	48
4.3.6	Reibung und Verschleiß bei Kurzhubanwendungen	53
4.3.7	Vorspannung	55
	Weiterführende Literatur	60
5	Ausgewählte lineare Wälzführungen	61
5.1	Führungssysteme mit Käfigführungen	61
5.2	Führungssysteme mit Laufrollen und Laufrollensystemen	67
5.3	Führungssysteme mit Linearkugellager	71
5.4	Führungssysteme mit verdrehgesicherten Wellenführungen	74
5.5	Führungssysteme mit Kugel- und Rollenumlaufschuhen	75
5.6	Zusammenfassung und Vergleich	81
6	Kompaktführungen	83
6.1	Aufbau von Kompaktführungseinheiten und –systemen	83
6.2	Belastung von Kompaktführungseinheiten	85
6.2.1	Äußere Belastungen	85
6.2.2	Unterschiede zwischen Kompaktführungseinheiten mit Kugeln oder Rollen	86
6.2.3	Innere Belastungen an typischen, 4-reihigen Kompaktführungseinheiten	88
6.2.3.1	Druck-, Zug- und Querkräfte bei O-Anordnung	88
6.2.3.2	Druck-, Zug- und Querkräfte bei X-Anordnung	90
6.2.3.3	„Schräg angreifende“ Kräfte	92
6.2.3.4	Längsmomente	93
6.2.3.5	Quermomente bei Kompaktführungseinheiten mit Kugelumlauf	94
6.2.3.6	Quermomente bei Kompaktführungseinheiten mit Rollenumlauf	97
6.2.3.7	Innere Belastungen bei Führungssystemen mit mehreren Kompaktführungseinheiten	98
6.2.4	X- und O-Anordnung im Vergleich	100
6.2.5	Innere Belastungen an speziellen Varianten von Kompaktführungseinheiten mit Kugelumlauf	102
6.2.5.1	Vierreihige Kompaktführungseinheit mit 2-Punkt-Kontakt und Kontaktwinkeln ungleich 45°	102
6.2.5.2	Zweireihige Kompaktführungseinheit mit 4-Punkt-Kontakt	105
6.2.5.3	Vierreihige Kompaktführungseinheit mit 4-Punkt-Kontakt	107
6.2.5.4	Vierreihige Führung mit 2- und 4-Punkt-Kontakt	109
6.2.5.5	Sechsheihige Führung mit 2-Punkt-Kontakt	111
6.2.5.6	Resümee	114

6.3	Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit von Kompaktführungen	115
6.3.1	Vorspannung und deren Auswirkungen	115
6.3.2	Steifigkeitserhöhung bei einem Führungswagen	119
6.3.3	Steifigkeitserhöhung des Wagen-Schiene-Systems	120
6.3.4	Steifigkeitserhöhung bei Kompaktführungssystemen bestehend aus mindestens zwei Führungsschienen mit vier Wagen	123
7	Auswahl und Berechnung von linearen Wälzführungen	125
7.1	Berechnungsgrundlagen	125
7.1.1	Statische Tragzahl und statische Tragsicherheit	126
7.1.2	Dynamische Tragzahl und Lebensdauer	128
7.1.3	Nachrechnung von vom Anwender gestalteten Laufbahnen	132
7.1.4	Belastung der Führungselemente eines Führungssystems	132
7.1.4.1	Führungssystem mit Käfigführungen	134
7.1.4.2	Führungssystem mit vier Laufrollen	137
7.1.4.3	Führungssystem mit vier Linearkugellagern	139
7.1.4.4	Führungssystem mit einer verdrehgesicherten Wellenführung	140
7.1.4.5	Führungssystem mit einer Kompaktführungseinheit	142
7.1.4.6	Führungssystem mit vier Kompaktführungseinheiten	144
7.1.5	Kugel- oder Rollenführung	146
7.1.6	Geschwindigkeit als Auswahlkriterium	146
7.2	Auswahl und Berechnung von Führungssystemen in Transportachsen	147
7.3	Auswahl und Berechnung von Führungssystemen für Bearbeitungsachsen	152
	Weiterführende Literatur	163
8	Einsatzaspekte von linearen Wälzführungen	164
8.1	Anforderungen an die umgebende Konstruktion	164
8.1.1	Form- und Lagetoleranzen der Anschlusskonstruktion	165
8.1.2	Genauigkeitsklassen der Führungselemente	166
8.1.3	Ausgleichseffekt an der geführten Baugruppe	168
8.1.4	Anordnungen der Führungsschienen im Führungssystem	170
8.1.4.1	Anordnung der Führungsschienen in einer Ebene (A)	174
8.1.4.2	Winkelanordnungen (B)	177
8.1.4.3	Spezielle Anordnungen (C)	179
8.1.5	Beispiel: Anschlusskonstruktion bei einer Stufenanordnung	182
8.2	Schmierung	185
8.3	Schutz vor Kontamination	188
8.4	Montage	192
8.4.1	Montagegerechte Gestaltung	192
8.4.2	Vorgehensweise bei der Montage einer Kompaktführung	194

8.5	Geräusche und Condition Monitoring	198
8.5.1	Geräuschentwicklung an linearen Wälzführungen	198
8.5.2	Condition Monitoring an linearen Wälzführungen	199
8.6	Erkennen von Schadensfällen	202
	Weiterführende Literatur	207
9	Aktuelle Trends bei der Entwicklung linearer Wälzführungen	208
	Glossar	211
	Bildquellenverzeichnis	216
	Sachwortverzeichnis	217

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a, b	[mm]	Halbmesser einer Ellipse (Kapitel 4)
a	$\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$	Beschleunigung
a_0, a_x	[mm]	Diagonaler Wälzkörperabstand bei O-Anordnung bzw. X-Anordnung
a, b, c, d, f, g, e	[mm]	Diverse Abstände (Beispiele in Kapitel 7)
a, b	[mm], $\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Breite und maximaler Betrag der Pressungsverteilung
b_L	[mm]	Wirksame Wälzkörperlänge bei Linienkontakt
C	[N]	Dynamische Tragzahl
C_0	[N]	Statische Tragzahl
C_{DIN}	[N]	Dynamische Tragzahl nach DIN 636 Teil 2 mit 100 km erreichbarem Fahrweg
C_{50}	[N]	Dynamische Tragzahl mit 50 km erreichbarem Fahrweg
$C_{0Qx}, C_{0Ly}, C_{0Lz}$	[μm]	Statische Tragzahlen bei Belastung durch Momente
$c_{\text{Druck}}, c_{\text{Zug}}, c_{\text{Quer}}$	[μm]	Druck-, Zug- und Quersteifigkeit
C_{erf}	[N]	Erforderliche dynamische Tragzahl
c_{dyn}	[μm]	Dynamische Steifigkeit
$c_{\text{stat}}, c_{\text{stat,ges}}, c_{\text{stat,1}}, c_{\text{stat,2}}, c_y$	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Statische Steifigkeit
d_K, d_R	[mm]	Kugel- und Rollendurchmesser
d_{stat}	$\left[\frac{\text{mm}}{\text{N}}\right]$	statische Nachgiebigkeit
E_{eq}, E_1, E_2	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$	Äquivalenter Elastizitätsmodul und Elastizitätsmodule verschiedener Körper
$E1, E1.1, E1.2$	[μm]	zulässige Höhentoleranzen
$F_A, F_B, F_C, F_{z1}, F_{z4}, F_y, F_z, F_{yb}, F_{zb}, F_{yl}, F_{yr}, F_{0y}, F_{0z}$	[N]	Äußere Belastungen (Beispiele in Kapitel 4 und 7)
$F_{\text{eff,y}}, F_{\text{eff,z}}$	[N]	Richtungsbezogene Effektivkräfte
$F_{\text{ax,i}}$	[N]	Axiale Belastungen
$F, F_F, F_R, F_{\text{Last}}$	[N]	Kraft, Federkraft, Reibkraft, (äußere) Belastungskraft
$F_{\text{Druck}}, F_{\text{Zug}}, F_{\text{Quer}}$	[N]	Druck-, Zug- und Querkraft
F_N	[N]	Normalkraft bei Hertzscher Pressung

F_O, F_X	[N]	Kraft bei O und X-Anordnung
F_{RG}, F_{RH}	[N]	Gleit- und Haftreibungskraft
F_V	[N]	Vorspannkraft
f_{Druck}	[N]	Federweg bei Druckbelastung
f_{Err}	[1/s]	Erregerfrequenz
f_{HP}	[1/s]	Hubpulsationsfrequenz
f_V	[μm]	Federweg bei Vorspannung
$f, \prod f$	[–]	Zusatzfaktoren für die Lebensdauerberechnung
g	[m/s^2]	Erdbeschleunigung
h	[μm]	Führungsspalt bei hydrostatischer Führung
i	[–]	Anzahl der Wälzkörperreihen
l	[mm]	wirksame Wälzkörperlänge (bei Rollen)
l_x, l_O	[mm]	Stützabstand bei X-Anordnung bzw. bei O-Anordnung
L	[km]	Nominelle Lebensdauer
L	[mm]	Länge eines Führungswagens
L_h	[h]	Nominelle Lebensdauer
M_x, M_y, M_z	[Nm]	Moment
$m_{BG}, m_{Greifer}, m_{Tr}$	[kg]	Transportierende Massen
$M_L, M_Q, M_{Lh},$ $M_{Lv}, M_{Lz}, M_{Ly},$ M_{Qx}	[Nm]	Längsmoment (L), Quermoment (Q), horizontales (Lh) und vertikales (Lv) Längsmoment, Längs- und Quermoment um die jeweiligen Koordinatenachsen x, y und z
$M_{0Ly}, M_{0Lz}, M_{0Qx}$	[Nm]	Maximale statische Momentbelastung
$M_{0Ly,zul}, M_{0Lz,zul}$ $M_{0Qx,zul}$	[Nm]	Maximal zulässige statische Längs- oder Quermomente
m	[kg]	Masse
n	[min^{-1}]	Hubfrequenz
P, P_n	[N]	Dynamisch äquivalente Belastung
P_0	[N]	Statische äquivalente Belastung
P_m	[N]	Mittlere dynamisch äquivalente Belastung
p	[MPa]	Staudruck (Öldruck)
p	[–]	Lebensdauerexponent
p_H	$\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Hertzsche Pressung
$q(t)$	[μm]	Schwingamplitude als Funktion der Zeit

q_i	[%]	Bezogene Wirkungsdauer
q_{sn}	[%]	Weg- oder Zeitanteile
$R_1; R_2; R_{1x}; R_{1y};$ $R_{2x}; R_{2y}$	[mm]	Radien
R_{eq}	[mm]	Äquivalenter Radius
S_0	[-]	Statischer Sicherheitsfaktor
S_{min}	[mm]	Mindestabstand zwischen zwei Führungswagen
s	[mm]	Schlittenweg, Hublänge
T	[s]	Periodendauer
t	[s]	Zeit
v, v_A, v_G, v_S	[m/s]	Geschwindigkeit, Antriebsgeschwindigkeit, Gleitgeschwindigkeit, Schlittengeschwindigkeit
v_{vsp}	[-]	Vorspannfaktor
\bar{v}	[m/s]	dynamisch äquivalente Geschwindigkeit
x, y, z	[mm]	Koordinatenrichtung, Länge
z	[-]	Anzahl der Wälzkörper je Reihe
α	[°]	Kontaktwinkel, Profilwinkel (bei profilierten Laufrollen)
δ	[μ m]	Axiale Annäherung zwei Körper bei Hertzscher Pressung
$\Delta\alpha$	[°]	Winkeldifferenz bei Momentenbelastung, Winkelfehler bei vorhandener Geradheitsabweichung
$\Delta F, \Delta F_y$	[N]	Kraftdifferenz bzw. Belastungsänderung
ΔF_v	[N]	Belastungsänderung bei Vorspannkraft
ΔM	[Nm]	Änderung eines Torsions- oder Biegemomentes
Δf_v	[μ m]	Änderung des Federweges bei Vorspannkraft
Δf_y	[μ m]	Verlagerung bzw. Einfederung eines Führungssystems
$\Delta h, \Delta s$	[μ m]	Höhenabweichung und Parallelitätsabweichung
Δs_{Fv}	[μ m]	Negatives Führungsspiel bei Vorspannung (= Vorspannweg)
Δt_i	[%]	Zeitanteil
Δu	[mm]	Verformungsdifferenz
Λ	[-]	Logarithmisches Dämpfungsdekrement
μ	[-]	Reibwert



1 Die Bedeutung von Führungssystemen

Die kürzeste Strecke zwischen zwei Punkten ist eine gerade Linie. Demzufolge ist die optimale Bewegung zwischen zwei Punkten meistens die lineare Bewegung. Für die Realisierung dieser linearen Bewegung benötigt man eine Führung, die Abweichungen von der optimalen gewünschten Linie verhindert. Solche Führungssysteme werden *Linearführungen* genannt.

Abweichungen von der optimalen Bewegung werden u. a. durch Kräfte, welche durch eine Bearbeitung entstehen, verursacht. Grundsätzlich alle Bauteile sind nachgiebig und die Bauteile, welche die Bewegung ermöglichen, besitzen eine endliche Genauigkeit.

Soll eine räumliche Bewegung realisiert werden, kann mit linearen Bewegungen entlang der drei Achsen des kartesischen Koordinatensystems jeder Punkt im Raum erreicht oder jede denkbare räumliche Kontur abgefahren werden. Für die Genauigkeiten dieser Bewegungsabläufe sowie für die Positioniergenauigkeit leisten die Führungen einen entscheidenden Beitrag.

Ganz gleich ob es sich um Transportbewegungen oder um Bearbeitungsvorgänge handelt, jede Masse in Bewegung erzeugt Schwingungen, jede Beschleunigung und jede Verzögerung erzeugt Kräfte und Momente, und natürlich wirken bei einer Bearbeitung die unterschiedlichsten Kräfte. All diese Belastungen müssen die Führungen aufnehmen. Hohe Belastbarkeit, hohe Geschwindigkeit, hohe Genauigkeit, hohe Steifigkeit, hoher Wirkungsgrad, geringer Verschleiß, lange Lebensdauer, einfache Handhabung und anderen anwendungsspezifischen Anforderungen müssen lineare Führungssysteme gerecht werden. Die Bandbreite der Einsatzgebiete ist sehr groß und reicht vom Zuführ- und Transportsystem über Robotersysteme, Einrichtungen zum Handling, Medizintechnik, Messmaschinen, Mikroelektronik, Verpackungsmaschinen, Werkzeugwechsler, Werkzeug- und Sondermaschinen bis hin zu Landmaschinen, Baumaschinen und Konsumgütern und weiteren anderen Anwendungen.

So vielfältig die Einsatzgebiete sind, so variantenreich gestalten sich die Führungssysteme. Die Palette reicht von daumennagelgroßen Miniaturführungen bis zu hochhaustragenden Wälzführungselementen zur Aufnahme von Erdbebenschwingungen, von hydrodynamischen über hydrostatische Gleitführungen, den exotischen Magnet- und Aerostatischen Gleitführungen bis zu den Wälzführungen. Letztere, also die *Wälzführungen* bilden den Schwerpunkt dieses Fachbuches.

Wälzführungen werden im praktischen Sprachgebrauch *Kompaktführungen*, *Kugel-* oder *Rollenumlaufführungen* oder *Linearführungen* genannt. Es gibt ganz unterschiedliche Bezeichnungen für dieses, mittlerweile am meisten verwendete Führungssystem. Die wohl sinnvollste Bezeichnung ist, in Anlehnung an „Wälzlager“ als Oberbegriff für alle Kugel-, Rollen- und Nadellager, die Bezeichnung *lineare Wälzführungen* als Oberbegriff für alle Führungssysteme, die ebenso wie die Wälzlager auf Basis von *abrollenden*, technisch besser *abwälzenden* Wälzkörpern funktionieren. Der Begriff *Wälzen* beinhaltet das gleichzeitige Rollen und Gleiten eines vorzugsweise in Bewegungsrichtung runden Körpers (Kugel,

Rolle, Nadel, Tonne etc.). Reines Abrollen eines Körpers ist unter Belastung technisch nicht möglich. Auch wenn bei niedriger Belastung der Gleitanteil einer Wälzbewegung vernachlässigt werden kann.

Hydrodynamische Führungssysteme sind in der Regel kostengünstig, haben einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad und ein von der Geschwindigkeit abhängiges Reibungsverhalten. Deshalb erfolgt ihr Einsatz vorwiegend bei Anwendungen mit annähernd konstanter Geschwindigkeit und zur Realisierung von Transportbewegungen.

Berührungslose Führungssysteme wie Magnetführungen oder aerostatische Gleitführungen sind wegen ihrer geringen Tragfähigkeit und anderer Nachteile im Maschinenbau begrenzt einsetzbar. Hydrostatische Gleitführungen sind verschleißfrei, benötigen aber umfangreiche Pump- und Leitungssysteme sowie entsprechende Steuerungssysteme. Diese sind nicht wartungsfrei und benötigen Energie. Insgesamt sind hydrostatische Führungssysteme in der Regel sehr kostenintensiv. Ihr Einsatz macht vor allem dort Sinn, wo Wälzführungen aufgrund hoher Belastungen bezüglich Abmessungen, Gewicht und Herstellungskosten keine Alternative mehr sind.

Wälzführungen sind natürlich auch nicht wartungsfrei. Der Gleitanteil beim Wälzen geht mit Reibung einher. Das bedeutet Verschleiß und die Notwendigkeit einer Schmierung. Im Gegensatz zu den alternativen Führungssystemen haben Wälzführungen in Summe dennoch den höchsten Wirkungsgrad und das beste Preis-Leistungs-Verhältnis. Vielleicht der wichtigste Grund, dass mittlerweile z. B. über 90 % aller spanenden Werkzeugmaschinen mit Wälzführungen ausgestattet werden (Schätzung der Autoren).

In Abhängigkeit vom Einsatzfall, den Belastungs- und Umgebungsbedingungen und den technischen Anforderungen sind bestimmte Voraussetzungen einzuhalten, um die richtige Auswahl der Elemente der Wälzführung treffen zu können und ihre einwandfreie Funktion zu gewährleisten. Sind diese Voraussetzungen nicht erfüllt oder wird eine für den Anwendungsfall nicht geeignete Führung eingesetzt, kommt es entweder zu Funktionsstörungen oder im schlimmsten Fall zum Führungsausfall. Statistiken besagen, z. B. dass für ca. 30 % aller Ausfälle von Werkzeugmaschinen die Führungssysteme verantwortlich sind. Kugelgewindetriebe (besser Wälzschraubtriebe) liegen mit ca. 40 % der Ausfallursachen noch über diesem Wert. Doch in den meisten Fällen sind weder Wälzführungen noch Wälzschraubtriebe für die Ausfälle direkt verantwortlich. Es sind Fehler bei der Auswahl, Dimensionierung, Einsatz, Montage und Wartung dieser Komponenten, die zu Fehlfunktionen oder Ausfällen führen. Dieses Buch soll dazu beitragen, eben diese Fehler beim Einsatz von Wälzführungen zu vermeiden.

Sowohl bei vielen Führungen für Transportbewegungen und erst recht bei Führungen für Bearbeitungsvorgänge haben sich die Kompaktführungen in den vergangenen Jahren immer mehr zu einem Standard entwickelt und andere Prinzipien linearer Wälzführungen verdrängt. Dieser Entwicklung wird vor allem in den Kapiteln 6 und 8 mit dem Schwerpunkt auf die Kompaktführungen Rechnung getragen.

Ausfälle bedeuten Produktionsstillstand und zeit- sowie kostenintensive Reparaturen und ggf. erhebliche Zusatzkosten, wie folgendes reale Beispiel verdeutlichen soll:

Die Führung einer größeren Werkzeugmaschine fällt nach ca. 5 Jahren aus. Die Ausfallursache liegt mit großer Wahrscheinlichkeit in einem Montagefehler. Für den Austausch des defekten Führungssystems muss der komplette Ständer der Maschine abgehoben werden.

Bei gut konstruierten Maschinen reicht das Anheben dieses Gestellelements mit Hydraulikelementen um wenige Millimeter. Anders in diesem Fall, der Maschinenständer musste mit einem Autokran komplett abgehoben werden, um Führungswagen und Schienen austauschen zu können. Aus Platzgründen mussten das Hallendach geöffnet und außerhalb der Produktionshalle eine Böschung abgebaggert werden, damit der Autokran nahe genug an die Halle und an die Maschine gelangen konnte. Alles in allem eine ungefähre Schadenssumme von ca. 75.000 € zzgl. der Kosten für den mehrtägigen Produktionsausfall. Der Wert des defekten Führungswagens betrug ca. 500 €.

Die Ursachen für den Ausfall mit diesem enormen Kosten waren die folgenden:

- Die Verschlussstopfen der Schienenbefestigungsbohrung wurden teilweise zu tief eingesetzt. Dadurch konnten Späne in das Wageninnere gelangen und in weiterer Folge den Rollenumlauf im Umlenkbereich blockieren. Damit kam es zum Gleiten der Rollen bei Bewegung des Maschinenständers und durch die Reibung wirkten sehr große Kräfte auf die Endstücke, die letztlich zur Zerstörung der Umlenkbeiche und zum Austritt der Rollen führten.
- Eine serviceunfreundliche Konstruktion verhinderte den normalerweise unpektakulären Austausch des defekten Führungswagens und führte zu erheblichem Aufwand mit unverhältnismäßig hohen Kosten.

Wer die Grundprinzipien und Besonderheiten von Wälzfürungen kennt, wird wesentlich bessere Lösungen für Führungssysteme in Maschinen und Anlagen finden und die Ausfallhäufigkeit auf ein Minimum reduzieren können. Gerade im Zeitalter von Industrie 4.0 müssen solche mechanischen Systeme wie Wälzfürungen und Wälzschraubtriebe so ausgewählt und eingesetzt werden, dass sie zuverlässig und störungsfrei arbeiten. Andernfalls helfen weder Sensoren noch die besten Verknüpfungen mit anderen Maschinen.

2 Überblick zu Führungssystemen im Maschinenbau

2.1 Klassifizierung, Aufbau und Funktionsprinzipien

Die Aufgabe von Führungen besteht darin, die relative Bewegung zwischen zwei Bauteilen in einem Freiheitsgrad zuzulassen, ohne dass dabei unzulässige Verschiebungen oder Verdrehungen in den anderen fünf Freiheitsgraden auftreten. Damit sind Anforderungen wie zwangfreier Lauf ohne Verkanten, geringe Reibung und niedriger Verschleiß, gutes statisches, dynamisches und thermisches Verhalten sowie niedrige Herstellungs- und Betriebskosten verbunden. Die Führung kann physisch eine eigenständige Baugruppe, also ein separat zu verbauendes Maschinenelement sein oder unmittelbar Flächen der relativ zueinander bewegten Baugruppen nutzen (Bild 2-1).

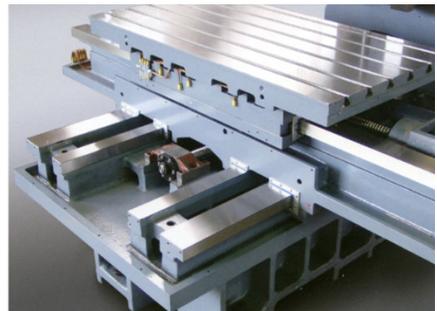
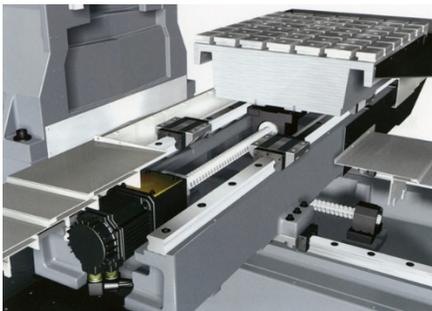


Bild 2-1 Führungen als separates Maschinenelement (links) [Quelle Haas Automation] und aus Flächen an den relativ zueinander bewegten Bauteilen (rechts) [Quelle SAEILO]

Die Klassifizierung der Führungssysteme erfolgt oft abhängig von den Anwendungsbranchen und der zu erfüllenden Funktion. Beispielfür Werkzeugmaschinen sind die verschiedenen Kriterien und Klassifizierungen in Bild 2-2 dargestellt.

Es ist üblich nach der Art der möglichen Bewegung in *Gerad- und Rundführungen* oder nach der Vollständigkeit der Kraftaufnahme in *offene* und *geschlossene* Bauweise einzuteilen. Geschlossene Führungssysteme nehmen im Gegensatz zu offenen Systemen abhebbende Kräfte auf. Weiterhin wird bezüglich der Funktion bei einem Fertigungsprozess in der Maschine, eingeteilt in *Verstell- und Bewegungsführungen*. Verstellführungen dienen dem Positionieren des Gestellbauteils und sind während der Bearbeitung am Werkstück feststehend und gegebenenfalls geklemmt. Bewegungsführungen werden z. B. während der Bearbeitung oder eines Bauteiltransportes bewegt. Das heißt, die bewegte Baugruppe führt eine

formbildende Bewegung aus und bestimmt damit wesentlich die geometrische Qualität am Werkstück. Andere Klassifizierungsmerkmale, auf die im Weiteren näher eingegangen wird, sind die *geometrische Querschnittsform* und die *Art der Führungsflächentrennung*.



Bild 2-2 Klassifizierung von Werkzeugmaschinen-Führungen

Die Anordnung der Führungsflächen im Querschnitt der Führung basiert im Allgemeinen und bei unmittelbar an den relativ zueinander bewegten Baugruppen angeordneten Flächen auf den geometrischen Grundformen Rechteck, Dreieck und Kreis (Bild 2-3). Je nach verwendeten Flächen ergeben sich Flach-, Dach-, Prismen-, Schwalbenschwanz- und Säulenführung sowie Kombinationen daraus. In der Regel erfolgt die Flächenanordnung bei Führungssystemen in Werkzeugmaschinen so, dass bei mehreren Freiheitsgraden die Möglichkeit der Mehrfachbindung vorliegt. Konsequentes Einhalten der Regeln des Austauschbaus, das Anordnen von Elementen zum Einstellen des Spiels bzw. Anpassungsarbeiten während der Montage sind die Folge.

Die Flachführung hat den Vorteil, dass die parallel und rechtwinklig zueinander liegenden Flächen relativ einfach zu fertigen und zu prüfen sind. Die Steifigkeiten in den einzelnen Richtungen können weitestgehend unabhängig voneinander konstruktiv ausgelegt werden. Dem steht die hohe Anzahl an Führungsflächen und die notwendige Spieleinstellung in der Seitenführung und dem Umgriff gegenüber.

Dach- bzw. Prismenführungen haben den Vorteil, dass durch ihre Geometrie eine automatische Zentrierung bzw. Nachstellung stattfindet. Der Nachteil besteht in der aufwändigen Fertigung der nicht rechtwinkligen und parallelen Führungsflächen sowie der Ansammlung von Öl und Spänen auf den Führungsflächen. Die mehrfache Überbestimmung quer zur Bewegungsrichtung macht Anpassungsarbeiten, z. B. das Schaben der Führungsflächen erforderlich.

Die Schwalbenschwanzführung ist das geschlossene Führungssystem mit der geringsten Anzahl an Führungsflächen, was sich wiederum günstig auf die Fertigungskosten auswirkt. Dem stehen jedoch aufwändige Anpassungsarbeiten bei der Montage sowie die geringe und unsymmetrische Steifigkeit gegenüber.

Die wesentlichsten Bezeichnungen und allgemeinen Richtlinien zur Auslegung einer Geradführung werden in Bild 2-4 am Beispiel einer Flachführung mit Umgriff, auch Rechteckführung genannt, erklärt.

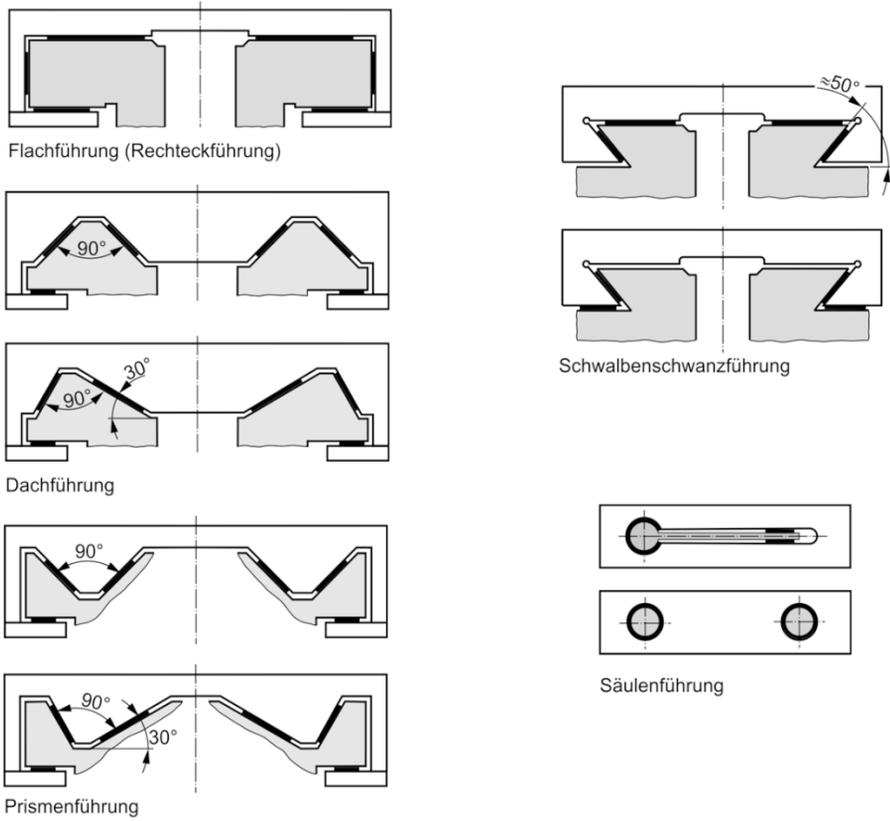


Bild 2-3 Beispiele für geometrische Grundformen von Führungssystemen

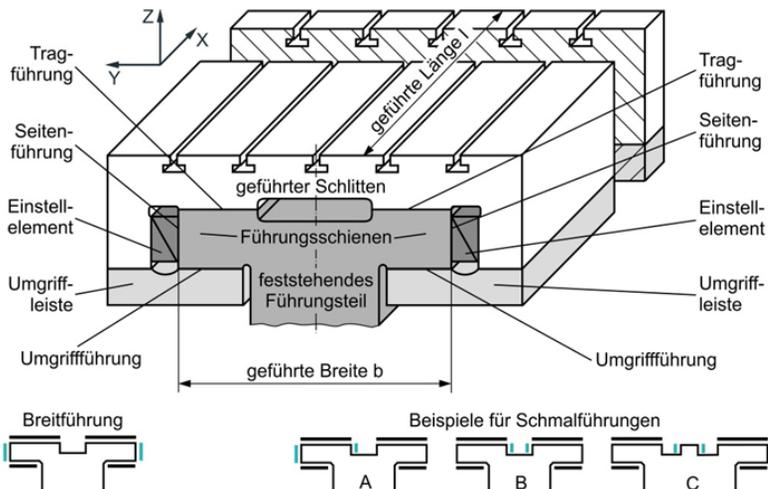


Bild 2-4 Grundsätzlicher Aufbau einer Geradföhrung als Rechteck- und Breitföhrung

Wie im Bild 2-4 dargestellt, befinden sich hier am feststehenden Gestell-Bauteil zwei Führungsschienen. Die funktionsrelevanten Flächen an diesen Führungsschienen sind die Tragführungsflächen, die Seitenführungsflächen und die Umgriffführungsflächen. Die Analyse des Bindens der Freiheitsgrade zwischen bewegtem und feststehendem Führungsteil macht die Aufgaben der Flächen deutlich:

- Durch das Aufliegen des Schlittens auf den Tragführungsflächen werden drei Freiheitsgrade (Verschiebung in z , Drehung um x und y) gebunden.
- Durch Anliegen an einer Seitenführungsfläche werden zwei Freiheitsgrade (Verschiebung in y , Drehung um z) gebunden. Zur gegenüber liegenden Seitenführungsfläche muss das gewünschte Spiel durch Einstell-elemente definiert werden. Dies kann beidseitig, also symmetrisch, oder einseitig, unsymmetrisch, erfolgen.
- Die mit dem Schlitten verschraubten Umgriffleisten verhindern das Abheben des Schlittens. Die Führung wird zu einem geschlossenen Führungssystem. Durch das Anliegen der Umgriffleisten an den Umgriffführungsflächen werden die gleichen Freiheitsgrade gebunden, die auch schon durch die Tragführung bestimmt sind. Durch entsprechende Gestaltung und Montage des Umgriffs muss auch hier das gewünschte Spiel eingestellt werden.

Durch die Gestaltung des Verhältnisses geführte Länge l zu geführter Breite b größer 1,5 kann das Verkanten des Schlittens vermieden werden.

Unabhängig davon unterscheidet man *Breit- und Schmalführungen*. Bei der Breitführung werden die äußeren Flächen der Führungsschienen als Führungsflächen für die Seitenführung genutzt. Für Schmalführungen gibt es folgende Ausführungsvarianten, ebenfalls dargestellt in Bild 2-4 unten:

- A. Beide Seitenführungsflächen liegen an einer Führungsschiene.
- B. Die Seitenführungsflächen sind an der Innenseite der Führungsschienen angeordnet.
- C. Für die Seitenführungsflächen werden separate Flächen an den Gestell-Bauteilen geschaffen.

Bei Schmalführungen kann die geführte Breite klein gehalten werden, so dass sich bei Einhalten des Führungsverhältnisses $l/b > 1,5$ kürzere Führungslängen ergeben oder durch größere Führungsverhältnisse (z. B. $l/b > 20 \dots 30$) bei gleichem Spiel eine geringere Schrägstellung zwischen den Bauteilen möglich wird.

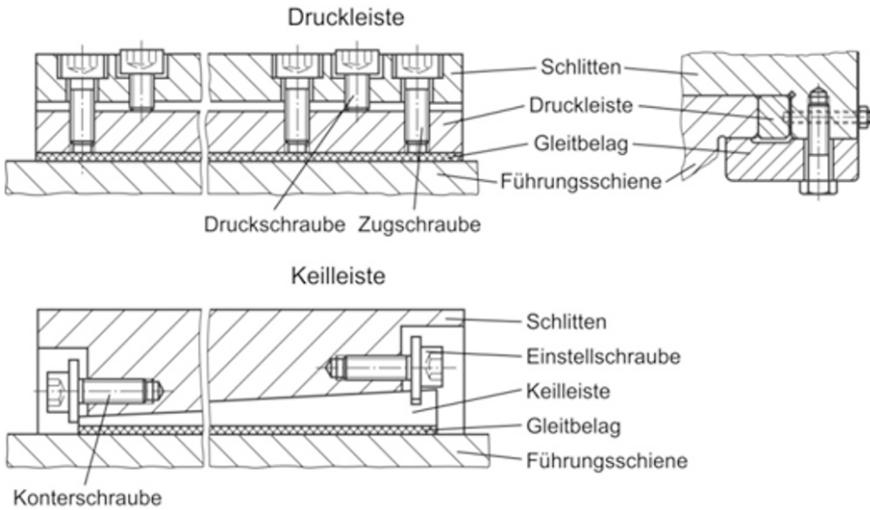


Bild 2-5 Beispiele für den Aufbau von Einstellelementen (überwiegend angewandt in der Seitenführung)

Das Spiel in der Seitenführung lässt sich mit Hilfe von Einstellelementen festlegen. Dabei kommen Druck- oder Keilleisten zum Einsatz (Bild 2-5). Druckleisten haben einen auf die Länge konstant bleibenden rechteckigen Querschnitt. Diese Leisten werden mittels Zug- und Druckschrauben zur Führungsfläche positioniert (Anzahl der Zugschrauben um 1 größer). Keilleisten besitzen eine Neigung von 1:20 bis 1:100. Durch die Verschiebung längs zur Führungsrichtung kann das Führungsspiel eingestellt werden.

Bei geschlossenen Führungssystemen erfolgt das Festlegen des Spieles zwischen Tragführung und Umgriff mittels entsprechender Ausführung der Toleranzen an Führungsschiene und Schlitten, durch den Einsatz von Druckleisten oder Keilleisten im Umgriff oder durch Beilagen zwischen Umgriffleiste und Führungsschiene bei der Montage (Bild 2-6).

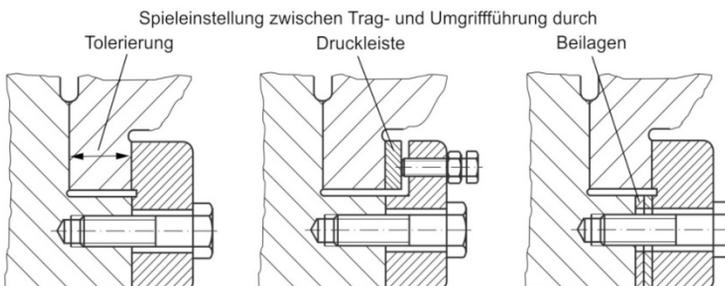


Bild 2-6 Gestaltung der Spieleinstellung in der Umgrifführung

Rundführungen erlauben die Drehbewegung von Drehtischen, Schwenkeinheiten und anderen Gestell-Baugruppen. Ihr Aufbau unterscheidet sich wesentlich von dem einer Hauptspindellagerung.

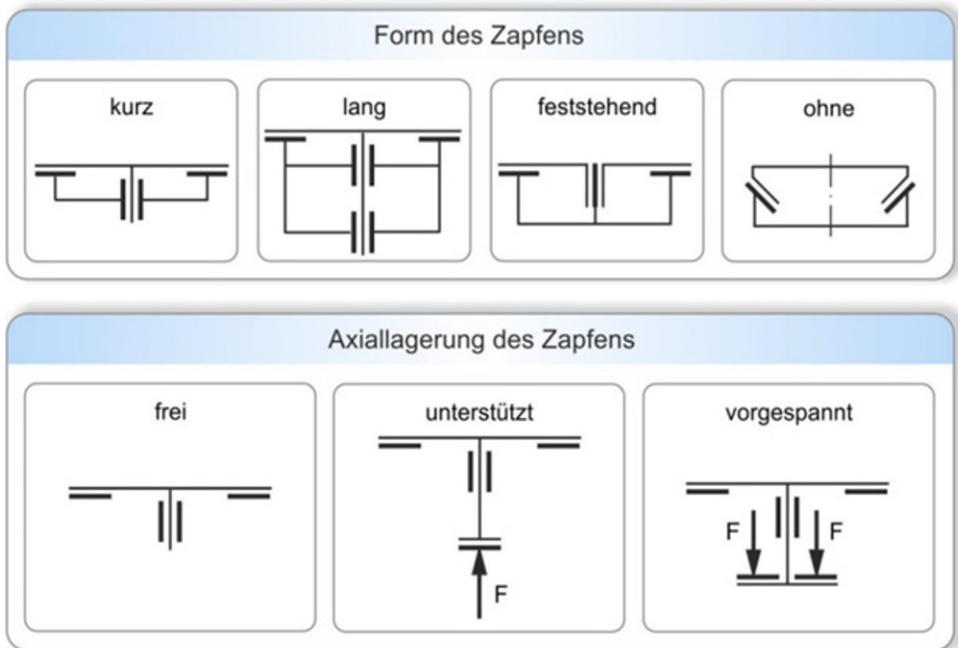


Bild 2-7 Grundsätzlicher Aufbau von Rundführungen

Unterteilt werden Rundführungen nach der Form des Zapfens und der Anordnung der Führungsflächen (Bild 2-7). Auch die Art der Führungsflächentrennung (Gleit- oder Wälzführung) kann ein Unterscheidungskriterium sein. Bei der Gestaltung von Rundführung sollte darauf geachtet werden, dass

- die Aufspannplatte ausreichend stark dimensioniert wird
- der Abstand zwischen Aufspannfläche und axialer Führungsfläche minimal gehalten wird
- gegebenenfalls kegelförmige Führungsflächen zur Selbstzentrierung verwendet werden
- möglichst auf Zapfen verzichtet wird, da sie nachträgliches Anpassen erforderlich machen.

Wenn weder abhebende noch kippende Kräfte vorkommen, kann die Rundführung als offenes System ohne Zapfen gestaltet werden. Beim Vorhandensein eines Kippmoments ist die Länge des Zapfens der Größe des Moments anzupassen. Abhebende Kräfte können durch Vorspannen des Zapfens bzw. durch den Einsatz von Umgriffen aufgenommen werden. Einer auftretenden Durchbiegung des Tisches kann durch Stützen des Zapfens entgegengewirkt werden. Kommt es in ein und derselben Maschine zu abhebenden und durchbiegenden Kräften, muss mit Vorspannen und Stützen des Zapfens reagiert werden.

Für die Funktion und die Eigenschaften von Führungen ist die Art des Trennens der Führungsflächen von besonderer Bedeutung. Man unterscheidet in Gleitführungen auf der Basis von Öl mit hydrodynamischer Schmierung oder mit hydrostatischer Schmierung und in Gleitführungen mit Luft auf aerostatischem Prinzip. Eine weitere Gruppe sind die Wälzführungen, bei der Wälzelemente zwischen den Führungsflächen angeordnet sind. Besonders

die Größe der Reibung, die Differenz zwischen Start- und Bewegungsreibung, die realisierbare statische Steifigkeit und die Dämpfung sind physikalische Eigenschaften, die den Einsatz der jeweiligen Führungsart bestimmen (Tabelle 2-1).

Die *hydrodynamische Gleitführung* hat die Vorteile der geringen Herstell- und Betriebskosten, des außerordentlich guten Dämpfungsverhaltens und hoher statischer Steifigkeiten. Nachteilig sind die Festkörperreibung im Startbereich bzw. die Mischreibung im Arbeitsbereich, was entsprechenden Verschleiß zur Folge hat, sowie die Neigung zu Stick-Slip-Effekten.

Die *hydrostatische bzw. aerostatische Gleitführung* zeichnet sich durch ausgesprochen geringe Reibwerte, auch bei langsamen Geschwindigkeiten, sowie sehr hohe Führungsgenauigkeiten aus. Dadurch ist dieses Wirkprinzip nahezu verschleißfrei. Die statische Steifigkeit und Dämpfung sind ausreichend aber mit entsprechenden Reglern durchaus akzeptabel. Hingegen sind die Kosten für Herstellung und Betrieb bedeutend höher als die der hydrodynamischen Schmierung.

Tabelle 2-1 Eigenschaften wichtiger Funktionsprinzipien von Führungen

	Führungsart				
	Gleitführung mit hydrodynamischer Schmierung (Mischreibungsgebiet)		Gleitführung mit hydrostatischer Schmierung (Flüssigkeitsreibung)	Gleitführung mit aerostatischer Flächentrennung	Wälzführung
	Werkstoffpaarung Guss/Guss (Stahl)	Werkstoffpaarung Plast/Guss (Stahl)			
Bewegungsreibkoeffizient μ_K	0,1... 0,2) ¹	0,05... 0,1) ¹	0,001... 0,0001) ²	0,0001	0,01... 0,0001) ²
Startreibkoeffizient μ_P	$\mu_P \gg \mu_K$	$\mu_P > \mu_K$	$\mu_P = \mu_K$	$\mu_P = \mu_K$	$\mu_P \approx \mu_K$
statische Steifigkeit	gut	gut	gut ... hoch) ⁴	gut ... hoch) ⁴	hoch
Dämpfung	sehr gut	sehr gut	sehr gut) ⁵	schlecht	schlecht

¹ Reibkoeffizient stark abhängig von Geschwindigkeit

² Reibkoeffizient nahezu unabhängig von Geschwindigkeit

³ Reibkoeffizientgröße weitgehend von Anzahl und Anordnung der Gleitelemente (Mischreibungsgebiet) im Führungssystem abhängig

⁴ Steifigkeit abhängig von eingesetzter Drossel, am Besten bei geregelter Drossel

⁵ Dämpfung sehr gut quer zur Führungsrichtung, in Führungsrichtung extrem niedrig

Wälzführungen erreichen geringe Reibwerte, ausgezeichnete Tragfähigkeit und gute Genauigkeiten. Durch das große Angebot von Komponenten und Komplettsystemen der Zulieferer erlauben sie eine große Einsatzvielfalt mit gewünschten Eigenschaften für jegliche Art der Anwendung. Der geringer ausgeprägten Dämpfung vorgespannter Wälzführungssysteme kann man mit Hilfe von sogenannten Dämpfungsschlitten entgegenwirken. Auch kann durch eine entsprechend steife Gestaltung vermieden werden, dass Schwingungen signifikante Störeinflüsse auf die Maschine haben. Da sich Wälzführungen in den letzten Jahrzehnten zu einem Quasistandard für alle Anwendungen, die nicht konstruktionsbedingt auf

andere Prinzipien zurückgreifen müssen, entwickelt haben, soll die Wälzführungen im Fokus des vorliegenden Fachbuches stehen. Die Autoren schätzen, dass mittlerweile über 90 % aller zerspanenden Werkzeugmaschinen mit Wälzführungen ausgestattet sind.

2.2 Gleitführungen

2.2.1 Hydrodynamische Gleitführungen

Hydrodynamische Gleitführungen sind klassische Führungen und wurden lange bevor es Wälzführungen gab bei verschiedensten Maschinen, unter anderem bei Werkzeugmaschinen eingesetzt. Bei einer Relativbewegung der beiden Führungsflächen entsteht bei dem hydrodynamischen Führungsprinzip im Führungsspalt ein Öldruck. An den jeweiligen Grenzschichten zwischen den Bauteilen und dem Öl haftet das Öl an den Oberflächen an und wird mit den bewegten Bauteilen mit der dort vorhandenen Geschwindigkeit v_s mitgeführt. Es entsteht eine Gleitströmung. Da die Oberfläche aufgrund der immer vorhandenen Oberflächenrauigkeit niemals eben ist, variiert der Spalt $h(x)$ zwischen den beiden Führungspartnern. Das Öl wird dadurch abschnittsweise von Bereichen größeren Abstands in Bereiche mit niedrigerem Schmierpalt hineingepresst. An diesen Stellen entsteht der Staudruck p , der wiederum die beiden Führungsflächen auseinander drückt.

Der Schmierstoff wird drucklos in Schmiertaschen bereitgestellt, die sich in einer der beiden Führungsflächen befinden. Die wirkenden Bearbeitungskräfte und Gewichtskräfte führen zu einer Verringerung des Spaltes. Dadurch entsteht eine Druckströmung, welche den Staudruck im Schmierpalt vergrößert (Bild 2-8). Hydrodynamische Führungen arbeiten in der Regel im Bereich der Mischreibung, also einem Zustand zwischen Festkörper- und Flüssigkeitsreibung. Mit Additiven im Öl erreicht man, dass das Öl besser an den Oberflächen haftet und sich damit das Gleitverhalten, dargestellt im Stribeck-Diagramm, hin zu niedrigerer Festkörperreibung verändert (Bild 2-9). Die Ölzuführung erfolgt mit geringem Druck über sogenannte Impulsschmieranlagen. Bei der Gestaltung der Schmiernuten, die in der Regel quer zur Bewegungsrichtung angeordnet sind, ist auf eine genügende Anzahl von Ölzuführungen zu achten. Die Kanten der Schmiernuten werden zur Unterstützung der Ausbildung des hydrodynamischen Druckes in Bewegungsrichtung mit Radien versehen.

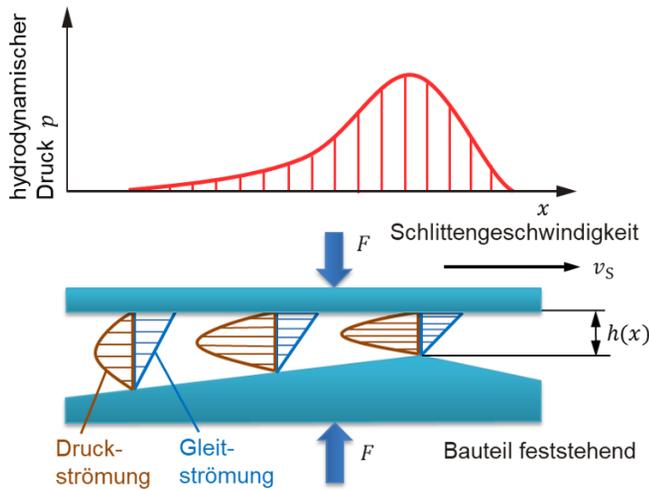


Bild 2-8 Prinzip des hydrodynamischen Druckaufbaus

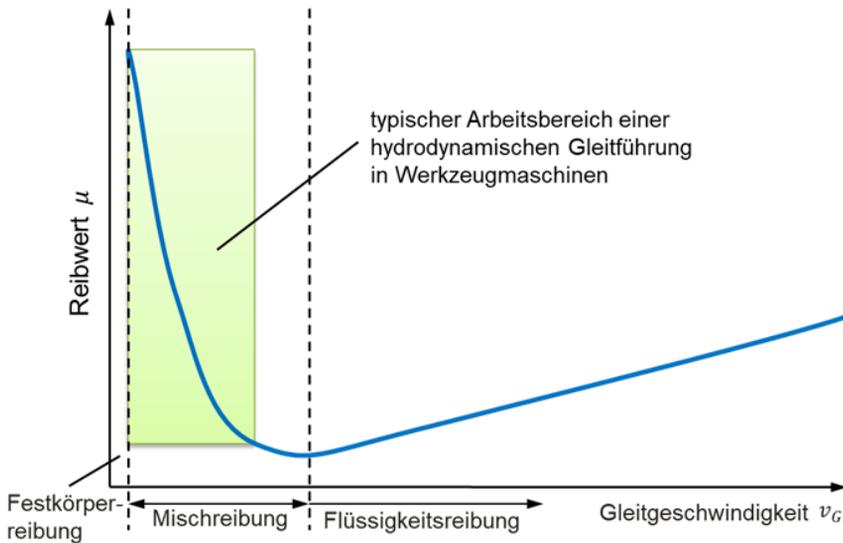


Bild 2-9 Stribeck-Diagramm mit Arbeitsbereich einer hydrodynamischen Gleitführung in einer Werkzeugmaschine

Das hydrodynamische Gleitführungssystem bietet den Vorteil eines geringen Fertigungs- und Montageaufwands. Auch der Wartungsaufwand ist recht gering, da durch Impulsschmieranlagen im Vergleich zu hydrostatischen Führungssystemen wenig Öl im Einsatz ist. Durch den Flächenkontakt sowie der Reibung zwischen den Führungspartnern bietet sich darüber hinaus ein recht gutes statisches Verhalten, d. h. eine hohe Steifigkeit bei Normalbelastung auf die Führungsfläche, sowie gute Dämpfungseigenschaften, die gerade bei Werkzeugmaschinen als positiv angesehen werden.