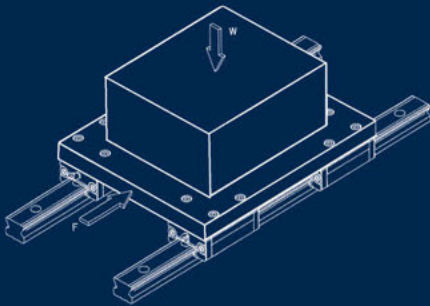


Joachim Klement

Technologie geradliniger und drehender Führungen



Joachim Klement

Technologie geradliniger
und drehender Führungen

Technologie geradliniger und drehender Führungen

Dipl.-Ing. Joachim Klement

Mit 382 Bildern und 10 Tabellen

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic Information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the internet at <http://www.dnb.de>

ISBN 978-3-8169-3144-7

Bei der Erstellung des Buches wurde mit großer Sorgfalt vorgegangen; trotzdem lassen sich Fehler nie vollständig ausschließen. Verlag und Autoren können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen. Für Verbesserungsvorschläge und Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autoren dankbar.

© 2018 by expert verlag, Wankelstr. 13, D-71272 Renningen
Tel.: +49 (0)71 59-92 65-0, Fax: +49 (0)71 59-92 65-20
E-Mail: expert@expertverlag.de, Internet: www.expertverlag.de
Alle Rechte vorbehalten
Printed in Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Vorwort

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Erfahrung langjähriger Werkzeugmaschinen Konstruktions- und Entwicklungstätigkeit aufgezeigt, welche sich bei modernen Führungssystemen an Bearbeitungsmaschinen, Messmaschinen, Handlingachsen und Vorschubbaugruppen ergeben. Es werden praxisbezogene Lösungen angeboten.

Dazu gehört die Beschreibung von Hydrodynamischen Geradführungen, Wälzführungen, kombinierte gleitende und wälzende Geradführungen, Fehler der Gleitführungen und ihre Ursachen, Hydrostatische Gleitführungen, Aerostatische Geradführungen, Elektromagnetische Geradführungen, Schmierung von Gleitführungen, Schmierung von Wälzführungen, Klemmeinrichtung geradliniger Führungen, Dämpfelemente geradliniger Führungen, Messsysteme an geradlinigen Führungen, Hydrodynamische Drehführungen, Wälzende Drehführungen, Hydrostatische Drehführungen, Aerostatische Drehführungen, Elektromagnetische Drehlagerungen, Klemmung drehender Führungen, Schmierung drehender Führungen, Messsysteme drehender Führungen, Dichtung, Schutzabdeckungen, Werkstoffe drehender Führungen, Berechnung Programme, Gleitlager und Wälzlager Schäden.

Die Anforderungen an die Dynamik und gleichzeitig an die Genauigkeit von Produktionsmaschinen, Bearbeitungsmaschinen und Handlingsystemen steigt laufend. Somit bilden Führungen ein wichtiges Bauteil der Maschinen.

Die Texte sind durch zahlreiche instruktive Skizzen ergänzt.

Ich danke den Herren Armin Kopp und Matthias Wippler und Herrn Jonas Frießlich für die nützlichen Hinweise zur Manuskriptgestaltung und für die Herausgabe des Buches. Besonders danke ich meiner Familie für die Geduld bei meinen Schreib- und Recherchearbeiten.

Coburg, März 2018

Dipl. Ing. Joachim Klement

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Gesichtspunkte	1
1.1	Führungsarten	2
2	Aufgabe und Einteilung der Führungen	4
3	Grundformen der Führungen	7
4	Auswahl von Führungen	9
4.1	Eigenschaften von Tischführungen	16
5	Geradführungen	17
5.1	Führungstypen	18
6	Hydrodynamische Führung (Gleitführungen)	29
6.1	Zulässige Flächenpressungen auf Führungsbahnen:.....	29
6.1.1	Werkstoffpaarung	31
6.2	Berechnungsbeispiel für eine Flachprismenführung.....	31
6.2.1	Prismenführung	33
6.2.2	Verschiebekraft	33
6.3	Gestaltung	33
6.3.1	Flachführungen	34
6.3.2	Schwalbenschwanzführung.....	34
6.4	Passleisten	35
6.5	Umgriffleisten	36
6.6	Rundführungen.....	38
6.7	Klemmgefahr	39
6.8	Hydrodynamische Druckbildung	40
6.9	Reibungsarten	43
6.10	Stribeck-Kurve.....	46
6.11	Werkstoffe für Gleitführungen.....	47
7	Wälzende Geradführungen.....	50
7.1	Vergleich zwischen Kugel- und Rollenführungen	54
7.2	Vergleich zwischen Gleit- und Wälzführungen	57
7.3	Crash-Sicherheit.....	57
7.4	Dämpfung.....	59
7.5	Genauigkeit der Anschluss-Konstruktion.....	61
7.6	Ablaufgenauigkeit der Linearführung.....	62

8	Kombinierte gleitende und wälzende Geradföhrung.....	64
9	Fehler der Gleitföhrungen sowie ihre Ursachen, ihre Messung und Korrektur	66
9.1	Messprinzipien	67
9.2	Messung der Tischgerad- und -ebenheit.....	69
9.2.1	Messverfahren mit Lineal und Wegaufnehmern	69
9.2.2	Messverfahren mit positionsempfindlicher Diode (PSD)	69
9.2.3	Messverfahren mit Autokollimator	70
9.2.4	Messverfahren mit elektronischer Neigungswaage	70
9.2.5	Messverfahren mit Laser-Interferometer und Winkeloption	71
9.3	Messung der Geradlinigkeit der Bewegung.....	71
9.4	3D-Formvermessung (Elcolevel).....	72
9.5	Laservermessung	74
9.6	Abweichungs-Korrektur	75
10	Hydrostatische Gleitföhrungen	77
10.1	Eigenschaften und Anwendung der Hydrostatik	77
10.2	Arbeitsweise hydrostatischer Lager	80
10.3	Systeme zur Ölförsorgung	83
10.4	Viskosität und Fließvorgänge des Druckmittels	92
10.5	Tragfähigkeit und Ölfilmsteifigkeit	95
10.6	Bauarten Hydrostatischer Flachföhrungen	102
10.7	Vorteile der hydrostatischen Föhrung.....	105
10.8	Nachteile der hydrostatischen Föhrung	105
11	Aerostatische Geradföhrungen	106
11.1	Präzisionsluftlager – Technologie der Zukunft	106
11.2	Funktionsweise von Luftlagern (aerostatische Lager)	106
11.2.1	Klassifizierung	106
11.2.2	Konventionelle Luftlager	106
11.3	Vorteile der aerostatischen Föhrung	108
11.4	Nachteile der aerostatischen Föhrung.....	108
11.5	Anwendungen	108
12	Elektromagnetische Geradföhrungen.....	112
12.1	Beschreibung der einzelnen Schwebeprinzipien	113
12.1.1	Permanentmagnetisches Schweben (PMS).....	113
12.1.2	Verwendung des permanentmagnetischen Schwebens.....	113
12.1.3	Elektrodynamisches Schweben (EDS).....	113
12.1.4	Verwendung des elektrodynamischen Schwebens	114

12.2	Anwendungen	114
12.2.1	Förderfahrzeug mit Hybrid-Magnetschwebesystem	114
12.2.2	Lineare Magnetführung für eine direkt angetriebene Vorschubachse	117
12.3	Magnetschwebetechnik am Beispiel des Transrapid.....	118
12.3.1	Antriebssystem.....	120
13	Beanspruchung, Steifigkeit und Kontaktsteifigkeit der Geradfürungen	122
13.1	Berechnungsbeispiel:	124
14	Schmierung von Gleitführungen	128
14.1	Ölzufuhr.....	129
14.2	Gleitführungen mit polymeren Lagerwerkstoffen	131
14.3	Wirkung von Abstreifern	132
14.4	Einfluss des Werkstoffes	132
14.5	Einfluss der Flächenpressung	135
14.6	Strukturierung der Gleitflächen	135
14.7	Zusammenfassung.....	137
15	Schmierung von Wälzführungen	138
15.1	Führungs-Beschichtung	141
15.2	Spezialwerkstoffe	143
15.3	Abdichtung und Abstreifer	145
16	Führungselemente geradliniger Führungen.....	149
16.1	Geometrische Grundformen.....	149
16.1.1	Gleitführung.....	149
16.1.2	Wälzführungen:	151
16.2	Ausführungen linearer Profilschienenführungen.....	152
16.2.1	Rollenführungen	156
16.2.2	Profilschienenführung mit eingebautem elektrischen Direktantrieb	159
17	Klemmeinrichtungen geradliniger Führungen.....	162
17.1	Funktionsbeschreibung einer Sicherheitsklemmung für Schienenführungen.....	163
17.1.1	Pneumatisch mit Membrankammer	163
17.1.2	Pneumatisch mit Keilgetriebe	164
17.1.3	Hydraulische Schwerlastklemmung.....	165
17.1.4	Hydraulisches Brems- und Klemmelement mit Keilgetriebe	166
17.2	Maschinenspezifische Klemmlösungen.....	168
18	Dämpfungselemente geradliniger Führungen	170
18.1	Profilschienenführung mit Dämpfelementen.....	172
18.2	Zusammenfassung:.....	174

19	Messsysteme an geradlinigen Führungen	176
19.1	Beispiele von geradlinigen Messsystemen.....	177
19.1.1	Fotoelektrisches Linearmesssystem mit Strichmaßstab.....	177
19.1.2	Inkrementales Längenmesssystem mit fotoelektrischer Abtastung	178
19.1.3	Fotoelektrisches Linearmesssystem mit Code-Lineal.	179
19.1.4	Resolver	179
19.2	Elektrische Messsignal Verarbeitung	180
19.3	Eigenfrequenz des Messsystems.....	180
19.4	Längenmesssystem „Closed Loop“ und „Semiclosed Loop“	181
19.4.1	Vergleich zwischen „Semiclosed Loop“ und „Closed Loop“ Messsystem.....	182
19.5	Prinzip und Baumaße der Längenmessgeräte	182
19.6	Profilschienenführung mit integriertem Wegmesssystem	184
19.7	Fehleinflüsse der direkten und indirekten Wegmessung	187
19.8	Übersicht über digitale Messverfahren	188
19.9	Übersicht über analoge Messverfahren.....	189
20	Drehführungen	190
21	Hydrodynamische Drehführungen	193
21.1	Aufbau der hydrodynamischen Spindel.....	193
21.1.1	Drehzahl.....	195
21.1.2	Steifigkeit.....	195
21.1.3	Schmierung	195
21.2	Anwendungsbeispiele mit hydrodynamischen Spindeln	197
22	Wälzende Drehführungen.....	205
22.1	Lagerauswahl für wälzgelagerte Werkzeugmaschinen-Spindeln	206
22.2	Thermisch neutrale Hauptspindellagerung	209
22.2.1	Ermittlung des thermisch neutralen Abstandes	209
22.3	Anwendungsbeispiel	213
22.4	Ausgeführte wälzende Drehführungen von Werkzeugmaschinen	215
22.4.1	Lagerungssysteme für die Arbeitsspindeln von Dreh- und Fräsmaschinen.	215
22.4.2	Erfahrungen mit dem Fest-/ Loslager-System	217
22.4.3	Erfahrungen mit dem starren Lagerungssystem.....	220
22.4.4	Bearbeitungszentrum Arbeitsspindellagerung	220
22.4.5	Schleifmaschinen Spindellager	221
22.5	Rundachsenlagerung	221
22.6	Rundachslager mit Zusatzfunktionen	222
22.6.1	Rundachslager mit integriertem Winkel-Messsystem	223
22.6.2	Schwingungsgedämpftes Rundtischlagersystem	224
22.7	Drahtwälzlager für Leichtbau-Konstruktionen.....	227

23	Hydrostatische Drehführungen	228
23.1	Taschen-Drucköl-Systeme	231
23.1.1	Hydrostatische Lager ohne zusätzliche Regelung.....	231
23.1.2	Hydrostatische Lager mit Regelung	233
23.2	Hydrostatische Spindeln.....	234
23.3	Hydrostatische Axiallager.....	238
23.4	Hydrostatischer Gewindetrieb im Vergleich zum Linearmotor.....	239
23.4.1	Die Steife bei statischer sowie dynamischer Belastung	241
23.4.2	Die maximale Beschleunigung	242
23.5	Anwendungs-Beispiele	245
24	Aerostatische Drehführungen	247
24.1	Aufbau einer aerodynamischen Spindel.....	249
24.2	Anwendungen	250
25	Elektromagnetische Drehlagerungen	251
25.1	Unterschied zwischen magnetisch gelagerten Spindeln und herkömmlich gelagerten Spindeln	254
25.2	Prinzip der Regelung.....	255
25.3	Vor- und Nachteile magnetisch gelagerter Spindeln	256
25.4	Anwendungen magnetisch gelagerter Spindeln	257
25.5	Aufbau einer Magnetlager-Motorspindel	260
25.6	Vorteile von magnetgelagerten Motorspindeln im Formenbau	262
25.7	Grenzen von Magnetlager-Motorspindeln	264
25.8	Anwendungen	265
25.8.1	Rundtisch mit kombinierten mechanischen Lager und Magnetlagersystem	265
25.8.2	Rundtisch mit Magnetlager und Führung	265
26	Klemmung drehender Führungen	270
26.1	Funktion verschiedener Klemmsysteme.....	271
26.1.1	Pneumatisches Klemm- und Bremsselement	271
26.1.2	Klemmelement zur Drehmomentaufnahme mit Federenergiespeicher	272
26.1.3	Klemmsystem „RotoClamp“ Fabrikat Hema	273
26.1.4	Axiale Klemmung einer Fräskopfachse	278
26.1.5	Radiale Klemmung einer Schwenkfräskopfachse	279
27	Schmierung drehender Führungen	283
27.1	Aufgaben der Schmierung.....	283
27.2	Fettschmierung.....	285
27.3	Öl+Luft-Schmierung	289
27.3.1	Vorteile der Öl+Luft-Schmierung	290
27.3.2	Schmierstoffmenge für Wälzlager	291
27.3.3	Anforderungen an den Schmierstoff.....	292
27.3.4	Druckluft.....	293

27.3.5	Schmierstoffzuführung	294
27.3.6	Öl+Luft-Schmieranlagen.....	296
27.4	Schmierung mit großen Ölmengen.....	297
27.4.1	Gestaltung der Einspritzschmierung.....	298
27.5	Schäden durch mangelhafte Schmierung	302
27.6	Selbstschmierende Gleitlager.....	304
28	Messsysteme für drehende Führungen	312
28.1	Fotoelektrischer Drehgeber mit Strichscheibe.....	312
28.2	Axial-Radiallager mit Messsystem.....	314
28.2.1	Vorteile des Messsystems.....	317
29	Dichtung	319
29.1	Dichtung geradliniger Führungen	319
29.2	Dichtung drehender Führungen.....	322
29.2.1	Berührende Dichtsysteme	322
29.2.2	Berührungsfreie Dichtsysteme	327
29.2.3	Sperrluft-Dichtsysteme	332
29.2.4	Drehende Dichtungen mit Sensor-Verschleißerkennung	336
30	Reibung	338
30.1	Äußere Reibung:	339
30.2	Innere Reibung.....	340
30.3	Reibung in der Schmierungstechnik.....	341
30.3.1	Tribologische Eigenschaften	341
30.4	Reibungsverhältnisse im Zahnradgetriebe	342
30.5	Reibungsverhältnisse bei Vorschubantrieben	343
31	Führungs-Schutzabdeckungen	347
31.1	Teleskop-Stahlabdeckungen.....	348
31.1.1	Stahlabdecksysteme für hohe Verfahrgeschwindigkeiten	349
31.2	Rolloabdeckungen.....	351
31.3	Faltenbälge	352
31.3.1	Schutzabdeckungen im Bereich Großbearbeitungszentren	355
31.4	Profilierte Führungsbahnabstreifer	357
32	Werkstoffe für drehende Führungen	358
32.1	Gleitlager	358
32.2	Normen	359
32.3	Hochbelastete Spindeln aus faserverstärkten Kunststoffen	360

33	Berechnungsprogramme Linearführungselemente	362
33.1	Berechnungsprogramm INA „Bearinx“	362
33.1.1	Programm-Eingabeschritte.....	362
33.1.2	Berechnungs-Beispiel	366
33.2	Berechnungsprogramm Bosch Rexroth „Linear Motion Designer“	368
33.3	Berechnungsprogramm für Schneeberger „Monorail“ Führungen	368
34	Gleitlager- und Wälzlager-Schäden	371
34.1	Gleitlager-Schäden.....	371
34.2	Wälzlager-Schäden	375
34.2.1	Überwachung der Lager	378
35	Anwendungsbeispiele	379
36	Literaturverzeichnis	391
37	Stichwortverzeichnis	398

1 Allgemeine Gesichtspunkte

Führungen sind neben den Antrieben und Gestellen die wichtigsten Bauteile der Maschinen. Zur Bewegung der Supporte und Arbeitstische sowie der Lagerung von Hauptspindeln sind Führungen erforderlich.



Bild 1.1: Baugruppen spanender Werkzeugmaschinen

Die Aufgabe einer Führung ist, die Geradlinige oder Drehbewegung umzusetzen. Dabei müssen zum Teil sehr hohe Kräfte aufgenommen werden. Außerdem hängen Genauigkeitswerte in starken Maßen von den Führungen ab.

Besondere Anforderungen an die Führungen und Lagerungen besonders von Werkzeugmaschinen sind:

- hohe Führungsgenauigkeit über die gesamte Betriebsdauer
- kein mechanisches und thermisches Verklemmen
- Geringe Haft- und Gleitreibung und Verschleiß
- Günstige Herstellung und Betriebskosten

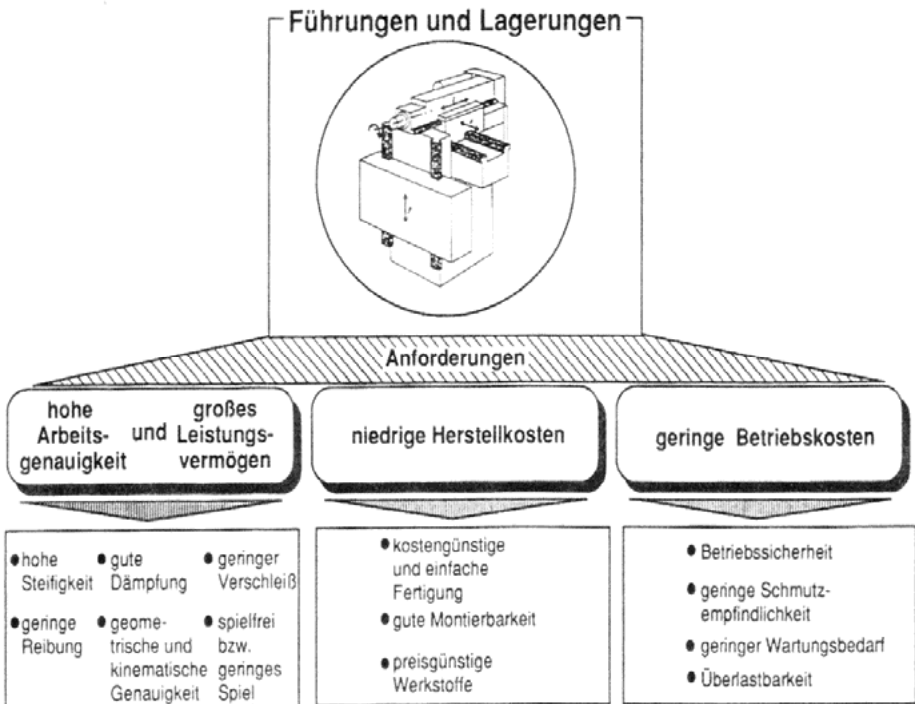


Bild 1.2: Anforderungen an Führungen und Lagerungen

1.1 Führungsarten

Bewegungsführungen ermöglichen während des Abspanvorgangs genaue geometrische Bewegungen von Maschinenteilen, die Werkstück oder Werkzeug tragen. Sie sind nötig zur Erzeugung der gewünschten Wirkbewegungen.

Verstellführungen sind während des Abspanens verschraubt oder geklemmt, sie dienen zum Beispiel zur Festlegung des Ausgangs- oder Endpunktes der Wirkbewegung.

Bei Bewegungsführungen sollen die Maschinenteile quer zur Führungsrichtung ihre Lage beibehalten, während sie in Führungsrichtung vom Antrieb bewegt werden. Die Geschwindigkeit in den Führungen richtet sich nach den Schnitt-, Vorschub- oder Zustellgeschwindigkeiten. Erstere können zum Beispiel im Verhältnis $n_{\max} : n_{\min} = 200$, letztere zum Beispiel im Verhältnis $v_{\text{Eilgang}} : v_{\text{Vorschub}} = 1000$ verändert werden. Bei den hohen Genauigkeitsanforderungen, die an die Führungen gestellt werden, ergeben sich allein schon aus den Geschwindigkeitsbereichen Probleme in Bezug auf Art die Führungen (gleitend, wälzend, hydrostatisch). Aus der unterschiedlichen Aufgabenstellung folgt, dass Bewegungsführungen schwieriger zu konstruieren und zu behandeln sind als Verstellführungen.

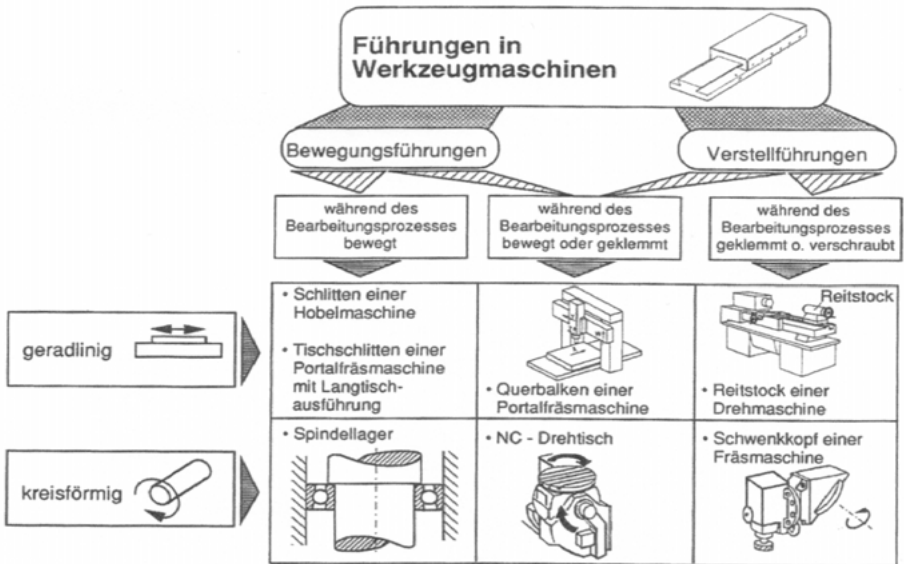


Bild 1.3: Führungen in Werkzeugmaschinen

Es kommt jedoch auch vor, dass Bewegungsführungen für bestimmte Aufgaben geklemmt werden müssen. Dann sind schädliche Nebenwirkungen, wie fehlerhafte Verschiebung oder Deformation, zu vermeiden.

Hohe Führungsgenauigkeit bedeutet:

- geringe Haft- und Gleitreibung für genaues Positionieren mit möglichst kleinen Vorschubkräften.
- Hohe statische Steifigkeit und geringes Führungsspiel, um die Abweichung von der Soll-Bewegung der geführten Bauteile bei unterschiedlichen Belastungen gering zu halten
- Hohe Dämpfung in Trag- und in Verfahrrichtung, um die Neigung zum Rattern und Ruckgleiten zu verringern
- Hohe thermische Steifigkeit zur Erhaltung der Führungsgenauigkeit während des gesamten Betriebszyklus
- Niedriger Verschleiß

Die Güte der Führungen beeinflusst die Dauergenauigkeit der Maschine besonders stark. Ein großer Prozentsatz der Herstellkosten einer Maschine entfällt auf die Führungen.

Führungen erzeugen geradlinige oder kreisförmige Bewegungsbahnen. Durch Kombination sind aber auch andere Bahnen möglich. Die Spindel eines Bohrwerkes zum Beispiel wird axial verschoben (gerade geführt) und gedreht. Entsprechend werden die Führungen in Gerad- oder Längsführungen, Kreis- oder Drehführungen mit je einem Freiheitsgrad und Gerad- und Kreisführungen mit zwei Freiheitsgraden eingeteilt. Kreisführungen kennzeichnen im Schrifttum vorwiegend Arbeitsspindellagerungen.

2 Aufgabe und Einteilung der Führungen

Führungen und Lagerungen müssen folgende Eigenschaften besitzen:

- geringe Reibung und Stick-Slip-Freiheit als Voraussetzung für exaktes Positionieren mit geringen Vorschubkräften,
- geringen Verschleiß und Sicherheit gegen Fressen, damit die Genauigkeit über lange Zeit erhalten bleibt,
- hohe Steifigkeit und geringes Führungsspiel beziehungsweise Spielfreiheit, um die Lageveränderungen der geführten Bauteile unter Last gering zu halten,
- gute Dämpfung in Trag- und Bewegungsrichtungen, um Überschwingungen der Vorschubantriebe und Ratterneigung der Maschine zu vermeiden.

Entsprechend den geforderten Führungsaufgaben werden dem zu führenden Element von den drei geradlinigen und den drei drehenden Freiheitsgraden der Bewegung mindestens vier – in den meisten Fällen fünf – Freiheitsgrade entzogen.

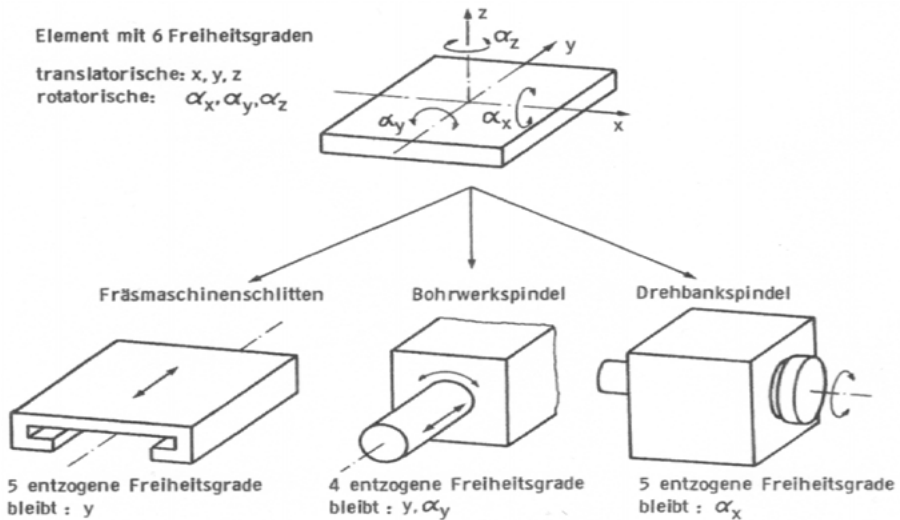


Bild 2.1: Bewegungsfreiheitsgrade

So besitzt beispielsweise ein geradlinig geführter Schlitten nur noch einen geradlinigen Freiheitsgrad. Die Bohrspindel in der Pinolenführung eines Bohrwerkes hat einen geradlinigen und einen drehenden Freiheitsgrad, während eine Arbeitsspindel einer Drehmaschine nur noch einen drehenden Freiheitsgrad behält.

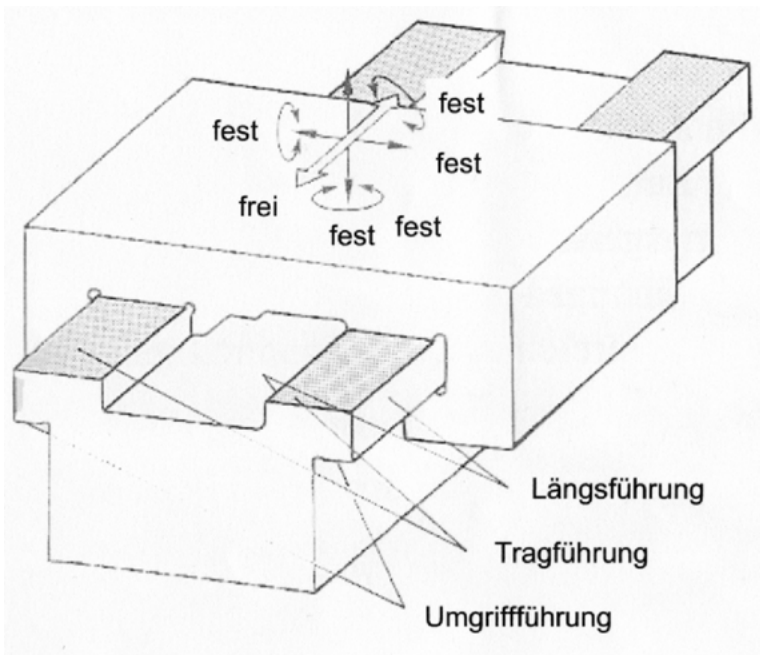


Bild 2.2: Eigenschaften von Tischführungen an Vorschubachsen

Tabelle 2.1: Führungsarten

	Gleitführung	Wälzführung	Hydrostatische Führung	Aerostatische Führung	Lineare Profilschienenführung
Reibungs- und Verschleißverhalten	Ungünstig, durch Werkstoffauswahl beeinflussbar	Günstig	Sehr günstig	Außerordentlich günstig	Günstig
Gefahr von Slick-Slip	Vorhanden	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden
Anforderungen an Material- und Oberflächenqualität	Sehr hoch	Hoch	Gering	Gering	Gering (Montagefläche) (für OEM-Anwender)
Maßnahmen zur Erzielung hoher Dauergenauigkeit	Sehr aufwendig	Wenig aufwendig	Entfallen	Entfallen	Entfallen (für OEM-Anwender)
Steifigkeit	Sehr gut	Gut, falls vorgespannt und Umbauteile steif genug sind	Unterschiedlich, je nach Ölversorgungssystem. Hohe Steifigkeit bei Membrandrosseln	Weniger gut	Gut, falls vorgespannt und Montage auf genügend steife Teile erfolgt
Dämpfungsgrad	Sehr hoch, nicht konstant $D_{\text{mech}} \geq 0,1 \dots 0,3$	Gering $D_{\text{mech}} \leq 0,1$	Hoch, durch konstruktive Maßnahmen beeinflussbar $D_{\text{mech}} = 0,15 \dots 0,25$	Sehr gering $D_{\text{mech}} \leq 0,05$	Gering $D_{\text{mech}} \leq 0,1$
Herstelleraufwand	Sehr hoch	Kaufteile, aufwendig bei Montage, die sorgfältig erfolgen muss	Wenig, jedoch Hydrauliksystem an der Maschine erforderlich	Gering, jedoch Luftaufbereitung erforderlich	Kaufteile Montage muss sorgfältig erfolgen
Bevorzugter Einsatzbereich	Werkzeugmaschinen, oft auch zusammen mit Wälzführungen als kombinierte Führung	Werkzeugmaschinen	Großwerkzeugmaschinen, HSC-Anwendungen	Messmaschinen	Werkzeugmaschinen, Handhabungstechnik Allgemeine Automatisierung

3 Grundformen der Führungen

Ausgangsform für Geradföhrungen sind die im folgenden Bild (A-D) dargestellten Föhrungs-
paare.

Das Föhrungspaar im Bild D ist Ausgangsform für Drehföhrungen oder kombinierte Dreh-
Geradföhrungen.

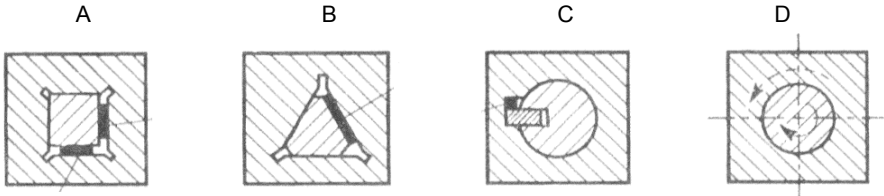


Bild 3.1: Grundformen der Föhrungspaare

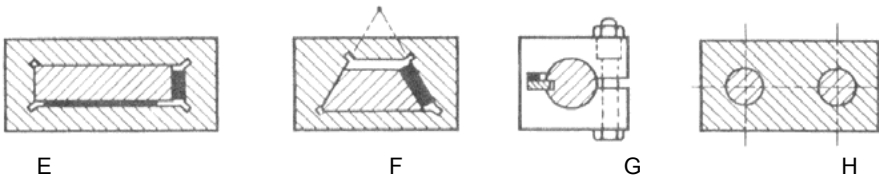


Bild 3.2: Abwandlung der Grundformen der Föhrungspaare

Die Bilder (E-H) zeigen weitere Ausgangsformen. Aus der quadratischen ist eine rechteckige, aus der dreieckigen eine trapezförmige Föhrung geworden. Die Spielfreiheit der Föhrungspaare erreicht man durch Einbau genauer Passleisten. (Im Bild schwarz angelegt.)

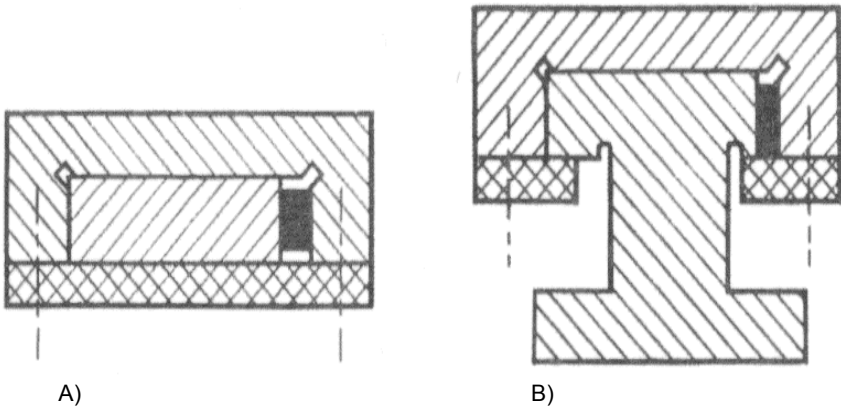
Für die rechteckige Form sind zwei Passleisten, für die dreieckige Form ist eine erforderlich. Die Dreiecksform liegt dem bekannten Prisma zugrunde. Eine Geradföhrung mit zylindrischen Grundformen ist nur mit großem Aufwand spielfrei zu fertigen. In der Ausführung nach Bild G ist das gesamte Spiel zu beseitigen, welches auf dem Umfang des Zylinders besteht, nach Bild H ähnlich.

Bei jedem Herstellungsverfahren muss mit gewissen Fehlern gerechnet werden. Fehlerhafte Fertigung aber bedingt bei allen Grundformen nach den Bildern A-H Spiel oder Zwang.

Die Grundformen nach Bild A und B werden als statisch bestimmt betrachtet. Bei einem zylindrischen Föhrungselement nach Bild C ist dieser Zustand nicht garantiert.

Die Bearbeitung von zylindrischen Föhrungsteilen ist zwar einfacher als die von ebenen Teilen, dafür ergeben sich aber für zylindrische Elemente Nachteile, wenn die Herstellungsgenauigkeit nicht ausreicht, da sie normalerweise nicht nachgearbeitet werden können.

Vergleicht man die Grundformen der Bilder A und B, so stellt man fest, dass die Rechteckform vier, die Dreieckform drei bearbeitete Flöchen für jedes Föhrungselement benötigt. Die Anzahl der zu bearbeitenden Föhrungsflöchen kann man etwa proportional dem Fertigungsaufwand setzen.



*Bild 3.3: Grundformen für Geradföhrungen
 A) Schlitten geteilt, unten geschlossen
 B) Schlitten unten offen*

Das äußere Föhrungsteil kann in der Praxis selten das innere Teil voll umschließen. Das äußere Teil muss geöffnet werden können oder ganz offen bleiben. Die folgenden Bilder A und B sind Beispiele hierfür. Zylindrische Föhrungsteile – also Bohrung und Zylinder – sollten nicht geteilt ausgeföhrt werden. Die Grundform nach Bild C hat eine direkte praktische Bedeutung. Ihr Einsatzgebiet ist aber eingeschränkt, weil sie nicht geteilt und der Schlitten nicht herausgehoben werden kann.

Die im Einsatz befindlichen Geradföhrungen sind oft Kombinationen aus den Grundformen der Bilder A bis H.

Die Drehföhrungen (Lagerungen) entsprechen dem in Bild D dargestellten Prinzip. Durch verschiedene Lagerungsarten und Ausföhrungen versucht man bei ihnen: großen Wirkungsgrad, hohe Steifigkeit und Genauigkeit, sowie Spielfreiheit zu erzielen. Von der Lagerungs- beziehungsweise Föhrungsart sind die Grundformen der Föhrungselemente nahezu unabhängig. An die Stelle eines Schmierfilmes bei Gleitföhrungen treten Rollkörper wie Kugeln oder Walzen bei Wälzföhrungen. Bei hydrostatischen Föhrungen unterliegt der Schmierfilm den Gesetzen der Hydrostatik.

4 Auswahl von Führungen

Eine Analyse der unterschiedlichen Geradfürungen an Werkzeugmaschinen hat ergeben, dass eine Reihe von konstruktiven Merkmalen zur Erfüllung der Funktion bei allen Führungen vorkommt.

Die Merkmale lassen sich in folgende Punkte gliedern:

1. Führungsprinzip
2. Form der Führungsbahnen
3. Konstruktive Varianten
4. Schutzvorrichtungen
5. Schmiersystem
6. Schmierstoff
7. Werkstoffpaarung
8. Bearbeitung

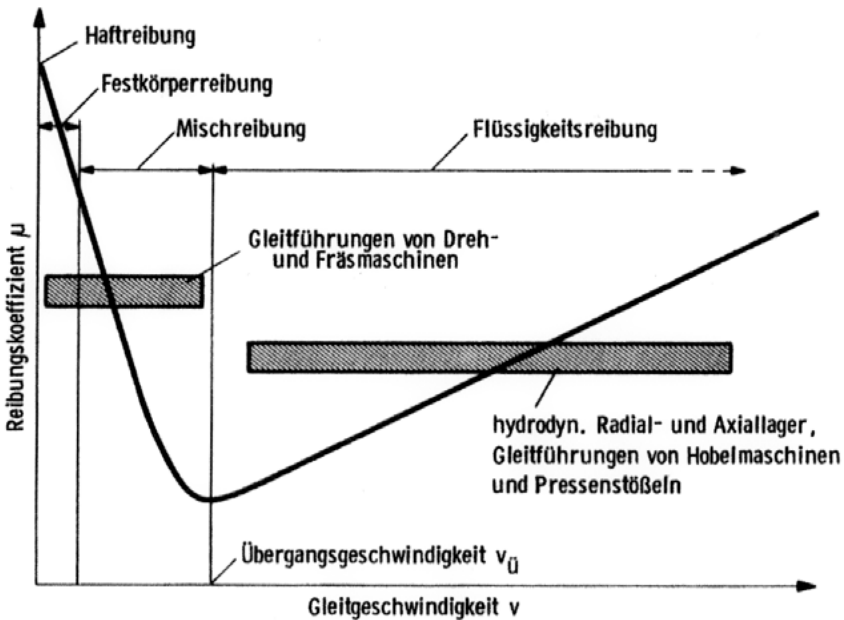


Bild 4.1: Führungszuordnung innerhalb der Stribeck-Kurve

Diese Grobpunkte können auch als Konstruktionsschritte für den Ablauf der Lösungsfindung dienen. Dabei ist die Reihenfolge der Entscheidungsstufen nicht zwingend. Im Lösungskonzept einer Führungskonstruktion müssen diese Entscheidungsstufen festgelegt werden.

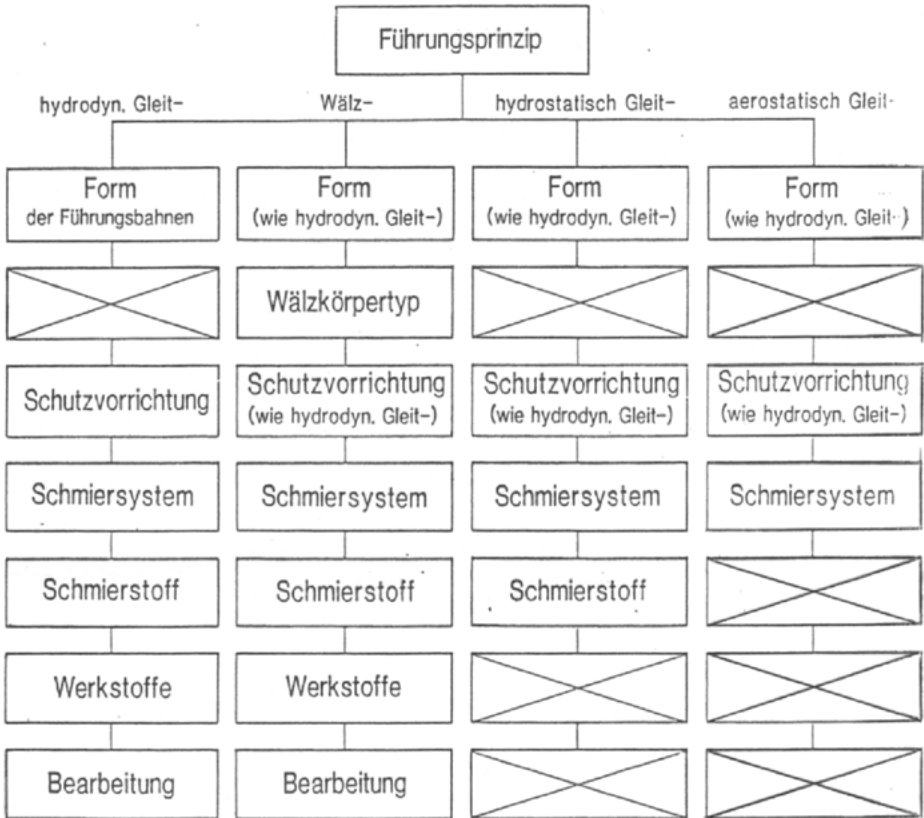
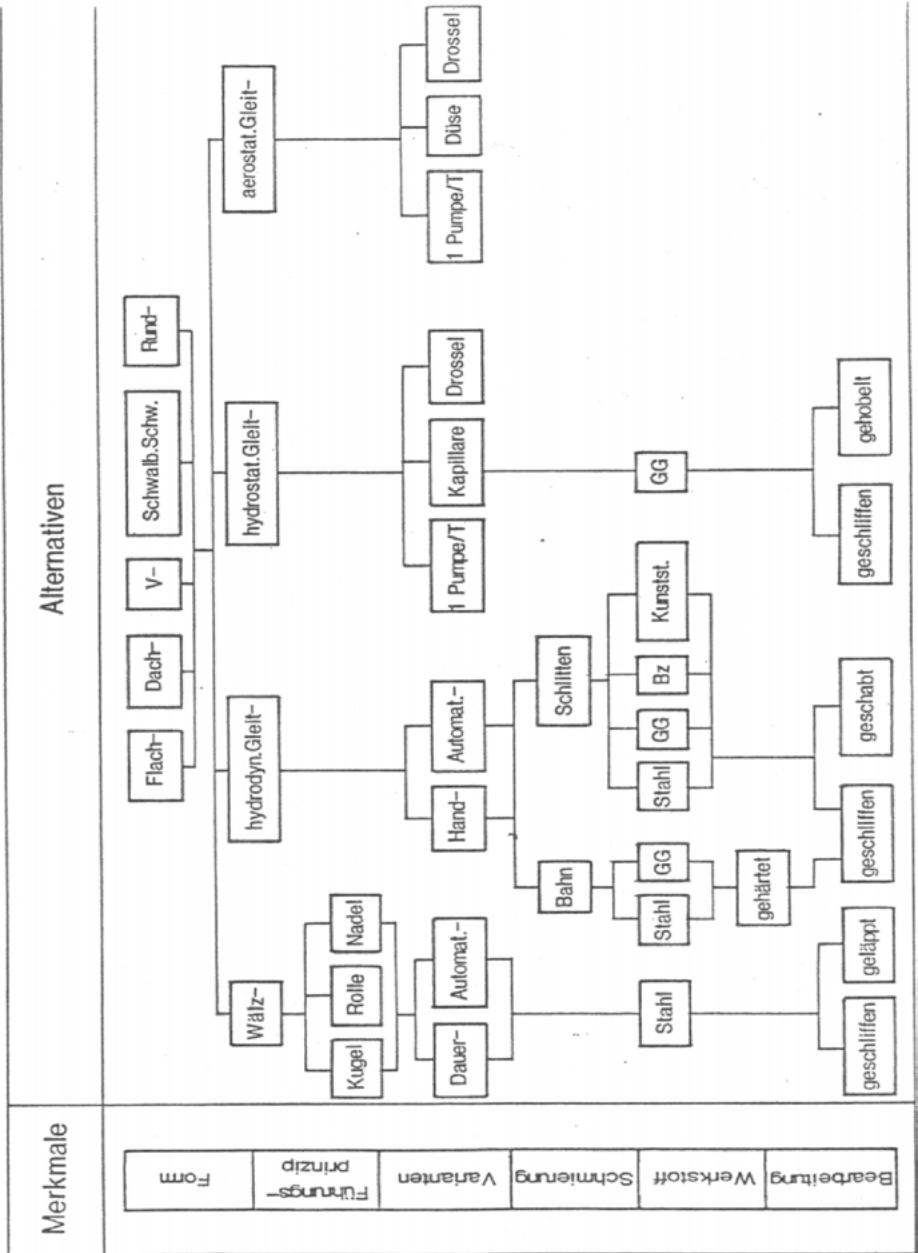


Bild 4.2: Entscheidungsstufen

Bild 4.3: Schema zur Auswahl von Führungen



Für jedes konstruktive Merkmal gibt es eine Anzahl von Lösungsvarianten. So lassen sich für das Führungsprinzip zum Beispiel vier Alternativen aufzeigen:

- Wälzführung
- Hydrodynamische Gleitführung
- Hydrostatische Gleitführung
- Aerostatische Gleitführung

Innerhalb der verschiedenen Führungsprinzipien gibt es zum Teil unterschiedliche Alternativen für ein konstruktives Merkmal. Die Wälzführung kennt zum Beispiel als Werkstoffpaarung nur gehärtete Stähle, während die hydrodynamische Gleitführung eine reiche Auswahl an Werkstoffen hat. Für die hydrostatische und aerostatische Gleitführung ist die Werkstoffpaarung nicht entscheidend, da sich die Führungsflächen nicht berühren. Die Vielzahl von Alternativen ist in ein Einteilungsschema Bild 4.3 eingeordnet.

Als Ordnungsgesichtspunkte für das Einteilungsschema sind die konstruktiven Merkmale „links“ im Bild gewählt.

Das Alternativ-Spektrum teilt sich in vier Äste: Wälz-, hydrodynamische und hydrostatische und aerostatische Gleitführungen.

Eine Unterteilung der konstruktiven Alternativen ist notwendig, weil es innerhalb der Prinzipien unterschiedliche Alternativen gibt.

Die Wälzführungen haben eine besondere Vielfalt in der Stufe „Varianten“, zum Beispiel mit unterschiedlichen Wälzkörpern. Bei der hydrostatischen und aerostatischen Gleitführung liegt ein Konstruktionsschwerpunkt bei dem Schmiermittel-Versorgungssystem und bei den hydrodynamischen Gleitführungen kommt es besonders auf die Werkstoffpaarung an.

Um den Entscheidungsprozess für eine Alternative in den Entscheidungsstufen zu erleichtern, wird dieses Alternativspektrum einer Nutzwertanalyse unterzogen. Als Beurteilungskriterien sind die Eigenschaften von Führungen geeignet. Eine Anzahl von Eigenschaften wurde ausgewählt, die zur Beurteilung von Geradführungen an Werkzeugmaschinen dient.

Diese sind:

1. Baugröße
2. Dämpfung in Tragrichtung
3. Dämpfung in Fahrrichtung
4. Einlaufverhalten
5. Fressneigung
6. Kosten
7. Montierbarkeit
8. Schmiermittelbedarf
9. Schmutzempfindlichkeit
10. Stick-Slip-Neigung
11. Spielfreiheit
12. Störanfälligkeit
13. Verlustleistung
14. Verschleiß
15. Wartungsbedarf

Im Einzelnen:

- Zu 1: Mit der Baugröße wird sowohl die Höhe der Führungsfuge als auch der Bauraum für verschiedene Anordnungen der Führungsflächen angesprochen.
- Zu 2: Die Dämpfung in Tragrichtung bezeichnet die Dämpfungskomponente senkrecht zur Verfahrrichtung des Schlittens.
- Zu 3: Die Dämpfung in Fahrrichtung wirkt in Bewegungsrichtung des Schlittens.
- Zu 4: Das Einlaufverhalten einer Führung bezeichnet die Veränderung ihrer Eigenschaften vom Neuzustand bis zum eingelaufenen Zustand.
- Zu 5: Das Fressen von Führungen tritt bei starker Überbelastung auf und bewirkt eine Zerstörung der Materialoberfläche.
- Zu 6: Die Kosten umfassen sowohl die Herstellkosten als auch die Betriebskosten und stehen den technischen Eigenschaften gegenüber.
- Zu 7: Die Montierbarkeit erfasst die leichte Zugänglichkeit bei etwaigen Überholungs- oder Nachstararbeiten.
- Zu 8: Der Schmiermittelbedarf ist bei Lebensmittelmaschinen von Bedeutung, wo zum Teil kein Schmiermittel benutzt werden darf. Eine hydrostatische Führung hat zum Beispiel einen hohen Schmiermittelbedarf.
- Zu 9: Die Schmutzempfindlichkeit bezieht sich auf die Führungsfuge.
- Zu 10: Die Spielfreiheit bezieht sich auf das seitliche Spiel.
- Zu 11: Das Ruckgleiten (oder Stick-Slip) tritt unter Umständen bei langsamen Vorschubgeschwindigkeiten auf und ist für die Positioniergenauigkeit von Bedeutung.
- Zu 12: Die Steifigkeit ist eine wichtige statische und dynamische Eigenschaft einer Werkzeugmaschine.
- Zu 13: Die Störanfälligkeit verursacht unerwünschte Ausfallzeiten.
- Zu 14: Die Verlustleistung wird durch Reibung an den Führungsbahnen und durch Zusatzaggregate hervorgerufen.
- Zu 15: Der Verschleiß umfasst die allmähliche Zerstörung durch Abtrag oder Ermüdung.
- Zu 16: Der Wartungsbedarf hat eine Bedeutung, da Wartungszeiten nicht produktive Zeiten der Maschine sind.

Bei der Auswahl der Eigenschaften ist zu beachten, dass möglichst wenig gegenseitige Überschneidungen und Abhängigkeiten auftreten.

So beschreiben zum Beispiel die Lebensdauer und der Verschleiß den gleichen physikalischen Zusammenhang und sind deshalb bei der Untersuchung unter Verschleiß behandelt.

Um einen einheitlichen Bewertungsmaßstab für die aufgeführten Bewertungskriterien zu bekommen, wird ein Punktsystem benutzt. Es werden 5 Bewertungsstufen von 0 bis 4 zugelassen, wobei 0 die schlechteste und 4 die beste Punktzahl ist.

Jede Lösungsalternative bekommt für jede Eigenschaft eine Bewertungspunktzahl zugeordnet, die angibt, wie gut die Eigenschaft erfüllt ist.

Auf diese Weise verbindet eine Bewertungsmatrix zwischen den Alternativen und den Beurteilungskriterien.

Beim Konstruktionsprozess wird eine Führung für eine spezielle Aufgabe konzipiert. Es werden ganz bestimmte Anforderungen in dieser Aufgabe gestellt. Die eine Führung soll besonders preiswert sein, die andere darf keine Stick-Slip-Erscheinungen zeigen und soll dennoch kostengünstig sein. Bei einer Dritten kommt es im Wesentlichen auf die hohe technische Qualität an, dafür weniger auf den Preis. Die Einbeziehung der speziellen Aufgabe wird durch die Gewichtung der Beurteilungskriterien erreicht.

Durch die Gewichtung zwischen 0 und 9 wird angegeben, wie wichtig die jeweilige Eigenschaft für diese Führung ist. Bei Gewicht 0 geht die Eigenschaft gar nicht ein und bei 9 sehr stark.

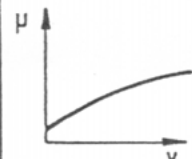
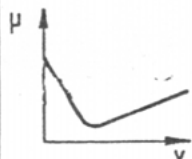
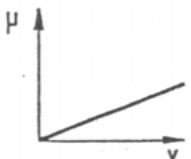
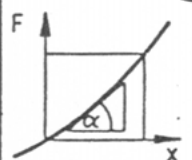
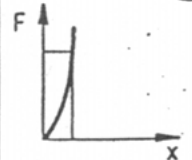
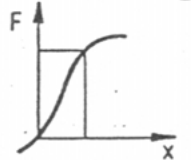
Alt. Eig.	Wälzführung	Gleitführung	hydrostatische Führung
Stick - Slip Neigung	 (3)	 (1)	 (4)
Steifigkeit $\tan \alpha$	 (1)	 (4)	 (3)
Verschleiß	mittel (2)	stark (0)	nicht vorhanden (4)
Kosten	mittel (3)	gering (4)	hoch (0)

Bild 4.4: Bewertung von Führungsprinzipien

Eig. \ Alt.	Wälz-	Gleit-	hydr.-	Gewicht 1.)	Gewicht 2.)	Gewicht 3.)
Stick-Slip-Neigung	③	①	④	1	9	5
Steifigkeit $\tan \alpha$	①	④	③	4	2	5
Verschleiß	②	①	④	4	2	5
Kosten	③	④	①	9	8	3
1.) preiswerte Führung	42	53	32			
2.) Führung ohne Stick-Slip	57	49	50			
3.) technisch hochwertig Führung	39	37	55			

Bild 4.5: Durchführung der Nutzwertanalyse

Bei einer einfachen Führung für eine nicht sehr genaue Arbeit wird wenig Wert auf die Stick-Slip-Neigung gelegt. Auch auf Steifigkeit und Verschleiß kommt es nicht besonders an, wohl aber auf den Preis. Siehe dazu die Gewichtung im Bild 4.5.

Um ein Bewertungsergebnis zu erhalten, werden die Gewichte mit den Bewertungspunkten multipliziert und spaltenweise die Summe der entstehenden Produkte gebildet. So entsteht eine Punktzahl für jede Alternative. Die Alternative mit der höchsten Punktzahl ist die günstigste für diese spezielle Aufgabe. Für diesen Fall ist eine Gleitführung die günstigste mit 53 Punkten. Die zweitgünstigste ist die Wälzführung, und die hydrostatische Führung ist für diesen Anwendungsfall ungünstig.

Entsprechend ist bei einer Schleifmaschine das Reib-Geschwindigkeitsverhalten sehr entscheidend. Dafür sind die Kräfte nicht hoch, so dass Steifigkeit und Verschleiß eine geringere Rolle spielen. Dennoch soll auf die Kosten geachtet werden. Hier bietet sich eine Wälzführung als günstige Alternative an mit 57 Punkten. Die von den technischen Kriterien hochwertigste Führung ist die hydrostatische Führung.

Die für die Varianten im Einzelnen möglichen Entscheidungsstufen beziehungsweise Bewertungskriterien sind nachfolgend dargestellt.

4.1 Eigenschaften von Tischführungen

Tabelle 4.1: Eigenschaften von Tischführungen

	Gleitführung	Wälzführung	Hydrost. Führg.	Aerost. Führg.
Reibungs- und Verschleißverhalten	ungünstig durch Werkstoffauswahl beeinflussbar	günstig	sehr günstig	Außerordentlich günstig
Stick-Slip Gefahr	vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden	nicht vorhanden
Anforderung an Material- und Oberflächenqualität	sehr hoch	hoch	gering	gering
Maßnahmen zur Erzielung hoher Dauergenauigkeit	sehr aufwendig	wenig aufwendig	entfallen	entfallen
Steifigkeit	Normalerweise sehr gut	gut, falls Führung vorgespannt und Umbauteile steif genug.	Unterschiedlich, je nach Ölversorgungssystem. Hohe Steifigkeit bei Membrandrosseln	weniger gut
Dämpfungsgrad	sehr hoch, aber nicht konstant	gering	hoch, konstruktiv relativ einfach zu beeinflussen	sehr gut

5 Geradföhrungen

Trends in Werkzeugmaschinen nach h6herer Spanleistung, zunehmender Flexibilität, besserer Bearbeitungsqualität, h6herer Dynamik und Leistungsdichte wirken sich auf die Gestaltung von Maschinenstruktur und Komponenten aus. Durch die zunehmende Dynamik m6ssen bewegte Massen m6glichst reduziert werden, gleichzeitig aber die dynamische Steifigkeit m6glichst hoch sein. Somit m6ssen Eigenschaften wie Dämpfung, statische Steifigkeit und Tragfähigkeit von Komponenten die erforderlichen Werte annehmen, die von der Maschinenstruktur am Einbauort gefordert werden, damit sich eine hohe Gesamtsteifigkeit in der Bearbeitungsebene ergibt.

Große Dampfungsfahigkeit, hohe Genauigkeit und Steifigkeit bei vertretbarem Konstruktions- und Fertigungsaufwand sowie ein kalkulierbares Risiko bei Neukonstruktionen sind Merkmale der Gleitföhrungen.

Forderungen an Föhrungen, diese sollen:

- die Lage des geföhrten Teiles eindeutig bestimmen
- die äußeren Kräfte (Prozess- und Gewichtskräfte) mit Sicherheit aufnehmen, das heißt auch unter Kraffteinwirkung m6ssen sie ihre Lage beibehalten.
- Funktionsgerecht bemessen sein, damit sie unter Last nicht kippen, ecken oder abheben k6nnen. Das Kippen oder Ecken kann weitestgehend vermieden werden, wenn das Verhältnis von Föhrungslange zu Föhrungsbreite m6glichst groß ist. Deshalb sollte die Forderung m6glichst erf6llt sein:

$L/B \geq 2$

L in mm Föhrungslange

B in mm Föhrungsbreite

- einen m6glichst geringen Verschleiß haben und bei eingetretenem Verschleiß leicht nachstellbar beziehungsweise nacharbeitbar sein.
- leicht vor Verschmutzung und Beschädigung zu sch6tzen sein.
- durch leicht zugängliche Schmierstellen gut zu schmieren sein.