

1. Einleitung

Die Forderung des Marktes nach immer größerer Leistungsfähigkeit der Erzeugnisse des Präzisionsgeräte- und Maschinenbaues stellt neue, höhere Anforderungen auch an die Bauelemente, insbesondere an die zum Einsatz kommenden Führungssysteme. Mit den bisher vorrangig eingesetzten Wälzführungssystemen ist die notwendige Leistungssteigerung nicht zu realisieren. Mit ihnen wurde eine Leistungsgrenze erreicht, die nur dann überschritten werden kann, wenn die grundsätzlichen Mängel, die Wälzführungen besitzen, durch die Wahl neuer Arbeitsprinzipien beseitigt werden. Als Alternativlösung bieten sich aerostatische Führungen an.

Aerostatische Führungen zeichnen sich durch Reibungsarmut, hohe Laufgenauigkeit, Laufruhe, Verschleißfreiheit und Sauberkeit im Betrieb aus. Im Gegensatz zu der im modernen Werkzeugmaschinenbau eingesetzten hydrostatischen Führung verlangt die Druckluftschmierung keinen geschlossenen Kreislauf zur Schmiermittlrückführung. Infolge der geringen Abhängigkeit der dynamischen Zähigkeit der Luft von der Temperatur ist dieses Führungsprinzip gleichermaßen bei hohen als auch niedrigen Temperaturen mit Erfolg einsetzbar.

Trotz dieser überzeugenden Eigenschaften wird die aerostatische Führung - deren Haupteinsatzgebiet der Präzisionsgerätebau sein sollte - nur sehr zögernd für die Lösung von Präzisionsführungsaufgaben herangezogen. Die Gründe dafür sind:

- Der hohe Schwierigkeitsgrad der Thematik und die damit verbundene lange Einarbeitungszeit,
- der akute Mangel an geeigneten Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen,
- die gefürchtete Neigung aerostatischer Führungen zu selbsterregten Schwingungen,
- die aus Unkenntnis geborene Meinung, mit aerostatischen Führungen könne infolge der Kompressibilität des Schmiermittels Luft keine große Tragfähigkeit und Steifigkeit erreicht werden.

Mit der Erarbeitung zweier Berechnungs- und Konstruktionsvorschriften /38/ sowie der Entwicklung des Programmsystems AERFUE /49/ - die auch Bestandteil dieses Buches sind – wurde vom Autor bereits ein erster Schritt zur Veränderung dieser unbefriedigenden Situation unternommen. Mit dem vorliegenden Buch will der Autor einen weiteren Beitrag leisten und den Einsatz aerostatischer Führungen, vor allem im Präzisionsgeräte- und Maschinenbau, fördern helfen.

2. Führungen im Maschinen- und Präzisionsgerätebau

2.1 Die Aufgabe von Führungen in technischen Gebilden

Führungen zählen zu den wichtigsten Konstruktionselementen im Maschinen- und Präzisionsgerätebau. „Durch eine Führung wird ein Bauteil, das geführte Teil, gegenüber einem als feststehend angenommenen Teil längs einer Leitgeraden relativ beweglich, wenn es mit dem feststehenden Teil unmittelbar oder mittelbar (unter Hinzunahme weiterer Teile) so gepaart wird, dass nur ein Freiheitsgrad der Translation verbleibt“ /51/.

Somit hat eine Geradführung – ganz allgemein – die Aufgabe, die Relativbewegung zwischen zwei Bauteilen nur in einer Richtung, längs einer Geraden, zuzulassen /19/, /39/. Es müssen also fünf von sechs im Raum möglichen Freiheitsgraden – drei rotatorische und zwei translatorische Freiheitsgrade – eingeschränkt werden.

Bei den Geradführungen wird prinzipiell zwischen Gleit- und Wälzführungen unterschieden /52/. Als Unterscheidungsmerkmal der verschiedenen Arten von Gleitführungen wird in der Regel die Art der Trennung der sich relativ zueinander bewegenden Elemente durch ein vorhandenes oder nicht vorhandenes Schmiermittel bzw. die in der Gleitführung vorherrschende Reibungsart (Festkörperreibung, Mischreibung, Flüssigkeitsreibung) herangezogen. Bei Wälzführungen erfolgt die Trennung der sich gegeneinander bewegenden Elemente durch die Wälzkörper. Geradführungen lassen sich nach ihrem physikalisch-technischen Prinzip, nach der Art des zum Einsatz kommenden Schmiermittels und des Schmierfilm- bzw. Druckaufbaus einteilen in:

- *Gleitführungen* mit Festkörperreibung
(\Rightarrow Trockenreibung, Coulombsche Reibung, kein Schmierfilm zwischen den bewegten Elementen)

- *Gleitführungen mit Mischreibung*
(Mischreibung \Rightarrow Festkörper- und Flüssigkeitsreibung, tragender Schmierfilm in der Kontaktzone reicht nicht aus, um bewegte Elemente völlig voneinander zu trennen)
- *hydrodynamische Führungen*
(Flüssigkeitsreibung \Rightarrow Druckaufbau an der Kontaktstelle zwischen Schlitten und Bett erfolgt allein durch die Relativbewegung der Führungselemente zueinander)
- *hydrostatische Führungen*
(Flüssigkeitsreibung \Rightarrow Schmiermittel: Öl, Erzeugung des tragenden Schmierfilms durch eine permanente externe, unter Druck stehende, Ölversorgung)
- *aerodynamische Führungen*
(Flüssigkeitsreibung \Rightarrow Schmiermittel: Luft, Druckaufbau an der Kontaktstelle zwischen Schlitten und Bett erfolgt allein durch die Relativbewegung der Führungselemente zueinander)
- *aerostatische Führungen*
(Flüssigkeitsreibung \Rightarrow Schmiermittel: Luft, Erzeugung des tragenden Schmierfilms durch eine permanente externe Druckluftversorgung)
- *elektromagnetische Führungen*
- *Wälzführungen*
(Rollreibung, Wälzreibung \Rightarrow Roll- bzw. Abwälzwidestand der verwendeten Rollelemente: Kugel, Zylinderrolle, Hochgenauigkeitskugellager, Kugelumlaufelement)

Aerodynamische Führungen werden im Maschinen- und Präzisionsgerätea-bau kaum angewendet, eher schon als aerodynamische Lagerungen für die Realisierung von Rotationsbewegungen /6/.

2.2 Führungsfehler und ihre Ursachen

Infolge von Form- und Lageabweichungen der Führungsbahnen, durch Deformationen im Führungssystem aufgrund der Masse der bewegten Bauteile (Support, Arbeitstisch, Messschlitten etc.) und der von ihnen zu tragenden Werkstücke bzw. Messobjekte, durch Eigenfehler der Führungselemente (bei Wälzführungen: Kugel, Zylinderrolle, Hochgenauigkeitskugellager, Kugelumlaufelement; bei aerostatischen Führungen: aerostatisches Führungselement), durch thermische Einflüsse und durch Reibung im Führungs- oder Versorgungssystem (z.B. Kabelschlepp) treten unerwünschte Bewegungen des geführten Bauteils in Richtung der Unfreiheiten auf, die als Führungsfehler bezeichnet werden /39/. Sie führen beispielsweise bei Werkzeugmaschinen oder Mehrkoordinatenmessmaschinen zu Abweichungen des „verkörperten“ vom angestrebten idealen Koordinatensystem und damit zu Fehlern in der bearbeiteten Geometrie des Werkstückes bzw. in der messtechnisch erfassten Geometrie des Prüfkörpers.

In Anlehnung an die Bewegungen eines Schiffes auf See wird der jeweilige Führungsfehler als Rollen, Nicken, Gieren, Driften oder Heben bezeichnet.

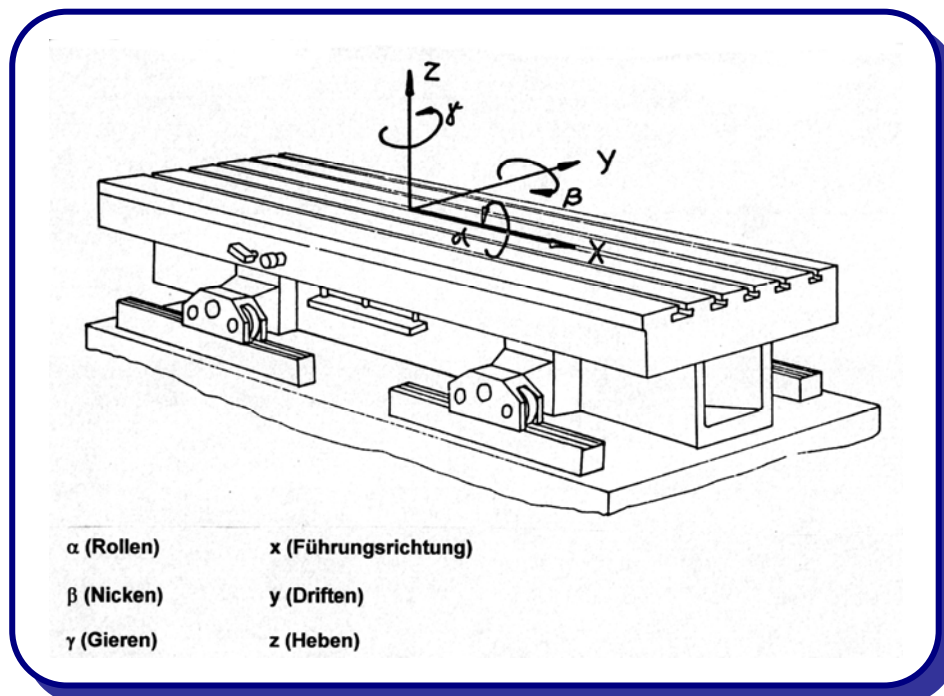


Bild 2-1: Führungsfehler einer Geradführung (Bewegungsrichtung x)

2.3 Kompensierung von Führungsfehlern

Bei einer Mehrkoordinatenmessmaschine beispielsweise ist das Zusammenwirken dreier, senkrecht zueinander angeordneter Geradföhrungen notwendig, um die für eine Messung im Raum erforderliche Relativbewegung zwischen Tastkopf und Messobjekt zu gewährleisten. Dabei kommt es zur Überlagerung der einzelnen Führungsfehler und, je nach Anordnung der drei Geradföhrungen, zur gegenseitigen Beeinflussung der Föhrungen untereinander, z.B. durch Masseverlagerungen infolge Messschlittenverschiebungen. Diese gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Föhrungen lässt sich nur dann vermeiden bzw. minimieren, wenn die horizontal bewegten Baugruppen, die in der Regel eine große Masse besitzen, nicht gemeinsam dem Tastkopf oder dem Messobjekt zugeordnet, sondern auf beide Einheiten aufgeteilt werden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, die schädlichen Kraftwirkungen unmittelbar ins Fundament abzuleiten.

Somit ist nicht nur die Qualität des verwendeten Führungsprinzips, sondern auch seine konstruktive Anordnung im konkreten Anwendungsfall (Messmaschine, Werkzeugmaschine, Vorrichtung) sowie die statische und dynamische Steifigkeit des gesamten Grundaufbaus ausschlaggebend für die Güte der ausgewählten Föhrung.

Im Gegensatz zu Werkzeugmaschinen, wo die zurückgelegte Bahn des Bearbeitungswerkzeug in erster Linie von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Föhrungen abhängt und somit die Qualität des hergestellten Werkstücks bestimmt, ist bei Koordinaten- bzw. Längenmessmaschinen eine rechnergestützte Korrektur zufälliger und systematischer Führungsfehler möglich und somit eine direkte Auswirkung auf das erzielte Messergebnis vermeidbar. Dabei gibt es unterschiedliche Ansatzmöglichkeiten für eine rechnergestützte Korrektur:

- Einmalige messtechnische Ermittlung der durch die Führungsfehler verursachten Messfehler, z.B. durch Vergleich mit einem extern stationierten Referenzsystem während der Maschinenkalibrierung, Ablage der ermittelten Korrekturdaten in einer Korrekturdatei und stetige Korrektur der beim Einsatz der Koordinaten- bzw. Längenmessmaschine anfallenden Messwerte durch einen geeigneten Korrekturalgorithmus im Auswerterechner.

- Stetige messtechnische Ermittlung der Führungsfehler durch Vergleich mit einem in der Messmaschine fest eingebauten Referenzsystem (beispielsweise ein durch extrem gerade hergestellte Lineale gebildetes Referenzkoordinatensystem und kontinuierlicher Abtastung desselben mit Hilfe von an den bewegten Baueinheiten befestigten Sensoren), Berechnung der aus den Führungsfehlern resultierenden Messfehler und rechentechnische Berücksichtigung dieser im Messergebnis.

3. Erkenntnisstand über aerostatische Führungen

Erste Überlegungen und Gedanken, Luft als Schmiermittel einzusetzen, wurden bereits 1854 von dem Franzosen HIRN geäußert. Über erste Experimente mit luftgeschmierten Führungs- bzw. Lagerelementen berichtete der Amerikaner KINGSBURY, und 1913 veröffentlichte der Engländer HARRISON seine „Hydrodynamische Theorie der Schmierung mit Luft als Schmiermittel“ /1/.

Der praktische Einsatz luftgeschmierter Führungen und Lagerungen beginnt jedoch erst in den fünfziger und sechziger Jahren. Eine Reihe von wissenschaftlichen Veröffentlichungen weist darauf hin, dass die Vorteile der Luftschmierung erkannt sind und ihre theoretische Bearbeitung begonnen hat. Es erscheinen Publikationen, die sich mit Fragen der Tragkraft, der Steifigkeit und der konstruktiven Gestaltung von kreisförmigen Führungselementen mit einer Einströmöffnung auseinandersetzen /10/, /11/, /15/, /17/, /21/, /25/.

Die Tragkraft eines aerostatischen Führungselementes ergibt sich aus der Summe aller auf die Fläche des Elementes im Lagerspalt wirkenden Partialdrücke. Die Kenntnis des Druckprofils unter dem Führungselement ist deshalb eine notwendige Voraussetzung zur Bestimmung der Tragkraft bzw. der Tragfähigkeit.

Für das kreisförmige Führungselement mit zentral angeordneter Einströmöffnung geben UNTERBERGER /21/ und v. SYBEL /11/ eine Näherungslösung an, die sich an die einfachere Lösung für inkompressible Strömungsmedien anlehnt, jedoch durch Multiplikation mit einem empirisch ermittelten Kompressibilitätsfaktor e für kompressible Medien eine Korrektur erfährt. Die mathematisch exakte Lösung zur Berechnung der Tragkraft aus der für das kreisförmige Führungselement gegebenen Druckverteilung /1/, /11/, /17/, /21/, /32/, gelingt LAUB /32/ unter Verwendung des Wahrscheinlichkeitsintegrals Erf (error funktion). Wie MERTEL /14/ nachgewiesen hat, ist eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Theorien einerseits und der Praxis andererseits bis zu Speisedrücken von etwa 20 bar vorhanden. Bei höheren Speisedrücken kommt es zum Teil zu erheblichen Abweichungen zwischen Theorie und Praxis. Obwohl in den theoretischen