

Experimentelle Untersuchung der haftungsbestimmenden Mechanismen zwischen zwei metallischen Körpern

H. Lorenz und M. Köhler

1 Einleitung und Zielsetzung

Bei der Handhabung metallischer Körper, beispielsweise durch Greifer oder Roboter, ist die Größe des Haftreibungskoeffizienten μ_0 zwischen beiden Reibpartnern von ausschlaggebender Bedeutung.

Welchen Wert hat nun der Haftreibungskoeffizient für eine konkrete Werkstoffpaarung? Welche Parameter beeinflussen die Größe von μ_0 ? Läßt sich eine Vorhersage von μ_0 unter bestimmten Randbedingungen mit hinreichender Genauigkeit durchführen? Diese Fragestellungen bildeten die Ausgangsbasis unserer Untersuchungen.

In *Abb. 1.1* ist der Einfluß verschiedener Parameter auf den Koeffizienten der Haftreibung μ_0 dargestellt. Werkstoffeigenschaften, wie z. B. die Härte des Materials oder geometrische Oberflächenkenngrößen sowie auf mikroskopischer Ebene Adhäsionsvorgänge beeinflussen μ_0 .

Zum Teil üben die Parameter einen gegenseitigen Einfluß aufeinander aus, sodass eine separate Variation einer einzigen Kenngröße schwierig, wenn nicht sogar unmöglich ist. Beispielsweise hat eine Erhöhung der Temperatur gleichzeitig eine Verringerung der Härte sowie den Aufbau einer Oxidschicht zur Folge.

Aufgrund des direkten Praxisbezugs der Untersuchungen sind die Probekörper vor Versuchsbeginn nicht gereinigt worden. Desweiteren wurden die Experimente nicht unter Schutzgas oder im Vakuum durchgeführt, sondern unter „normalen“

Umgebungsbedingungen. Insbesondere hat man eine Oberflächenveränderung der Werkstücke durch Abbildung einer Oxid- bzw. Zunderschicht nicht versucht zu unterdrücken.

Ziel der Forschungsarbeiten war die qualitative und quantitative Erfassung des Einflusses der maßgebenden Parameter auf die Größe des Haftreibungskoeffizienten μ_0 zwischen zwei metallischen Körpern unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur.

2 Beschreibung des Versuchsstandes und der Versuchsdurchführung

Die Versuchsanordnung bestand im wesentlichen aus einer Einspannvorrichtung für stabförmige Probekörper mit quadratischem Querschnitt, die in vertikaler Lage fixiert wurden, sowie einer Vorrichtung zur definierten Steigerung der Ausdrück- bzw. Tangentialkraft (siehe *Abb. 2.1*: Vorderansicht des Versuchsstandes mit eingespanntem Probekörper).

Im Zuge der Optimierungsschritte ist die Geometrie der Wirkflächen beider Reibpartner verändert worden. Anfänglich verwendete man relativ spitze Druckpilze und danach ebene Druckbacken. Hinsichtlich einer symmetrischen Kraftübertragung und einer möglichst geringen Beschädigung der Oberflächen der Probekörper durch Verformung stellten sphärisch abgerundete Druckbacken ($R = 800$) ein Optimum dar.

Einfluß verschiedener Parameter auf den Haftreibungskoeffizienten μ_0

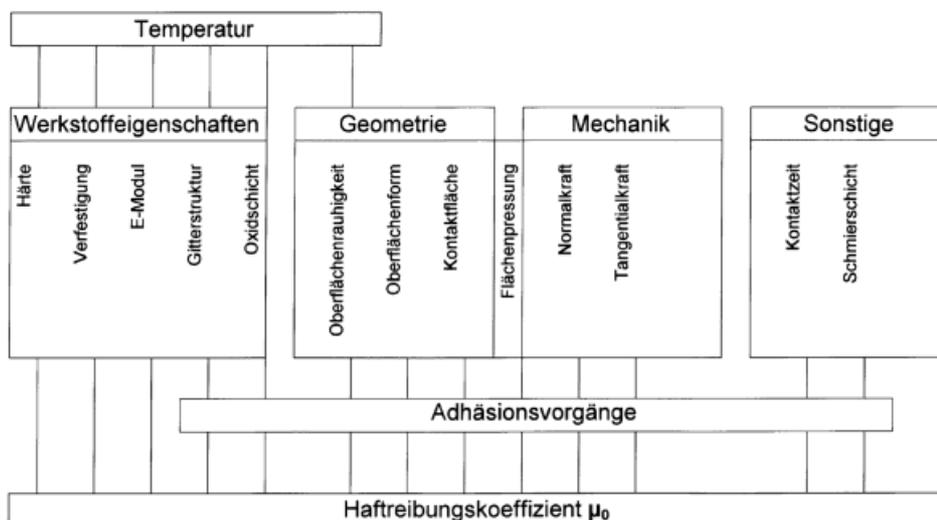


Abb. 1. Übersicht über den Einfluß verschiedener Parameter auf den Haftreibungskoeffizienten μ_0 (erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit)

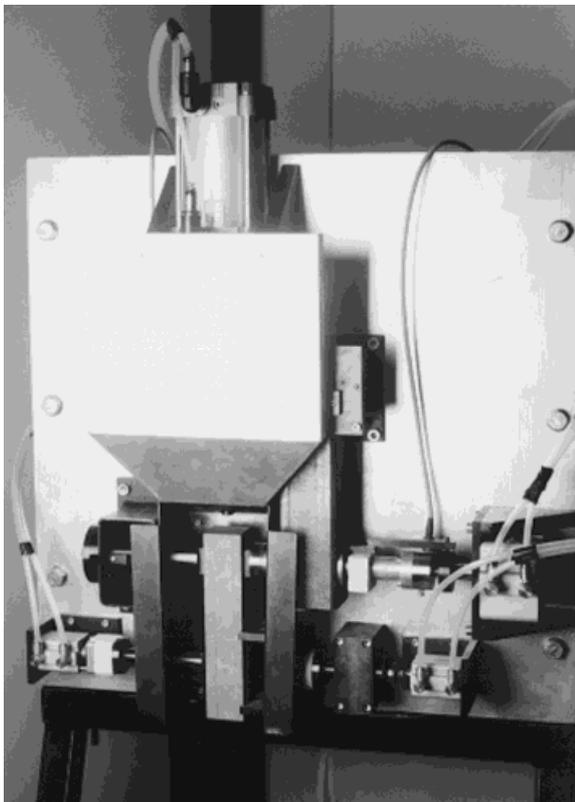


Abb. 2.1. Vorderansicht des Versuchsstandes mit eingespanntem Probekörper

Die zu ermittelnden Temperaturen (zwischen RT und 600 °C) der Probekörper wurden mit einem Nickel/Chrom-Nickel Widerstandsthermometer erfaßt, und zwar zeitgleich mit der Meßdatenerfassung der Kräfte.

Horizontal- und Vertikalkraft wurden pneumatisch aufgebracht und konnten stufenlos durch Verstellen von Ventilen variiert werden. Personenabhängige Fehlerquellen in bezug auf die Art der Kraftaufbringung sowie Ablesungenauigkeiten wurden weitestgehend durch eine digitale, online Meßdatenerfassung eliminiert. Zeitgleich erfaßte man Normal- und Ausdrückkraft, und zwar unabhängig davon, ob die Probe rutschte oder nicht. Nach offensichtlichem, makroskopischen Rutschen der Probekörper wurde der Versuch beendet, da ausschließlich der Haftreibungskoeffizient im Mittelpunkt des Interesses stand und nicht der Gleitreibungskoeffizient.

Man hat die Normalkraft in der Regel zwischen 400 N und 2000 N variiert. Einen Überblick über die Größenordnung der Variationsbreiten der verschiedenen Parameter gibt *Abb. 2.2*.

Beim Auftreffen des Ausdrückstempels auf den Probequader verhielt sich die Steigerungsrate der Tangentialkraft analog zum Öffnungsgrad des Regelventils. Der Gradient des Kraftanstiegs für die Vorschübe 1, 2, und 3 betrug etwa 10, 20 bzw. 30 N/s (siehe *Abb. 2.2*).

Mit Hilfe eines Hommel-Meßgerätes hat man das Oberflächenprofil der Proben sowie der Druckbacken im Bereich der Kontaktfläche (und auch außerhalb) aufgenommen und die Oberflächenrauigkeit bestimmt.

| Variationsbreiten der experimentell untersuchten Parameter | | |
|--|---------------------------|--|
| Reale Kontaktfläche | A_{real} | = (20) 80 300 [mm ²] |
| Flächenpressung | p_{real} | = 1,0 50 (200) [N / mm ²] |
| Normalkraft | F_N | = 200 4000 [N] |
| Tangentialkraftsteigerungsrate | $\delta / \delta t (F_T)$ | = ca. 10 50 [N / s] |
| Oberflächenrauigkeit | Rz | = 1 50 [µ m] |
| Temperatur | T | = RT 1200 [° C] |
| Werkstoffe Probekörper (Auswahl) | | C-Stahl (St37) Grauguß (GGL 40, GGG 25) Edelstahl (1.4016, 1.4301, 1.4512) Aluminium (Al99) |
| Werkstoffe Druckbacken (Auswahl) | | C-Stahl (St52, C45) Edelstahl (1.4301) Aluminium (Al99) |

Abb. 2.2. Variationsbreiten der experimentell untersuchten Parameter

3 Diskussion der Versuchsergebnisse

Im Rahmen dieses Vortrages werden die Versuchsergebnisse für folgende Parameter diskutiert:

- Temperatur
- Anpreßkraft/Normalkraft
- Steigerungsrate der Tangentialkraft
- Oberflächenrauigkeit

Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse erfolgte nach Abbildung des arithmetischen Mittelwertes aus fünf bis zehn Meßwerten pro Kraft bei der jeweiligen Temperatur. Offensichtliche Ausreißer sind bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt worden. Nach Durchführung umfangreicher Versuchsreihen konnte die Gauß'sche Normalverteilung der Meßergebnisse sowohl für die Verteilung der Oberflächenrauigkeiten als auch für die Werte der Haftreibungskoeffizienten nachgewiesen werden.

3.1 Temperatur

Bei Erwärmung von RT auf Versuchstemperaturen bis 400 °C bei Aluminiumproben (bis 600 °C bei C-Stahl-Proben) trat ein Steilanstieg im Verlauf des Koeffizienten der Haftreibung zwischen 100 und 200 °C auf. Innerhalb dieses Temperaturbereichs stieg μ_0 von 0,27 auf 0,72 bei Aluminium (von 0,20 auf 0,45 bei C-Stahl) an (siehe *Abb. 3.1*: und *Abb. 3.2*: Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarungen Al99 und St37 gegen C45 in Abhängigkeit von der Temperatur). Dieser Sprung im Verlauf des Haftreibungskoeffizienten trat für alle untersuchten Normalkräfte auf.

Den Abbildungen 3.1 und 3.2 lagen die Mittelwerte der Reibbeiwerte für alle untersuchten Kräfte zugrunde. Von 200 bis 400 °C bei Al99 (bzw. 200 bis 600 °C bei C-Stahl) lag ein nahezu konstanter Verlauf des Haftreibungskoeffizienten auf höherem Niveau vor.

Die Temperaturerhöhung bewirkte eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit aufgrund der verstärkten Ausbildung der Oxidschicht. Probequader im Anlieferungszustand aus Al99 wiesen eine durchschnittliche Rauhtiefe Rz von etwa 6 µm

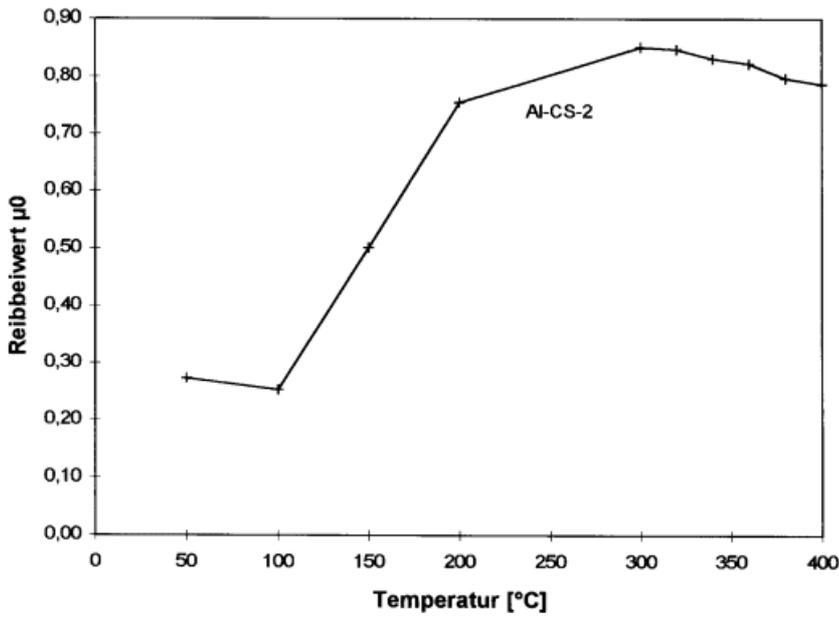


Abb. 3.1. Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung Al199-C45 in Abhängigkeit von der Temperatur

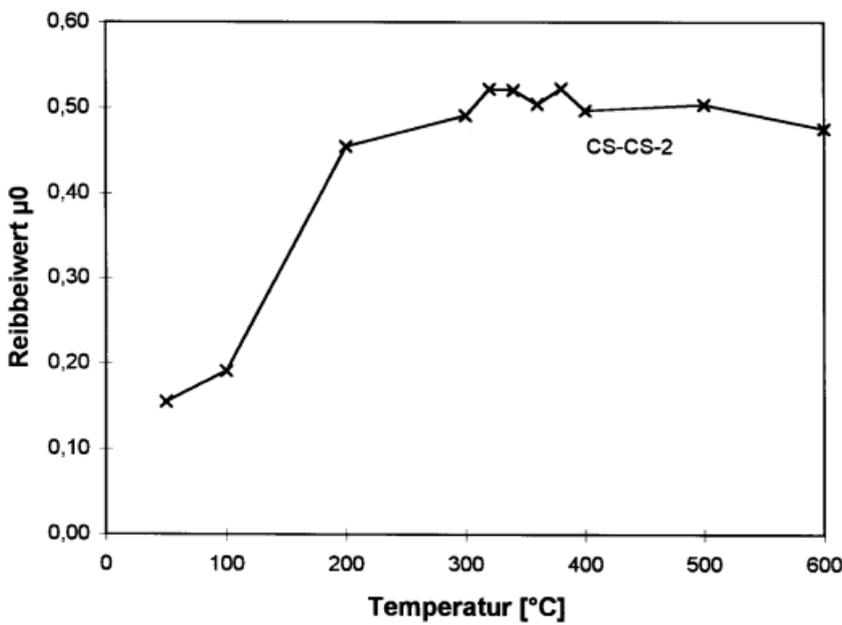


Abb. 3.2. Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung St37-C45 in Abhängigkeit von der Temperatur

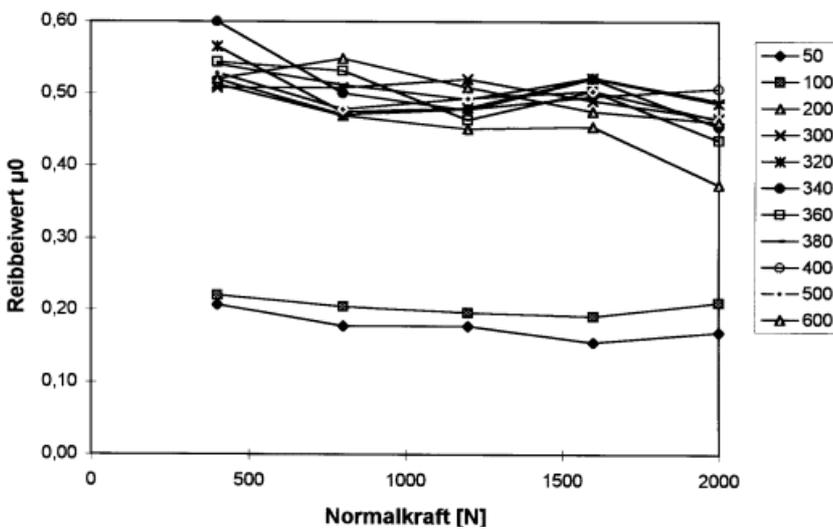


Abb. 3.3. Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung St37-C45 in Abhängigkeit von Temperatur und Normalkraft

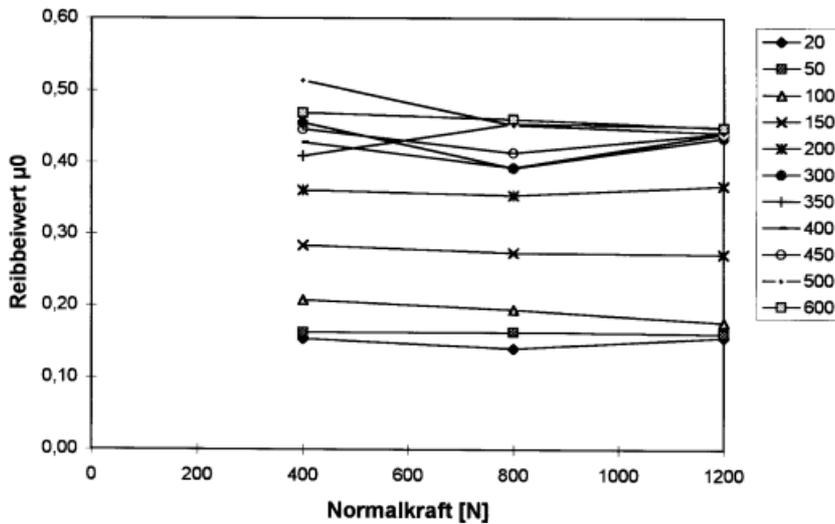


Abb. 3.4. Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung 1.4301-C45 in Abhängigkeit von Temperatur und Normalkraft (Vorschub 3)

auf, während nach Aufheizen auf 400 °C die Oberflächenrauigkeit deutlich auf etwa 16–26 μm angestiegen war. Parallel dazu bewirkte eine temperaturbedingte Abnahme der Werkstofffestigkeit, besonders bei Al99, eine Begünstigung höherer Haftreibungskoeffizienten, da sich die Oberflächen von Quader und Druckbacke besser einander anpassen konnten und die reale Kontaktfläche wuchs.

3.2 Anpreßkraft / Normalkraft

In *Abb. 3.3* ist der Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung St37-C45 in Abhängigkeit von Temperatur und Normalkraft dargestellt. Bei allen Temperaturen bewirkte eine Zunahme der Normalkraft lediglich einen schwach ausgeprägten Abfall des Haftreibungskoeffizienten. Bei höheren Temperaturen war die beobachtete Abnahme von μ_0 größer, da das Grundmaterial zunehmend er-

weichte. Durch die Aufnahme der Oberflächenprofile vor und nach dem Versuch konnte das „Plattdrücken“ der obersten Spitzen nachgewiesen werden. Die Kontaktstelle wurde glatter und μ_0 sank, obwohl sich gleichzeitig die reale Kontaktfläche vergrößerte.

Bei dem Kurvenverlauf der Werkstoffe Edelstahl gegen C-Stahl in *Abb. 3.4* war praktisch kein Einfluß der Normalkraft auf die Größe des Koeffizienten der Haftreibung festzustellen.

3.3 Steigerungsrate der Tangentialkraft

Die Rate, mit der die Tangentialkraft erhöht wurde, beeinflusste ebenfalls den Wert von μ_0 . Der Einfluß dieses Parameters war eng mit dem Versuchsaufbau verknüpft, da sich z. B. Spiel in den Auflagern und auch das Auffederungsverhalten des Versuchsstandes auf die Meßergebnisse auswirkten. *Abb. 3.5* zeigt den Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0

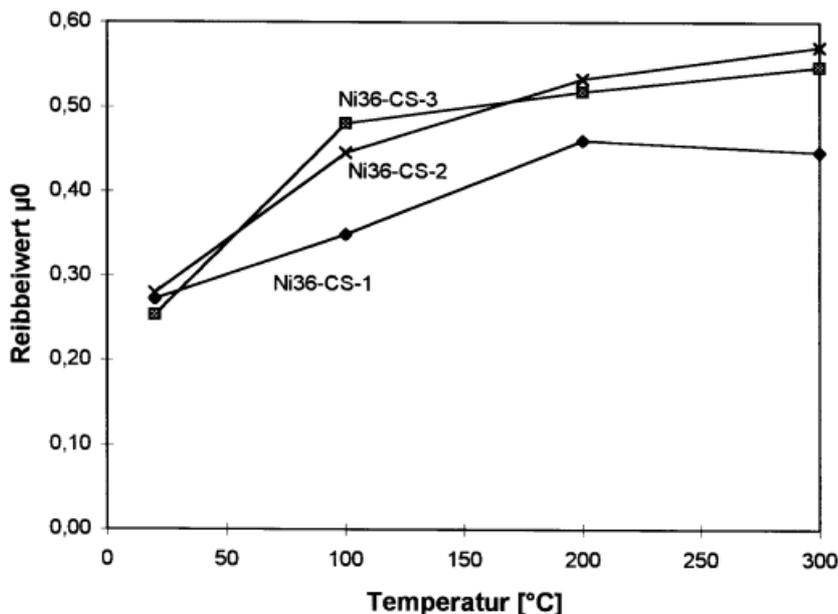


Abb. 3.5. Verlauf des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung Ni36-C45 in Abhängigkeit von Temperatur und Steigerungsrate der Tangentialkraft (Vorschub 1, 2, 3)

SS-SS-2 bei RT

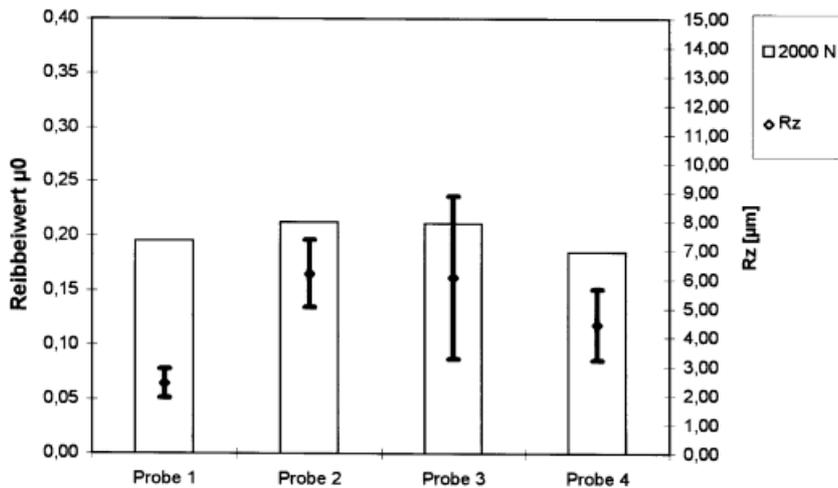


Abb. 3.6. Gegenüberstellung des Haftreibungskoeffizienten μ_0 für die Werkstoffpaarung 1.4301-1.4301 in Abhängigkeit von der Normalkraft bei Raumtemperatur und der Oberflächenrauigkeit Rz der Probe (Rz, Backe = 12,34 μm)

in Abhängigkeit von Temperatur und Steigerungsrate der Tangentialkraft. Allerdings war die Variationsbreite dieser Einflußgröße nicht besonders groß (siehe Abb. 2.2).

Bei Ni36-Probequadern gegen C45-Backen im Temperaturbereich zwischen 100 und 300 °C hatte eine Zunahme der Rate der Tangential- bzw. Ausdrückkraft tendenziell eine leichte Erhöhung des Haftreibungskoeffizienten zur Folge. Ähnlich wie bei dem Einfluß der Normalkraft bzw. der Flächenpressung ließ sich jedoch nur eine relativ geringe Veränderung von μ_0 ablesen.

3.4 Oberflächenrauigkeit

Unterschiedliche Größen der Oberflächenrauigkeit zum einen sowie grobe Riefen oder Vertiefungen zum anderen bewirkten eine deutliche Erhöhung des Koeffizienten der Haftreibung (Tendenz zum Formschluß). Dagegen konnte das Abplatzen einer Zunderschicht, die eine größere Rauigkeit besaß als die Oberfläche des Ausgangswerkstoffes, zu einer deutlichen Absenkung des Haftreibungskoeffizienten führen.

Besondere Beachtung verdient in Zusammenhang mit Reibungsuntersuchungen die Tatsache, dass allein die Größe der Oberflächenrauigkeit (Ra, Rz usw.) nur bedingt aussagekräftig ist. Von großem Einfluß sind insbesondere die Ausprägung der Rauigkeitsspitzen (abgerundet, spitz, Sägezahnprofil usw.) [1]. Im Gegensatz zu den Erhebungen der Oberfläche sind die „Täler“ von untergeordneter Bedeutung [2].

Als Bezugsgröße für den Einfluß der Oberflächenrauigkeit ist Rz gewählt worden, da hier der Mittelwert aus dem senkrechten Abstand der n höchsten Spitzen und den n tiefsten Tälern von der Mittellinie einer Meßstrecke gebildet wird.

Für die Werkstoffpaarung 1.4301–1.4301 ist für RT der Einfluß der Oberflächenrauigkeit auf die Größe des Reibwertes in Abb. 3.6 dargestellt. Tendenziell ließ sich feststellen, dass eine Oberfläche mit größerer Rauigkeit auch zu einem größeren Wert von μ_0 führt.

Bei höheren Temperaturen bzw. dickeren Oxidschichten war dieser Effekt noch deutlich ausgeprägter (vgl. Ausführungen unter obigem Kapitel Temperatur). Hier lag der Wert für μ_0 bei 0,28 (Werkstoffpaarung Al-CS; T = 50 °C) bei einer

durchschnittlichen Rauhtiefe Rz von etwa 6 μm , während nach Beenden der Versuchsreihe, d. h. nach einer insgesamt mehrstündigen „Glühbehandlung“ des Probequaders bei Temperaturen bis zu 400 °C sich die Rauhtiefe auf etwa 21 μm erhöhte. Die Referenzmessung der erkalteten, mit einer dickeren Oxidschicht behafteten Probe ergab einen Wert für μ_0 von 0,63 bei T = 50 °C.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend läßt sich feststellen, dass viele Faktoren die Größe des Haftreibungskoeffizienten beeinflussen. Von besonderem Interesse sind neben den Werkstoffkenngrößen die Oberflächenparameter. Die Auswirkung einer Oxidschicht oder gar einer Schmierschicht auf den Haftreibungskoeffizienten ist sehr groß. Im Rahmen dieses Vortrags kann man zusammenfassen, dass die Parameter Normalkraft (Flächenpressung) und Steigerungsrate der Tangentialkraft eher einen untergeordneten Einfluß auf μ_0 haben. Die Einflußfaktoren Oberflächenrauigkeit und Temperatur bzw. Folgererscheinungen der Temperaturerhöhung haben eine größere Auswirkung auf den Wert des Haftreibungskoeffizienten.

Langfristig ist angestrebt, mit Hilfe numerischer Berechnungsmethoden die Vorhersage des Reibungsverhaltens von metallischen Werkstoffpaarungen zu gestatten.

Literatur

1. Myers, N.O., Characterization of surface roughness; Wear, 5 (1962), S. 182–189.
2. Ghabrial, S.R., Zaghlool, S.A., The effect of surface roughness on static friction; Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 14 (1974), S. 299–309.

Anschrift: H. Lorenz, M. Köhler, Universität Dortmund, Experimentelle Mechanik

Eingangsdatum: 12.4.00

[T 252]