



Martin Köhler (Autor)

**Beitrag zur Bestimmung des COULOMB'schen
Haftreibungskoeffizienten zwischen zwei metallischen
Festkörpern**

Martin Köhler

**Beitrag zur Bestimmung des COULOMB'schen
Haftreibungskoeffizienten zwischen zwei
metallischen Festkörpern**



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2429>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Allgemeines zu Reibung und insbesondere Haftreibung

Reibung entsteht bei der Wechselwirkung von sich gegenseitig berührenden Oberflächen. Sie wirkt der Relativbewegung sich berührender Körper entgegen [1]. Das Verhältnis von Reibungskraft F_R zur wirkenden Normalkraft F_N wird als Reibungszahl oder Reibungskoeffizient μ bezeichnet [2].

Nutzbringend wird die Reibung im wesentlichen zur Übertragung von Kräften angewandt [3].

Im täglichen Leben, in der Technik oder im Maschinenbau spielen Reibungsvorgänge eine entscheidende Rolle, beispielsweise beim Bremsen oder Beschleunigen von Kraftfahrzeugen oder beim Schilanglauf. Die Qualität der Reibpaarung wird maßgeblich von dem absoluten Wert des Reibungskoeffizienten bestimmt. Je nach Größe des Reibungskoeffizienten kann ein Durchdrehen der Räder (mit geringer Beschleunigung des Kraftfahrzeugs oder der Lokomotive) oder ein Abrollen praktisch ohne Schlupf vorliegen. Mit steigendem Reibungskoeffizienten zwischen Radreifen der Lokomotive und Schiene wird die Antriebskraft besser übertragen bzw. bei besserer Haftung während der Abstoßphase legt der Schilangläufer die Strecke mit entsprechend höherer Geschwindigkeit oder geringerem Krafteinsatz zurück.

Ein großer Reibungskoeffizient bedeutet aber auch das Vorhandensein von Sicherheitsreserven, sei es beim Heben von Werkstücken oder Bauteilen unter statischen und dynamischen Belastungen, bei Reibschlußverbindungen (Preßverbänden, Klemmverbindungen, Welle-Nabe-Verbindungen) oder bei der Verspannung zweier Platten, die durch Schraubenverbindungen gehalten werden [4, 5].

Solange sich die Berührungsflächen nicht gegeneinander bewegen, spricht man von Ruhe- oder Haftreibung, im anderen Fall von Gleitreibung. Man unterscheidet in Abhängigkeit vom Kontaktzustand der Reibungspartner unterschiedliche Reibungszustände:

- Festkörperreibung (auch trockene, metallische, ungeschmierte Reibung)
- Flüssigkeits- und Gasreibung (auch Reibung mit Schmiermittel)
- Mischreibung
- Grenzreibung

[nach 1-3]

1.2 Anwendungsgebiete der Haftreibung

1.2.1 Schrumpfverbindungen

Schrumpfverbindungen sind in der Industrie neben dem Längseinpressen von Bolzen in Bohrungen die gängigsten reibschlüssigen Verbindungen von Wellen mit Naben oder Zapfen mit gebohrten Elementen. Die Auslegungsberechnung von Schrumpfverbänden - mit einem zu übertragenden Drehmoment durch die Pressung der gesamten Nabenfläche - wird mit einem geschätzten Reibbeiwert durchgeführt [4, 5].

Aufgrund experimenteller Ergebnisse wies LORENZ nach, daß kein gleichmäßiger Kontakt zwischen Welle und Nabe existiert, sondern eine Verdrehung beider Bauteile gegeneinander auftritt und daher eine gleichmäßige Momentenübertragung nicht vorliegt. Die Welle verdrillt sich beim Drehmomentangriff sowohl vor als auch in dem Nabensitz. Die Größe des übertragbaren Drehmomentes hängt nach dem Coulomb'schen Reibungsgesetz von dem Haftreibungskoeffizienten und von der Belastung ab [4, 5].

1.2.2 Greifer bzw. Handhabungsgeräte

Die Hauptaufgabe eines mechanischen Greifers ist das Halten und Bewegen eines Greifobjektes durch kraftschlüssige Verbindung. Greifer haben die Aufgabe, Güter anzuheben, zu transportieren und zu positionieren. Zu ihrer mechanisch exakten Auslegung müssen daher die Kontaktwechselwirkungen zwischen Greifer und Greifgut bekannt sein.

Einerseits soll der Greifer das Gut sicher handhaben ohne Gefährdung für Personen oder Güter, andererseits soll er das Gut nicht unzulässig verformen, um es für weitere Bearbeitungsvorgänge in seiner Ursprungsgestalt zu erhalten. Beim Greifen erwärmter Stahlbauteile mit großem Gewicht, z.B. beim Umschmieden, hängt die maximal verfügbare Hubkraft vom Hallenkran ab. Wird ein Greifer zu schwer ausgelegt, verringert sich also das mögliche Hub- und Transportgewicht der Lasten.

Beim Greifen durch reines Spannen (Klemmgriff) werden die Werkstücke allein durch Reibkräfte gehalten. Die Kontaktflächen begrenzen die Greifbewegung. Die Anwendung ist beim Außen-, Zwischen- und Innengriff möglich (siehe **Bild 1** bis **3**). Die Belastung der Werkstücke ist groß, da oft nur Punkt- oder Linienberührung vorliegt [6].

Beim Greifen muß die Greifbarkeit des Teils gegeben sein, gegebenenfalls durch Anbringen von nur für den Greifvorgang benötigten Flächen. Unter Einwirkung der

Greifkraft, die durch Füge- und Gewichtskräfte vorgegeben wird, soll das Teil formstabil bleiben [6].

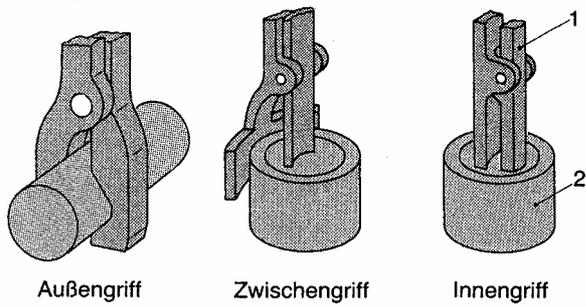


Bild 1: Griffvarianten [6] 1 Finger 2 Werkstück

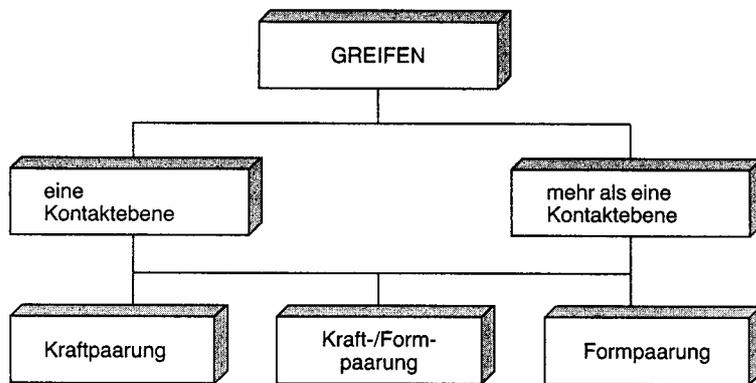


Bild 2: Gliederung des Greifens [6]

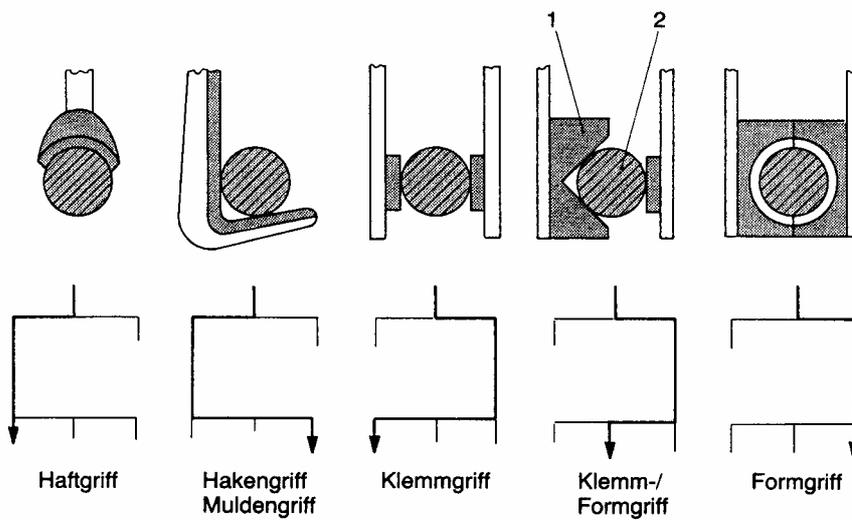


Bild 3: Griffvarianten [6] 1 Greiforgan 2 Objekt

Um Greifen, Halten und Ablegen ausführen zu können, muß der Greifer statische, dynamische und prozeßbedingte Kräfte und Momente aufnehmen bzw. übertragen können. Statische Kräfte und Momente werden vom Werkstück hervorgerufen. Dynamische Kräfte oder Momente entstehen durch den Bewegungsablauf und aus prozeßbedingten Vorgängen, wie z.B. Montieren. Die Greifkraft wird wesentlich durch Form und Reibbeiwert zwischen Greiffläche und Objekt sowie durch die Objektmasse bestimmt [6].

1.3 Möglichkeiten zur Beeinflussung des Haftreibungskoeffizienten

Bei der Handhabung metallischer Körper, beispielsweise durch Greifer oder Roboter, ist die Größe des Haftreibungskoeffizienten μ_0 von ausschlaggebender Bedeutung. Die kraftschlüssige Verbindung zwischen "Greifer" und "Greifobjekt" wird von den haftungsbestimmenden Mechanismen am Wirksystem beeinflusst. Man ist demnach bestrebt, einen möglichst großen Reibungskoeffizienten bei derartigen Reibpaarungen zu erzielen. Dieses kann unter anderem durch folgende Maßnahmen bewirkt werden:

- Wahl einer anderen Werkstoffpaarung
- Entfernung von Fremdschichten
- Erzeugung eines Anteils an Formschluß

Die Grenze zwischen Formschluß und Reibschluß ist sicherlich nicht exakt anzugeben. Beispielhaft seien an dieser Stelle die Profilierung von Geländefahrzeugreifen, die Schuppung von Langlaufskiern im Abstoßbereich (Strukturierung der Oberfläche) oder die Verwendung von Spikes bei Sprinterschuhern genannt. Bei den oben angegebenen Beispielen bewirken Formschlußanteile bei der Kraftübertragung eine Erhöhung des Haftreibungskoeffizienten.

Zum anderen läßt sich durch eine entsprechende Werkstoffauswahl aber auch ein möglichst niedriger Reibungskoeffizient erzielen (Teflon auf Stahl). Das Aufbringen einer aufgespritzten Schicht (Chromoxid) auf Greifwerkzeugen bewirkt dagegen eine Vergrößerung der übertragbaren Kraft.

Im Gegensatz dazu kann man durch Verunreinigung oder Schmierung der Oberfläche mit Öl, Grafit etc. eine erhebliche Reduzierung der Reibung bewirken. Daher führt eine Reinigung der Oberflächen bzw. eine Entfernung von Oberflächenschichten im allgemeinen zu höheren Reibungskoeffizienten.

1.4 Haftreibung bei hohen Temperaturen

Nicht nur bei Umgebungstemperaturen, sondern auch bei höheren Temperaturen spielen Reibungsvorgänge im Maschinenbau eine große Rolle. Bei Stahlerzeugern erfolgt die Handhabung großer Ronden während des Transports von der Kokillenform zur Walzstraße bzw. Schmiedepresse mittels Greiferzangen bei einer Temperatur bis zu 1200 °C. Aber auch andere Rohmaterialien und über 300 t schwere Halbzeuge, wie z.B. Schmiedestücke, Gußstücke oder geschweißte Bauteile werden durch Roboter und andere Hebezeuge bewegt.

Die Handhabung von Gußstücken nach der Erstarrung, aber noch während des Abkühlprozesses, wird zwar im allgemeinen durch Formschluß und nicht durch Reibschluß ermöglicht (Ösen, natürliche Bauteilöffnungen, Vorsprünge etc.), aber häufig erfolgen dennoch Transport- und Positioniervorgänge mittels Reibschluß, z.B. mit geriffelten Preßbacken.

Beim Gußeisenwarmschweißen (insbesondere bei Fertigungsschweißungen) liegen die Vorwärmtemperaturen zwischen 500 und 700 °C, beim Gußeisenkaltschweißen (überwiegend bei Konstruktions- und Reparaturschweißungen) zwischen 5 und 300 °C. Die Vorwärmung wird in Öfen durchgeführt, um eine gleichmäßige Durchwärmung zu gewährleisten [7]. D.h. das zu schweißende Gußbauteil wird anschließend bei hohen Temperaturen für die Fertigung oder Reparatur bewegt und positioniert.

In Zukunft wird auch die Handhabung von Bauteilen mit oder ohne Oxidschicht im Weltraum bei extremen Temperaturen durch Serviceroboter eine zunehmend breitere Anwendung finden.

1.5 Unzureichender Berechnungsansatz für Haftreibung in der Literatur

Ein Unfall bei einem Stahlerzeuger während des Hebens einer Stahlrunde von der Kokille auf eine Rollenstraße hat Überlegungen zur Folge gehabt, die die Konstruktion von Greiferzangen und auch die Berechnungsgrundlagen für deren Auslegung näher in den Mittelpunkt des Interesses rücken ließ.

Zu einem Zeitpunkt, wo in vielen Disziplinen mit hohem Aufwand Optimierungen durchgeführt werden, wie z.B. im Automobilbau, wo Wanddicken von Karosserieblechen und anderen Bauteilen minimiert werden, entsteht die Forderung bei der Gestaltung von reibschlüssigen Verbindungen, beispielsweise beim Bau von Greifern, nach genaueren Berechnungsgrundlagen.

Unterschiedliche Berechnungsansätze zur Dimensionierung von reibschlüssigen Verbindungen lassen sich in der Literatur bzw. in der Industrie finden. Vielfach

beinhalten die Auslegungsvorschriften große Sicherheitsreserven. Oft wird die Auswirkung einer Temperaturänderung auf Reibungsvorgänge nicht gesondert betrachtet, ja sogar als untergeordnet oder gänzlich ohne Einfluß angesehen.

Derzeit ist nur in Ansätzen geklärt, in welcher Weise Fremdschichten und Oberflächeneigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur das Haftverhalten beeinflussen. Während bei Raumtemperatur für einige Werkstoffpaarungen neben experimentellen Haftreibungsdaten teilweise halbempirische analytische Modelle unter Berücksichtigung haftungsbestimmender Mechanismen zur realistischen Abschätzung von μ_0 entwickelt wurden, ist die Ermittlung eines temperaturabhängigen Haftreibungskoeffizienten $\mu_0(T)$ mit analytischen Mitteln aus heutiger Sicht aufgrund der komplexen nichtlinearen Zusammenhänge nicht möglich [8]. Am Wirksystem Greifer - Objekt kommen noch instationäre Wärmeübertragungen hinzu, die das Beschreiben der Problematik erschweren.

In **Tabelle 1** sind Werte für Haftreibungskoeffizienten für Stahl auf Stahl aus verschiedenen Quellen gegenübergestellt. Man erkennt, daß große Bandbreiten der Reibungskoeffizienten für dieselbe Werkstoffpaarung in der Literatur vorhanden sind, das daher rührt, daß die Spezifizierung der Randbedingungen oft sehr allgemein gehalten wurde. Unabhängig von den fehlenden Angaben zu den genauen Randbedingungen (Temperatur, Oberflächenrauigkeit usw.) werden teilweise relativ große Wertebereiche vorgegeben, ohne daß ersichtlich ist, wie die Streuung zustande kommt bzw. ausgenutzt werden kann, da keine genormten Meßverfahren existieren.

Stahl / Stahl trocken	Stahl / Stahl trocken	Stahl / Stahl trocken	Stahl / Stahl trocken	Stahl / Stahl blank	Stahl / Stahl rostig	Stahl / Stahl trocken	Stahl / Stahl unge- schmiert
[2]	[9]	[10]	[11]	[12]	[12]	[13]	[14]
0,45-0,80	0,15	0,20	0,15-0,30	0,10-0,15	0,30-0,80	0,12-0,20	0,15

Tabelle 1: Literaturangaben zu Haftreibungskoeffizienten von Stahl auf Stahl

Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist nicht die Konstruktion der Greif- und Handhabungsvorrichtung, sondern die Erforschung des Haftreibungskoeffizienten von metallischen Werkstoffen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern unter besonderer Berücksichtigung der Temperatur. Zur Simulation des realen Ablaufs der Greif- und Reibungsvorgänge hat man zunächst Modellrunden im Maßstab 1:10 betrachtet.

2 Grobe Einteilung der Einflußfaktoren

Die Kontaktwechselwirkung zwischen beiden Reibpartnern wird unter anderem von makroskopischen Verformungen, Oberflächenkenngrößen, Materialeigenschaften sowie auf mikroskopischer Ebene von Adhäsionsvorgängen beeinflusst (siehe *nächste Seite **Bild 4***: Übersicht über den Einfluß verschiedener Parameter auf den Haftreibungskoeffizienten μ_0).

Es hat sich für eine erste Klassifizierung als zweckmäßig erwiesen, die Vielzahl der Parameter, die den Haftreibungskoeffizienten beeinflussen, grob in die vier Kategorien

- Werkstoffe
- Kraftwirkung
- Oberflächen und
- Umgebungseinflüsse

einzuteilen. Die Bewertung einer konkret vorliegenden Reibpaarung kann grundsätzlich nur unter Berücksichtigung aller bzw. möglichst vieler relevanter Einflußgrößen erfolgen. Insbesondere ist es im allgemeinen schwierig, den Einfluß einzelner Parameter zu isolieren und separat zu betrachten. Bei detaillierterer Untersuchung eines aktuellen Reibungsproblems stellt man daher regelmäßig fest, daß sich mehrere Faktoren gleichzeitig verändern und sich sogar gegenseitig beeinflussen. Beispielsweise erfolgt bei Temperaturerhöhung eine entsprechende temperaturbedingte Festigkeitsabnahme sowie eine Oberflächenveränderung durch Oxidschichtbildung. Einen Eindruck über die Komplexität der **gegenseitigen** Beeinflussung der einzelnen Parameter vermittelt **Bild 5** (*übernächste Seite*).

An dieser Stelle soll lediglich ein erster Überblick über die verschiedenen Einflußfaktoren präsentiert werden. Eine tiefergehende Betrachtung der Einflußfaktoren auf die Reibung erfolgt insbesondere in den Kapiteln 4.2 (Stand der Kenntnisse bzgl. des Einflusses verschiedener Parameter) und 6.2 (Versuchsauswertung).

der Einzelflächen aller Kontaktpunkte wird als reale oder wahre Kontaktfläche bezeichnet, die auch entscheidend durch seine Mikroabmessungen (Rauhigkeit und Welligkeit etc.) bestimmt wird.

2.4 Umgebung

Das Umgebungsmedium, z.B. Luft oder eine andere Gasatmosphäre übt einen wesentlichen Einfluß auf die Bildung einer Oxid- oder Zunderschicht aus. Die vorhandene Luftfeuchtigkeit oder weitere auf der Festkörper- bzw. Oxidschichtoberfläche vorhandenen Gase können zu deutlich geringeren Reibungskoeffizienten führen. Die Mikroverbindungen stellen nur zu einem geringen Anteil Metall-Metall-Kontakte dar, häufig liegen Metall-Oxid- oder Oxid-Oxid-Kontakte vor.

Die Umgebungstemperatur wirkt sich in vielfältiger Weise auf den Reibungsvorgang aus. Zum einen bewirkt eine Temperaturerhöhung eine entsprechende Festigkeitsabnahme, zum anderen erfolgt zeitgleich eine verstärkte Bildung einer Oxid- oder Zunderschicht. Diese Oberflächenschichten führen unter anderem zu einer deutlichen Vergrößerung der Rauhigkeit der Oberfläche.

Verunreinigungen, z.B. Staub, Sand etc., können sowohl einen erniedrigenden als auch einen erhöhenden Einfluß auf den Reibungskoeffizienten ausüben. Schmierschichten, unabhängig davon, ob absichtlich (Ölschmierung) oder unabsichtlich (Fingerabdrücke) hinzugefügt, können zu einer drastischen Reduzierung des Haftreibungskoeffizienten führen.