

Eigenschaften der Linearführung

Anforderungen an die Linearführung

Hohe zulässige Belastung
 Hochsteif in allen Richtungen
 Hohe Wiederholgenauigkeit
 Hohe Laufgenauigkeit
 Hohe Genauigkeit über einen langen Zeitraum

Leichtgängige Bewegung ohne Spiel
 Bei sehr hohen Geschwindigkeiten einsetzbar
 Einfache Wartung
 Einsetzbar in unterschiedlichen Anwendungen

Eigenschaften der Linearführung

Hohe zulässige Belastung und hohe Steifigkeit

Kompensationseffekt

Ideale Struktur mit vier Kreisbogenlaufrillen im Zwei-Punkt-Kontakt

Hervorragende Fehlerkompensation mit der X-Anordnung

Niedriger Reibungskoeffizient

Breites Zubehörprogramm (verschiedene Schmier- und Abdichtungssysteme usw.)

Entsprechend werden nachfolgende
 Eigenschaften umgesetzt.

Einfache Wartung

Verbesserte Produktivität der Maschine

Erhebliche Energieeinsparung

Niedrige Gesamtkosten

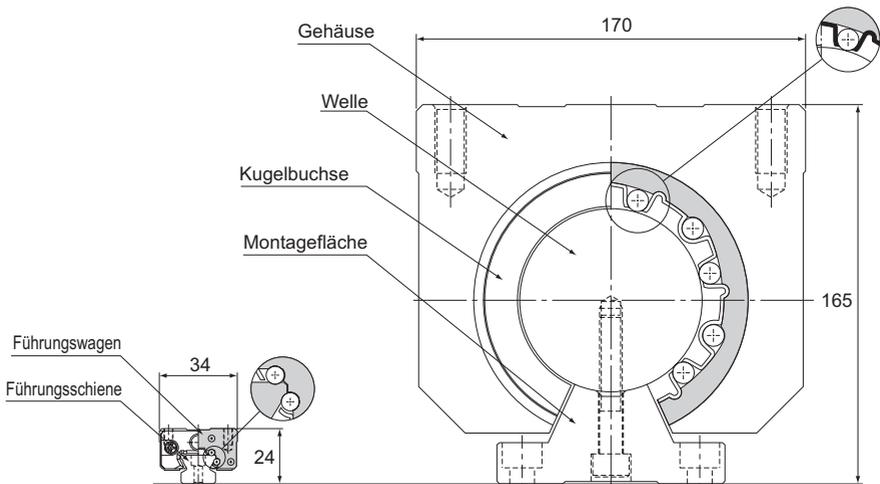
Höhere Genauigkeit der Maschine

Höhere Effizienz bei der Maschinenkonstruktion

Hohe zulässige Belastung und hohe Steifigkeit

[Hohe zulässige Belastung]

Bei Linearführungen ist die Schmiegun g der Laufrille fast identisch mit dem Kugeldurchmesser. Aufgrund dieses Konstruktionsmerkmals ist der Unterschied z.B. zu einem Führungssystem mit Kugelbuchsen beträchtlich. In Abb. 1 sind eine Linearführung und eine Kugelbuchse mit ungefähr gleichen Tragzahlen im Querschnitt dargestellt. Das Beispiel zeigt, daß aufgrund der wesentlich geringeren Bauhöhe der Linearführung weitaus kompaktere Konstruktionen realisiert werden können. Dazu verdeutlicht anhand der zulässigen Belastbarkeit einer Kugel, daß der Flächenkontakt beim Kreisbogenkontakt im Vergleich zum Punktkontakt der Kugel eine um den Faktor 13 höhere zulässige Belastung ermöglicht. Da die nominelle Lebensdauer in der 3. Potenz von der Belastung abhängt, ist die nominelle Lebensdauer um den Faktor 2.200 höher.



Linearführung Typ SSR15XW
Dynamische Tragzahl: 14,7 kN

Kugelbuchse Typ LM80 OP
Dynamische Tragzahl: 7,35 kN

Abb. 1 Vergleich zwischen Linearführung und Kugelbuchsenführung

Tab. 1 Tragfähigkeit pro Kugel (P und P₁)
Zulässige Flächenpressung: 4.200 MPa

Kugeldurchmesser	Kreisbogenkontakt (P)	Punktkontakt (P ₁)	P/P ₁
φ3,175 mm (1/8'')	0,90 kN	0,07 kN	13
φ4,763 mm (3/16'')	2,03 kN	0,16 kN	13
φ6,350 mm (1/4'')	3,61 kN	0,28 kN	13
φ7,938 mm (5/16'')	5,64 kN	0,44 kN	13
φ11,906 mm (15/32'')	12,68 kN	0,98 kN	13

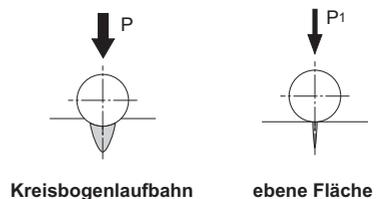


Abb. 2 Tragfähigkeit pro Kugel

[Hohe Steifigkeit]

Die Linearführungen sind in radialer, gegenradialer und tangentialer Richtung belastbar. Weiterhin kann aufgrund des Konstruktionsprinzips mit der Kreisbogenlaufrille eine Vorspannung für eine verbesserte Steifigkeit aufgebracht werden.

Wenn man die Steifigkeit mit einem Kugelgewindtrieb und einer Spindel vergleicht, dann besitzt das Führungssystem unter Verwendung einer Linearführung eine höhere Steifigkeit.

● Beispiel für den Vergleich der Steifigkeit zwischen einer Linearführung, einem Kugelgewindtrieb und einer Spindel

(vertikales Bearbeitungszentrum mit Antriebsleistung von 7,5 kW)

Tab. 2 Vergleich der Steifigkeit

Einheit: N/ μ m

[Komponenten]

Linearführung: SVR45LC/C0

(C0-Vorspannungsklasse: Vorspannkraft = 11,11kN)

Kugelgewindtrieb: BNFN4010-5/G0

(G0-Vorspannungsklasse: Vorspannkraft = 2,64 kN)

Spindel: konventionelle Schneidspindel für Werkzeugeinsatz

Komponenten	in X-Richtung	in Y-Richtung	in Z-Richtung
Linearführung	—	2.400	9.400 (radial) 7.400 (gegenradial)
Kugelgewindtrieb	330	—	—
Spindel	250	250	280

Hinweis: Die Steifigkeit der Wellenendenlagerung ist in der Steifigkeit des Kugelgewindtriebs einbezogen.

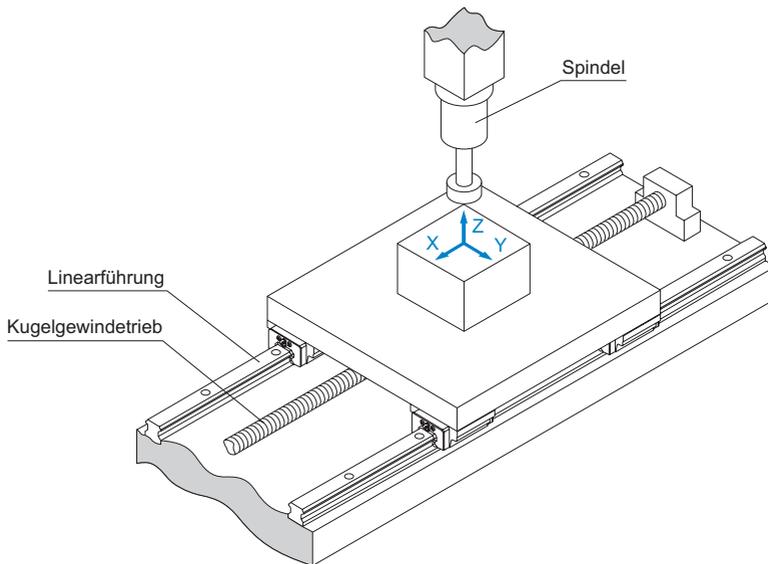
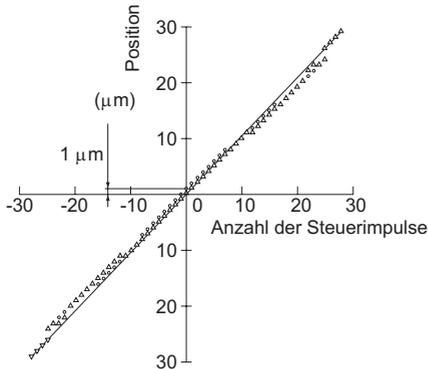


Abb. 3

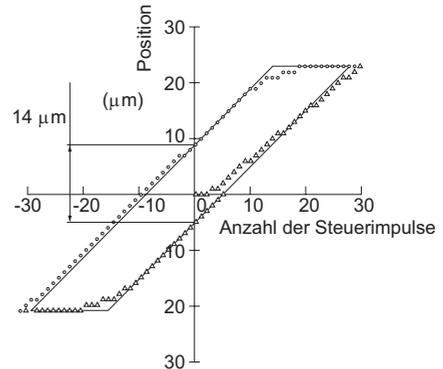
Hohe Positioniergenauigkeit

[Wenig Totgang]

Aufgrund des Konstruktionsprinzips der wälzgelagerten Führung entspricht die Anfahrrichtung der Linearführung annähernd der Verfahrrichtung. Daher tritt bei Linearführungen nur sehr wenig Totgang und Steuerungsverlust auf.



Linearführung Typ HSR45



Gleitführung mit Kunststoffbeschichtung

(Messungen werden mit dem einachsigen Tisch, der mit einem Gewicht von 500 kg beladen ist, vorgenommen)

Abb. 4 Vergleich von Totgang zwischen THK Linearführung und einer Gleitführung

Tab. 3 Vergleich Totgang

Einheit: μm

Typ	Vorspannung	Prüfmethode			
		Gemäß JIS B 6330			Methode der minimalen Inkrementeingabe
		10 mm/min	500 mm/min	4000 mm/min	
Linearführung (HSR45)	C1-Vorspannung (siehe Tab. unten)	2,3	5,3	3,9	0
	C0-Vorspannung (siehe Tab. unten)	3,6	4,4	3,1	1
Gleitführung mit Kunststoffbeschichtung	0,02 mm	10,7	15	14,1	14
	0,005 mm	8,7	13,1	12,1	13

Radialspiel der Linearführung

Einheit: μm

Symbol	C1	C0
Radialspiel	-25 bis -10	-40 bis -25

[Hohe Laufgenauigkeit]

Linearführungen ermöglichen hohe Laufgenauigkeiten.

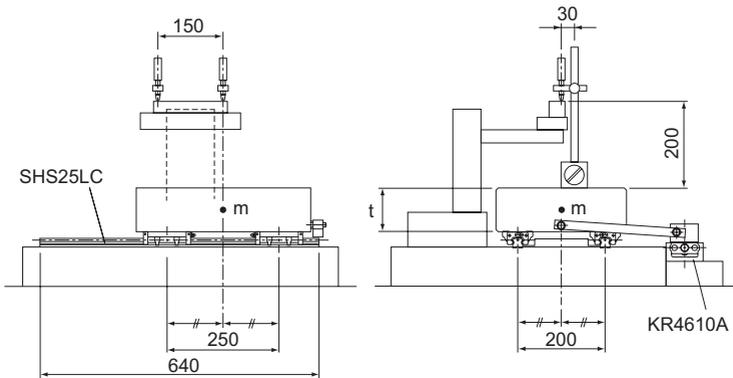
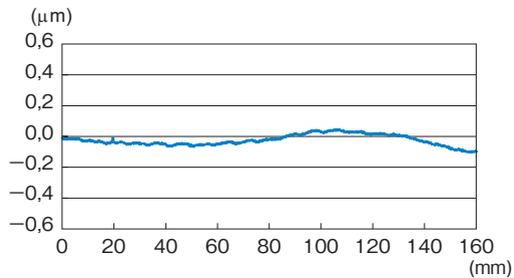
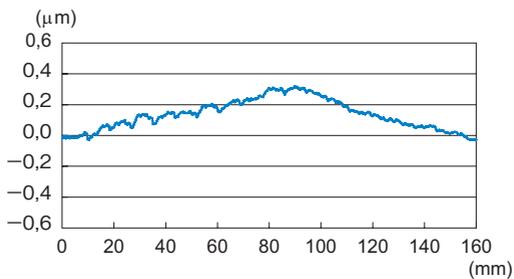
[Messmethode]**Nickgenauigkeit (Ma-Richtung)****Giergenauigkeit (Mb-Richtung)**

Abb. 5 Laufgenauigkeit eines einachsigen Tisches

Merkmale und Typen

Eigenschaften der Linearführung

[Hohe Genauigkeit bei langer Lebensdauer]

Aufgrund der idealen Rollbewegung tritt bei THK-Linearführungen kaum Verschleiß auf, somit bleibt die hohe Präzision über einen langen Zeitraum erhalten. Abb. 6 zeigt eine Versuchsanordnung, bei der eine vorgespannte Führung unter Einwirkung einer Belastung noch nach 2.000 km Fahrweg über 90% der ursprünglich angebrachten Vorspannung aufweist.

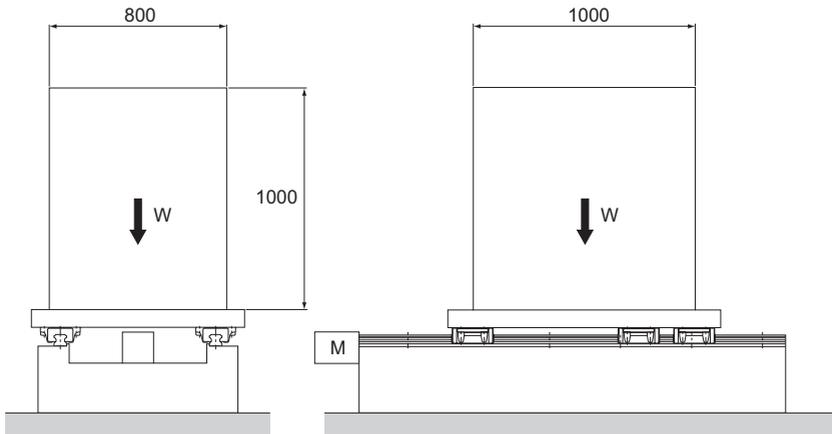


Abb. 6 Versuchsanordnung

[Versuchsaufbau]

Baureihe : HSR65L

Vorspannung

: C0 (Vorspannkraft: 15,7 kN)

Hublänge : 1.050 mm

Geschwindigkeit : 15 m/min (jeweils 5 Sek. Pause in beiden Endpositionen)

Beschleunigungszeit

: 300 ms (Beschleunigung: $\alpha = 0,833 \text{ m/s}^2$)

Masse : 6.000 kg

Antrieb : Kugelgewindetrieb

Schmierung : Lithiumseifenfett der Konsistenzklasse 2

(alle 100 km nachgeschmiert)

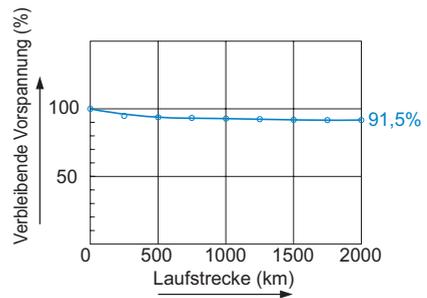


Abb. 7 Vorspannungsverlust über die Laufleistung

Kompensationseffekt

THK-Linearführungen sind spielfreie, hochbelastbare Konstruktionselemente mit Präzisionskugeln. Beim Einbau von mehreren parallel verlaufenden Führungsschienen in einer Ebene erhöhen sich deutlich die Leistungsmerkmale der Führungskonstruktion. Etwaige Abweichungen in der Parallelität, der Geradheit und der Ebenheit, die durch die Bearbeitung der Unterkonstruktion bzw. während der Montage entstanden sind, können so durch die besonderen Merkmale der Linearführungen kompensiert werden.

Dieser sogenannte Kompensationseffekt ist abhängig von der Größe des Versatzes oder der Abweichung, der Vorspannung, der Anzahl der eingebauten Elemente u.a. Die Abb. 8 zeigt eine Versuchsanordnung zur Darstellung des Parallelitätsfehlers und die Auswirkung auf die Laufgenauigkeit des Tisches (oder die horizontale Geradheit) bei einer bewußt versetzten Führungsschiene. In Abb. 9 werden die Ergebnisse wiedergegeben. Aufgrund dieses Kompensationseffekts können Führungssysteme mit einer hohen Laufgenauigkeit einfach realisiert werden.

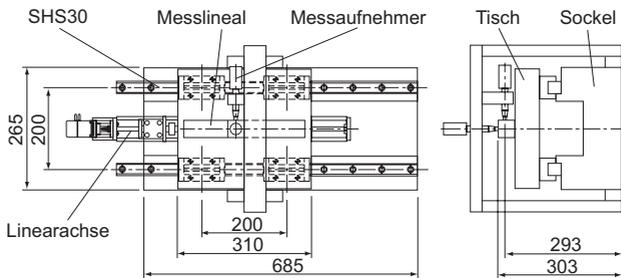


Abb. 8

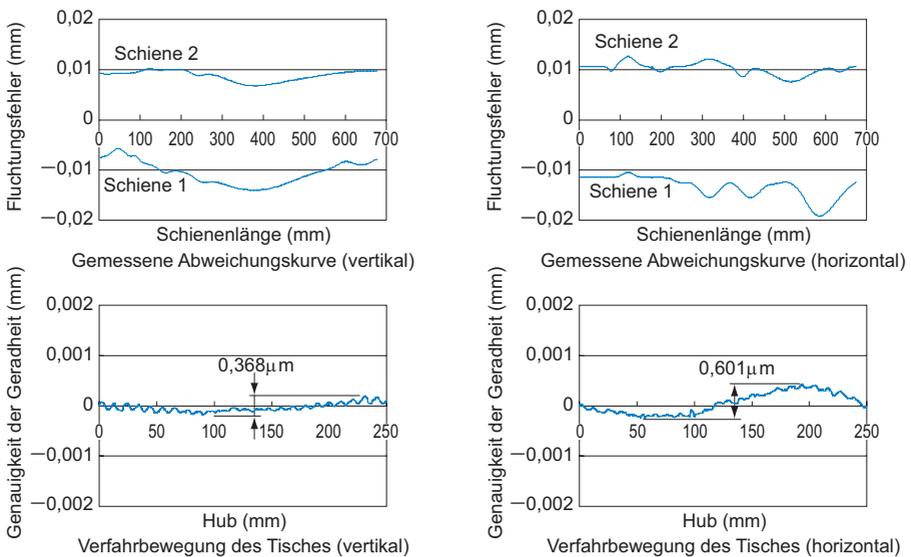


Abb. 9

Merkmale und Typen

Eigenschaften der Linearführung

Selbst auf einer grob gefrästen Montagefläche erhöht die Linearführung deutlich die Laufgenauigkeit der Tischoberfläche.

[Montagebeispiel]

Im Vergleich zur Genauigkeit der Montagefläche (a) und der Laufgenauigkeit des Tisches (b) ergibt sich:

$$\begin{array}{l} \text{Vertikal} \\ \text{Horizontal} \end{array} \begin{array}{l} \boxed{92,5 \mu\text{m}} \\ \boxed{28 \mu\text{m}} \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} \boxed{15 \mu\text{m}} \\ \boxed{4 \mu\text{m}} \end{array} = \begin{array}{l} \boxed{1/6} \\ \boxed{1/7} \end{array}$$

Tab. 4 Tatsächliche Genauigkeit der Montagefläche
Einheit: μm

Richtung	Auflagefläche	Geradheit	Durchschnitt (a)
Vertikal	Horizontal	A	80
		B	105
Grundfläche	Anschlagfläche	C	40
		D	16
			28

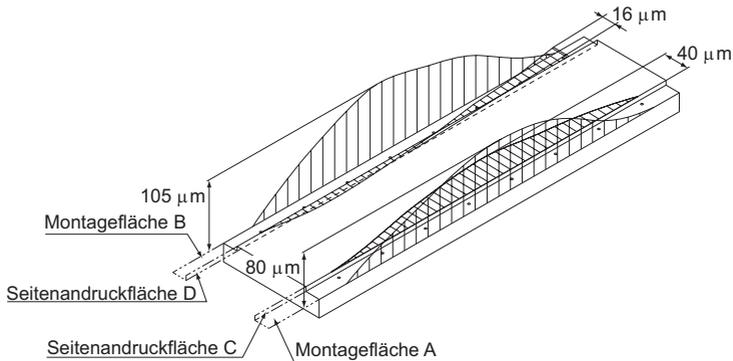


Abb. 10 Oberflächengenauigkeit der Montagefläche der Linearführung (nur gefräste Oberfläche)

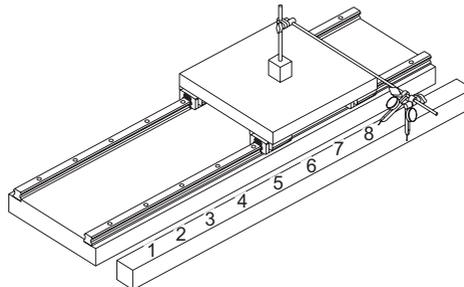


Abb. 11 Laufgenauigkeit nach Montage der Linearführung

Tab. 5 Tatsächliches Maß der Laufgenauigkeit auf dem Tisch (basierend auf Maßen in Abb. 10 und Abb. 11)

Einheit: μm

Richtung	Messpunkt								Geradheit (b)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Vertikal	0	+2	+8	+13	+15	+9	+5	0	15
Horizontal	0	+1	+2	+3	+2	+2	-1	0	4

Einfache Wartung

Anders als bei Gleitführungen unterliegen Linearführungen kaum einer nennenswerten Abnutzung. Demzufolge entfällt die Wartung der Gleitoberflächen, und die Genauigkeit muss nicht nachjustiert werden. Im Hinblick auf die Schmierung benötigen Gleitführungen größere umlaufende Schmiermittelmengen, um einen Ölfilm aufrechtzuerhalten. Im Vergleich dazu erfordern Linearführungen lediglich ein Nachfüllen kleinerer Mengen von Schmierstoffen in bestimmten Zeitabständen. Dies trägt auch zu einer saubereren Arbeitsumgebung bei.

Erhebliche Energieeinsparung

Tab. 6 dokumentiert das erhebliche Energiesparpotenzial der Linearführung.

Tab. 6 Datenvergleich zu Gleit- und Rollcharakteristik

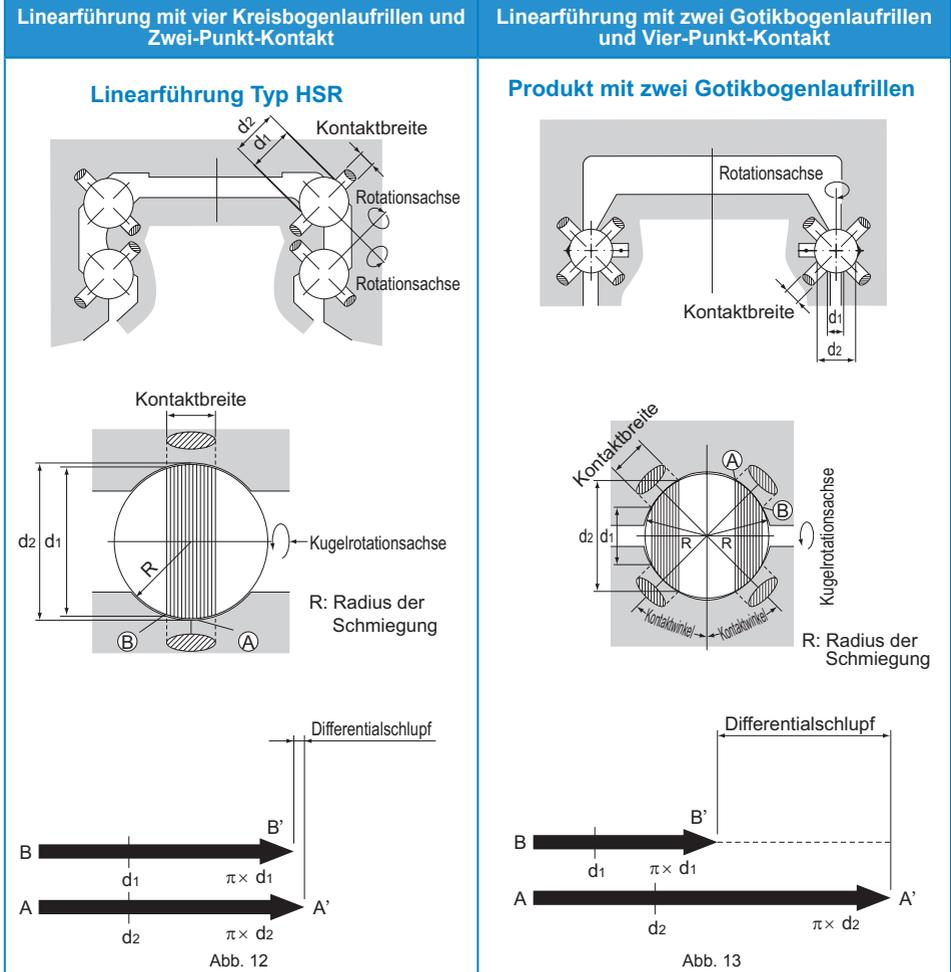
Maschinenspezifikationen		
Maschinentyp	Einachsige Oberflächenschleifmaschine (Gleitführung)	Dreiachsige-Oberflächenschleifmaschine (Linearführung)
Gesamtlänge × Gesamtbreite	13 m × 3,2 m	12,6 m × 2,6 m
Gesamtgewicht	17.000 kg	16.000 kg
Tischgewicht	5.000 kg	5.000 kg
Schleiffläche	0,7 m × 5 m	0,7 m × 5 m
Tischführung	Gleitsystem mit Prismenführung	Wälzgelagertes System mit Linearführung
Anzahl der Schleifachsen	1 Achse (5,5 kW)	3 Achsen (5,5 kW + 3,7 kW × 2) Schleifkapazität: 3-mal größer als Maschine mit Gleitführung

Tisch-Antriebsspezifikationen			Verhältnis
Verwendete Motorleistung	38,05 kW	3,7 kW	10,3
Antriebsdruck der Hydraulik	Bohrungsdurchmesser $\phi 160 \times 1,2$ MPa	Bohrungsdurchmesser $\phi 65 \times 0,7$ MPa	—
Antriebskraft	23.600 N	2.270 N	10,4
Energieverbrauch	38 kWh	3,7 kWh	10,3
Ölverbrauch Hydraulikantrieb	400 l/Jahr	250 l/Jahr	1,6
Schmierstoffverbrauch	60 l/Jahr (Öl)	3,6 l/Jahr (Fett)	16,7

Vierreihige Kreisbogenlaufrillen-Anordnung mit Zwei-Punkt-Kontakt

Mit dem patentierten Konstruktionsprinzip der idealen vierreihigen Kreisbogenlaufrille, das eine automatische Selbsteinstellung ermöglicht, heben sich die THK-Linearführungen von anderen Produkten ab.

[Vergleich verschiedener Konstruktionsprinzipien]



Wie in Abb. 12 und Abb. 13 dargestellt, entsteht während einer Kugelumdrehung ein Schlupf, der sich aus der Differenz des Kugelumfanges des inneren Durchmessers (πd_1) und dem des äußeren Durchmessers (πd_2) bildet. Dieser Schlupf wird als Differentialschlupf bezeichnet. Bei einer größeren Differenz reibt die Kugel beim Drehen. Bei der Gotikbogenlaufrille steigt der Reibungskoeffizient um mehr als das 10-fache an und der Reibwiderstand erhöht sich.

**Vierreihige Kreisbogenlaufrille
mit Zwei-Punkt-Kontaktstruktur**
**Zweireihige Gotikbogenlaufrille-
mit Vier-Punkt-Kontaktstruktur**
Leichtgängige Bewegung

Wie in Abb. 12 und Abb. 13 gezeigt, besteht sowohl bei Vorspannung als auch bei Belastung ein Zwei-Punkt-Kontakt in Belastungsrichtung, sodass die Differenz zwischen d_1 und d_2 gering ist und eine leichtgängige Rollbewegung erzielt wird.

Wie in Abb. 12 und Abb. 13 auf **B 1-19** dargestellt, ist die Differenz der Kontaktflächen zwischen d_1 und d_2 groß. Dadurch entsteht bei Vorspannung, bei angreifender tangentialer Belastung oder bei ungenau parallel montierten Führungsschienen ein Differentialschlupf. Dieser führt zu starker Reibung nahe dem Gleitwiderstand und einem überproportionalen Verschleiß.

Genauigkeit der Anschlusskonstruktion

Aufgrund der idealen Anordnung der vier Kreisbogenlaufrillen und des Zwei-Punkt-Kontaktes mit günstigem Kontaktwinkel sind elastische Verformungen der Kugeln möglich. Gewisse Ungenauigkeiten der Montageflächen können so vom Wagen aufgenommen werden, und es wird eine leichtgängige und gleichmäßige Bewegung erreicht. Deshalb ist z.B. eine steife und genaue Unterkonstruktion bei Zuführeinrichtungen nicht unbedingt erforderlich.

Bei der Gotikbogenlaufrille haben die Kugeln an vier Stellen Kontakt und können sich deswegen kaum elastisch verformen. Dadurch können Abweichungen der Montagefläche oder Ungenauigkeiten der montierten Schienen nicht ausgeglichen werden. Aufgrund des fehlenden Kompensationsvermögens sind leichtgängige Bewegungen nur zu erreichen, wenn Schienen in einer hohen Präzisionsklasse auf steifen und genau bearbeiteten Unterkonstruktionen ausgerichtet werden.

Steifigkeit

Beim Zwei-Punkt-Kontakt steigt der Verschiebewiderstand selbst bei einer relativ hohen Vorspannung nur gering an. Dabei wird durch die hohe Vorspannung eine hohe Steifigkeit erreicht.

Wie oben erwähnt, kann wegen des möglichen Differentialschlupfes keine genügend hohe Vorspannung zur Steifigkeitsverbesserung aufgebracht werden.

Tragzahl

Hohe Tragzahlen werden durch eine Schmiegun der Kugellaufbahnen erzielt, die 52-53% des Kugeldurchmessers entspricht.

Die Schmiegun der Gotikbogenlaufrille muß 56-60% des Kugeldurchmessers betragen. Dies verringert die Tragfähigkeit um 50% gegenüber der Kreisbogenlaufrille.

Unterschiedliche Steifigkeit

Abb. 14 Die beiden Steifigkeitsdiagramme zeigen, daß die Steifigkeit im wesentlichen von der Schmiegun und der Vorspannung abhängt.

Rundungsradius und Vorspannung

Vergleich der Steifigkeit entsprechend der Schmiegun
(pro Kugel)

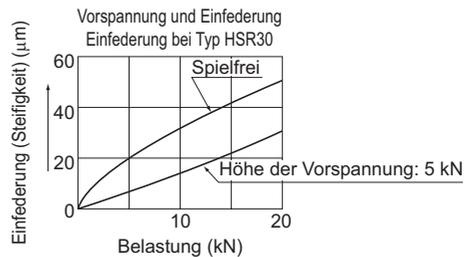
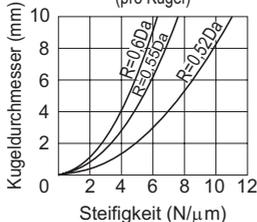


Abb. 14

Unterschiedliche nominelle Lebensdauer

Durch die im Vergleich zur Kreisbogenlaufrille um ca. 50% verringerte Tragfähigkeit der Gotikbogenlaufrille beträgt deren nominelle Lebensdauer nur ca. 12,5% der Kreisbogenlaufrille.

[Genauigkeitsabweichungen der Montagefläche und Prüfdaten zum Verschiebewiderstand]

Die Unterschiede in der Kontaktstruktur kommen im Rollwiderstand zum Ausdruck.

Wird ein System mit Gotikbogenlaufrille vorgespannt, um das Spiel zu beseitigen, oder wird die Montage nicht sehr sorgfältig durchgeführt, haben die Kugeln Vier-Punkt-Kontakt. Es kommt zum Differentialschlupf, bzw. der Stick-Slip-Effekt tritt auf. Weiterhin nimmt mit einem Ansteigen des Rollwiderstands die Lebensdauer drastisch ab. Dazu werden Linearführungen mit vierreihiger Anordnung der Kreisbogenlaufrille und vergleichbare Führungen mit zweireihiger Anordnung der Gotikbogenlaufrille miteinander verglichen:

[Prüfmuster]

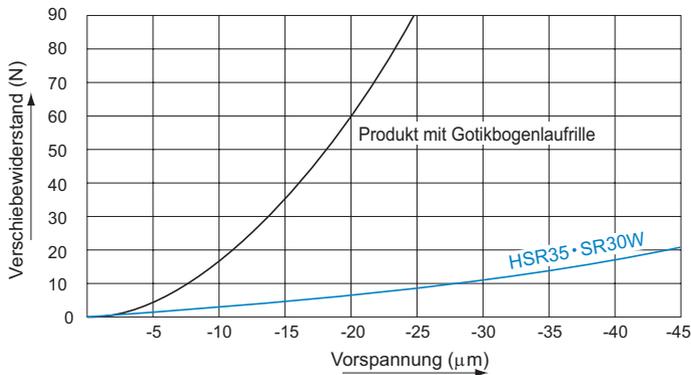
- | | |
|--|--------|
| (1) Linearführung | |
| SR30W (Radialtyp) | 2 Sets |
| HSR35 (aus vier Richtungen gleich belastbarer Typ) | 2 Sets |
| (2) Produkt mit zwei Gotikbogenlaufrillen | |
| Führung mit Abmessungen ähnlich HSR30 | 2 Sets |

[Prüfbedingungen]

- Radialspiel: $\pm 0 \mu\text{m}$
 Ohne Dichtung
 Ohne Schmierung
 Belastung: Tischgewicht von 30 kg

Messergebnis 1: Verschiebewiderstand bei Vorspannung

Wenn eine Vorspannung angewendet wird, steigt der Verschiebewiderstand des Produkts mit Gotikbogenlaufrillen stark an, und es entsteht Differentialschlupf. Dagegen erhöht sich selbst bei Vorspannung der Verschiebewiderstand der Linearführung mit Kreisbogenlaufbahnen nicht.



Messergebnis 2: Verschiebewiderstand bei Parallelitätsabweichungen

Abb. 15 Zwei parallel montierte Führungsschienen werden, wie unten gezeigt, an einer bestimmten Stelle leicht voneinander versetzt. Dann wird im Bereich der Parallelitätsabweichung der Verschiebewiderstand gemessen. Das Ergebnis ist bei den Führungsschienen mit Gotikbogenlaufrillen ein Verschiebewiderstand von 34 N bei 0,03 mm Parallelitätsabweichung und von 62 N bei 0,04 mm Abweichung. Diese Werte entsprechen etwa dem Verschiebewiderstand einer Gleitführung.

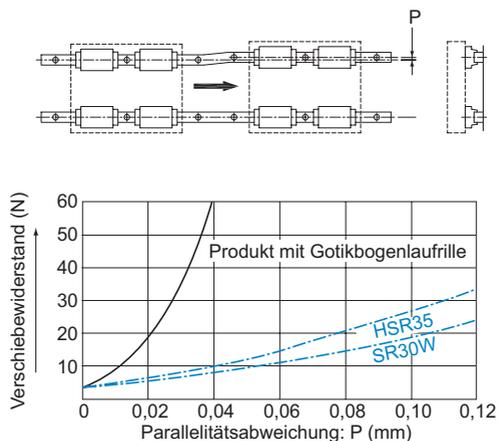
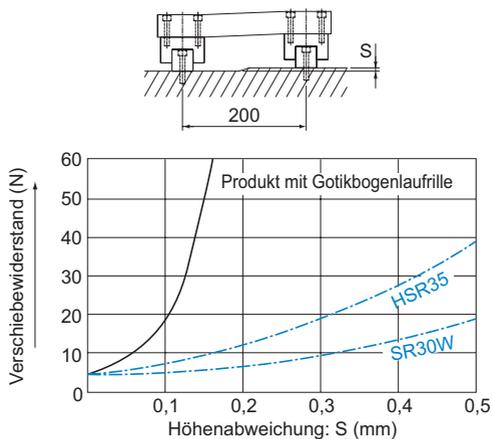


Abb. 15

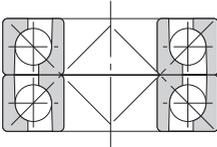
Messergebnis 3: Unterschied zwischen den Stufen der oberen und unteren Schienen sowie Verschiebewiderstand

Verschieben Sie die Unterseite beider Schienen vertikal um S , um einen Höhenunterschied zwischen den beiden Achsen zu schaffen. Messen Sie anschließend den Verschiebewiderstand. Wenn ein Höhenunterschied zwischen den Schienen besteht, wirkt ein Drehmoment auf den Führungswagen. Bei einer Linearführung mit Gotikbogenlaufrille wird ein Durchdrehen der Kugeln ausgelöst. Die Linearführung mit Kreisbogenlaufrille kann den Fehler kompensieren, der durch den Höhenunterschied zwischen den Schienen verursacht wird, und bis zu einer Differenz von $0,3/200$ mm vergrößert sich der Verschiebewiderstand kaum.



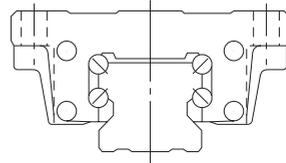
Hervorragende Fehlerkompensation mit der X-Anordnung

Da die Kontaktstruktur der Linearführung der X-Anordnung von Schrägkugellagern ähnelt, verfügt sie über eine hervorragende Kompensation von Montagefehlern.

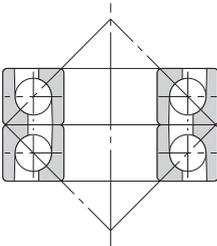


Schrägkugellager mit X-Anordnung

Ein geringer Abstand der Kontaktpunkte ermöglicht eine gute Selbsteinstellung auch bei Neigungsfehlern.

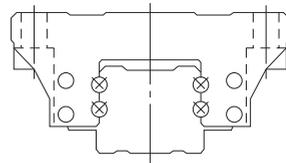


Vierreihiger Winkelkontakt in X-Anordnung (Linearführung)
Die geometrische Struktur gleicht hohe Ungenauigkeiten der Montagefläche aus.



Schrägkugellager mit O-Anordnung

Ein großer Abstand der Kontaktpunkte lässt nur geringe Neigungsfehler zu.



Vierreihiger Gotikbogenkontakt

Diese Anordnung erfordert eine höhere Genauigkeit der Montageflächen.

Eine auf einem Untergrund montierte Linearführung erfährt ein Moment (M) aufgrund einer Abweichung in der Geradheit oder Höhe, oder durch eine Einfederung des Tisches. Deshalb ist es für die Führung äußerst wichtig, Montagefehler kompensieren zu können.

Linearführung Typ HSR	Ähnliches Produkt eines Wettbewerbers
<p>Durch den geringen Abstand der Kontaktpunkte sind auch die inneren Kräfte bei auftretenden Montagefehlern gering. Das Laufverhalten bleibt so stets leichtgängig.</p>	<p>Da der Druckmittelpunktabstand des Lagers groß ist, ist die von einem Montagefehler herrührende innere Belastung groß und die Kompensation von Montagefehlern gering. Wenn bei einer Linearführung in O-Anordnung eine Abweichung in der Geradheit oder eine Einfederung des Tisches auftritt, so ist die innere Belastung auf den Wagen etwa 6 mal höher als bei einer Linearführung in X-Anordnung. Die Lebensdauer ist dementsprechend wesentlich kürzer. Zusätzlich ist die Schwankung des Verschleißwiderstandes größer.</p>