

EINFLUSS DER SCHMIERSTOFFE AUF DIE GLEICHFÖRMIGKEIT DER SCHLITTENBEWEGUNG BEI WERKZEUGMASCHINEN

Von
G. ARZ

Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Technische Universität Budapest

Einleitung

Die Steigerung der Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschinen stellt auch an die Gleichförmigkeit der Schlittenbewegung erhöhte Anforderungen, die durch die bei Werkzeugmaschinen noch immer meistverbreiteten gleitgeführten Schlitten nur mit Hilfe spezieller Schmierstoffe erfüllt werden können.

Die Bewegung der gleitgeführten Schlitten ist unter gewissen Bedingungen eine Kippschwingung, die allgemein als Stick-slip oder Ruckgleiten bekannt ist. Bei der experimentellen Untersuchung dieser intermittierenden Bewegung können die verschiedenen Bettbahnöle qualifiziert werden.

1. Das Ruckgleiten

Mit Hilfe des mechanischen Ersatzsystems für die Baugruppe Führung—Schlitten—Antrieb, die durch einen gedämpften Einmassenschwinger dargestellt werden kann (Abb. 1), läßt sich der Bewegungsverlauf folgendermaßen ableiten:

Der Gleitkörper m bleibt nach dem Einschalten des Antriebs durch die Wirkung der Haftreibung (μ_p) solange in Stillstand ($\dot{X} = 0$), bis die Kraft der gespannten Antriebsfeder die Startreibung erreicht:

$$C_h X_0 > \mu_p (F_N + mg) \quad (1)$$

Nun beginnt sich der Gleitkörper mit erhöhter Gleitgeschwindigkeit zu bewegen ($\dot{X} > 0$). Da die Bewegungsreibung (μ_K), in den meisten Fällen kleinere Werte annimmt als die Haftreibung (μ_p) nimmt die Antriebsfederkraft ab, und nach einer gewissen Gleitzeit kommt der Gleitkörper m wieder zum Haften.

Es entsteht damit eine periodische Kippschwingung, bei der sich Haften und Gleiten periodisch wiederholen.

Die Bewegungsgleichung für das Schwingungssystem in Abb. 1 lautet mit Vernachlässigung der Schmierfilmdämpfung:

$$m\ddot{X} + \mu_K(F_N + mg) + k_h(\dot{X} - \dot{X}_0) + C_h(X - X_0 - t) = 0 \quad (2)$$

wobei der kinetische Reibwert (μ_K) als nichtlineare Funktion der Gleitgeschwindigkeit des Gleitkörpers betrachtet werden soll:

$$\mu_K = f(\dot{X}) \quad (3)$$

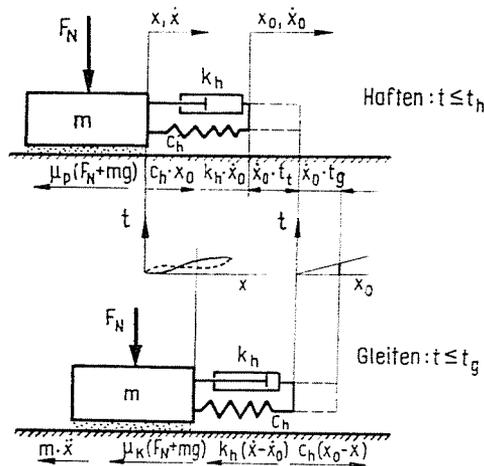


Abb. 1. Das mechanische Ersatzsystem des gleitgeführten Schlittens

Der kinetische Reibwert ist kleiner, als der von der Haftzeit abhängige potentielle Reibwert:

$$\mu_p = f(t_h) \quad (4)$$

Um die Bewegungsgleichung (2) nach elementaren Methoden lösen zu können, muß der Verlauf des kinetischen Reibwerts (3) linearisiert, und die Dämpfung als lineare Funktion der Gleitgeschwindigkeit betrachtet werden.

Die verschiedenen theoretischen Untersuchungen für das Ruckgleiten unterscheiden sich in der Art der Linearisierung und in der Berücksichtigung des potentiellen Reibwertes (4) [1], und die Feststellungen dieser Untersuchungen können nur im Gültigkeitsbereich der Näherungen hingenommen werden.

Die Ursache dieser selbsterregten Schwingung liegt in der Differenz zwischen Startreibung und Bewegungsreibung.

Wie eine Reihe von Untersuchungen an verschiedenen Prüfständen ergaben, sind dabei die dynamische Kennlinie des kinetischen Reibwertes in

Abhängigkeit von der tatsächlichen Gleitgeschwindigkeit und die Kennlinie des potentiellen Reibwertes in Abhängigkeit von der Haftzeit maßgebend.

Eine Komplexdarstellung des Reibwertverlaufs nach SCHINDLER [2] bringt diese Zusammenhänge beim Ruckgleiten klar zum Ausdruck (Abb. 2). Bei intermittierender Bewegung hört die Zuordnung von Reibungskraft und Antriebsgeschwindigkeit auf.

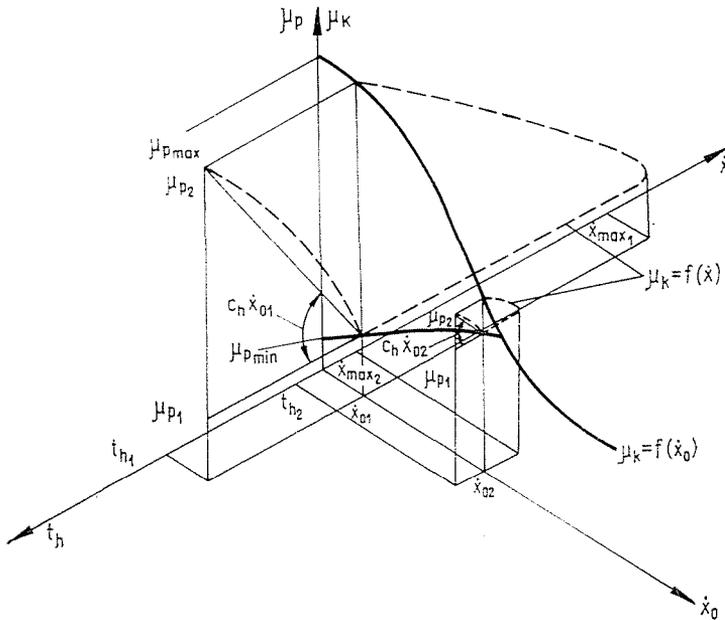


Abb. 2. Die Reibwerte beim Ruckgleiten nach SCHINDLER [2]

Die sogenannte statische Kennlinie des Bewegungsreibwertes

$$\mu_K = f(\dot{X}_0) \tag{5}$$

spreizt sich unterhalb der Grenzgeschwindigkeit für das Ruckgleiten in die sogenannte dynamische Kennlinie:

$$\mu_K = f(\dot{X}) \tag{6}$$

die den Bereich der den Haft- und Gleitphasen entsprechenden Reibungskraftveränderungen umschließt.

Die oben erwähnte Grenzgeschwindigkeit für das Ruckgleiten wurde zuerst von DERJAGIN, PUSH und TOLSTOI [3] theoretisch bestimmt. Diese

Grenzwertigkeit, die zum Vermeiden des Ruckgleitens erforderliche kleinste Antriebsgeschwindigkeit, wird oft kritische Antriebsgeschwindigkeit genannt:

$$\dot{X}_{0_{kr}} = \frac{\Delta F}{\sqrt{C_n \cdot m f(D)}} \left[\frac{m}{\text{sec}} \right] \quad (7)$$

wobei

$$\Delta F = N(\mu_{p_{max}} - \mu_{p_{min}}) \text{ [kp]} \quad (8)$$

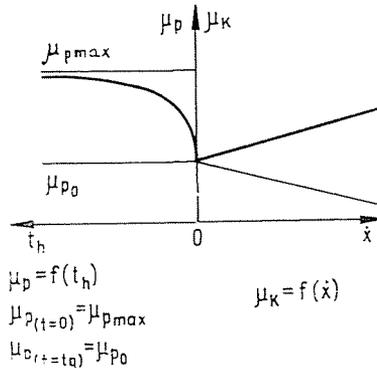


Abb. 3. Die Reibwerte nach DERJAGIN, PUSH, TOLSTOI [3]

der Reibungskraftsprung ist (Abb. 3). (Die Kennlinie des potentiellen Reibwertes in Abhängigkeit von der Haftzeit wurde durch ihre zwei Grenzwerte ersetzt.)

Auf Grund der Untersuchungen von ISLINSKI und KRAGELSKI [4] wurde von SCHINDLER [5] die folgende Funktion für die Kennlinie des potentiellen Reibwertes in Abhängigkeit von der Haftzeit aufgestellt:

$$\mu_p = \mu_{p_{min}} + (\mu_{p_{max}} - \mu_{p_{min}}) \frac{(t_h + t_0)^{\frac{1}{n}}}{(t_h + t_0)^{\frac{1}{n}} + \tau^{\frac{1}{n}}} \quad (9)$$

wobei

- τ (sec) die den Anstieg kennzeichnende Zeitkonstante (Abb. 4),
- t_0 (sec) die Haftzeit für $\mu_{p_0} = \mu_{p_r} + \mu_{p_{min}}$ bedeuten ($\mu_{p_{min}}$ wird beim Ruckgleiten nur mit sehr weichen Antriebsfedern erreicht).

Mit einer ausreichenden Annäherung für $n = 2$ kann für die Grenzwertigkeit von (9) folgende Formel abgeleitet werden:

$$\bar{x}_{0kr} = \frac{N}{C_h} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{(\Delta\mu_p - \mu_{pv})^3}{\Delta\mu_p \cdot \mu_{pv}} \left[\frac{m}{\text{sec}} \right] \quad (10)$$

wobei

$$\Delta\mu_p = \mu_{pmax} - \mu_{pmin} \quad (11)$$

Aus den bisherigen Ausführungen läßt sich feststellen, daß die Grenzgeschwindigkeit durch Werte, die vor allem vom Schmiermittel abhängig sind

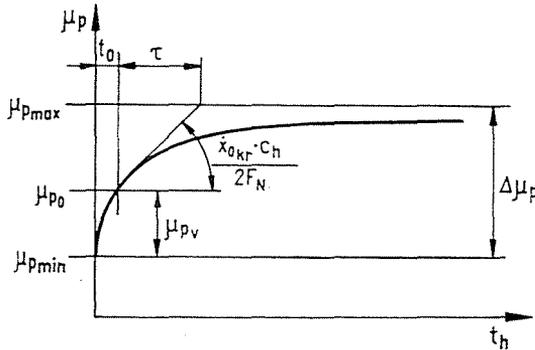


Abb. 4. Die Kennlinie $\mu_p = f(t_h)$ nach SCHINDLER [5]

$[\Delta F$ (Gl. 7), τ , $\Delta\mu_p$, μ_{pv} (Gl. 10)], wesentlich beeinflusst wird. Das heißt, die Bewegungsgenauigkeit gleitgeführter Schlitten ist vom angewandten Schmiermittel stark abhängig.

2. Modellprüfstand

Da die Untersuchung des Ruckgleitens an Originalausführungen für das System Antrieb — Schlitten — Führung nicht ohne weiteres möglich ist, empfiehlt sich hierfür der Einsatz eines Modellprüfstands mit den folgenden Hauptmerkmalen (Abb. 5):

- Antriebsschlitten mit zwei rotierenden Rundführungen,
- ein Meßschlitten der mit einem auf dem Antriebsschlitten befestigten Belastungshebel beliebig belastbar ist,
- leicht veränderliche Meßschlittenmaße,
- leicht austauschbare Antriebsfeder und Meßschlittenführung.

Die wichtigsten Daten des angewandten Führungspaares sind in Abb. 6 zusammengefaßt.

Die Standardabweichung der Meßfehler betrug für eingefahrene Führung bei der Messung der Antriebsfederdeformation ($X_0 - X$) 2,46%, bei der Messung der Haftzeit (t_h) 3,8%.

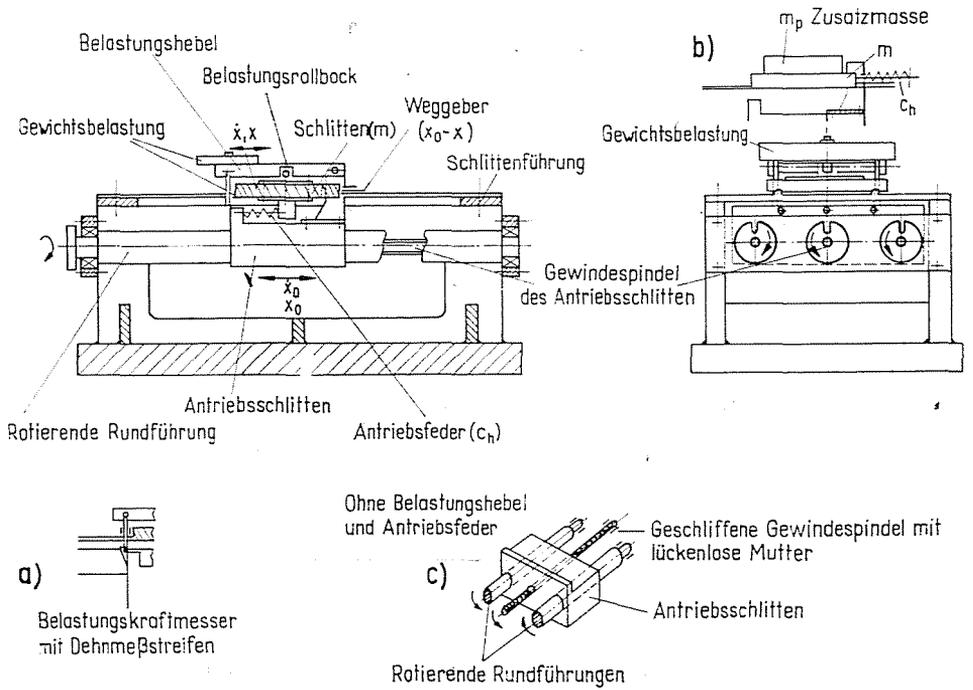
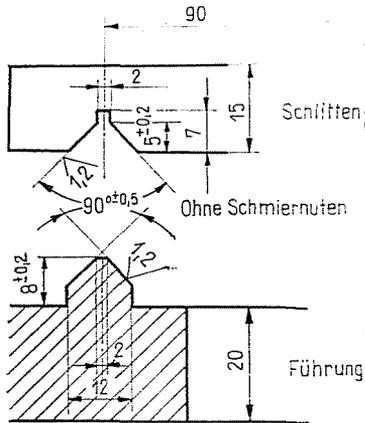


Abb. 5. Der Modellprüfstand



Zusammensetzung

C	3,43	%
Si	1,44	%
Mn	0,62	%
P	0,21	%
S	0,085	%

GG. 26
HB 191 ± 4

GG. 26
HB 186 ± 4

Schlittenlänge: 160 mm

Oberflächenrauheit (mit Topscheiben geschliffen) $R_a \mu m$

	Schlitten	Führung
Nach der Bearbeitung	1,3	1,3
Nach dem Einlauf ($0,5 \cdot 10^3 m$)	0,85	0,86
Nach der Untersuchung ($\sim 2 \cdot 10^5 m$)	0,82	0,83

Temperatur in der Umgebung des Prüfstandes: $22 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Abb. 6. Die wichtigsten Daten des angewandten Führungspaares

Im untenstehenden sind die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen von Bettbahnölen auf dem Modellprüfstand zusammengefaßt.*

3. Die Bestimmung der Kennlinie $\mu_p = f(T_h)$ mit der sogenannten Umkehrmeßmethode

Um die einzelnen Werte der Kennlinie $\mu_p = f(T_h)$ genau zu ermitteln, wurde die nachfolgende Umkehrmeßmethode ausgearbeitet:

Wird die Deformation der Antriebsfeder während einer Umkehr fortlaufend registriert (Abb. 7), können aus dieser Registrierung die Haftzeit

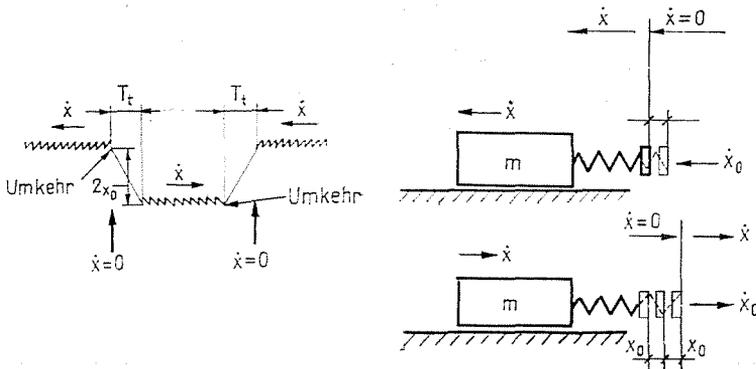


Abb. 7. Die Grundlage der Umkehrmeßmethode

(T_h) und das Doppelte der Antriebsfederdeformation (X_0), die der während dieser Haftzeit (T_n) entstandenen Haftreibungskraft (F_p) entspricht, leicht abgelesen werden, wobei der potentielle Reibwert mit der Formel

$$\mu_{pT_h} = \frac{F_p}{N} = \frac{X_0 \cdot C_h}{N} \quad (12)$$

einfach berechnet wird.

* Die geprüften Bettbahnöle:

- | | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------------------------|---|------|---|------|---|---|---|---|---|-------------------|---|---------------------------------------|
| <table border="0"> <tr><td>A</td><td rowspan="5" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td><td rowspan="5" style="vertical-align: middle;">NAKI</td><td rowspan="5" style="vertical-align: middle;">ungarische Bettbahnöle im Versuchsstadium, deren chemische Zusammensetzung wegen der Patentansprüche der Firma NAKI nicht bekannt gegeben werden kann</td></tr> <tr><td>B</td></tr> <tr><td>C</td></tr> <tr><td>D</td></tr> <tr><td>E</td></tr> </table> | A | } | NAKI | ungarische Bettbahnöle im Versuchsstadium, deren chemische Zusammensetzung wegen der Patentansprüche der Firma NAKI nicht bekannt gegeben werden kann | B | C | D | E | <table border="0"> <tr><td>F</td><td>BP ENERGOL SB4—EP</td></tr> <tr><td>G</td><td>KLÜBER LSP, mit WOLPASIT SECURO Paste</td></tr> </table> | F | BP ENERGOL SB4—EP | G | KLÜBER LSP, mit WOLPASIT SECURO Paste |
| A | } | | | | NAKI | ungarische Bettbahnöle im Versuchsstadium, deren chemische Zusammensetzung wegen der Patentansprüche der Firma NAKI nicht bekannt gegeben werden kann | | | | | | | |
| B | | | | | | | | | | | | | |
| C | | | | | | | | | | | | | |
| D | | | | | | | | | | | | | |
| E | | | | | | | | | | | | | |
| F | BP ENERGOL SB4—EP | | | | | | | | | | | | |
| G | KLÜBER LSP, mit WOLPASIT SECURO Paste | | | | | | | | | | | | |

Die Untersuchungen wurden bei einer Antriebsfedersteifigkeit $C_h = 1,05$ kp/ μ m durchgeführt.

Auf Grund der bestimmten Kennlinienabschnitte $\mu_p = f(T_h)$ (Abb. 8) ergab sich unter Berücksichtigung der Flächenpressung folgende relative Reihenfolge der Bettbahnöle:

B, G, C, F, E, A, D.

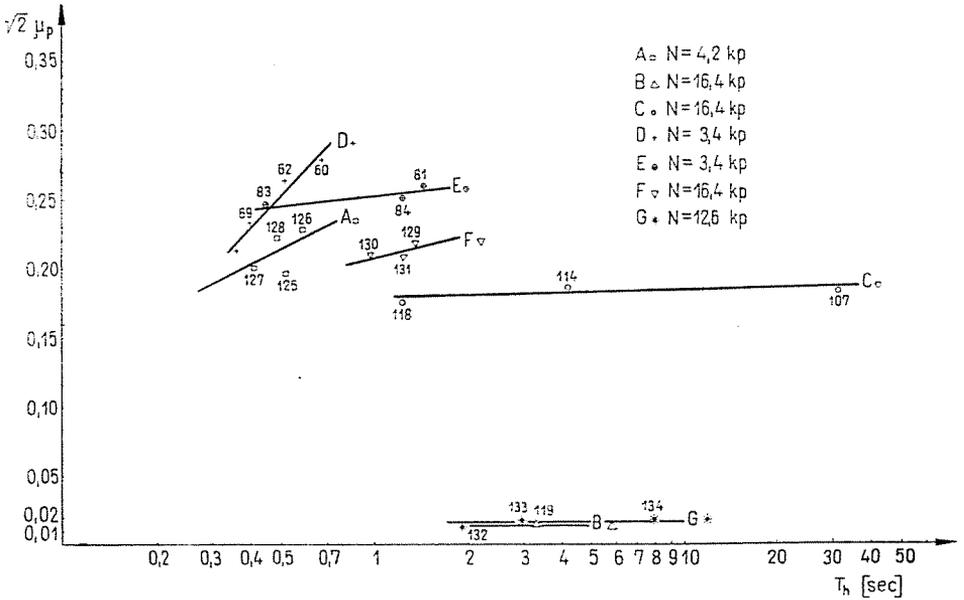


Abb. 8. Die Kennlinienabschnitte $\mu_p = f(T_h)$

4. Die Kennlinie $\mu_p = f(T_h)$ als wichtiger Bettbahnölkennwert

Nachdem die auch aus der einschlägigen Fachliteratur bekannte lineare Kennlinie der Grenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Schlittenmaßen

$$\dot{X}_{0,kr} = f(m) \tag{13}$$

bei den geprüften Bettbahnölen bestimmt wurde (Abb. 9), ließ sich eine relative Reihenfolge der geprüften Bettbahnöle aufstellen.

Diese stimmt mit der auf Grund der Kennlinienabschnitte $\mu_p = f(T_h)$ (Abb. 7) aufgestellten relativen Reihenfolge überein. Diese Übereinstimmung beweist, daß die Bettbahnöle hinsichtlich des Ruckgleitens auf Grund der nach der Umkehrmeßmethode ermittelten Kennlinienabschnitte $\mu_p = f(T_h)$ qualifiziert werden können, und daß zwischen der Grenzgeschwindigkeit und

der Kennlinie des potentiellen Reibwertes in Abhängigkeit von der Haftzeit ein enger Zusammenhang besteht.

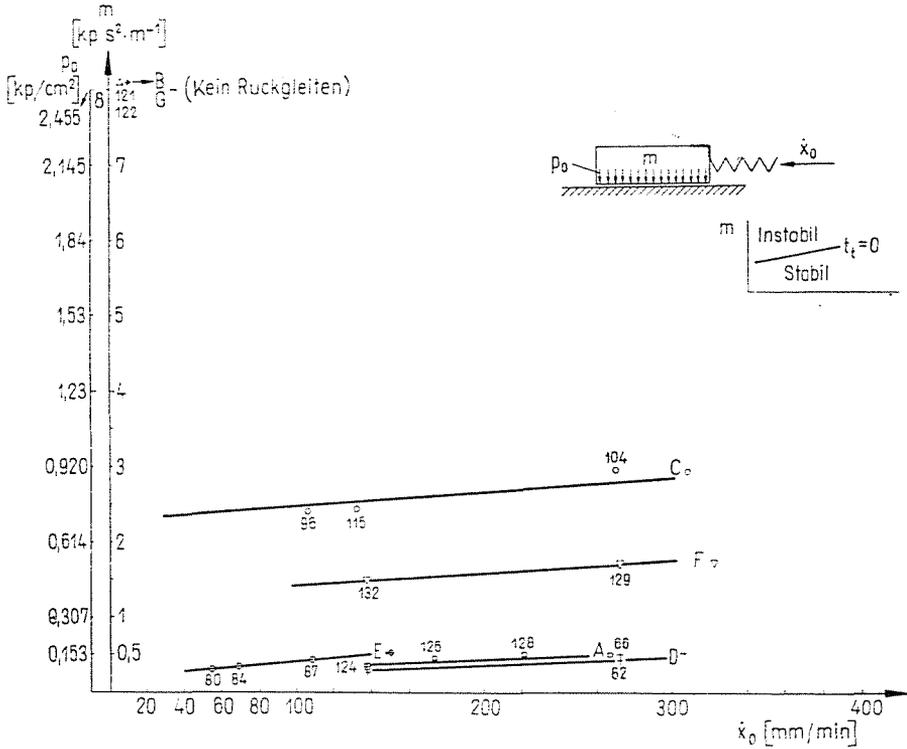


Abb. 9. Die Kennlinienabschnitte $X_{0kr} = f(m)$

Die mathematische Formulierung dieses Zusammenhangs soll mit computerunterstützten theoretischen Untersuchungen ermittelt werden.

Zusammenfassung

Es werden mit Hilfe des mechanischen Ersatzsystems für die Baugruppe Führung — Schlitten — Antrieb der Bewegungsverlauf des Rückgleitens sowie an Hand einer Komplexdarstellung des Reibwertverlaufes nach SCHINDLER die Ursache dieser Relaxationsschwingung erörtert.

Durch die Analyse der Einflußfaktoren der Grenzgeschwindigkeit wird bewiesen, daß die Bewegungsgenauigkeit gleitgeführter Schlitten von dem angewandten Schmiermittel stark abhängig ist.

Der benutzte Modellprüfstand wird beschrieben, und eine sogenannte Umkehrmeßmethode für die Bestimmung der Kennlinie $\mu_p = f(T_h)$ erörtert.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß

- der Modellprüfstand für die Untersuchung des Rückgleitens geeignet ist,
- die Kennlinie des potentiellen Reibwertes in Abhängigkeit von der Haftzeit nach der Umkehrmethode ermittelt werden kann,
- diese Kennlinie ein wichtiger Bettbahnölkennwert ist,
- die Grenzgeschwindigkeit mit dieser Kennlinie in engem Zusammenhang steht.

Literatur

1. ARZ, G.: Die theoretischen Zusammenhänge des Ruckgleitens (ungarisch). *Gép XVIII*, 464—470 (1966).
2. SCHLINDLER, H.: Analyse und Näherungsberechnung der ungleichförmigen Schlittenbewegung bei Werkzeugmaschinen. 6. Int. Werkzeugmaschinenntagung 1968. Dresden. Manuskript.
3. DERJAGIN, V., PUSH, V., TOLSTOI, D.: Theorie für die Reibung fester Körper bei Ruckgleiten (russisch). *ZSTF*, **22**, 12—18 (1956).
4. ISLINSKI, A. I., KRAGELSKI, I. V.: Über das Ruckgleiten (russisch). *ZSTF* **14**, 276—282 (1944).
5. SCHLINDLER, H.: Analyse und Näherungsberechnung der ungleichförmigen Schlittenbewegung bei Werkzeugmaschinen. *Maschinenbautechnik* **17**, 627—632 (1968).

Bezeichnungen

C_h	kp mm ⁻¹	Antriebssteifigkeit
D		Dämpfung
F_N	kp	Lastkraft
k_h	kp s m ⁻¹	Antriebsdämpfung
m	kp s ² m ⁻¹	Schlittenmasse
$NF_N \div mg$	kp	Normalkraft
p_0	kp cm ⁻²	Flächenpressung
t_g	sec	Gleitzeit
t_h	sec	Haftzeit
T_h	sec	Haftzeit bei Umkehr
t_0	sec	Haftzeit bei μ_{p_0}
τ	sec	Zeitkonstante
μ_p		potentieller Reibwert
μ_K		kinetischer Reibwert
\tilde{X}	mm	Schlittenweg
\tilde{X}_0	m sec ⁻¹	Antriebsgeschwindigkeit
\tilde{X}_{0kr}	m sec ⁻¹	kritische Antriebsgeschwindigkeit

Gusztáv ARZ, Budapest XI, Stoczek u. 2—4. Ungarn