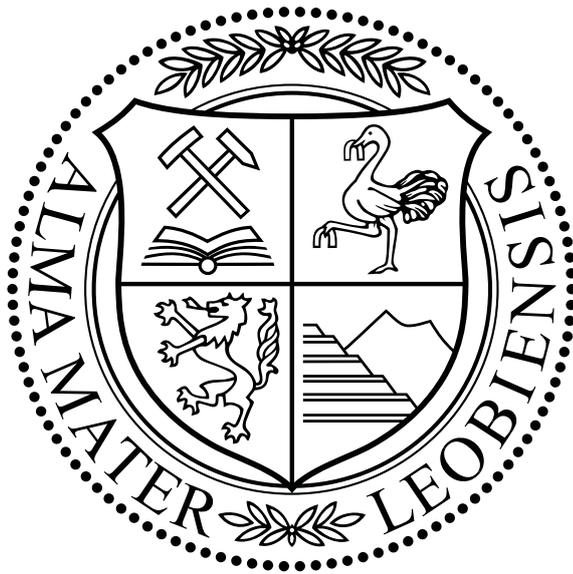


Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,

Montanuniversität Leoben



Masterarbeit

METHODEN ZUR ERMITTLUNG DES REIBFAKTORS BEI
ERHÖHTER TEMPERATUR

Jürgen Leopold Elser

Montanmaschinenbau

Leoben, 22.2.2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, 22.2.2018

Jürgen Leopold Elser

Danksagung

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont Bruno Buchmayr, am Lehrstuhl für Umformtechnik für die Betreuung dieser Arbeit und der fachlichen Unterstützung besonders bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich noch bei meinen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Umformtechnik für die Unterstützung bei der Durchführung der praktischen Versuche bedanken. Ein besonderer Dank geht an Herrn Dipl. -Ing. Dr. mont Gernot Eggbauer, der mir bei der Ausarbeitung dieser Arbeit stets zur Seite stand.

Zuletzt möchte ich mich noch bei meinen Eltern bedanken, die mir dieses Studium und diese Ausbildung ermöglichen und ständig unterstützen.

Kurzfassung

Die Reibung hat auch in der Umformtechnik eine große Bedeutung, da sie insbesondere den Materialfluss, Schädigung und Verschleiß der Werkzeuge.

In einer Literaturrecherche wurde versucht den aktuellen Stand der Technik der Reibung im Zuge der Warmumformung zu ermitteln. Dabei wurde insbesondere die Messung der Reibungskoeffizienten und Modellbildung bei erhöhter Temperatur betrachtet.

Im praktischen Teil werden Ringstauchversuche von verschiedenen Werkstoffen (42CrMo4 und AA6082) bei verschiedenen Temperaturen und Schmierungsverhältnissen durchgeführt und ausgewertet. Die Ergebnisse werden in Ringstauch-Nomogrammen dargestellt, die mittels FEM-Rechnung ermittelt wurden. Zur Validierung werden die Ergebnisse der Ringstauchversuche mit jenen aus einem Rotations-Schmiede-Tribometer verglichen.

Abstract

Friction is of great importance in metal forming, it particularly affects the material flow, damage and wear of the tools.

A literature search attempted to determine the current state of the art of friction in the course of hot forming. In particular, the measurement of friction coefficients and modeling at elevated temperature was considered.

In the practical part, ring-compression tests of different materials (42CrMo4 and AA6082) are carried out and evaluated at different temperatures and lubrication conditions. The results are presented in ring-compression charts, which were determined by FEM calculation. For validation, the results of the ring-compression tests are compared with those from a Rotary Forging Tribometer.

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen:

A_r	mm ²	Reale Kontaktfläche
A_α	mm ²	Scheinbare Kontaktfläche
α	1	Relative Kontaktfläche
C	1	Faktor für den Einfluss der Gleitgeschwindigkeit
d	mm	Nenndurchmesser oder Außendurchmesser
d_0	mm	Innendurchmesser vor der Umformung
d_1	mm	Innendurchmesser nach der Umformung
d_B	mm	Bohrungsdurchmesser
d_{MP1}	mm	Erster Messpunkt des Innendurchmessers
d_{MP2}	mm	Zweiter Messpunkt des Innendurchmessers
d_{MP3}	mm	Dritter Messpunkt des Innendurchmessers
d_{WZ}	mm	Durchmesser des Werkzeugs für die Umformsimulation
Δd	%	Änderung des Innendurchmessers
F_R	N	Reibkraft
F_N	N	Normalkraft
$f(v_{rel})$	1	Einfluss der Gleitgeschwindigkeit
h	mm	Höhe der Probe und des Werkstücks für die Umformsimulation
h_0	mm	Höhe vor der Umformung
h_1	mm	Höhe nach der Umformung
h_{MP1}	mm	Erster Messpunkt der Höhe
h_{MP2}	mm	Zweiter Messpunkt der Höhe
h_{MP3}	mm	Dritter Messpunkt der Höhe
h_{WZ}	mm	Höhe des Werkzeug für die Umformsimulation
Δh	%	Änderung der Höhe

η	Ns/m ²	Dynamische Viskosität
k	N/mm ²	Schubfließgrenze
k_f	N/mm ²	Fließspannung
m	1	Reibfaktor
m_0	1	Faktor für Umformtemperatur
μ	1	Reibzahl, bzw. Reibungskoeffizient
p	N/mm ²	Druck oder Flächenpressung
s_1	1	Empirisch ermittelte Größe von Alasti
s_2	1	Empirisch ermittelte Größe von Alasti
σ_N	N/mm ²	Kontaktnormalspannung
σ_V	N/mm ²	Vergleichsspannung nach Mises
τ_R	N/mm ²	Reibschubspannung
v_{rel}	mm/s	Relative Gleitgeschwindigkeit

Text-Abkürzungen

FEM	Finite-Elemente-Methode
LUT	Lehrstuhl für Umformtechnik
RST	Rotational-Forging-Tribometer
TORA	Torsions-Reibschweiß-Anlage

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	IV
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Problemstellung und Motivation	1
2 Tribologie	2
2.1 Reibung	2
2.2 Reibungs-/ Verschleißmechanismen	4
2.3 Reibmodelle in der Umformtechnik	5
2.3.1 Coulomb Reibmodell	6
2.3.2 Reibfaktormodell	8
2.3.3 Kombiniertes Reibmodell	10
2.3.4 Reibmodell nach Neumaier	11
2.3.5 Reibmodell nach Alasti	12
2.3.6 IFUM Reibmodell	13
2.4 Schmierung	14
2.4.1 Einteilung der Schmierstoffe	14
2.4.2 Anforderung an Schmierstoffen	15
2.4.3 Schmierung in der Warmmassivumformung	16
3 Verfahren zur Ermittlung der Reibwerte	17
3.1 Direkte Verfahren	17
3.2 Indirekte Verfahren	17
3.2.1 Ringstauchversuch	18
3.2.2 WHUST	20
3.2.3 Pin-on-Disc-Test	20
3.2.4 Rotational Forging Tribometer	21
4 Simulation	23
4.1 Simulationsaufbau und Eingabeparameter	23
4.2 Auswertung der Simulationsergebnisse	26
4.3 Interpretation der Simulationsergebnisse	28
5 Praktische Versuche	30

5.1	Ringstauchversuche	30
5.1.1	Versuchsdurchführung	30
5.1.2	Versuchsauswertung	32
5.1.3	Versuchsergebnisse und Interpretation	33
5.1.3.1	Versuchsergebnisse 1000°C	34
5.1.3.2	Versuchsergebnisse 900°C	35
5.1.3.3	Versuchsergebnisse 800°C	37
5.1.3.4	Versuchsergebnisse 450°C	40
5.1.4	Bewertung der Versuchsergebnisse	41
5.2	Rotational Forging Tribometer Versuche	41
5.2.1	Versuchsdurchführung	42
5.2.2	Versuchsauswertung	43
5.2.3	Versuchsergebnisse und Interpretation	44
5.2.3.1	Versuchsergebnisse 900°C-RST	44
5.2.3.2	Versuchsergebnisse 800°C-RST	46
5.2.3.3	Versuchsergebnisse 700°C-RST	47
5.2.3.4	Versuchsergebnisse 450°C-RST	49
5.2.4	Bewertung der Versuchsergebnisse	50
5.3	TORA-Versuche	50
5.3.1	Versuchsdurchführung	51
5.3.2	Versuchsauswertung und Interpretation	51
5.3.3	Bewertung der Versuchsergebnisse	52
6	Zusammenfassung und Ausblick	53
	Abbildungsverzeichnis	56
	Literaturverzeichnis	57

1 Problemstellung und Motivation

Gegenwärtig gibt es viele Methoden zur Ermittlung des Reibwerts für die Massivumformung, speziell für Stahlwerkstoffe. Die wohl bekannteste Methode ist der Ringstauchversuch bei dem mit einfachen Mitteln schnell und einfach ein Reibwert bestimmt werden kann. Die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück beeinflusst den Materialfluss, wodurch es bspw. beim Stauchen zum Ausbauchen der Probe kommt. Die charakteristische inhomogene Verteilung des Umformgrades spiegelt sich in der Praxis im auftretenden Schmiedekreuz wieder. Zur Charakterisierung der Reibverhältnisse wird in der Massivumformung aber meist der Reibfaktor bestimmt, da hier große Spannungen (nahezu in der Höhe der Fließspannung) auftreten. Der Reibfaktor m wird aus dem Verhältnis zwischen Schubspannung und der Schubfließgrenze k gebildet. Über Ringstauchsimulationen werden für unterschiedliche Reibfaktoren und Temperaturen sogenannte Reibfaktor-Nomogramme erstellt, die zur praktischen Bestimmung des Reibfaktors in der Massivumformung verwendet werden.

Im Maschinenbau werden die Werkstoffe 42CrMo4 und AA6082 aufgrund ihrer hohen Duktilität, Umformbarkeit und ihrer hohen Festigkeit häufig verwendet. Aluminiumlegierungen gewinnen aufgrund ihrer geringen Dichte und hohen Leichtbaupotentials in der Luft- und Raumfahrt, sowie im Automobilbau immer mehr an Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit war die Charakterisierung der Methoden zur Ermittlung des Reibfaktors und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Methoden. Dazu wurde zunächst ein Literaturstudium über die Tribologie in der Umformtechnik und den bekanntesten Verfahren zur Ermittlung der Reibwerte durchgeführt. Entsprechend des Maschinenparks am Lehrstuhl für Umformtechnik wurden drei Verfahren (Ringstauch-, Rotations- (Spin-on-Disc) und Torsions-Reibversuche) für experimentelle Untersuchungen ausgewählt. Für die Auswertung der Ringstauchversuche bezüglich Reibungskoeffizient μ und Reibwert m wurden FEM Simulationen mit dem Programm „Simufact Forming“ durchgeführt. Die Ergebnisse wurden im Kapitel Diskussion vergleichend beurteilt.

2 Tribologie

Tribologie (griechisch für Reibungslehre) ist der übergeordnete Fachbegriff für die Gebiete Reibung, Schmierung und Verschleiß und kann definiert werden als die Wissenschaft und Technik von Oberflächen, die mit einer Relativgeschwindigkeit aufeinander einwirken und deren damit verbundenen Abläufe [Czi10, Pig01].

Nach DIN 50323 umfasst der Begriff Tribologie das Gesamtgebiet von Verschleiß, Reibung und Schmierung einschließlich der Grenzflächenwechselwirkungen zwischen Festkörpern, als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Festkörpern und Gasen.

Bei Untersuchungen von tribologischen Vorgängen lassen sich die beteiligten Komponenten nicht unabhängig voneinander einzeln betrachten, sondern nur als tribologisches Gesamtsystem, wie in Abbildung 1 dargestellt (auch tribotechnisches System genannt) [Lan02].

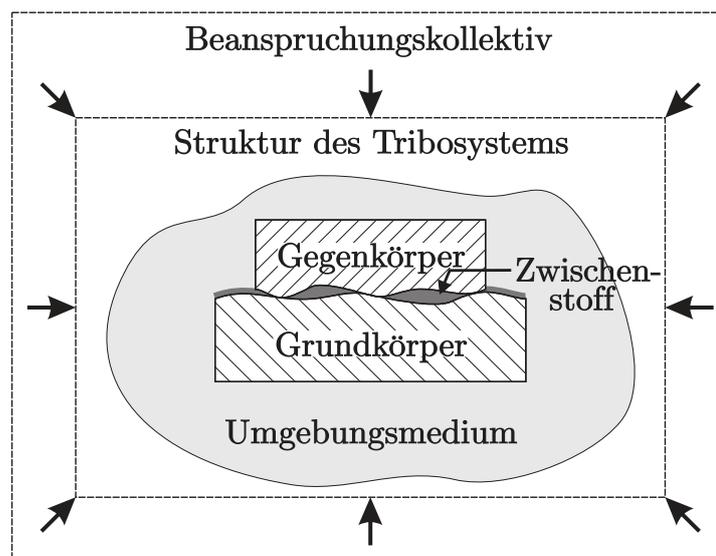


Abbildung 1: Tribologisches Gesamtsystem [Web07].

2.1 Reibung

Die Voraussetzung für Reibung ist die Relativbewegung zweier Elemente in einem tribologischen System unter Einwirkung äußerer Kräfte [Lan02]. Ursprünglich wurde Reibung als ein Widerstand gegen atomare oder makroskopische Materialdeformation definiert [CHS03]. Die Reibung zeigt sich als Widerstand gegen die Einleitung oder Aufrechterhaltung einer Relativbewegung oder Deformation. Dies gilt sowohl für die „äußere Reibung“ als auch für die „innere Reibung“ (Viskosität, Rheologie) [Czi10].

In einem tribologischen System wird die Reibung durch mehrere Reibungsbegriffe beschrieben und mittels der Stribeckkurve, wie in Abbildung 2 dargestellt, klassifiziert.

Festkörperreibung beschreibt die Reibung zweier Festkörper im unmittelbaren Kontakt ohne Zwischenstoff. Dieser Reibmechanismus ist nur mit metallisch reinen Oberflächen und im Vakuum zu realisieren [Czi10, Lan02].

Die **Grenzreibung** oder **Grenzschichtreibung** ist eine Festkörperreibung. Hierbei sind die Oberflächen der Reibpartner mit molekularen Reaktionsschichten (Oxidschichten) oder einem Schmierstoff ähnlichen Film belegt. Dieser Grenzschichtfilm begünstigt das Reibverhalten und verringert somit das Verschleißverhalten [CHS03, Lan02].

Bei der **Mischreibung** sind zwischen den Reibpartnern kleine Mengen an Schmierstoff vorhanden, die flüssig oder pastös sein können. Es kann keine Berührung der Reibpartner ausgeschlossen werden, aber die Kontaktstellen wechseln sich mit den Bereichen in denen ein Schmierfilm auftritt, der die Oberflächen trennt, ab [CHS03, Lan02].

Flüssigkeitsreibung ist jene Reibung bei der die Oberflächen im Gegensatz zur Mischreibung lückenlos von einem Flüssigkeitsfilm getrennt sind. Der Flüssigkeitsfilm wird hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt und der Reibungswiderstand wird rein durch die „innere Reibung“ der Flüssigkeit erzeugt [CHS03, Lan02].

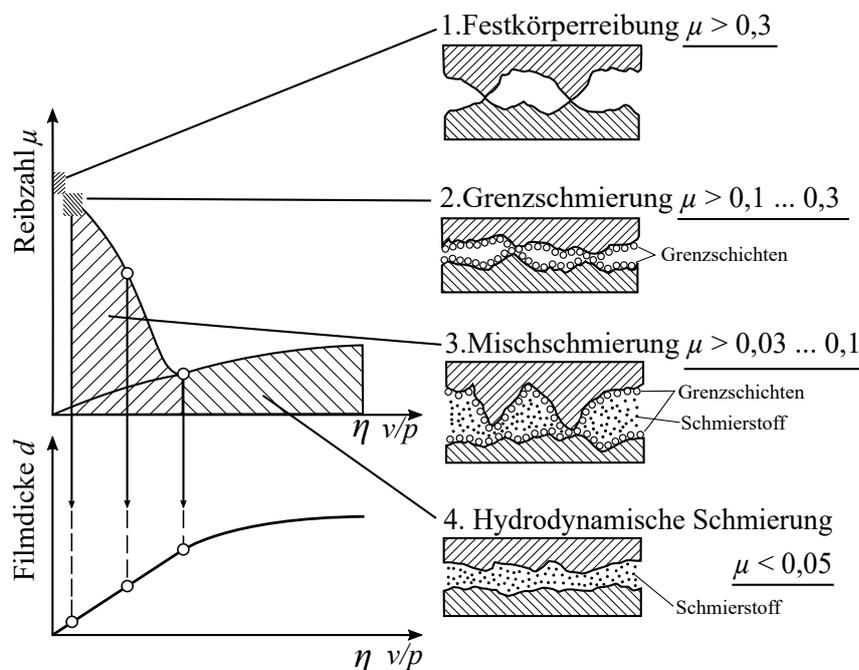


Abbildung 2: Stribeck-Kurve für verschiedene Schmierzustände. Hierbei stehen η für die dynamische Viskosität, p für den Druck oder die Flächenpressung, v für die Gleitgeschwindigkeit [Lan02].

Die **Gasreibung** ist ähnlich der Flüssigkeitsreibung, anstatt einer Flüssigkeit zum Trennen der Oberflächen der Reibpartner wird ein Gas verwendet, welches aerostatisch oder aerodynamisch einen gasförmigen Film aufbaut [CHS03].

2.2 Reibungs-/ Verschleißmechanismen

In der Tribologie lassen sich die Reibphänomene auf chemische und physikalische Wechselwirkung zwischen den Kontaktflächen zurückführen. Grundsätzlich werden die Hauptmechanismen zwischen Adhäsion, Abrasion und Oberflächenzerrüttung unterschieden. Desweiteren gibt es Tribochemische Reaktionen die jedoch in dieser Arbeit betrachteten Bereiche keinen Einfluss haben. Energieverluste treten hier durch dissipative Prozesse bei plastischen Kontaktdeformationen auf. Das heißt dem System wird kontinuierlich Energie entzogen indem sich Mechanische Energie in Wärme umwandelt [CHS03].

Adhäsion wird durch molekulare Wechselwirkung zweier verschiedener Stoffe hervorgerufen. Durch Abreißen des Schmierfilms kommt es zum direkten Kontakt zwischen den Reibpartner und in weiterer Folge zu Mikroverschweißungen. Da die verschweißten Bereiche meist eine Kaltverfestigung erfahren, brechen die Verbindungen bei weiterer Schubbeanspruchung nicht in der Naht, sondern es werden weichere Bereiche in der Umgebung der Naht abgeschert. Somit kommt es nicht nur zu einem Energieverlust, sondern auch zu einer Materialübertragung vom weicheren auf den härteren Körper. Zusätzlich wirken auch molekulare Kräfte zwischen den Kontaktflächen. [CHS03, Web07].

Oberflächenzerrüttung entsteht durch die tribologische Wechselwirkung sich berührender Körper bei tangentialen Relativbewegungen. Bei überlagerten Tangential- und Normalspannungen können in und unterhalb der Kontaktfläche Spannungsmaxima auftreten. Durch zyklische Wechselwirkungen von mehrachsigen Zug- und Druckspannungen können in und unterhalb der Berührungsflächen Risse gebildet werden [Czi10].

Abrasion ist, wenn bei einem Reibpaar der Gegenkörper härter und rauer ist als der Grundkörper oder wenn in einem tribologisch beanspruchten Werkstoff raue Partikel eingedrückt werden. Die Reibungskomponente ist das Ergebnis aus Widerstand des weicheren Materials gegenüber der Furchung des härteren Gegenkörpers bei einer Tangentialverschiebung. Für die Abrasion sind vier Detailprozesse bekannt mit denen sich die Wechselwirkung zwischen abrasiv wirkenden Gegenkörper und der verschleißenden Werkstoffoberfläche beschreiben lässt [Czi10]. In Abbildung 3 sind die Detailprozesse des abrasiven Verschleißes dargestellt.

- Mikropflügen: Der Werkstoff wird unter Einwirkung des abrasiven Teilchens stark

plastisch verformt. Beim idealen Mikropflügen entsteht kein Werkstoffabtrag durch ein einzelnes abrasives Teilchen.

- Mikroermüden: Es kann infolge von wiederholten Mikropflügen auf der abrasiv beanspruchten Oberfläche zu Materialabtrag kommen.
- Mikrospanen: Vor dem abrasiv wirkenden Teilchen bildet sich ein sogenannter "Mikrospan" der abgetragen wird.
- Mikrobrechen: Tritt besonders bei spröden Werkstoffen oberhalb einer kritischen Belastung auf. Dadurch kann es aufgrund von Rissbildung und Rissausbreitung entlang der Furche zu größeren Materialausbrüchen kommen.

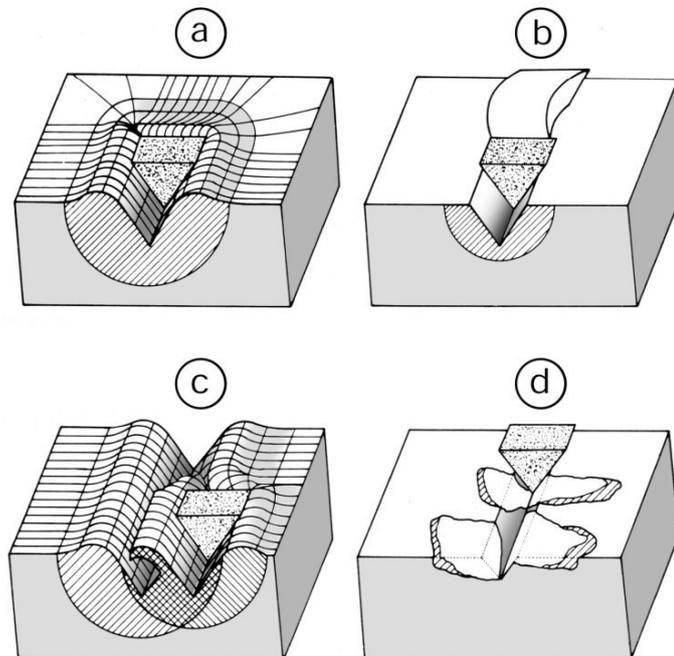


Abbildung 3: Detailprozesse des abrasiven Verschleißes. (a) Mikropflügen, (b) Mikrospanen, (c) Mikroermüden, (d) Mikrobrechen [Czi10].

2.3 Reibmodelle in der Umformtechnik

Aufgrund von Schmierung, hoher Temperatur und hohen Kräften in Verbindung mit geringen Geschwindigkeiten befindet sich die Massivumformung im Bereich der Mischreibung, welcher Festkörper- sowie Flüssigkeitsreibung umfasst [Mil14].

In den nachstehenden Unterkapitel werden Reibmodelle zur Beschreibung des Reibzustandes diskutiert, welche die Basis für die Berechnungen bzw. Simulationen in der Umformtechnik bilden.

2.3.1 Coulomb Reibmodell

Das wohl bekannteste Reibmodell ist das Reibgesetz von Coulomb. Die Festkörperreibung ist ein kompliziertes physikalisches Phänomen, das sich mit dem Reibgesetz nach Coulomb für erste Näherungen gut anwenden lässt. Darin wird der Zusammenhang zwischen der Reibkraft F_R und der Normalkraft F_N bzw. der Reibschubspannung τ_R und der Kontaktnormalspannung σ_N über den Reibungskoeffizienten μ (Formel (1) & (2)) beschrieben [Pop09].

$$F_R = F_N \cdot \mu \quad (1)$$

$$\tau_R = \sigma_N \cdot \mu \quad (2)$$

Der Reibungskoeffizient μ , auch Reibzahl genannt, kann die Werte zwischen $\mu = 0$ für reines Gleiten und $\mu = 1$ für vollständiges Haften einnehmen [BBL⁺14]. In Abbildung 4 ist der Ansatz von Coulomb-Amontons dargestellt, der den Zusammenhang von Reibschubspannung τ_R und Kontaktnormalspannung σ_N beschreibt [BHM⁺12].

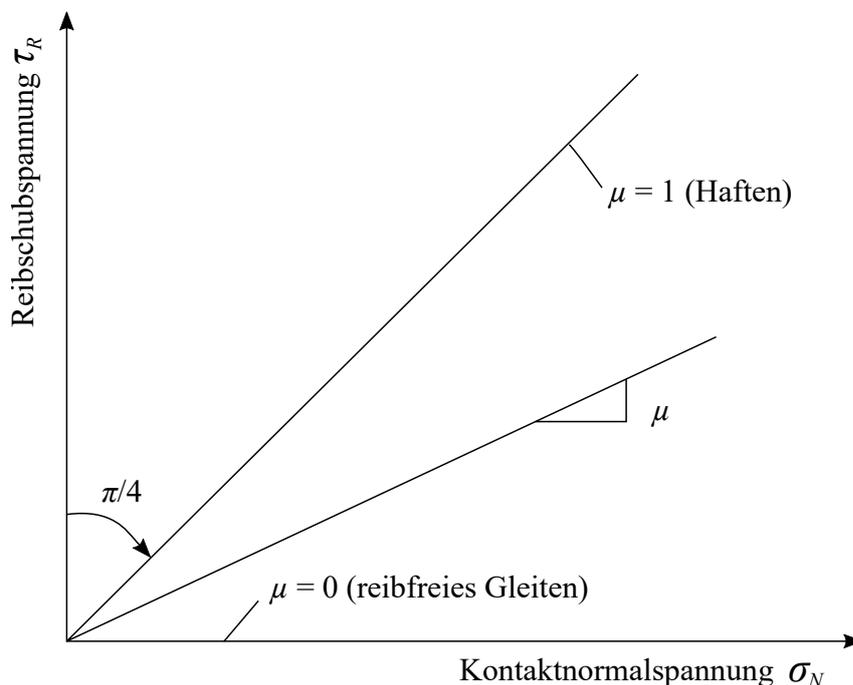


Abbildung 4: Reibmodell nach Coulomb-Amontons [BHM⁺12].

Diese Gesetzmäßigkeit ist gültig so lange die Kontaktnormalspannung σ_N kleiner als die Fließspannung k_f ist. Im plastischen Bereich, wenn die Kontaktnormalspannung σ_N größer der Fließspannung k_f ist, kann die Reibzahl μ nur begrenzt ansteigen und es gilt die Beziehung wie in Formel (3) beschrieben ist [Lan02].

$$\mu_{max} = \frac{k}{\sigma_N} \quad (3)$$

Durch diese Gesetzmäßigkeit ist jede Kontaktnormalspannung σ_N einer maximalen Reibzahl μ_{max} zugehörig, die von der Größe der Schubfließgrenze k und der Kontaktnormalspannung σ_N abhängig ist [Lan02].

Bis die Schubfließgrenze k erreicht ist, nimmt die maximale Reibzahl μ_{max} mit wachsender Kontaktnormalspannung σ_N gemäß der Formeln (4) & (5) hyperbolisch ab [Lan02][Mil14].

$$\text{nach Tresca} \quad k = k_f/2 \quad (4)$$

$$\text{nach von Mises} \quad k = k_f/\sqrt{3} \quad (5)$$

Dieser Zusammenhang und die Auswirkung des Zusammenhangs der Kontaktnormalspannung σ_N und der Fließspannung k_f auf die Reibzahl μ ist in Abbildung 5 dargestellt.

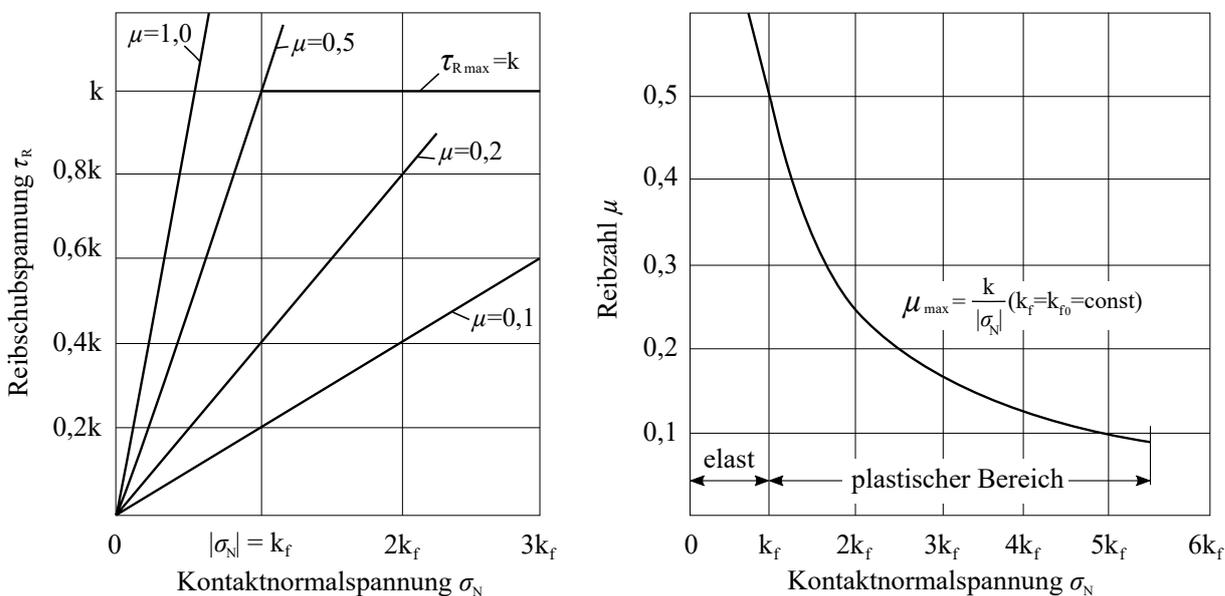


Abbildung 5: Einfluss der Kontaktnormalspannung σ_N auf die Reibschubspannung τ_R (links) und die Reibzahl μ (rechts) [Lan02].

Wird mit der Kontaktnormalspannung σ_N der Wert der Fließspannung k_f erreicht, so kann im plastischen Bereich μ_{max} folgende zwei Werte annehmen [Lan02]:

$$\begin{array}{ll} \text{nach Tresca} & \mu_{max} = 0,5, \\ \text{nach von Mises} & \mu_{max} = 1/\sqrt{3} = 0,577. \end{array}$$

2.3.2 Reibfaktormodell

Aufgrund der Ungenauigkeit des Coulomb-Amonton'schen Reibmodells im Bereich der plastischen Umformung wurde das Reibfaktormodell entwickelt. In diesem wird der Zusammenhang zwischen der Reibschubspannung τ_R und dem Produkt aus Schubfließgrenze k und einem konstanten Reibungsfaktor m (Formel (6)) beschrieben, welcher in Abbildung 6 dargestellt ist [BBL⁺14].

$$\tau_R = k \cdot m \quad (6)$$

Der Wert des Reibfaktors m befindet sich zwischen 0 und 1, wobei bei $m = 0$ keine Reibung auftritt und $m = 1$ vollständiges Haften bedeutet. Das Reibfaktormodell eignet sich sehr gut für die Beschreibung von Festkörperreibung und den Grenzfall des Haftens.

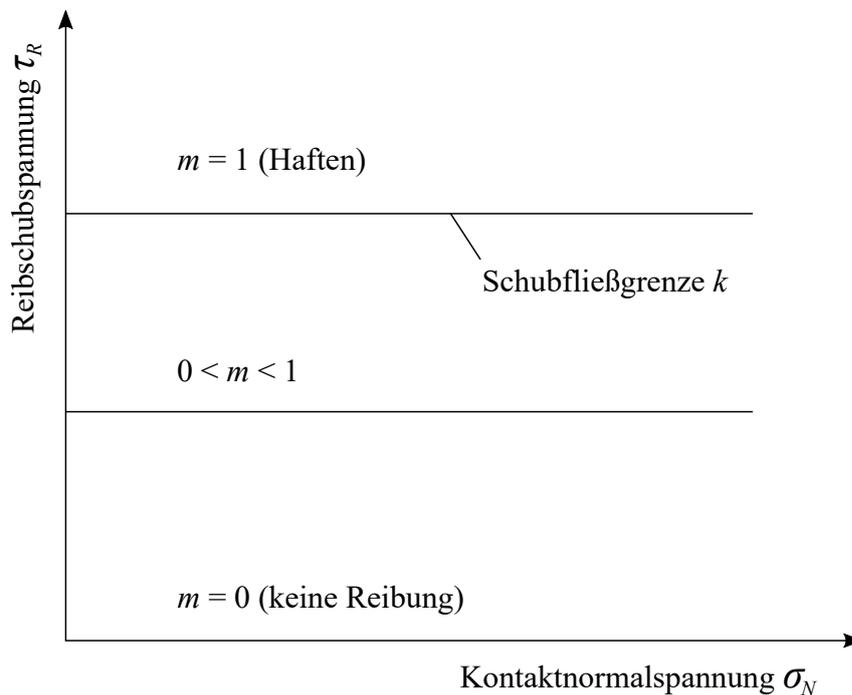


Abbildung 6: Reibfaktormodell [BHM⁺12].

Die in der Literatur diskutierten physikalischen Reibmodelle nehmen an, dass Reibung nur in den realen Kontaktflächen stattfinden kann und daher proportional zur realen Fläche ist A_r . Die Reibschubspannung kann mit Hilfe von Gleichung (7) ausgedrückt werden. Hierbei werden k als Schubfließgrenze, m als Reibfaktor und α als relative Kontaktfläche benannt. Des weiteren wird die relative Kontaktfläche α als das Verhältnis aus realer Kontaktfläche A_r und scheinbarer Kontaktfläche A_α in Gleichung (8) dargestellt [Buc08].

$$\tau_R = k \cdot m \cdot \alpha \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{A_r}{A_\alpha} \quad (8)$$

Die Darstellung in Abbildung 7 zeigt das Verhältnis zwischen A_r und A_α und dient zum besseren Verständnis über die relative Kontaktfläche α .

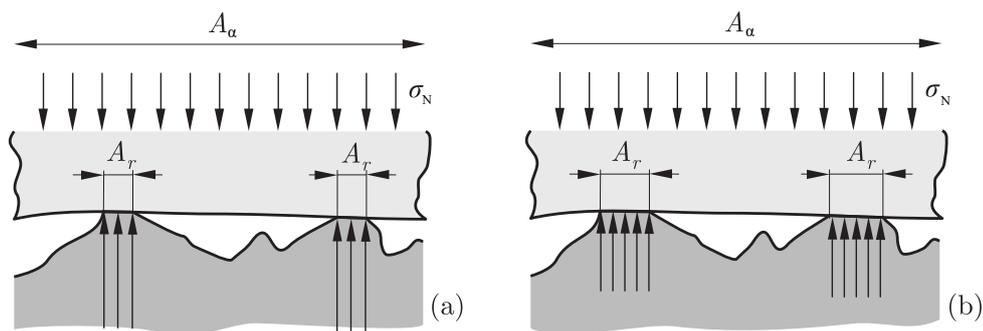


Abbildung 7: Kontakt zwischen Werkzeug und weicherem Werkstück mit plastischer Deformation von Unebenheiten: (a) Die reale Kontaktfläche A_r ist zu klein um die Kontaktnormalspannung σ_N aufzunehmen. Dadurch kommt es zu einer plastischen Verformung, dass die reale Kontaktfläche A_r vergrößert(b) [Buc08].

Abbildung 8 zeigt die Annäherung der relativen Kontaktfläche α an die scheinbare Kontaktfläche A_α . Im Bereich geringer Kontaktnormalspannung σ_N steigt diese annähernd konstant, mit steigender Kontaktnormalspannung σ_N nähert sich diese asymptotisch der scheinbaren Kontaktfläche A_α an [Web07].

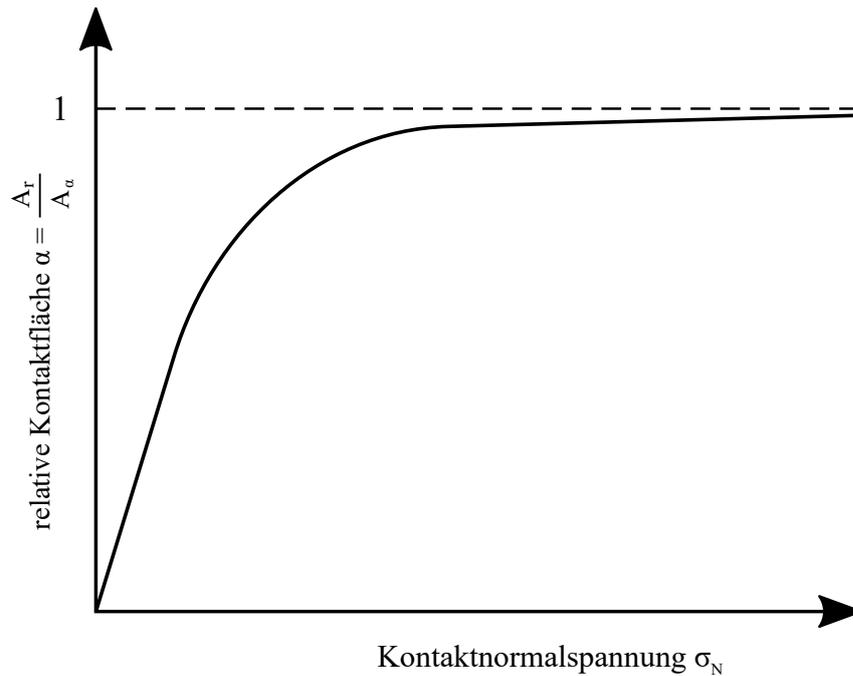


Abbildung 8: Asymptotische Annäherung der relativen Kontaktfläche α an die scheinbare Kontaktfläche A_α [Web07].

2.3.3 Kombiniertes Reibmodell

Die Vorteile des Coulomb-Amontonschen Modells und des Reibfaktormodells wurden im Kombinierten Reibmodell verknüpft und weiterentwickelt. Hierbei wird bei niedrigen Kontaktnormalspannungen σ_N vorerst das Coulomb-Amontonsche Reibungsgesetz angewendet. Steigt die Reibschubspannung τ_R jedoch auf den kritischen Grenzwert, der sich aus dem Reibfaktor m und der Schubfließgrenze k zusammensetzt, wird mit dem Reibfaktormodell gerechnet. Abbildung 9 zeigt die Kombination aus dem Coulomb-Amontonschen und Reibfaktor Reibmodell [BBL⁺14, Buc08].

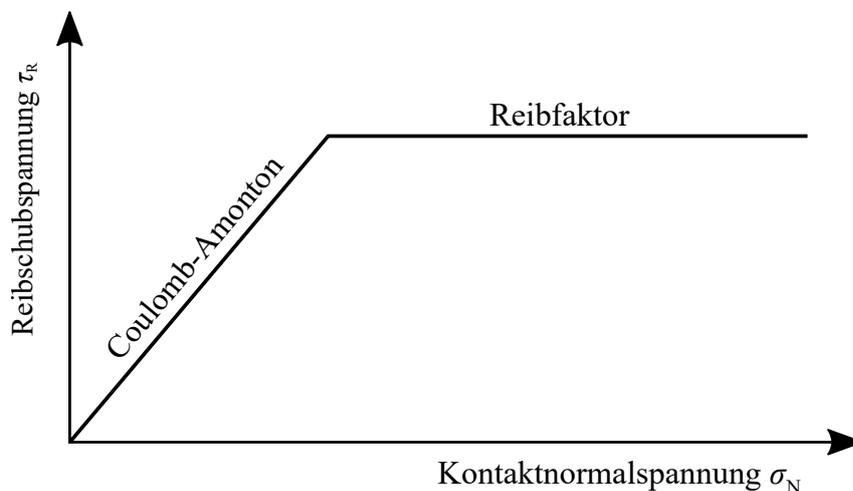


Abbildung 9: Kombiniertes Reibmodell vereinfacht dargestellt [BBL⁺14].

Anhand von Reibmessungen bei der Zerspanung haben Finnie und Shaw erstmals qualitativ nachgewiesen, dass die Reibschubspannung bei steigender Kontaktnormalspannung anfangs linear steigt (I), später nähert sie sich asymptotisch (II) der Schubfließgrenze (III) des weicheren Werkstoffs an, die ein Maximum für die Reibspannung darstellt. Zusammengefasst wird dieses Verhalten mit der Zunahme der relativen Kontaktfläche mit der Normalspannung, wie in Abbildung 10 illustriert [Buc08, FS56].

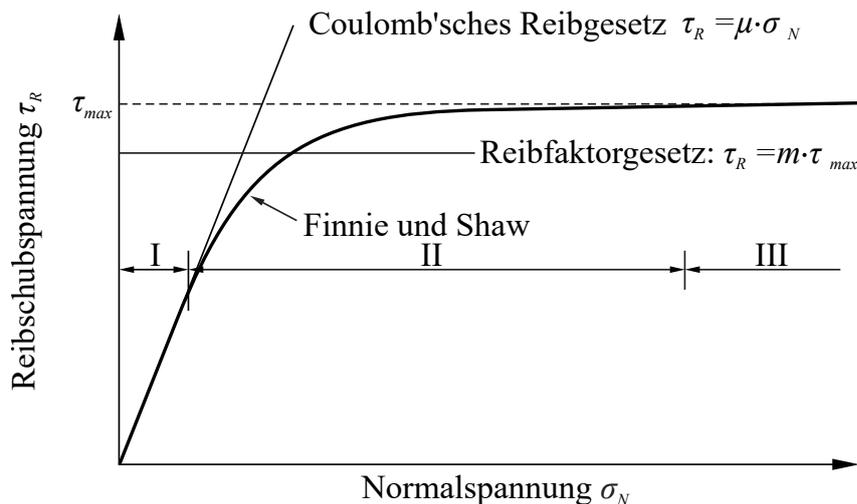


Abbildung 10: Kombiniertes Reibmodell nach Finnie und Shaw [Sha63].

Die Annäherung von Finnie und Shaw hat Betten [Bet75] mit der Formel (9) beschrieben [BBL⁺14]:

$$\frac{\tau_R}{k} = \sqrt[n]{\tanh\left(\frac{\mu \cdot \sigma_N}{k}\right)^n} \quad (9)$$

Das Verhältnis Reibschubspannung τ_R zu Schubfließgrenze k , wird berechnet mit der Reibzahl μ der Kontaktnormalspannung σ_N und einer natürlichen Zahl n , die die Annäherung vom Coulomb-Amonton'schen Modell auf das Reibfaktormodell beschreibt. In Abbildung 11 ist die Annäherung von Betten an Finnie und Shaw dargestellt.

2.3.4 Reibmodell nach Neumaier

Neumaier [Neu03] hat basierend auf den Forschungen von Chen und Kobayshi [CK78] die Beziehung der relativen Kontaktfläche α mit numerischer Simulation der realen Oberfläche mittels Profilometerspuren bestimmt. Als Ergebnis dieser Forschung schlug er die Gleichungen (10) und (11) vor.

$$\alpha = \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_N}{k_f}\right) \right] \quad (10)$$

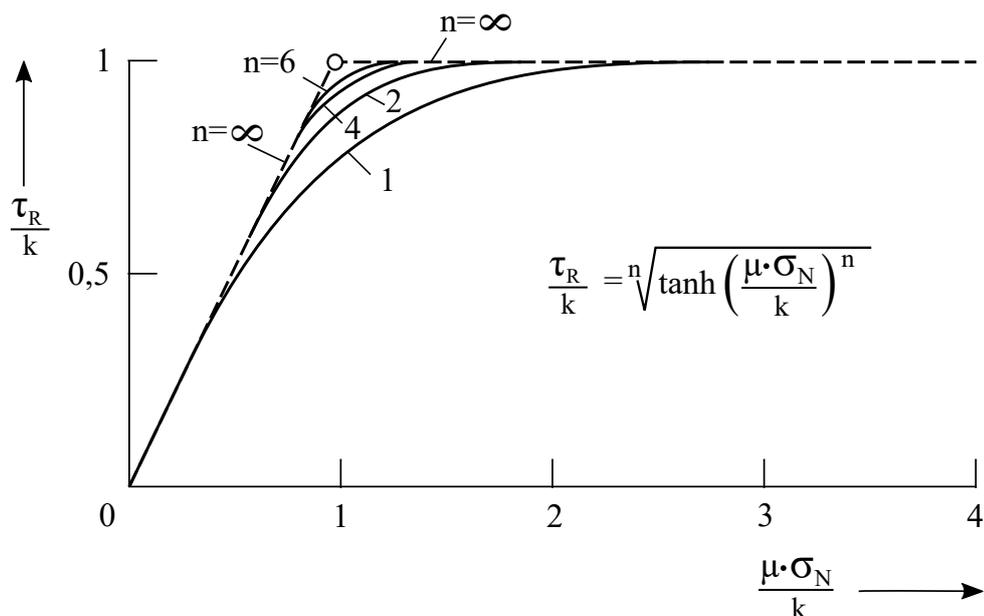


Abbildung 11: Annäherung von Betten an Finnie und Shaw [Bet75].

$$\tau_R = m_0 \cdot k \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma_N}{k_f}\right) \right] \cdot \left[\frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{v_{rel}}{C}\right) \right] \quad (11)$$

Der Faktor m_0 ist eine Funktion der Umformtemperatur, wobei

- $m_0 = 0,45$ für Warmumformung,
- $m_0 = 0,25$ für Halbwarmumformung und
- $m_0 = 0,15$ für Kaltumformung steht.

Neumaier berücksichtigt im Gegensatz zu Alasti die lokale Änderung der Kontaktbedingung infolge elastischer Werkzeugdeformation nicht [BBL⁺14].

2.3.5 Reibmodell nach Alasti

Von den bisher genannten Reibmodellen gibt es noch weiterentwickelte Modelle, die die lokale Änderung der Kontaktbedingungen miteinbezogen, jedoch nicht die lokale Änderung der Kontaktbedingungen infolge elastischer Werkzeugdeformation. Dieses Modell verfolgte erstmals Alasti in seinen Forschungen wie Formel (12) zeigt [Ala08] [BBM⁺10].

$$\tau_R = \left[\overbrace{0,15 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_V}{k_f}\right) \cdot |\sigma_N|}^a + \overbrace{k \cdot \frac{\sigma_V}{k_f} \cdot \left(1 - \exp\left(-s_1 \cdot \left|\frac{\sigma_N}{k_f}\right|^{s_2}\right)\right)}^b \right] \cdot \overbrace{f(v_{rel})}^c \quad (12)$$

Bei Alasti ist die Berechnung der Reibschubspannung τ_R zusammengesetzt aus einem Anteil der Starrkörperreibung (a), einer Reibung mit plastifiziertem Reibpartner (b) und dem Term zur Berücksichtigung der Relativgeschwindigkeit auf die Reibung (c) (Gleitgeschwindigkeitseinfluss) $f(v_{rel})$. Der Anteil der Starrkörperreibung, oder auch Starrkörperbewegung, beinhaltet die Vergleichsspannung nach Mises σ_V , die Fließspannung k_f und die Kontaktnormalspannung σ_N . In der Plastifizierung, oder Reibung mit plastifiziertem Reibpartner, sind zur Starrkörperbewegung weitere zwei empirisch ermittelte Größen s_1 und s_2 von den Rückwärtsfließpressversuchen von Alasti enthalten [Ala08] [BBL⁺14].

2.3.6 IFUM Reibmodell

Das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Universität Hannover entwickelte das IFUM Reibmodell auf der Basis von Neumaier und Alasti. Von Alasti wurde die Abhängigkeit der Reibschubspannung τ_R von der Funktion des Spannungszustandes σ_V/k_f zur Kontaktnormalspannung σ_N zur Beschreibung der Starrkörperbewegung und der Plastifizierung herangezogen. Die reale Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug sowie die relative Geschwindigkeit in der Kontaktzone wurden von Neumaier übernommen [BBL⁺14]. Aus diesen zwei Ansätzen wurde das IFUM-Modell, wie in Gleichung (13) beschrieben ist entwickelt, welches für geringe und hohe Kontaktspannungen verwendet werden kann [BBM⁺10].

$$\tau_R = \left[0,3 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_V}{k_f} \right) \cdot |\sigma_N| + m \cdot k \cdot \frac{\sigma_V}{k_f} \cdot \left\{ 1 - \exp \left(- \left| \frac{\sigma_N}{k_f} \right| \right) \right\} \right] \cdot f(v_{rel}) \quad (13)$$

Der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit $f(v_{rel})$ auf die Reibschubspannung τ_R wurde, wie in Formel (14) beschrieben, durch eine Variationsrechnung mit dem Programm Maple ermittelt [BBM⁺10].

$$f(v_{rel}) = \exp \left[- \frac{1}{2} \left(\frac{v_{rel}}{C} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Der Wert des Faktors C aus der Formel (14) regelt den Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibspannung τ_R . Je höher der Wert der Faktors C ist, desto geringer ist der Einfluss auf die Reibschubspannung τ_R . Abbildung 12 zeigt den Einfluss verschiedener Werte des Faktors C im Bereich $1 \leq C \leq 150$. Die Bereiche der Haftung und des reibfreien Gleitens sowie der Übergangsbereich sind deutlich hervorgehoben [BBL⁺14].

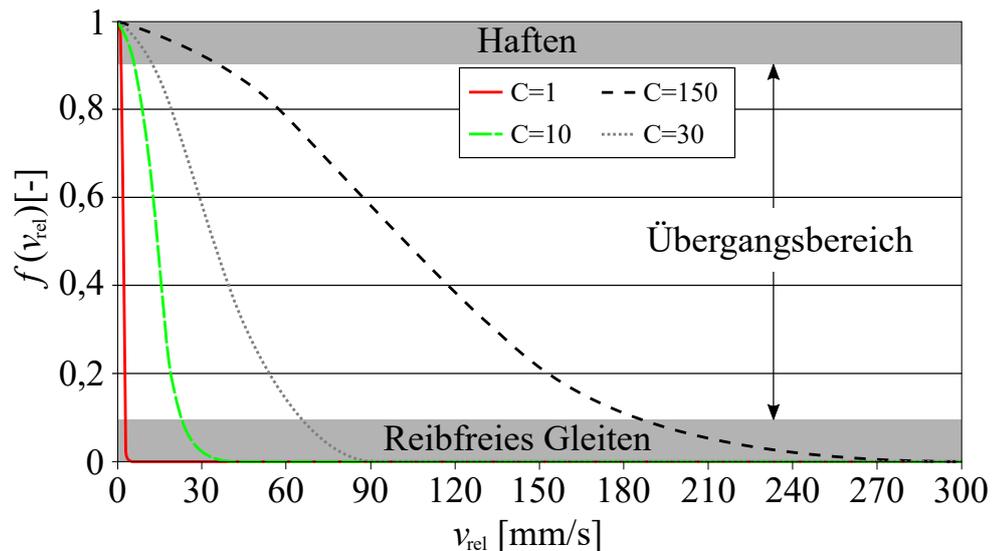


Abbildung 12: Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibschubspannung [BBL⁺14]

Durch dieses Reibmodell soll die Genauigkeit der Simulationsergebnisse gesteigert werden. Die Validierung dieses Reibmodells erfolgte durch experimentell aufgenommene Umformkraftverläufe, die mit numerisch berechneten Verläufen verglichen wurden, um die Qualität des Reibmodells zu bestimmen [BBM⁺10].

2.4 Schmierung

Die Hauptaufgabe der Schmierung besteht darin, den direkten metallischen Kontakt von Werkzeug und Werkstück zu vermeiden. Dadurch schützt es Werkzeug und Werkstück vor Verschleiß und verringert analog die Reibungsverluste sowie den damit verbundenen Kraft- und Energiebedarf [BB04]. Ohne Schmierung wären in der Umformtechnik aufgrund der hohen tribologischen Beanspruchungen viele Umformverfahren nicht durchführbar. Am häufigsten kommen flüssige Schmierstoffe auf Mineral- oder Syntheseölbasis, als auch natürliche Öle als Basisschmierstoff zum Einsatz. Die Auswahl des richtigen Schmierstoffes ist abhängig anhand der tribologischen Beanspruchung hinsichtlich der mechanischen Werkzeugbelastung sowie der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück [KK06, Czi10].

2.4.1 Einteilung der Schmierstoffe

Schmierstoffe sind Stoffe, die in einem tribologischen System die Reibung und den Verschleiß verringern. Simultan dienen sie auch zur Kraftübertragung, Kühlung, Dämpfung und als Korrosionsschutz. Schmierstoffe können Grundsätzlich fest, flüssig, konsistent oder gasförmig sein [Mil14].

Gasförmige Schmierstoffe finden bei schnellläufigen, wenig belasteten Maschinen wie Ultrazentrifugen oder Gaspumpen ihren Einsatz. Für die Umformtechnik sind daher Gas-

förmige Schmierstoffe kaum in Verwendung [MN02].

Den Größten Bereich der Schmierstoffe umfassen die **flüssigen Schmierstoffe**. Dieser reicht von verflüssigten Gasen bis hin zu zähflüssigen Ölen. Die bedeutendste Gruppe der Flüssigschmierstoffe ist die der Mineralöle aus Erdöl, aber auch synthetische, pflanzliche und tierische Öle sowie Wasser sind Bestand dieser Gruppe [MN02].

Schmierfette und Haftscherstoffe gehören zur Gruppe der **konsistenten Schmierstoffe**. Schmierfette bestehen aus einem Schmieröl und einem Eindicker. Haftscherstoffe hingegen sind überwiegend aus Bitumen aufgebaut [MN02].

Festschmierstoffe kommen nur für außergewöhnliche Bedingungen zum Einsatz. Festschmierstoffe haben keine flüssige oder konsistente Trägersubstanz. Ihr Einsatzgebiet ist bei sehr hohen Temperaturen (ca. 850°C) oder niedrigen Temperaturen (ca.-200°C). Die meist verwendeten Festschmierstoffe sind Graphit (C), Molybdänsulfid (MoS₂), Talkum und andere Stoffe [MN02, Mil14].

In der Umformtechnik finden hauptsächlich feste und flüssige Schmierstoffe ihre Verwendung. Aufgrund ihrer Sprühbarkeit und dadurch wirtschaftliche Aufbringung auf das Werkstück, bilden wassermischbare Schmierstoffe den Großteil an Flüssigschmierstoffen in Schmiedebetrieben [BB04].

2.4.2 Anforderung an Schmierstoffen

Die Anforderungen an den Schmierstoff sind vielfältig. In der Praxis können meist nicht alle Punkte eingehalten werden [BB04]:

- gute Schmiereigenschaften
- gute Trenneigenschaften
- gute Treibwirkung
- hohe thermische Stabilität
- gleichmäßige Benetzung mit schneller Schichtausbildung
- optimale Benetzungstemperatur
- gute Kühlwirkung
- keine Korrosion
- kein Schmierstoffaufbau
- kein Dieseleffekt
- keine gesundheitlichen Belästigungen

- keine Brandgefahr
- keine Umweltbelastungen
- sauberes Arbeiten
- Resistenz gegen Mikroorganismen
- einfache und wirtschaftliche Aufbringung

2.4.3 Schmierung in der Warmmassivumformung

Schmierstoffe bestehen vorwiegend aus einem Feststoffanteil (Graphit, Molybdänsulfid, Gläser, Bornitrid), aus einem Schmierstoffanteil (Fette, Öle, Wasser) und aus Additiven (z.B. für bessere Benetzbarkeit oder zur Verhinderung des Schäumens. Zur Kühlung des Werkzeugs wird Luft, Wasser, Wasser-Luft-Gemisch oder Wasser-Netzmittelzusatz (z.B. Seife) verwendet. Netzmittel verringern die Oberflächenspannung von Wasser und verhindern somit die Dampfhautbildung [KK06, Bar87].

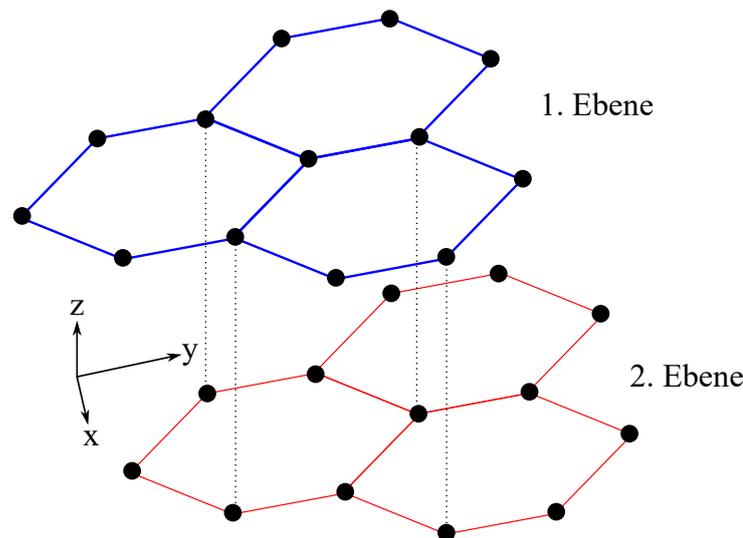


Abbildung 13: Kristallstruktur von Graphit [HEW08]

Aufgrund der Wirtschaftlichkeit wird in der Regel Graphit als Hauptschmiermittel beim Gesenkschmieden eingesetzt. Beim Walzen hingegen wird meist nur mit Wasser 'gekühlt', da für den Umformvorgang Reibung erforderlich ist [Bar87].

Graphit besteht aus regelmäßigen Sechsecken angeordneten Kohlenstoffatomen in zwei parallelen Ebenen (Abbildung 13). Es hat eine Oxidationstemperatur von 500°C und eine Sublimationstemperatur (direkter Phasenübergang von fest auf gasförmig z.B. Trockeneis) bei 3600°C . Prinzipiell hat Graphit eine schlechte Schmierwirkung und eignet sich schlecht als Schmiermittel. Jedoch, dank der Existenz von Strukturfehlern verknüpft mit dem einwirken der Atmosphäre, ist die Spaltung der Graphitkristalle erleichtert, sodass eine Schmierwirkung zustande kommt [Bar87].

3 Verfahren zur Ermittlung der Reibwerte

Bei der experimentellen Bestimmung der Reibung in der Umformtechnik werden die Versuchsmethoden in zwei Arten eingeteilt. Es wird zwischen dem direkten und dem indirekten Verfahren zur Reibwertbestimmung unterschieden. Bei direkten Methoden werden die Spannungen zwischen Werkzeug und Werkstück direkt in der Wirkfuge gemessen und daraus der Reibwert errechnet. Dies erlaubt Aussagen über den örtlichen Reibungszustand. Um bei der indirekten Messung auf den Reibwert schließen zu können wird eine abgeleitete Messgröße benutzt. Dadurch wird ein gemittelter Reibwert über die gesamte Umformzone ermittelt [BL72].

3.1 Direkte Verfahren

Abbildung 14 zeigt ein Beispiel für eine direkte Messung des Reibwertes. Hierbei werden Messstifte von hinten in das Werkstück eingeschraubt, die die Normal- und Schubspannungen getrennt über eigens schräg und gerade angeordnete Messstifte oder gemeinsam über kombinierte Messstifte erfassen [BMB06].

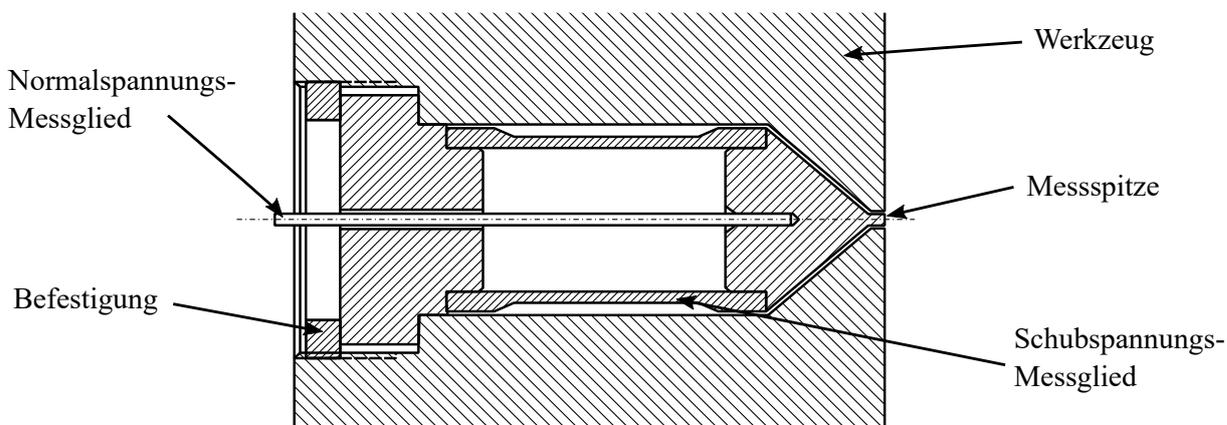


Abbildung 14: Aufbau eines kombinierten Messstiftes [BL72]

Ein Nachteil der direkten Messung ist, dass die Beeinflussung des Messpins in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück die Messergebnisse verfälscht. Um dies entgegenzuwirken gibt es Modifizierungen an den Sensoren (z.B. Cantilever-Sensor), sodass in allen drei orthogonalen Raumrichtungen die Kräfte gemessen werden können [Mil14].

3.2 Indirekte Verfahren

Indirekte Reibwertermittlungsverfahren werden unterteilt in Methoden aus dem Formänderungsverlauf (uninstrumentierte) und in Methoden aus Kraftermittlung (instrumentierte) [BL72, Mil14].

Uninstrumentierte Methoden zur Reibwertermittlung bedienen sich der Ergebnisse aus einem vorher/nachher Vergleich. Dadurch wird ein Parameter, wie z.B. die Höhe, vor und nach dem Versuch gemessen. Die Ermittelten Werte werden in einem Nomogramm eingetragen und dadurch kann eine erste Abschätzung getroffen werden [Mil14].

Instrumentierte Methoden ermitteln den Reibwert durch die Messung von Kräften und Momenten des Versuchs. Vorteil gegenüber uninstrumentierte Versuchsmethoden ist die permanente Aufnahme der Daten und somit auch die Erfassung von Effekten im Laufe des Versuchs. Dadurch kann direkt im Ablauf des Versuchs auf den Reibzustand geschlossen werden. Aufgrund der Kinematik sind bei instrumentellen Methoden rotatorische und translatorische Versuchsabläufe in Verwendung [Mil14].

3.2.1 Ringstauchversuch

Der Ringstauchversuch ist der bekannteste, einfachste und am häufigsten eingesetzte Versuchsablauf um den Reibfaktor m oder die Reibzahl μ zu erfassen und zählt zu den uninstrumentierten Methoden der Reibwertermittlung. Dabei wird eine kreisringförmige Probe zwischen zwei ebene Stempel gestaucht und es wird die Veränderung der Höhe und des Innendurchmessers gemessen [BB04]. Liegen die Spannungen und ermittelten Reibwerte im gültigen Bereich des Reibzahlmodells (Coulomb-Amonton), kann dieser Versuch zur Bestimmung der Reibzahl μ herangezogen werden. Außerhalb dieses gültigen Bereichs ist es zweckvoll, diesen Versuch für die Bestimmung des Reibfaktors m zu verwenden [DB07].

Die Abmessungen des Ringes stehen im Verhältnis $d : d_0 : h_0 = 6 : 3 : 2$.

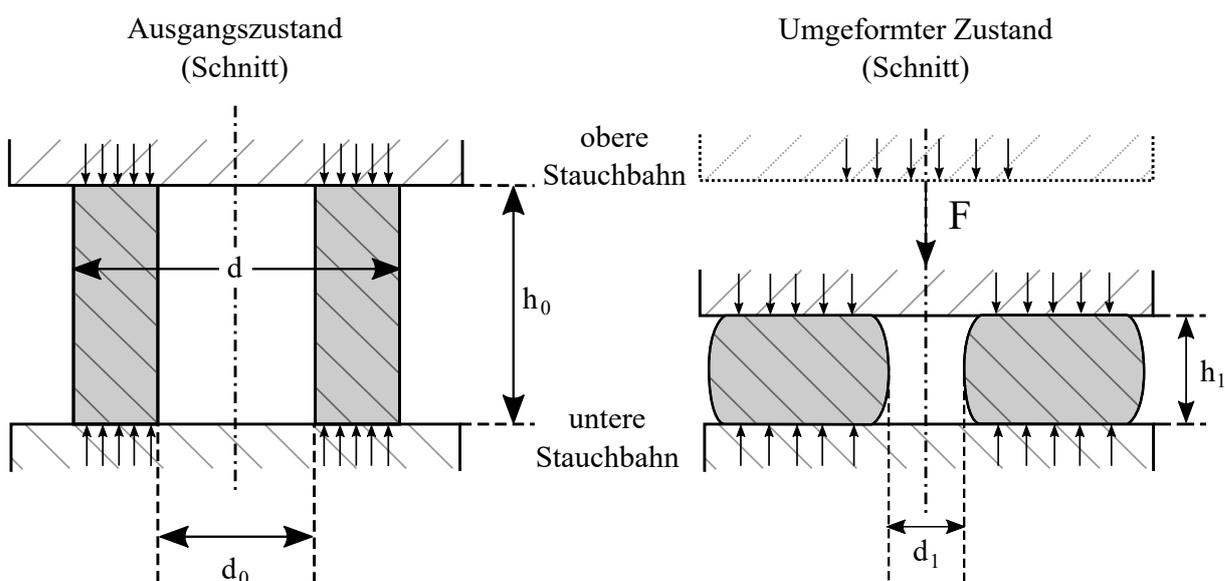


Abbildung 15: Schematische Darstellung eines Ringstauchversuchs [DB07].

In Abbildung 15 ist der Versuchsablauf dargestellt. Nach dem Drücken werden Innendurchmesser d_1 und Höhe h_1 gemessen, um die Reibzahl μ bzw. den Reibfaktor m bestimmen zu können. Dafür wird die Änderung des Innendurchmessers (Formel (15)) über die Änderung der Höhe (Formel (16)) in einem Nomogramm, wie in Abbildung 16 dargestellt ist, aufgetragen.

$$\Delta d = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \cdot 100\% \quad (15)$$

$$\Delta h = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100\% \quad (16)$$

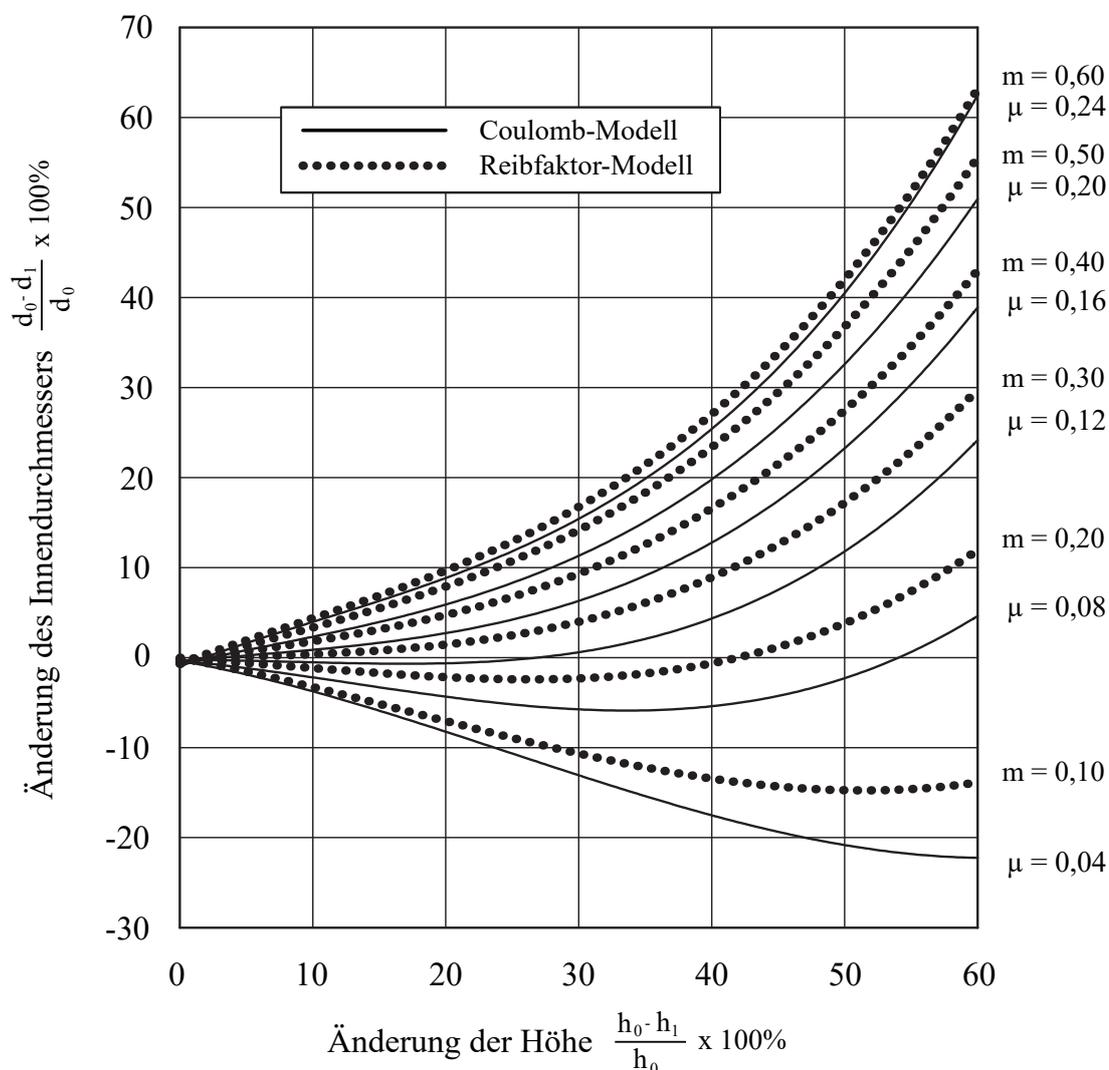


Abbildung 16: Darstellung eines rechnerisch ermitteltes Diagramms, aus dem sich durch die Änderung der Innendurchmesser und die Änderung der Höhe der Ringstauchprobe ein Reibwert bzw. ein Reibfaktor ermitteln lässt [JMC⁺09].

3.2.2 WHUST

WHUST steht für Warm-and-Hot-Upsetting-Sliding-Test und gehört zu der Gruppe der instrumentierten Versuchsmethoden zur Reibwertermittlung. Bei diesem Test wird ein Eindringkörper in eine Zylindermantelfläche gedrückt und entlang der Längsachse mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Die Parameter des WHUST sind die Geometrie des Eindringkörpers, seine Geschwindigkeit, das Eindringen in die Probe und die Temperatur des Eindringkörpers und der Probe. Der große Vorteil dieses Versuchs ist die direkte Verwendung von Proben (Werkzeug, Werkstück, Schmiermittel, usw.) aus dem Betrieb. Somit können die chemischen und physikalischen Eigenschaften (Oberflächenrauheit, adsorbiertes Gas, Härte, Oxidzunder, Verschleiß, usw.) der Kontaktsituation besser analysiert werden. Der Temperaturbereich des Versuchs ist einstellbar von Raumtemperatur bis zu 1200°C. In Abbildung 17 ist der WHUST schematisch dargestellt.

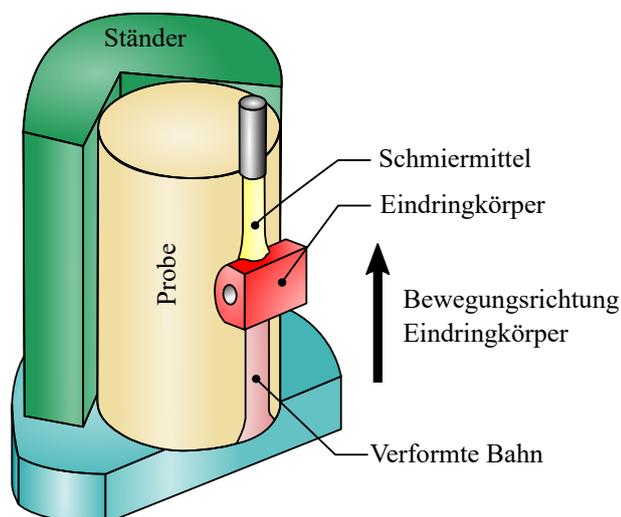


Abbildung 17: Schematische Darstellung des WHUST [DDD14].

3.2.3 Pin-on-Disc-Test

Der Pin-on-Disk-Test ist ein tribologischer Versuch mit definierten Normalkräften F_N . Dabei wird ein Stift (Werkstück) gegen eine rotierende Scheibe (Werkzeug), die sich mit konstanter Geschwindigkeit dreht, gepresst. Es werden sowohl die Temperatur als auch die Normalkraft F_N und die tangential wirkende Reibkraft F_R gemessen. Durch Formel (17) kann die daraus resultierende Reibzahl μ berechnet werden [Hor13].

$$\mu = \frac{F_R}{F_N} \quad (17)$$

In Abbildung 18 ist ein Pin-on-Disk-Test schematisch und in Abbildung 19 ist der Versuchsaufbau eines Pin-on-Disk-Tests dargestellt. Bei diesem Versuchsaufbau werden zwei Pins verwendet, die durch eine Induktionsspule erhitzt und auf die rotierende Platte gedrückt werden. Über eine Kraftmessdose können die Normalkräfte F_N gemessen werden und über eine Wägezelle wird das Moment aufgenommen. Durch den bekannten Hebel kann aus dem Moment die daraus resultierende Reibkraft F_R bestimmt werden.

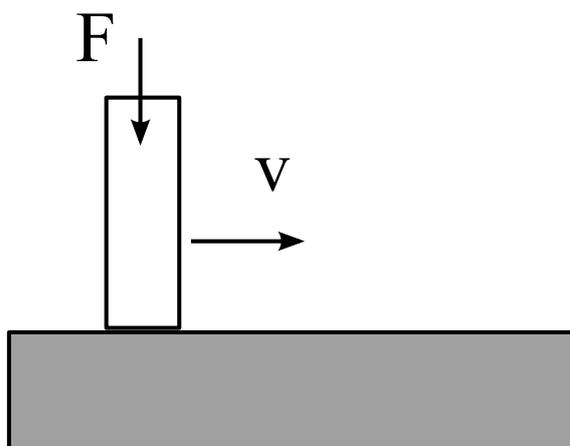


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Pin-on-Disk-Tests [Buc08].

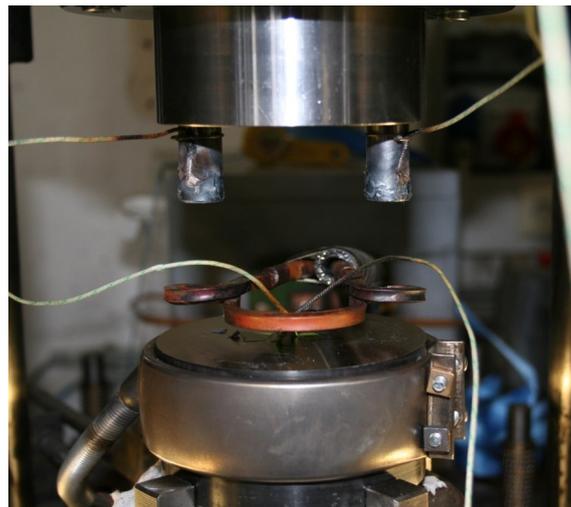


Abbildung 19: Versuchsaufbau eines Pin-on-Disk-Tests auf einem Rotational-Forging-Tribometer (RST) am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben (Abschnitt 3.2.4).

Dieser Versuch ist für umformtechnische Fragestellungen weniger geeignet, da die Proben keine plastische Formänderung erfahren. Hier wird nur der Materialabtrag der Reibpartner betrachtet und dadurch wird der Pin-on-Disk-Test üblicherweise für das untersuchen des Reibverhalten unterschiedlicher Werkstoffpaarungen der Reibpartner verwendet [Mil14].

3.2.4 Rotational Forging Tribometer

Das RST (auf Deutsch Rotations-Schmiede-Tribometer) wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik (LUT) der Montanuniversität entwickelt und gebaut. In Abbildung 20 ist diese Anlage mit dem für sie konzipierten Ring-on-Disk Test dargestellt. Es wird das Werkzeug (Ring) auf eine flache, sich drehende Probe gedrückt. Dabei werden über eine Kraftmessdose die Normalkräfte F_N gemessen und über eine Wägezelle das Moment aufgenommen. Durch den bekannten Hebelarm kann aus diesem Moment die Reibkraft F_R berechnet werden. Aus Reibkraft F_R und Normalkraft F_N lässt sich auch hier über die Formel (17) die Reibzahl μ bestimmen.

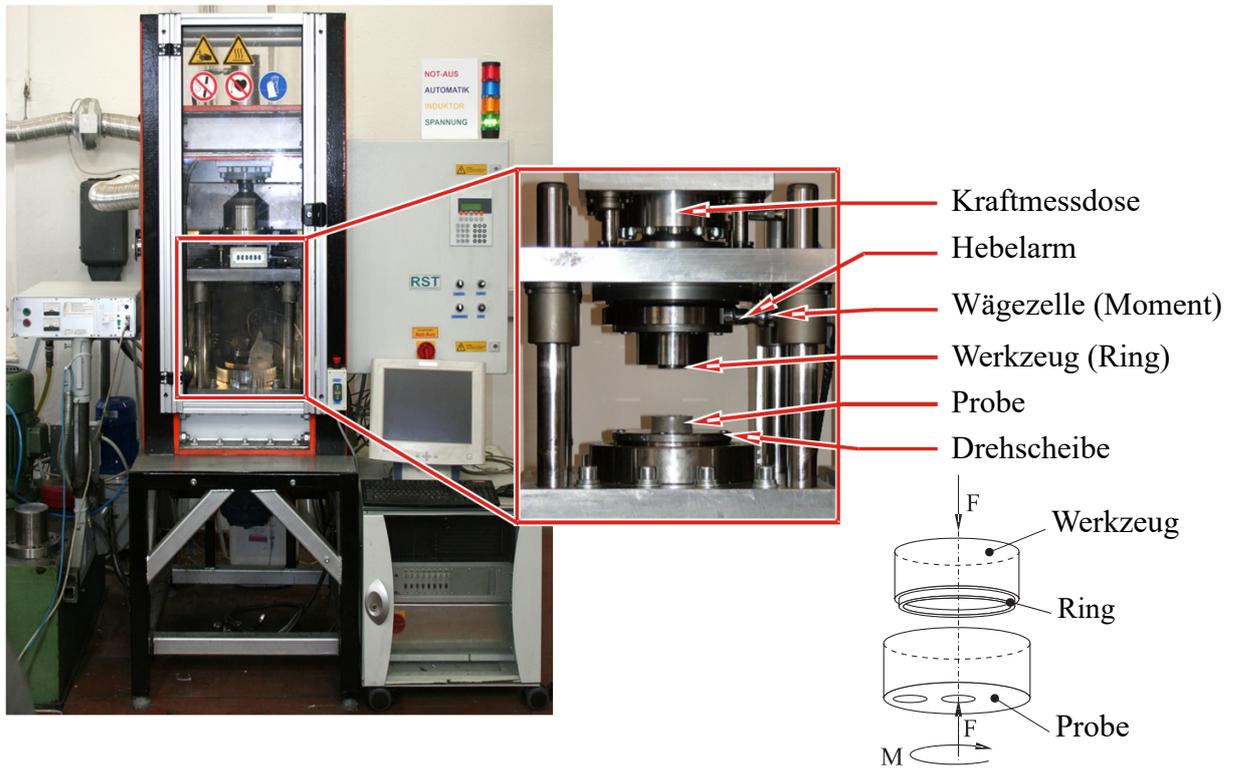


Abbildung 20: Aufbau des RST mit einer schematischen Darstellung eines Ring-on-Disk Versuchs [Mar06].

4 Simulation

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist die am häufigsten angewendete numerische Rechenmethode zur Festkörperberechnung. Dabei werden kontinuierliche Feldprobleme näherungsweise durch ein numerisches Verfahren gelöst. Verformungen und diverse andere Eigenschaften (wie z.B. Spannungen, Temperaturänderungen, Kontaktkräfte uvm.) können damit berechnet und simuliert werden. Dieses Werkzeug wird für die gezielte Strukturanalyse und -optimierung eingesetzt und es kann komplex Lastwechsel bis hin zu Crashanalysen realitätsnahe simulieren [KK06]. Für elastische Beanspruchungen genügt eine lineare Analyse, während bei vorwiegend plastischer Umformung eine nichtlineare FEM-Berechnung notwendig ist.

Ein Körper wird in endlich (finit) viele Elemente aufgeteilt und dessen Verhalten unter Einwirkung von Kräften, Temperatur oder Spannungen berechenbar gemacht. Die Elemente sind durch Knoten definiert und miteinander verbunden. Durch die Verschiebung bzw. den Kontakt der einzelnen Knoten wird die gesamte Verformung und Spannung mittels partieller Differentialgleichungen ermittelt [KK06].

Trotz der einfachen Handhabung gängiger Simulationspakete, ist die systematische FEM-Modellbildung ein komplexer Arbeitsschritt, der umfangreiche Kenntnisse der zugrundeliegenden Methoden erfordert. Dies ist notwendig um beim Aufbau einer Simulation Fehler zu vermeiden und dessen Ergebnisse richtig zu bewerten [KK06].

In dieser Arbeit wurde als Simulations-Tool die Software "simufact.formingTM 14.0" verwendet. Dieses Software-Tool ist ein Produkt von "MSC.software CorporationTM" und wurde speziell für Umformprozesse, egal ob Warm-, Kalt-, Massiv- oder Blechumformung, entwickelt. Simufact Forming arbeitet auf einem sogenannten "Marc[®]" Solver der nicht-linearische Gleichungen mit der Newton-Raphson-Methode löst [MSC].

4.1 Simulationsaufbau und Eingabeparameter

Zur Bestimmung des Reibfaktors wurden Ringstauchversuche simuliert. Die Simulation im Programm "simufact.formingTM 14" wurde mit dem Anwendungsmodul Warmumformung durchgeführt, da dieses Modul speziell für Massivumformungen oberhalb der Rekristallisationstemperatur ausgelegt ist. Die Einstellungen im User-Interface (Benutzeroberfläche) sind in Abbildung 21 dargestellt.

Weitere Prozessparameter für die Simulation sind:

- Prozesstyp → Stauchen

- Simulationstyp \rightarrow 3D/FEM
- Umgebungstemperatur \rightarrow 24°C
- Werkzeuge \rightarrow 2

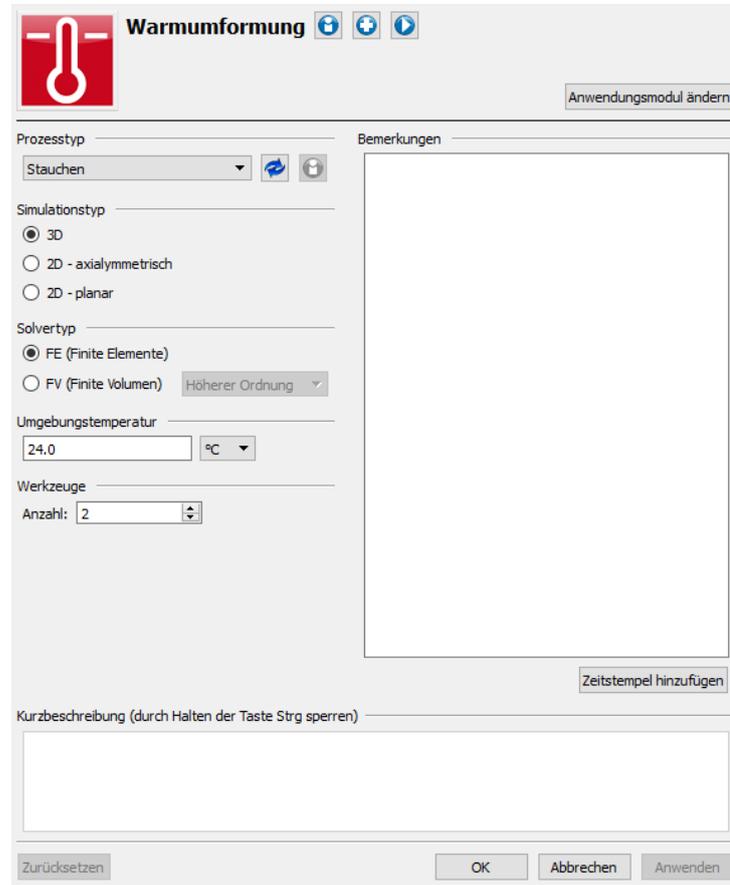


Abbildung 21: Auswahl der Prozessparameter im User-Interface von simufact.forming.

Die Geometrie für Werkzeug und Werkstück sind im Simulations-Tool direkt über die Erzeugung von Standardkörpern erstellt worden. Die Werkzeuge wurden als Zylinder mit einer Höhe $h_{WZ} = 5\text{mm}$ und einem Durchmesser $d_{WZ} = 30\text{mm}$ angenommen. Das Werkstück ist als Hohlzylinder mit einer Höhe $h_0 = 6,6\text{mm}$, einem Außendurchmesser $d = 20\text{mm}$ und einem Innendurchmesser $d_0 = 10\text{mm}$ modelliert. Aufgrund der Symmetrie konnte das Werkstück geviertelt werden, dies führte zu einer Verringerung der Rechenzeit. In Abbildung 22 ist der Aufbau der Simulation dargestellt.

Als Stauchparameter diente eine Tabellenpresse, die als Zeit/Hub-Typ angeführt ist. Dabei ändert sich der Hub in die negative Z-Richtung $3,63\text{mm}$ in einer Zeit von $t = 0,8\text{s}$, dass einer Umformgeschwindigkeit von $\dot{\varphi} = 1\text{s}^{-1}$ bei einer Umformung von 55% entspricht. Das Netz (Mesh) wurde als Hexmesh mit den Elementtyp Hexaeder ausgeführt und besteht aus 21019 Elementen bei einer Elementgröße von $0,2\text{mm}$. Die Temperatur der Werkzeuge betrug in allen Simulationen 20°C .

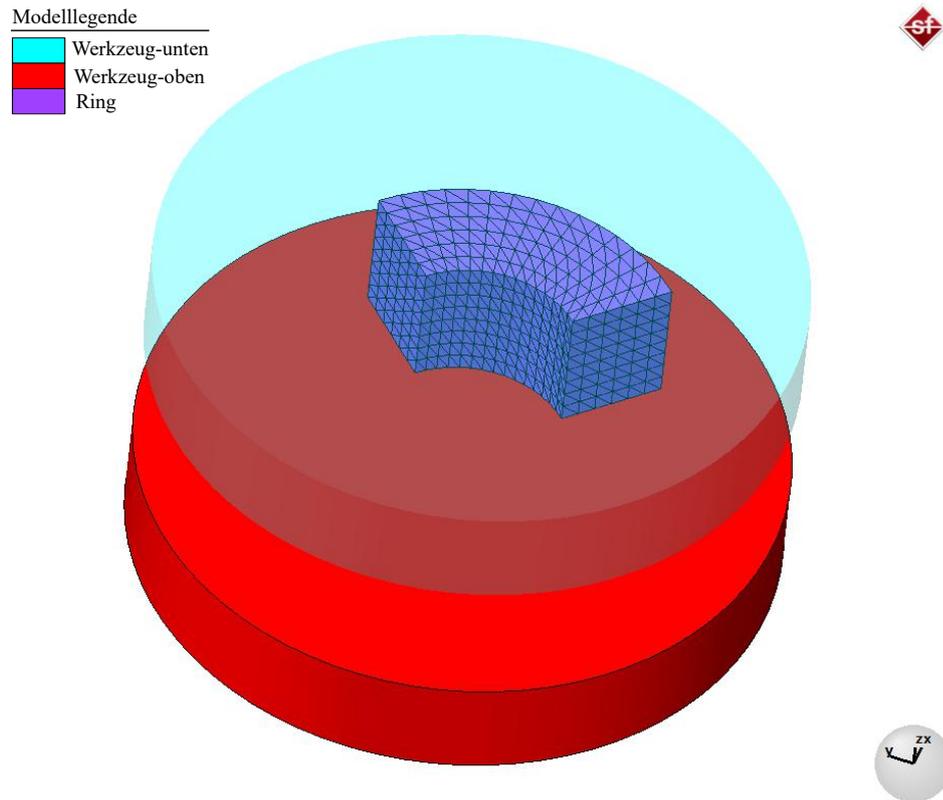


Abbildung 22: Darstellung des Simulationsmodells mit oberen und unteren Werkzeug sowie der geviertelten und vernetzten Ring-Probe.

Die Werkstoffparameter für die Simulationen der 42CrMo4-Werkstücke konnten aus dem Programm JMatPro entnommen und für die AA6082-Werkstücke aus der Werkstoffbibliothek vom Simulations-Tool werden.

Als Reibmodell kamen zur Bestimmung des Reibfaktors m das Reibfaktor Modell (Shear-Modell) zum Einsatz. Der Reibfaktor lag jeweils bei $m = 1$; $m = 0,5$; $m = 0,25$; $m = 0,1$; $m = 0,05$; $m = 0,01$ und $m = 0$ um ein Ringstauch-Nomogramm für die jeweiligen Temperaturen und Werkstoffe zu erstellen. In Tabelle 1 sind die einzelnen Simulationen mit deren unterschiedlichen Paramter aufgelistet.

Tabelle 1: Auflistung der Simulationen mit den unterschiedlichen Eingabeparametern zur Erstellung der Ringstauch-Nomogramme

Simulation	Temperatur [°C]	Werkstoff
1000-Stahl	1000	42CrMo4
900-Stahl	900	42CrMo4
800-Stahl	800	42CrMo4
700-Stahl	700	42CrMo4
450-Alu	450	AA6082

4.2 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Simulationen beinhalten jeweils sieben verschiedenen Reibfaktoren zu jeweils fünf verschiedenen Temperaturen. Die Änderung des Innendurchmessers ist wie in Abbildung 23 zu sehen ist mit einem Partikel aufgenommen worden. Ein Partikel nimmt die jeweiligen Daten wie z.B.: Kraft, Dehnrate, Spannung, Verschiebung, Temperatur usw. in einem Punkt auf.

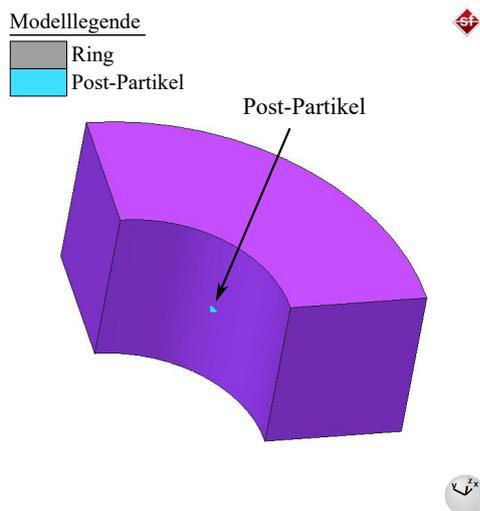


Abbildung 23: Lage des Post-Partikels am Innendurchmesser der Ringstauchprobe.

Durch den Befehl "Partikelverfolgung" konnte mittels eines Post-Partikels die Verschiebung des Punktes in x-Richtung über den Hub des Werkzeugs ausgegeben werden. Post-Partikel werden nach der Berechnung in die Simulation eingefügt, Partikel oder Fließlinien werden vor der Berechnung eingefügt. In Abbildung 24 ist ein Partikelverfolgungsdiagramm, das die X-Verschiebung des Partikels über den Hub des Werkzeugs dargestellt. Die X-Verschiebung ist in diesem Fall gleich der Verringerung des Innendurchmessers. Es zeigt einen negativen Abfalls der X-Verschiebung, dass eine Verringerung des Innendurchmessers bedeutet.

Die Daten des Partikelverfolgungsdiagramms wurden exportiert und in das Programm "OriginPro 9" eingefügt, um die Änderung des Innendurchmessers und der Höhe zu berechnen. Die Ergebnisse der Berechnungen mit unterschiedlichen Reibfaktoren m konnten anschließend in ein Diagramm dargestellt werden, welches als Ringstauch-Nomogramm bekannt ist. Abbildung 25 zeigt ein durch Simulationen erstelltes Ringstauch-Nomogramm für den Werkstoff 42CrMo4 bei einer Temperatur von 1000°C.

Dieses Ringstauch-Nomogramm zeigt, dass bei geringerem Reibfaktor die Änderung des Innendurchmessers minimal wird bzw. ist bei theoretisch keiner Reibung eine Vergrößerung des Innendurchmessers zu erwarten.

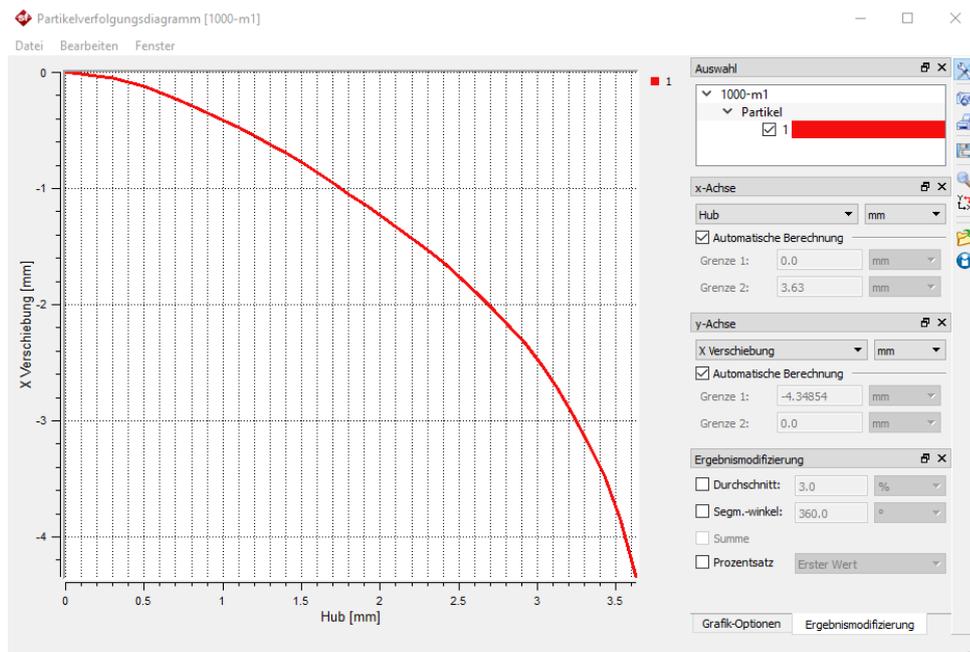


Abbildung 24: Partikelverfolgungsdiagramm: X-Verschiebung (Änderung des Innendurchmessers) über Hub des Werkzeugs.

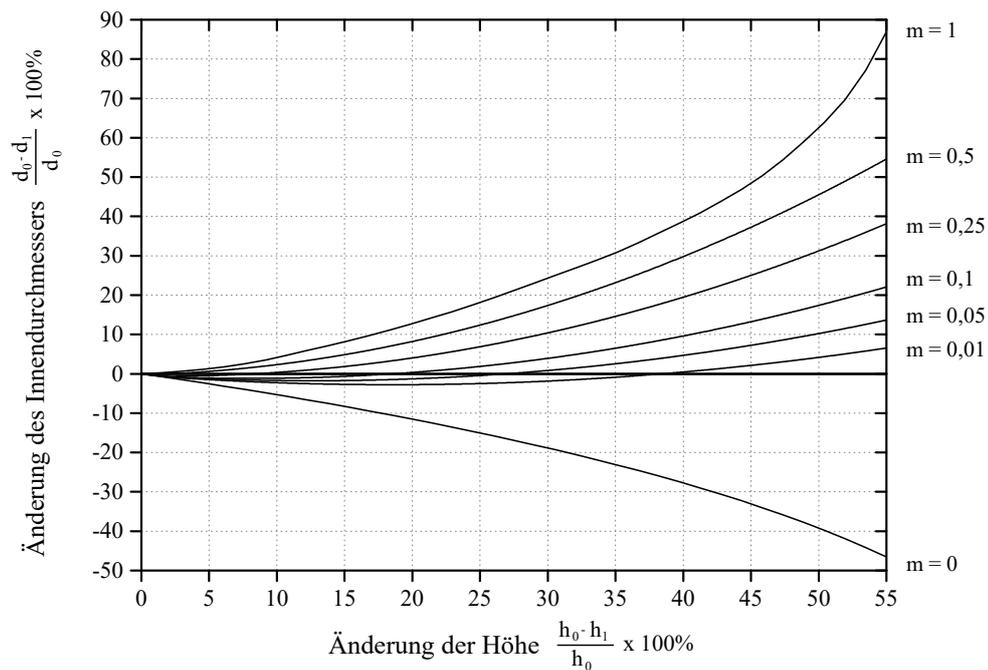


Abbildung 25: Ringstach-Nomogramm der Simulation bei 1000°C und sieben unterschiedlichen Reibfaktoren von $m = 0$ bis $m = 1$.

Als Ergänzung wurden in Abbildung 26 das Reibfaktor-Modell, das Coulomb-Reibmodell, das Kombinierte-Reibmodell und das IFUM-Reibmodell bei Haftung mit einem Praktischen Versuch gegenübergestellt. Für die Reibmodelle wurden folgende Parameter gewählt:

- Reibfaktor-Modell: $m = 1$

- Coulomb-Reibmodell: $\mu = 0,5$
- Kombiniertes-Reibmodell: $m = 1, \mu = 0,5$
- IFUM-Reibmodell: $m = 1, C = 3,67$

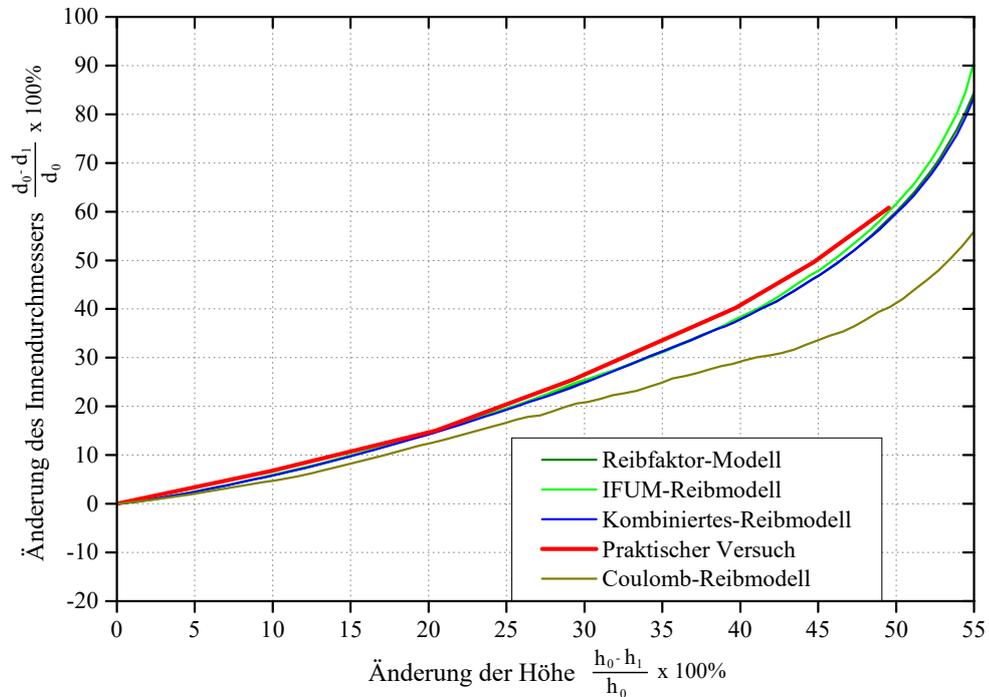


Abbildung 26: Gegenüberstellung der Reibmodelle mit einem praktischen Versuch bei 1000°C und ohne Schmierung.

Es ist ersichtlich, dass das Coulomb-Reibmodell bei dieser Art der Umformung sehr vom praktischen Versuch abweicht. Das Reibfaktormodell und das Kombinierte-Reibmodell liegen nahe am praktischen Versuch und es ist kaum ein Unterschied zwischen den beiden zu erkennen. Die Berechnungen mit dem IFUM-Reibmodell zeigen bei diesem Reibverhältnis die besten Ergebnisse.

4.3 Interpretation der Simulationsergebnisse

Das Coulomb-Reibmodell hat laut Buchner [Buc08] hohe Abweichungen bei Massivumform-Simulationen aufgrund der Überschätzung der Schubspannung infolge der Reibung. Daher kann es bei der Auswertung der Versuche zu einer Unterschätzung des Reibwertes kommen. Das Coulomb-Reibmodell wird daher häufiger bei Blechumform-Simulationen eingesetzt.

Das Reibfaktormodell und das Kombinierte-Reibmodell liegen wie Abbildung 26 zeigt nahe am praktischen Versuch. Das Kombinierte-Reibmodell rechnet, wie im Kapitel 2.3.3 beschrieben wurde, mit dem Coulomb-Reibmodell und dem Reibfaktor-Modell. Je nach

Höhe der Belastung wird zwischen den beiden Reibmodellen gewechselt. Da kaum ein Unterschied zwischen den Reibfaktor-Modell und Kombinierten-Reibmodell zu erkennen ist, kann angenommen werden dass mit dem Reibfaktor-Modell gerechnet wurde.

Trotz der guten Ergebnisse bei diesem Versuch kam es jedoch bei geringer Reibung ($m = 0$) zu keiner Vergrößerung des Innendurchmessers. Dies lässt auf einen Berechnungsfehler schließen und daher wurde für die Erstellung der Nomogramme das IFUM-Reibmodell nicht verwendet.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurde für weitere Berechnungen und für die Erstellung der Nomogramme folglich das Reibfaktormodell herangezogen, da es bei hohen Belastungen nahe an der Realität liegt und es nur einen Parameter zu regeln gilt.

Es sind für die Versuche 900-Stahl, 800-Stahl, 700-Stahl und 450-Alu weitere Nomogramme erstellt worden die hier nicht explizit dargestellt sind, allerdings im Abschnitt 5 verwendet werden.

5 Praktische Versuche

Für die Ermittlung des Reibfaktors gibt es viele Versuchsaufbauten, einige dieser Verfahren sind bereits in Kapitel 3 beschrieben. Die Experimentellen Untersuchungen in dieser Arbeit beinhalten Ringstauchversuche auf einem Warmumformsimulator und Pinon-Disk ähnliche Reibversuche auf einem Rotational-Forging-Tribometer (RST) und einer Torsions-Reibschweiß-Anlage (TORA). Bei den Versuchen kamen jeweils ein Warmarbeitsstahl (X38CrMoV5-1) als Werkzeug mit einem Vergütungsstahl (42CrMo4) als Probe zum Einsatz. Für die Gegenüberstellung wurden noch Versuche mit den Werkstoffpaarungen aus Warmarbeitsstahl (X38CrMoV5-1) als Werkzeug und einer Aluminium-Knetlegierung (AA6082) als Probe durchgeführt. Die Versuche sind ohne Einsatz eines Schmiermittels und mit Schmiermittel durchgeführt worden, wobei eine Graphit-Suspension als Schmiermittel diente

5.1 Ringstauchversuche

Für den Ringstauchversuch sind Proben mit den Abmessungen $d = 20\text{mm}$, $d_0 = 10\text{mm}$ und $h_0 = 6,6\text{mm}$, das einem Verhältnis von 6:3:2 entspricht, gefertigt worden. Zusätzlich wurde an jedem Ring eine Bohrung seitlich an der äußeren Zylinderfläche mit einem Durchmesser von $d_B = 1,1\text{mm}$ hinzugefügt, um ein Thermoelement am Ring zu befestigen. In Abbildung 27 ist die Fertigungszeichnung der Ringstauchproben dargestellt.

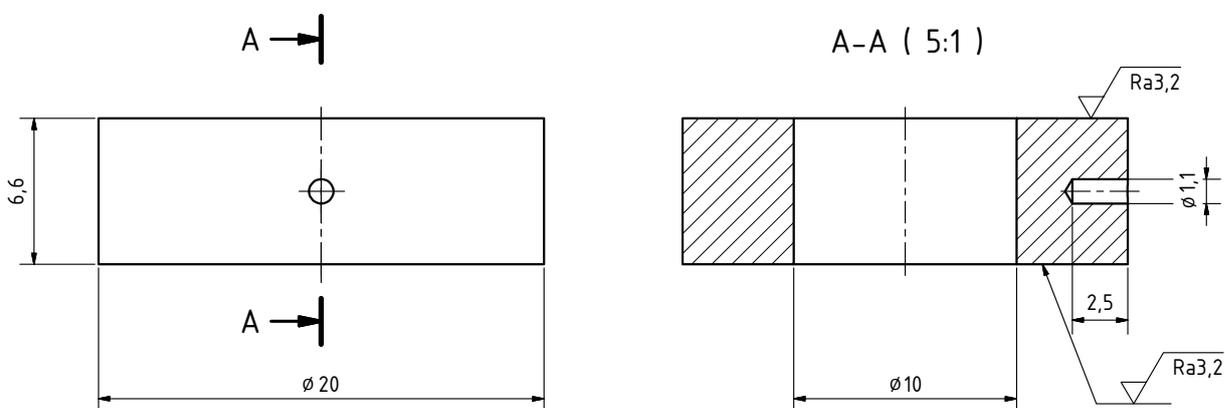


Abbildung 27: Fertigungszeichnung der Ringstauchprobe.

5.1.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche sind auf einem Warmumformsimulator (TMTS: Thermo-Mechanical Treatment Simulator) der Firma Servotest durchgeführt worden. Dazu wurden die Ringstauchproben wie in Abbildung 28 ersichtlich in einen zangenförmigen Aufnehmer eingespannt und das Thermoelement mit der Maschine verbunden. Die Probe ist anschließend auf die Prüftemperatur mittels eines an der Maschine montierten Induktors aufgeheizt worden der in Abbildung 29 dargestellt ist. Bei Erreichen der Prüftemperatur wurde die Probe

automatisch aus dem Induktor gefahren und schnellstmöglich zwischen den Werkzeugen (Abbildung 30) platziert und gestaucht. Druckluft diente nach dem Stauchen zur Abkühlung der Proben.

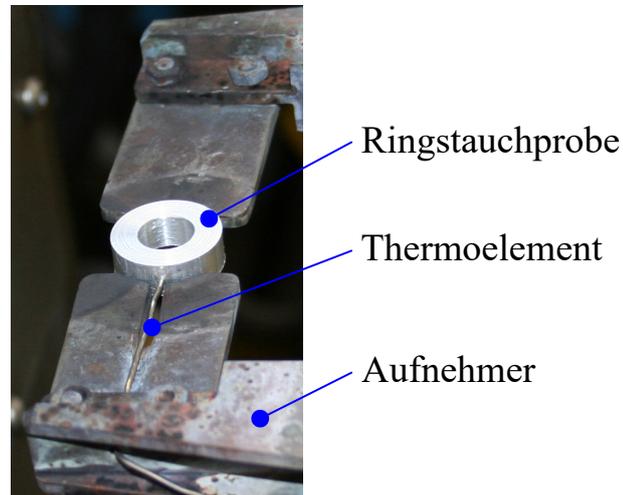


Abbildung 28: Probenaufnehmer des Warmumformsimulators mit eingespannter Ringstauchprobe und angeschlossenem Thermoelement.

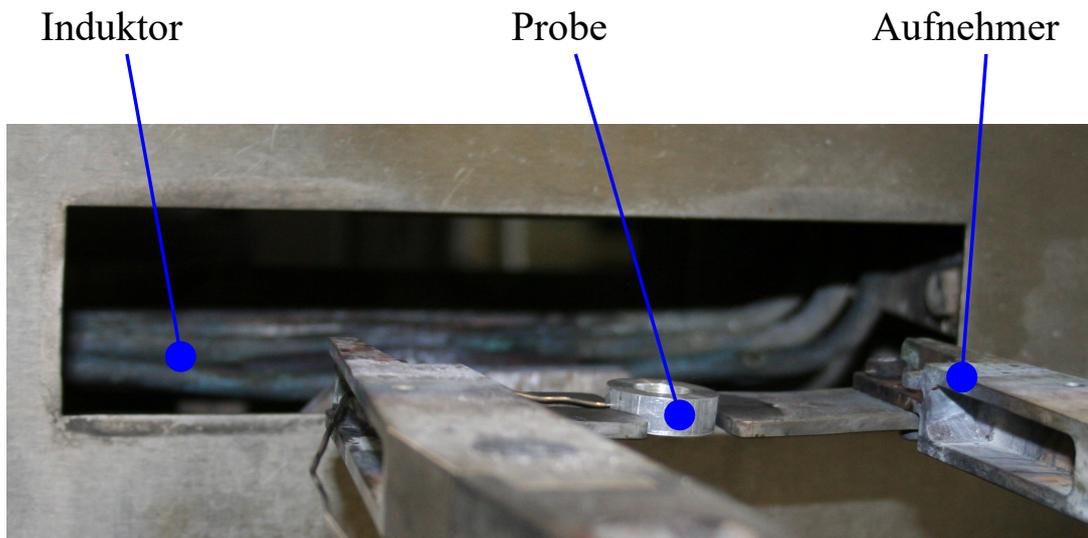


Abbildung 29: Induktor des Warmumformsimulators und im Aufnehmer eine eingespannte Ringstauchprobe.

Es haben insgesamt zehn Versuchsreihen stattgefunden, die sich wie in Tabelle 2 aufgelistet voneinander differenzierten.

Jede Versuchsreihe beinhaltet sechs Proben die jeweils um 10%, 20%, 30%, 40%, 45% und 50% ihrer ursprünglichen Höhe gestaucht wurden. Bei Proben mit Schmiermittel sind die Werkzeuge vor dem Stauchvorgang mit einem möglichst gleichmäßigen Schmiermittelfilm vorbereitet worden. Die Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ betrug für alle durchgeführten Stauchversuche 1 s^{-1} .

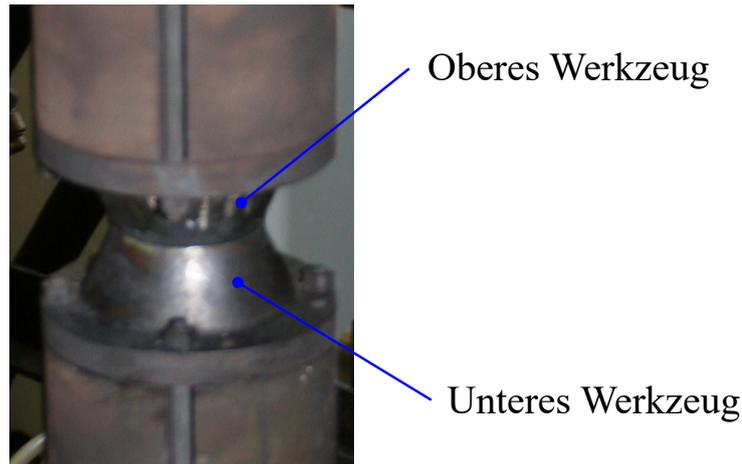


Abbildung 30: Oberes und unteres Werkzeug des Warmumfomsimulators.

Tabelle 2: Versuchsreihen für den Ringstauchversuch

Versuchsreihe	Probenwerkstoff	Temperatur	Schmiermittel
1000-trocken	Stahl: 42CrMo4	1000°C	ohne
1000-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	1000°C	mit
900-trocken	Stahl: 42CrMo4	900°C	ohne
900-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	900°C	mit
800-trocken	Stahl: 42CrMo4	800°C	ohne
800-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	800°C	mit
700-trocken	Stahl: 42CrMo4	700°C	ohne
700-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	700°C	mit
450-trocken	Aluminium: AA6082	450°C	ohne
450-geschmiert	Aluminium: AA6082	450°C	mit

5.1.2 Versuchsauswertung

An den gestauchten Ringstauchproben wurden sowohl der Innendurchmesser als auch die Höhe mithilfe eines Messschiebers vermessen. Aufgrund von Gefügeinhomogenitäten kann die Form des Innendurchmessers von einer Kreisform abweichen. Dieser Effekt ist in Abbildung 31 dargestellt.

Die Messung des Innendurchmessers erfolgte an drei Stellen (im Winkel von 120°) und der Mittelwert ist daraus arithmetisch ermittelt worden. Zusätzlich erfährt die zu vermessende Innenringfläche eine Ausbauchung entlang der Ringhöhe aufgrund der Reibung zwischen Werkzeug und Probenoberfläche. Dadurch wurde am kleinsten messbaren Innendurchmesser gemessen. Angesichts der elastischen Rückfederung nach dem Stauchvorgang ist auch die Höhe an drei Punkten gemessen und ebenfalls ein arithmetisches Mittel gebildet worden. Die Messpunkte an den Proben sind in Abbildung 32 dargestellt.



Abbildung 31: Ringstauchprobe mit stark verformten Innendurchmesser durch den Effekt der Gefügeinhomogenität.

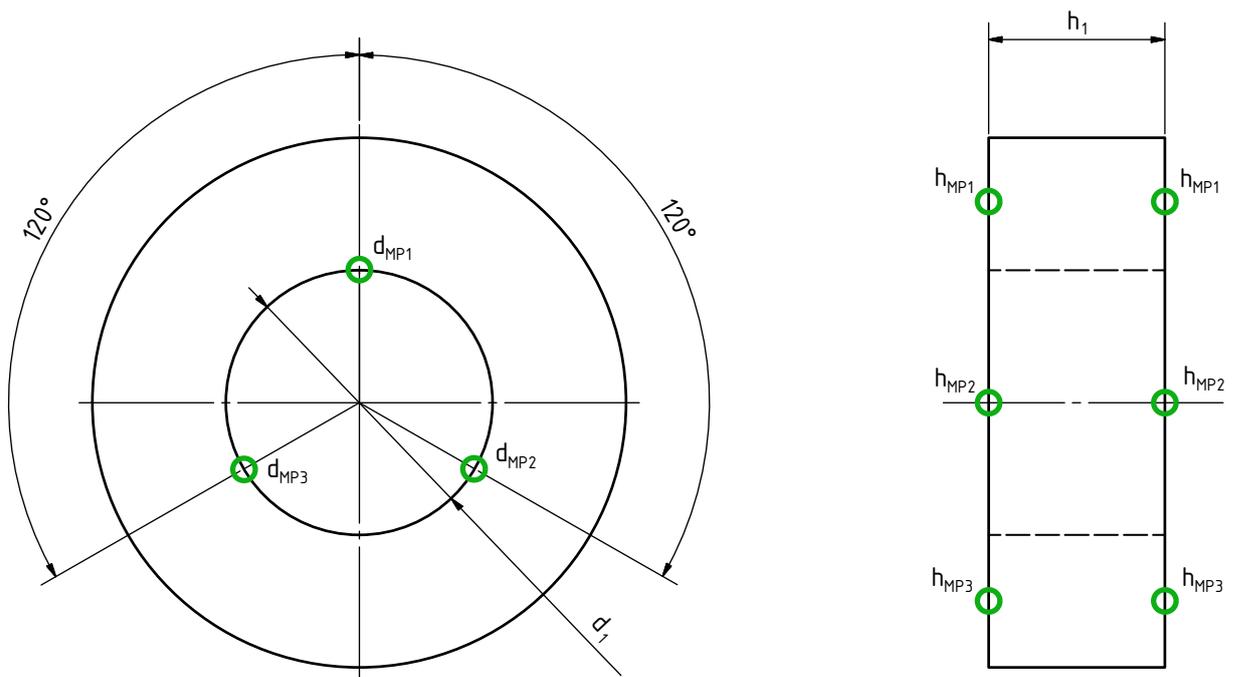


Abbildung 32: Messpunkte der Ringstauchprobe: d_{MP1} erster Messpunkt des Durchmessers, d_{MP2} zweiter Messpunkt des Durchmessers, d_{MP3} dritter Messpunkt des Durchmessers, h_{MP1} erster Messpunkt der Höhe, h_{MP2} zweiter Messpunkt der Höhe und h_{MP3} dritter Messpunkt der Höhe.

5.1.3 Versuchsergebnisse und Interpretation

Die Messergebnisse bzw. die daraus berechneten Mittelwerte der einzelnen Ringstauchproben wurden anschließend in die erstellten Ringstauch-Nomogramme eingetragen. Um den Einfluss der Reibung auf das Werkzeug zu veranschaulichen, gibt es eine Gegenüberstellung der mitgemessenen Kraftverläufe der praktischen Versuche in Diagrammen.

5.1.3.1 Versuchsergebnisse 1000°C

In Abbildung 33 sind die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 1000-trocken und 1000-geschmiert in das durch die Simulation erstellte Ringstauch-Nomogramm eingetragen.

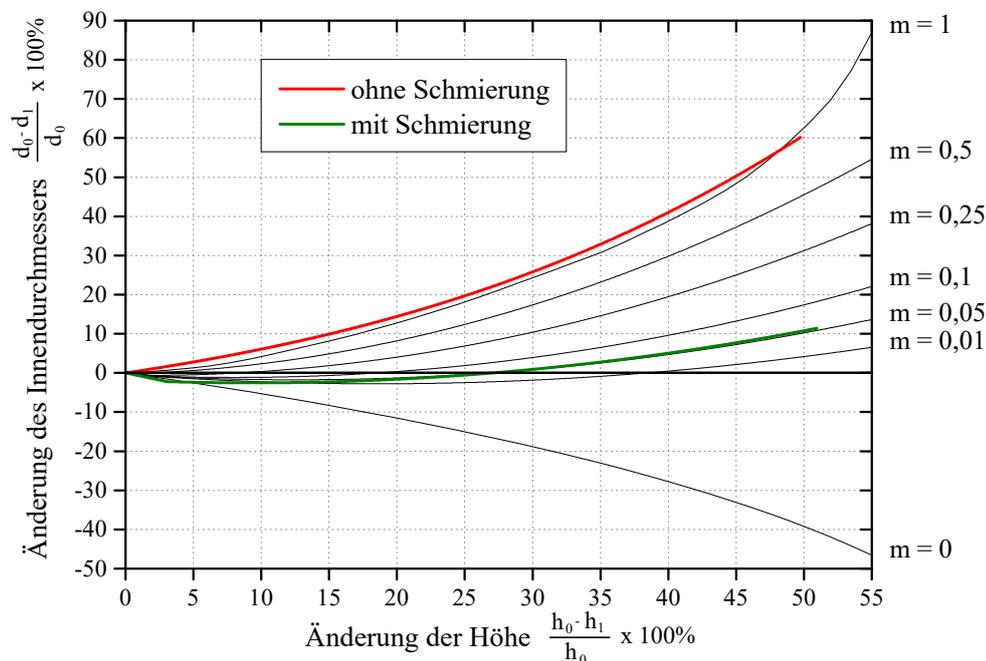


Abbildung 33: Ringstauch-Nomogramm bei 1000°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug.

Bei 1000°C und keiner Schmierung ist der Reibfaktor $m = 1$ und daher kein Gleiten zwischen Werkstück und Werkzeug zu erwarten. Dadurch ist mit hohen Kräften auf das Werkzeug zu rechnen, das zu einem hohen Verschleiß der Werkzeuge führen wird. Des Weiteren können sich beim Gesenkschmieden dadurch Falten an der Oberfläche bilden.

Wird jedoch ein Schmierfilm auf das Werkzeug aufgebracht, senkt sich der Reibfaktor beträchtlich auf $m = 0,05$ ab. Am Beginn des Stauchvorgangs sinkt die Kurve in den negativen Bereich, was eine Vergrößerung des Innendurchmessers bedeutet, da der Werkstoff nach außen fließt. Im weiteren Verlauf steigt die Kurve wie erwartet an. Hier fließt der Werkstoff sowohl nach außen als auch nach innen. Durch den geringen Reibfaktor senken sich auch die Kräfte, die auf das Werkzeug wirken, und so wird der Verschleiß minimiert.

Abbildung 34 zeigt den Kraftunterschied zwischen geschmierten und ungeschmierten Werkzeugen. Es ist zu erkennen, dass bis ca. 35% der Höhenänderung die Kräfte auf das Werkzeug ob mit oder ohne Schmierung identisch sind. Erst im Bereich höherer Umformung hebt sich die Kraft der Probe ohne Schmiermittel von der Probe mit Schmiermittel deutlich ab. Dies zeigt, dass die Reibung bei erhöhtem Umformgrad die auf das Werkstück wirkende Kraft beeinflusst.

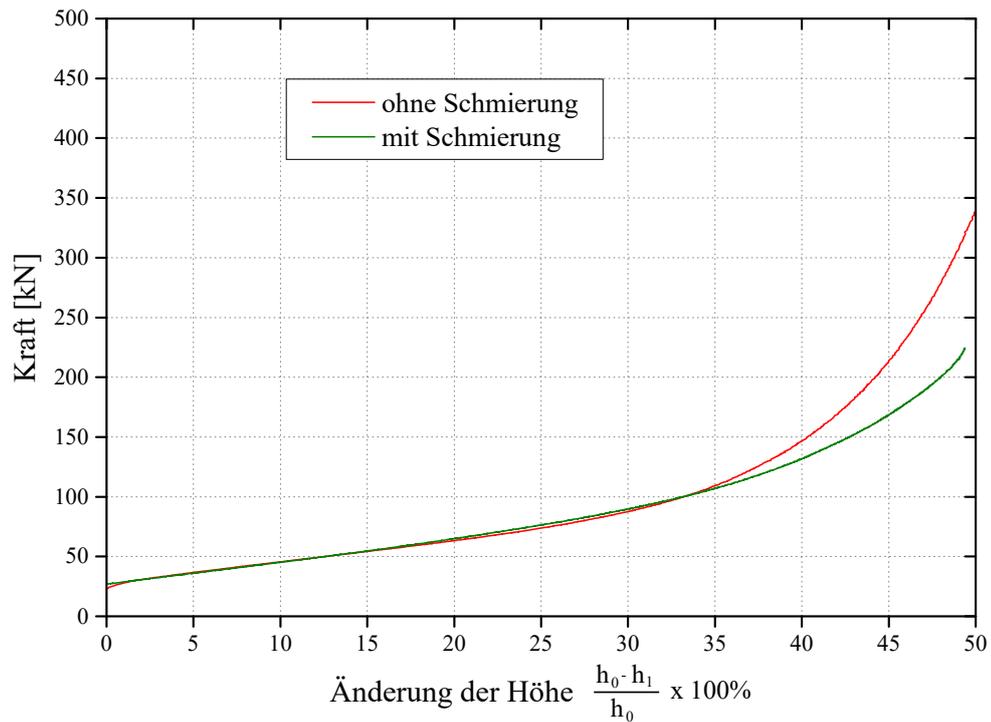


Abbildung 34: Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 1000°C und dem Werkstoff 42CrMo4.

5.1.3.2 Versuchsergebnisse 900°C

Die Versuchsergebnisse für die Versuchsreihen 900-trocken und 900-geschmiert sind im erstellten Ringstauch-Nomogramm in Abbildung 35 dargestellt.

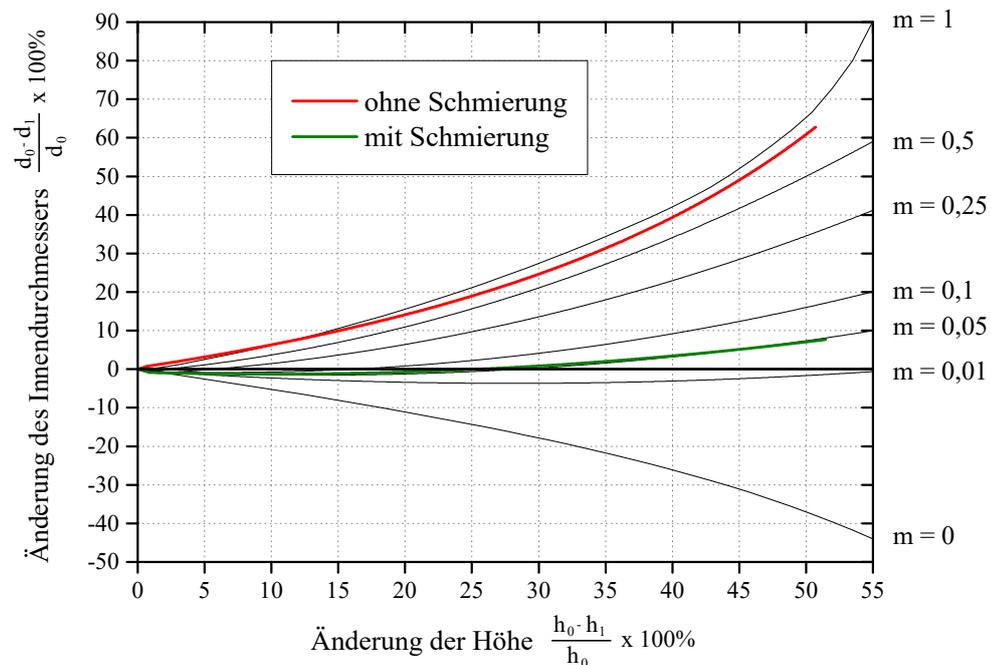


Abbildung 35: Ringstauch-Nomogramm bei 900°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug.

Bei keiner Schmierung liegen die praktischen Ergebnisse direkt unterhalb des Reibwertes von $m = 1$. Aufgrund von Abweichungen der Simulation zu den Experimenten kann jedoch Haften zwischen Werkzeug und Werkstück angenommen werden. Auch hier ist wieder mit hohen Kräften am Werkzeug zu rechnen, dass zu erhöhten Verschleiß führt.

Mit geschmierten Werkzeugen senkt sich der Reibfaktor auf $m = 0,05$ ab. Bis zu einer Änderung der Höhe von ca. 30% ist kaum eine Veränderung des Innendurchmessers zu erkennen. Das heißt es fließt der Großteil des Materials in Richtung des Außendurchmessers. Erst ab einer Höhenänderung von ca. 30% steigt die Kurve in den positiven Bereich, das auf die Gleichverteilung des Materialflusses schließen lässt. Durch die Abnahme des Reibfaktors ist auch mit einer Verringerung der Umformkraft zu rechnen das auf eine Verschleißminimierung schließen lässt. Die Maximalwerte des Reibfaktors dieser Versuchsreihe unterscheiden sich nur gering von den Versuchsreihen mit 1000°C.

Der Vergleich von den auf das Werkzeug wirkenden Umformkräfte ist in Abbildung 36 dargestellt. Wie angenommen ist die maximale Umformkraft mit geschmierten Werkzeug geringer als die maximale Kraft ohne geschmierten Werkzeug. Jedoch sind die Kräfte bis zu einer Höhenänderung des Werkstücks von 30% ident. Im Gegensatz zum Reibwert bezüglich Änderung des Innendurchmessers ist bei den Umformkräften ein erheblicher Anstieg im Vergleich zu der Versuchsreihe von 1000°C zu erkennen.

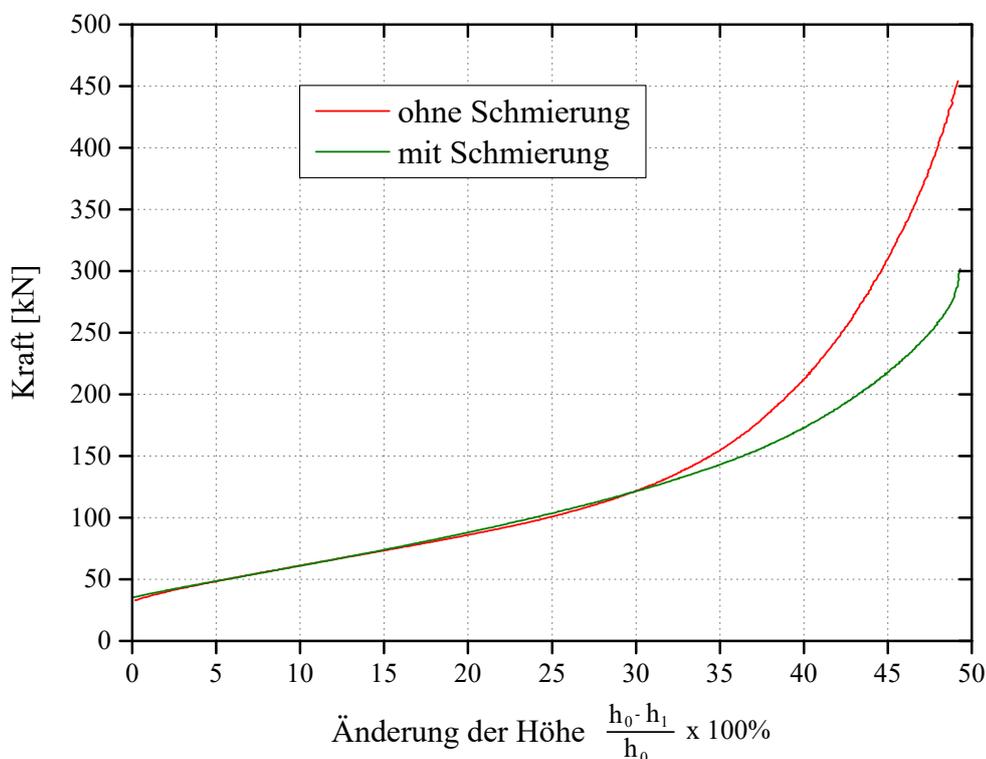


Abbildung 36: Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 900°C und dem Werkstoff 42CrMo4.

5.1.3.3 Versuchsergebnisse 800°C

Abbildung 37 zeigt die in das Ringstauch-Nomogramm eingetragenen Ergebnisse der Versuchsreihe 800-trocken und 800-geschmiert. Die gemessenen Werte der Versuchsreihe 800-trocken liegen nahe der Simulierten Werte für einen Reibwert von $m = 1$. Dies bedeutet, dass zwischen den Oberflächen des Werkzeugs und des Werkstücks kein gleiten sondern haften stattfindet. Das Maximum der Änderung des Innendurchmessers liegt wie bei den vorherigen Versuchen auch bei ca. 60% bei einer Höhenänderung von 50%. Haften bedeutet für das Werkstück eine hohe Beanspruchung und daraus folgt auch hoher Verschleiß.

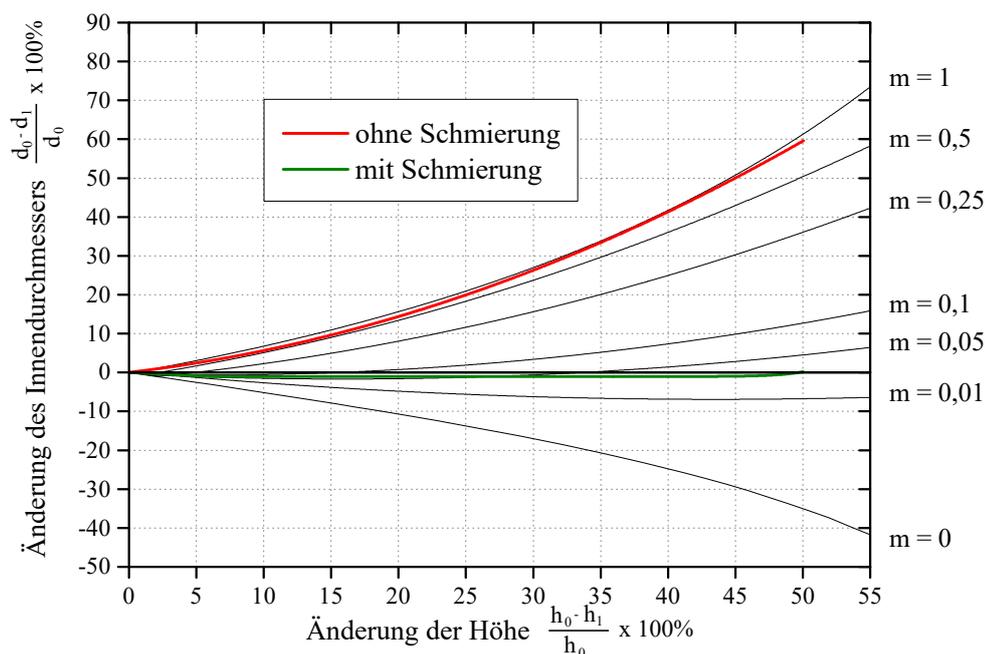


Abbildung 37: Ringstauch-Nomogramm bei 800°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug.

Der Innendurchmesser der Versuchsreihe 800-geschmiert bleibt während der gesamten Umformung konstant. Das heißt der Materialfluss bewegt sich in Richtung des Außendurchmessers. Bei etwa 35% Höhenänderung hebt sich das Praxisergebnis vom theoretischen Ergebnis ab und unterschreitet die Simulation. Diese Abweichung kann sowohl von Einflüssen aus dem Praktischen oder auch von Berechnungsfehlern kommen. Durchaus kann aber ein Reibfaktor von $m = 0,05$ angenommen werden. Durch den Einsatz eines Schmiermittels wird die Belastung des Werkzeugs verringert und somit die Lebensdauer erhöht.

Die auf das Werkzeug wirkenden Umformkräfte der Versuchsreihe 800-trocken und 800-geschmiert sind in Abbildung 38 dargestellt. Die Kräfte sind bis zu einer Höhenänderung von ca. 33% nahezu kongruent zueinander. Ab diesem Zeitpunkt hebt sich der Kraftverlauf der ungeschmierten Versuchsserie deutlich von der geschmierten Versuchsserie ab.

Im Vergleich zu den vorherigen Versuchsreihen bei 1000°C und 900°C Umformtemperatur sind die Maximalkräfte deutlich angestiegen. Sowohl im geschmierten als auch im ungeschmierten Zustand der Werkzeuge.

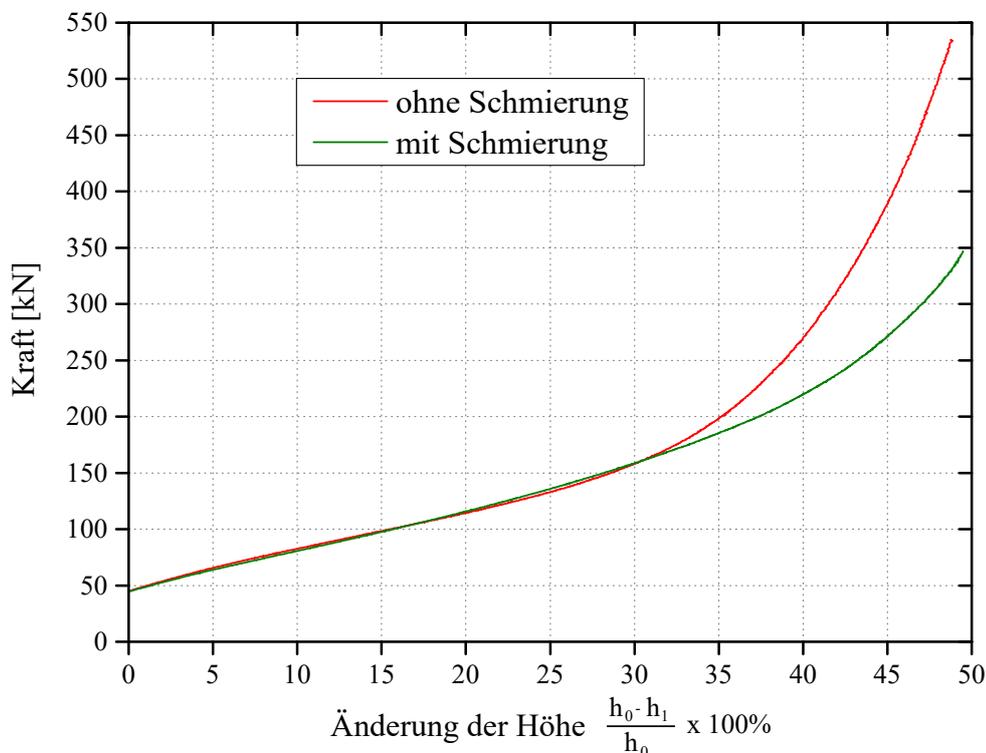


Abbildung 38: Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeugen bei 800°C und dem Werkstoff 42CrMo4.

Versuchsergebnisse 700°C

In Abbildung 39 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe 700-trocken und 700-geschmiert in ein Ringstauch-Nomogramm eingetragen. Die Werte der Messung des praktischen Versuchs ohne Schmierung liegen deutlich über den Werten des simulierten Versuchs bei einem Reibwert von $m = 1$. Diese starke Abweichung der praktischen Versuche von der Simulation wird von der Umwandlung des Gefüges stammen (Perlit- Austenitumwandlung bzw. Weichglühen 680°C - 720°C). Es kann jedoch trotzdem als Reibfaktor $m = 1$ angesehen werden und als haften deklariert werden.

Die praktischen Ergebnisse für die Versuchsserie 700-geschmiert liegen laut dem Ringstauch-Nomogramm aus Abbildung 39 über den Werten der Simulation von einem Reibfaktor von $m = 0,1$. Es kann jedoch angenommen werden dass bei einer Temperatur von 700°C, mit dieser Werkstoffparung und einer Graphit-Suspension als Schmierung ein Reibfaktor von $m = 0,1$ vorliegt.

Im Diagramm für die auf das Werkzeug wirkenden Umformkräfte (Abbildung 40) sind die

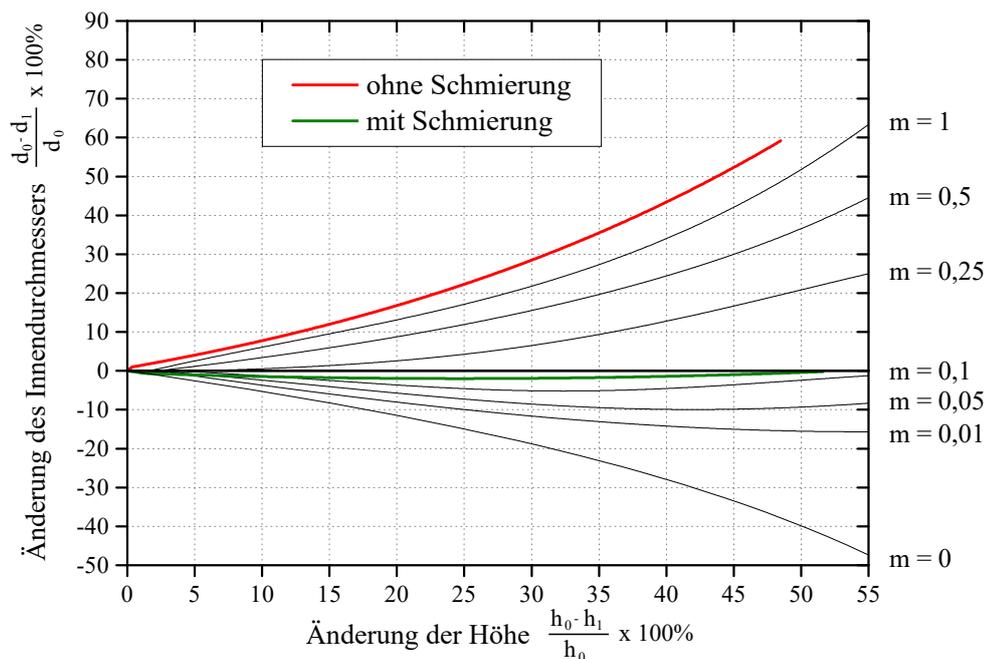


Abbildung 39: Ringstauch-Nomogramm bei 700°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug.

Ergebnisse der Versuchsserien 700-trocken und 700-geschmiert gegenübergestellt. Bis zu einer Höhenänderung der Proben von ca. 27% sind die Kraftverläufe identisch. Der Verlauf von den Versuchen ohne Schmierung hebt sich danach deutlich ab. Im Vergleich zu den vorigen Versuchen sind die Maximalkräfte mit ungeschmierten als auch mit geschmierten Werkzeug am höchsten.

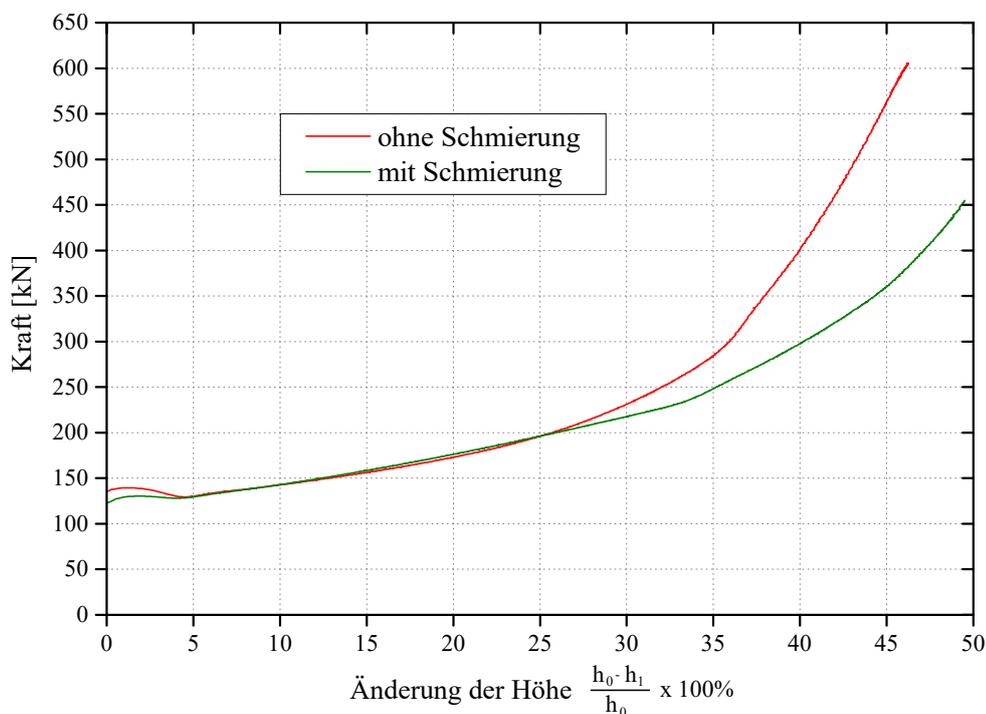


Abbildung 40: Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 700°C.

5.1.3.4 Versuchsergebnisse 450°C

Bei dieser Versuchsreihe wurde im Gegensatz zu den bisherigen Versuchsreihen als Werkstoffpaarung eine Aluminium-Knetlegierung (AA6082) als Werkstück und ein Warmarbeitsstahl (X38CrMoV5-1) als Werkzeug verwendet. In Abbildung 41 sind die Ergebnisse des Ringstauchversuchs der Versuchsreihe 450-trocken und 450-geschmiert in ein Ringstauch-Nomogramm dargestellt. Auch bei den Aluminium-Proben ist bei keiner Schmierung ein Reibfaktor von $m = 1$ zu erwarten. Aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums im Vergleich zu Stahl kann es zum "anhaften" des Werkstücks am Werkzeug kommen. Durch dieses Ankleben kommt es zu erhöhten Werkzeugverschleiß und zu Oberflächenschäden bzw. Maßungenauigkeiten am Werkstück.

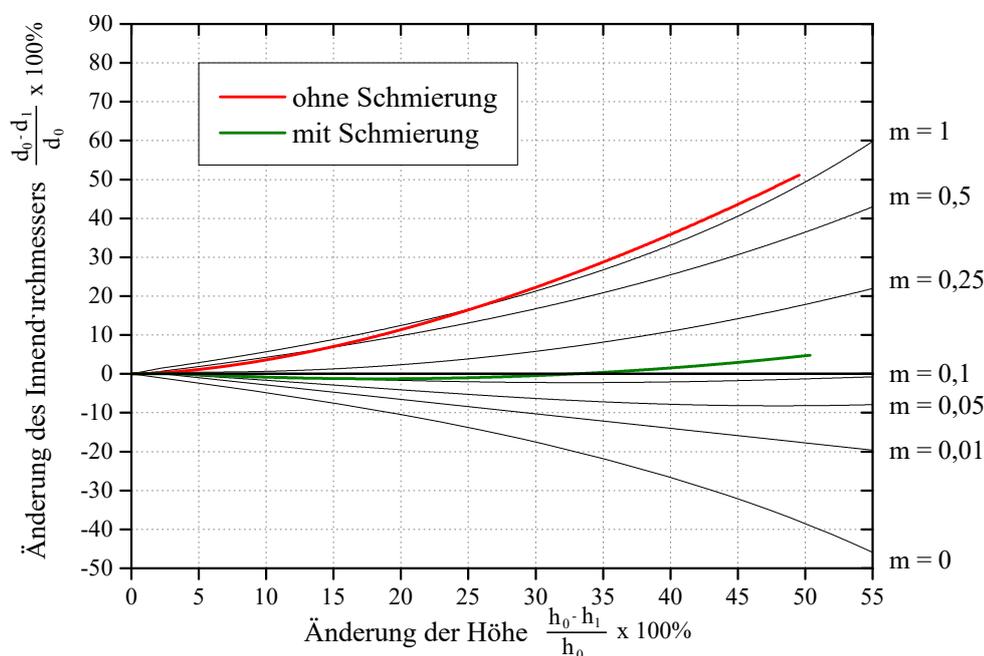


Abbildung 41: Ringstauch-Nomogramm bei 450°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug.

Mit geschmierten Werkzeug sinken die Werte des praktischen Versuchs auf die Werte den simulierten Versuchs mit einem Reibwert von $m = 0,1$. Jedoch bei einer Höhenänderung von ca 25% hebt sich der praktische Versuch von den theoretisch ermittelten Werten leicht ab. Es kann hier ein Reibwert zwischen $m = 0,1$ und $m = 0,25$ gewählt werden.

In Abbildung 42 sind die Kraftverläufe des Werkzeugs über die Änderung der Höhe der Probe dargestellt. Im Vergleich zu den vorherigen Proben aus Stahl sind diese Kräfte sehr gering. Es unterscheiden sich die Kräfte auch hier zwischen geschmierten und ungeschmierten Werkzeug. Bis zu einem Wert von ca. 27% sind beide Verläufe identisch und danach hebt sich der Verlauf vom ungeschmierten Werkzeug deutlich von Verlauf des geschmierten Werkzeugs ab. Wie bei den Stahlproben trennen sich die Kraftverläufe der

Aluminiumproben im selben Bereich.

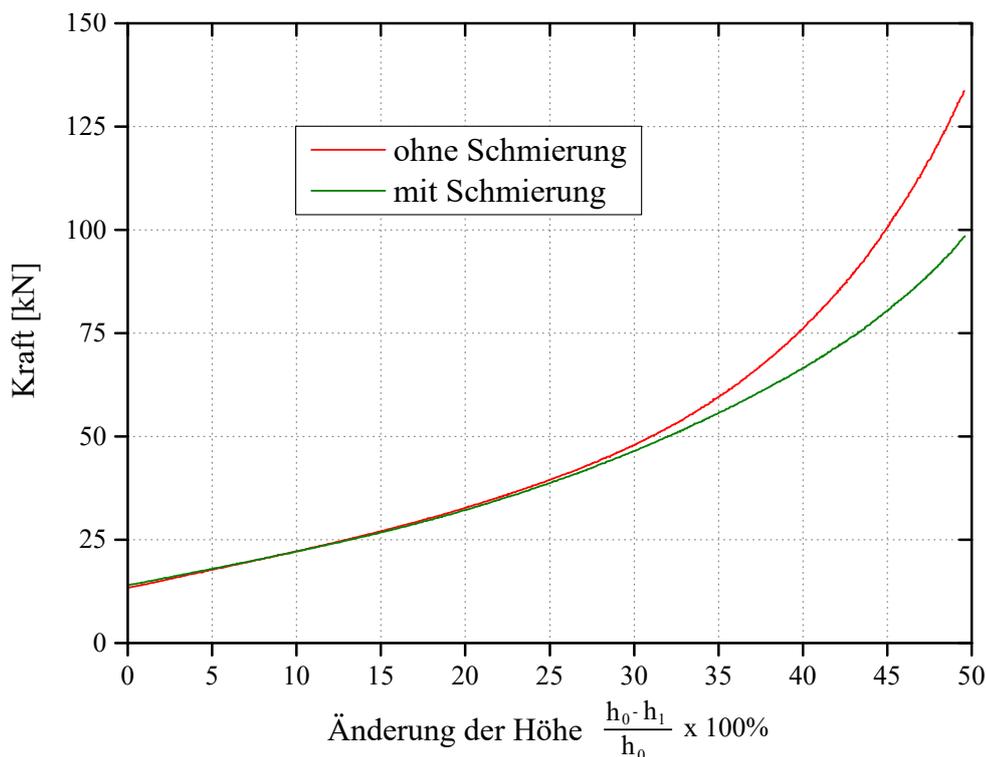


Abbildung 42: Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 450°C und dem Werkstoff AA8082.

5.1.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse, welche in den Ringstauch-Nomogrammen dokumentiert sind, zeigen dass ohne Schmierung kein gleiten zwischen den Werkzeug und den Werkstück vorliegt und daraus ein Reibfaktor von $m = 1$ resultiert. Schon ein geringer Schmierfilm zwischen Werkzeug und Werkstück zeigt einen erheblichen Abfall des Reibfaktors auf $m = 0,05$. Wie aus den Ringstauch-Nomogrammen ersichtlich, ist der Einfluss der Temperatur ab einem Wert von 800°C auf den Reibfaktor relativ gering. Anders verhielt sich der Temperatureinfluss auf die Umformkraft über der Änderung der Höhe der Probe. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, dass eine erhöhte Temperatur sich positiv auf die Umformung auswirkt. Durch die Schmierung kann zusätzlich die Umformkraft bei fortgeschrittener Höhenänderung gesenkt werden. Dies wirkt sich positiv auf das Verschleißverhalten aus und verlängert somit die Lebensdauer der Werkzeuge. Diese Ereignisse konnten sowohl bei den Stahl-Proben als auch bei den Aluminium-Proben festgestellt werden.

5.2 Rotational Forging Tribometer Versuche

Als Vergleich zu den Ringstauchproben in einem Warmumformsimulator erfolgte ein weiterer Versuchsaufbau auf dem RST (deutsch: Rotations- Schmiede- Tribometer). Anders

als bei den Ringstauchproben ist hier das Werkzeug drehend aufgebaut und es kann die Reibschubspannung τ_R direkt ausgeben.

5.2.1 Versuchsdurchführung

Wie auch beim Ringstauchversuch kamen hier dieselben Werkstoffpaarungen zum Einsatz. Als Werkzeug diente ein Warmarbeitsstahl (X38CrMoV5-1) und als Werkstück ein Vergütungsstahl (42CrMo4). Die Werkstoffpaarung Warmarbeitsstahl und Aluminium-Knetlegierung (AA6080) wurde eingesetzt. In Abbildung 43 ist die Fertigungszeichnung der Proben für den Reibversuch am RST und auf der TORA dargestellt. Der Außendurchmesser der Probe ist $d = 16\text{mm}$ und der Durchmesser der Bohrung ist $d_B = 5\text{mm}$. Die Länge der Proben kann in diesem Versuch vernachlässigt werden da es zu keiner plastischen Verformung kommen soll. Die Befestigung der Thermoelemente erfolgte auf der Oberfläche der Proben. Diese dienten zur Steuerung der Leistung des Induktionsgenerators und gleichzeitig zur dokumentierung des Temperaturverlaufs. Die grün markierten Bereiche stellen die Befestigungspunkte der Thermoelemente dar.

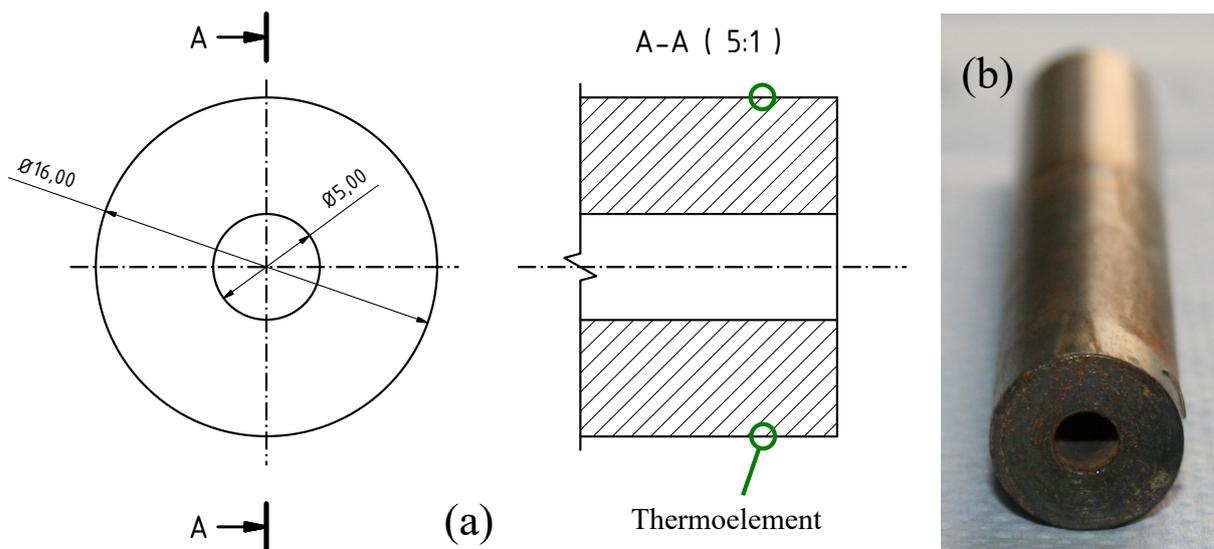


Abbildung 43: (a) Fertigungszeichnung der Probe für die Reibversuche auf dem RST und der TORA. (b) Abbildung einer bereits verwendeten Probe.

Wie in Abbildung 44 sind die Proben für den Reibversuch in ein Spannfutter eingespannt und anschließend erfolgte mit einem Induktionsgenerator die Erwärmung auf die gewünschte Prüftemperatur. Da in situ nicht möglich war die Temperatur zu halten fand bei jeder Probe eine "Überheizung" von 50°C statt die vor dem Start fünf Sekunden lang gehalten wurde um eine gleichmäßige Temperatur im Bauteil zu erhalten. Nach dem aufheizen sind die Stahlproben mit einer Kraft von $13,6\text{ kN}$ und die Aluminiumproben mit $5,6\text{ kN}$ auf das sich drehende Werkzeug gedrückt worden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 44 dargestellt.

Über eine Kraftmessdose und einer Wägezelle an der Spannfutterbefestigung wurden der Anpressdruck und das Moment aufgezeichnet. Über die Eingabe der Reibfläche in das

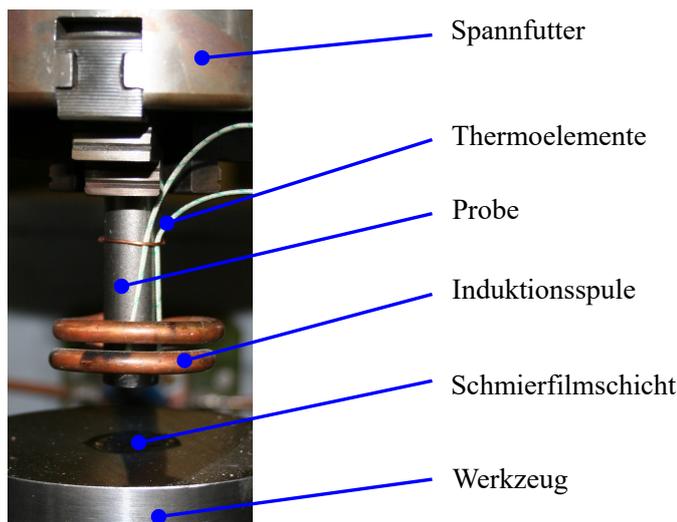


Abbildung 44: Versuchsaufbau des Reibversuchs auf dem RST mit einer gleichmäßigen Schmierfilmschicht auf dem Werkzeug.

Programm der Maschine konnte die daraus berechnete Reibschubspannung τ_R und Kontaktnormalspannung σ_N ausgegeben werden.

Die durchgeführten 8 Versuchsreihen sind in Tabelle 3 aufgelistet. Aufgrund der dünnen Probengeometrie und der Leistungsgrenze des Induktors konnte die Probe nicht auf 1000°C erwärmt werden um noch verwertbare Versuchsergebnisse zu erhalten.

Tabelle 3: Versuchsreihen für den Reibversuch auf dem RST

Versuchsreihe	Probenwerkstoff	Temperatur	Schmiermittel
900-RST-trocken	Stahl: 42CrMo4	900°C	ohne
900-RST-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	900°C	mit
800-RST-trocken	Stahl: 42CrMo4	800°C	ohne
800-RST-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	800°C	mit
700-RST-trocken	Stahl: 42CrMo4	700°C	ohne
700-RST-geschmiert	Stahl: 42CrMo4	700°C	mit
450-RST-trocken	Aluminium: AA6082	450°C	ohne
450-RST-geschmiert	Aluminium: AA6082	450°C	mit

5.2.2 Versuchsauswertung

Der Wert der Reibzahl μ berechnet sich aus dem Verhältnis der Reibspannung τ_R und der Kontaktnormalspannung σ_N . Die Spannungen können direkt aus der Versuchsanlage ausgelesen werden. Der Reibfaktor m lässt sich wiederum aus der Reibschubspannung τ_R und der Schubfließgrenze k berechnen. Die Schubfließgrenze ist aus Zylinderstauchversuchen nach Rastegaev ermittelten Fließspannungen bekannt. Der im Versuch gewählte Wert der

Kontaktnormalspannung σ_N liegt unter dem Wert der Fließspannung k_f um ein Fließen des Materials und eine daraus folgende Vergrößerung der Auflagefläche zu verhindern. In den unterschiedlichen Versuchen ist die Temperatur geändert worden um den Einfluss der Temperatur auf die Reibzahl μ bzw. den Reibfaktor m zu ermitteln. Zusätzlich wurde der Einfluss eines Schmiermittels (Graphit-Suspensions) auf dem Werkzeug analysiert. In Tabelle 4 sind die jeweiligen Fließspannungen bei den unterschiedlichen Temperaturen eingetragen. Die Berechnung des Reibfaktors erfolgte mit der Formel (6) und die Berechnung der Reibzahl mit der Formel (2) aus Kapitel 2.

Tabelle 4: Fließspannung und Schubfließgrenzen der RST-Proben.

Versuchsreihe	Probenwerkstoff	k_f [MPa]	k (Mises)[MPa]
900-RST-trocken	42CrMo4	78,69	45,43
900-RST-geschmiert	42CrMo4	78,69	45,43
800-RST-trocken	42CrMo4	94,05	54,3
800-RST-geschmiert	42CrMo4	94,05	54,3
700-RST-trocken	42CrMo4	171,4	98,96
700-RST-geschmiert	42CrMo4	171,4	98,96
450-RST-trocken	AA6082	39,89	23,03
450-RST-geschmiert	AA6082	39,89	23,03

5.2.3 Versuchsergebnisse und Interpretation

Die Kontaktnormalspannung σ_N und die Reibschubspannung τ_R sind während des Versuchs aufgenommen worden. Der Reibfaktor m und die Reibzahl μ konnten anschließend aus den gemessenen Spannungen berechnet werden. Die Ergebnisse der Berechnungen und der Messungen der Versuche sind in Diagrammen dargestellt.

5.2.3.1 Versuchsergebnisse 900°C-RST

In Abbildung 45 sind die Ergebnisse des RST-Versuchs abgebildet. Bei 900°C und keiner Schmierung ist der Reibfaktor m und die Reibzahl μ im Bereich der Haftung. Nach dem Anstieg des der Reibschubspannung τ_R und somit auch des Reibfaktors m und der Reibzahl μ ist ein Peak bzw. ein Abfall zu erkennen. Dieser Ausschlag ist der Übergang zwischen haften und gleiten auch "stick-slip-effekt" genannt. Das heißt es ist mehr Kraft notwendig die Haftung zu überwinden als das Gleiten aufrecht zu halten. Ein Durchrutschen der Probe im Spannfutter kann daher ausgeschlossen werden.

Zum Vergleich des RST-Versuchs bei 900°C und ohne Schmierung ist in Abbildung 46 der Versuch bei 900°C mit geschmierten Werkzeug dargestellt.

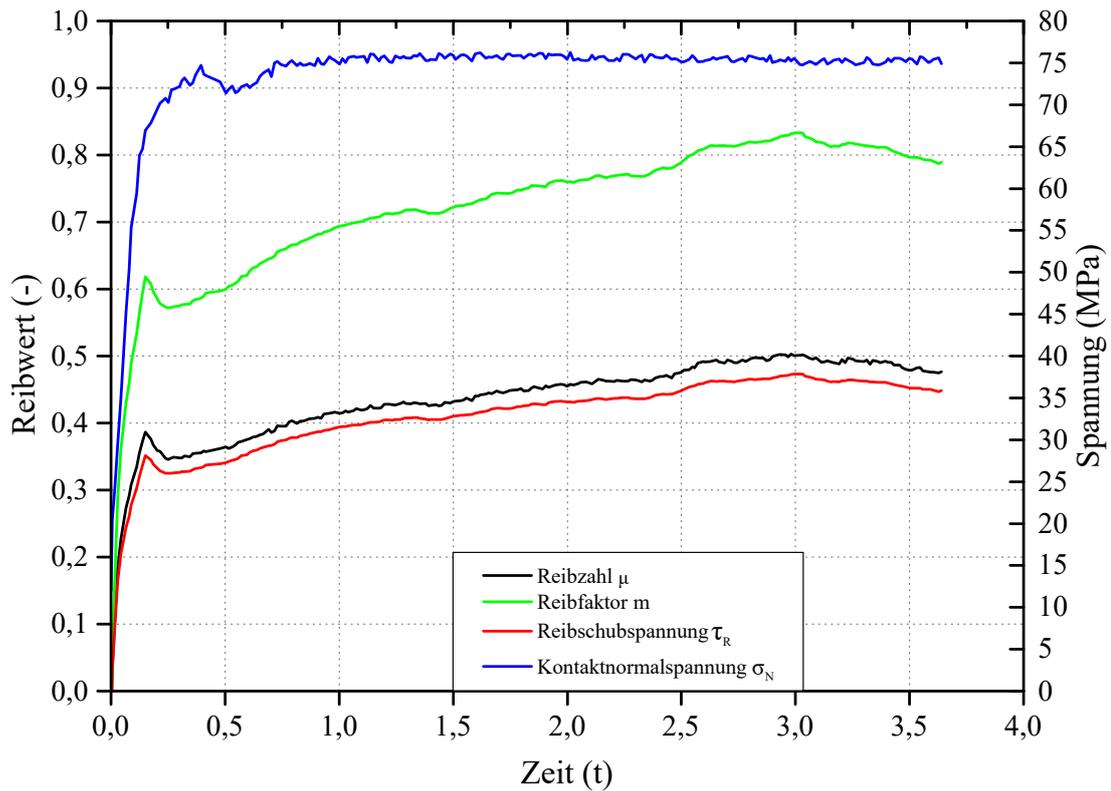


Abbildung 45: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 900°C, ohne Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.

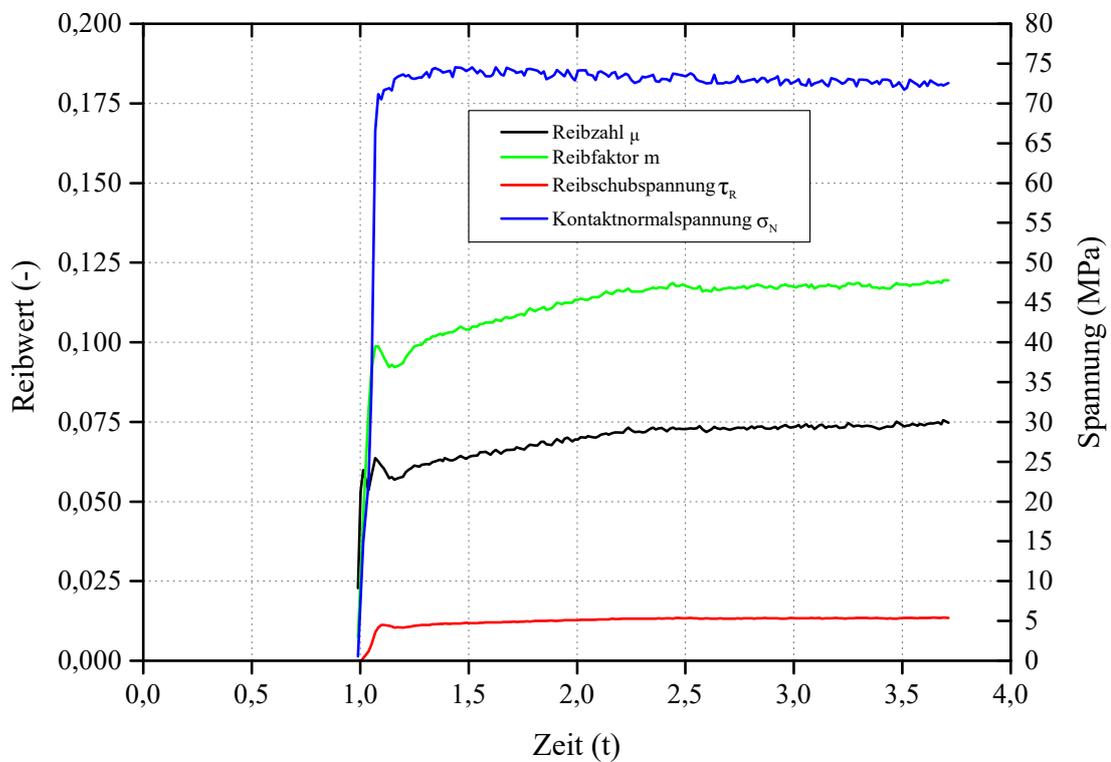


Abbildung 46: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 900°C, mit Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.

Die Reibschubspannung τ_R liegt bei geschmierten Werkzeug deutlich unter den Werten von ungeschmierten Werkzeug. Daraus folgt, dass auch der Reibfaktor m und die Reibzahl

μ bei geschmierten Werkzeug unter den Werten des ungeschmierten Werkzeugs liegt. Auch hier ist ein Übergang von haften auf gleiten erkennbar.

5.2.3.2 Versuchsergebnisse 800°C-RST

Die Ergebnisse für den RST-Versuch bei 800°C ohne geschmierten Werkzeug sind in Abbildung 47 dargestellt. Durch die gleichbleibende Kontaktnormalspannung σ_N und der geringeren Temperatur ist die Reibschubspannung τ_R , im Vergleich zum Versuch bei 900°C Proben temperatur, gesunken. Der Wert der Reibzahl μ liegt zu Beginn des Versuchs bei 0,4 und sinkt auf 0,32. Es wird vermutet, dass dieser Abfall aufgrund der fallenden Temperatur der Probe während des Versuchs zustande kommt. Anhand des Werts der Fließspannung von $k_f = 94,05\text{MPa}$ und der geringen Reibschubspannung ist auch der Reibfaktor m auf 0,5 bzw. 0,4 gesunken. Bei diesem Versuch ist kein Übergang von haften auf gleiten im anstieg zu erkennen, da hier kein Peak am Beginn der Kurve ist.

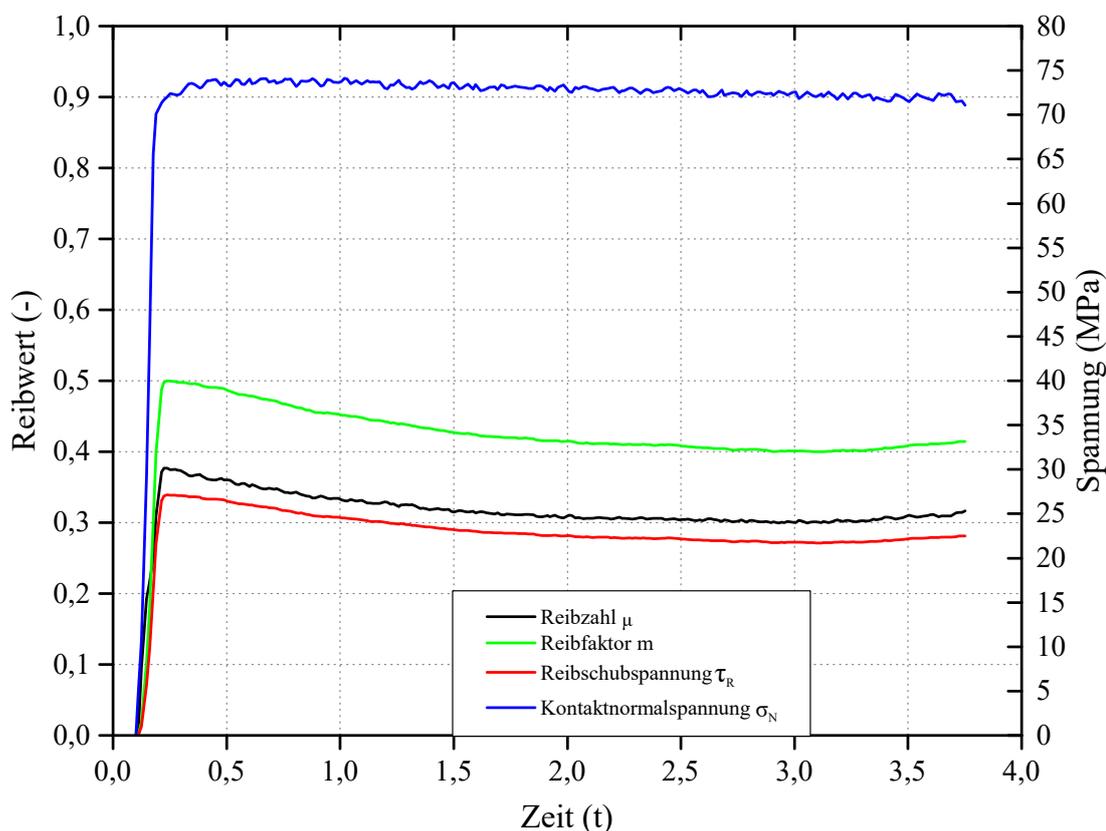


Abbildung 47: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 800°C, ohne Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.

Bei geschmierten Werkzeug und 800°C Proben temperatur, Abbildung 48, sind der Reibfaktor m und die Reibzahl μ deutlich geringer als ohne Schmierung. Die Reibschubspannung τ_R hat sich im Vergleich zur 900°C Probe kaum geändert und bleibt bei ca. 5MPa. Daraus folgt auch die gleichbleibende Reibzahl von ca. $\mu = 0,075$ und trotz höherer Fließspannung k_f ist der Reibfaktor bei rund $m = 0,1$ ähnlich dem des 900°C RST-Versuchs.

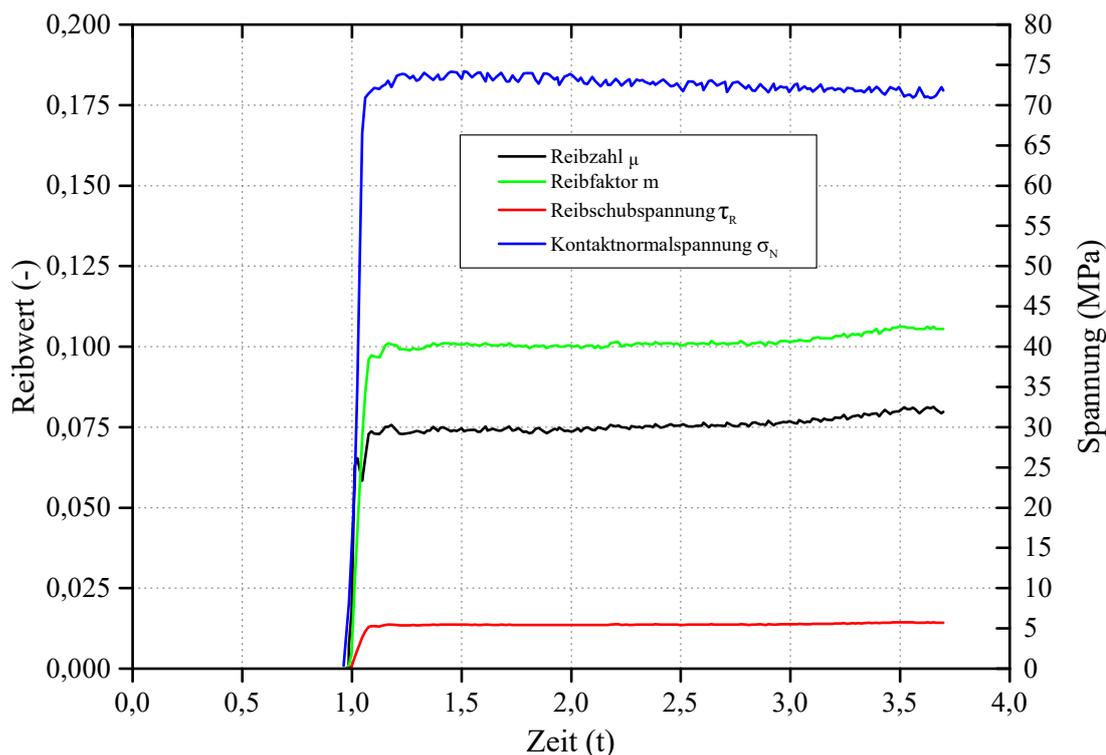


Abbildung 48: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 800°C, mit Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.

5.2.3.3 Versuchsergebnisse 700°C-RST

Abbildung 49 zeigt die Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 700-RST-trocken. Bei 700°C ist die Fließspannung von $k_f = 171,4$ MPa die deutlich höchste Fließspannung der durchgeführten Versuche. Die Reibzahl μ liegt etwas unter dem Haftungswert von 0,5. Durch die relativ hohe Fließspannung liegt der Reibfaktor m unter dem Wert der Reibzahl μ . Eine Erhöhung der Kontaktnormalspannung σ_N sollte den Reibfaktor m aufgrund der damit verbundenen Erhöhung der Reibschubspannung τ_R ansteigen lassen, jedoch wird die Reibzahl μ gleichbleibend bleiben weil sie nicht über 0,5 steigen kann.

Auch der RST Reibversuch bei 700°C und geschmierten Werkzeug zeigt in Abbildung 50 dass der Reibfaktor m , aufgrund der vergleichsweise zu den bisherigen Versuchen, hohen Fließspannung unter der Reibzahl μ liegt. Die Reibzahl μ und die Reibschubspannung τ_R bleiben jedoch unverändert bei Temperaturänderungen und geschmierten Werkzeug. Eine Änderung der Reibschubspannung τ_R und des Reibfaktors m , wird sich erst bei Kontaktnormalspannungen σ_N über der Fließspannung k_f ergeben.

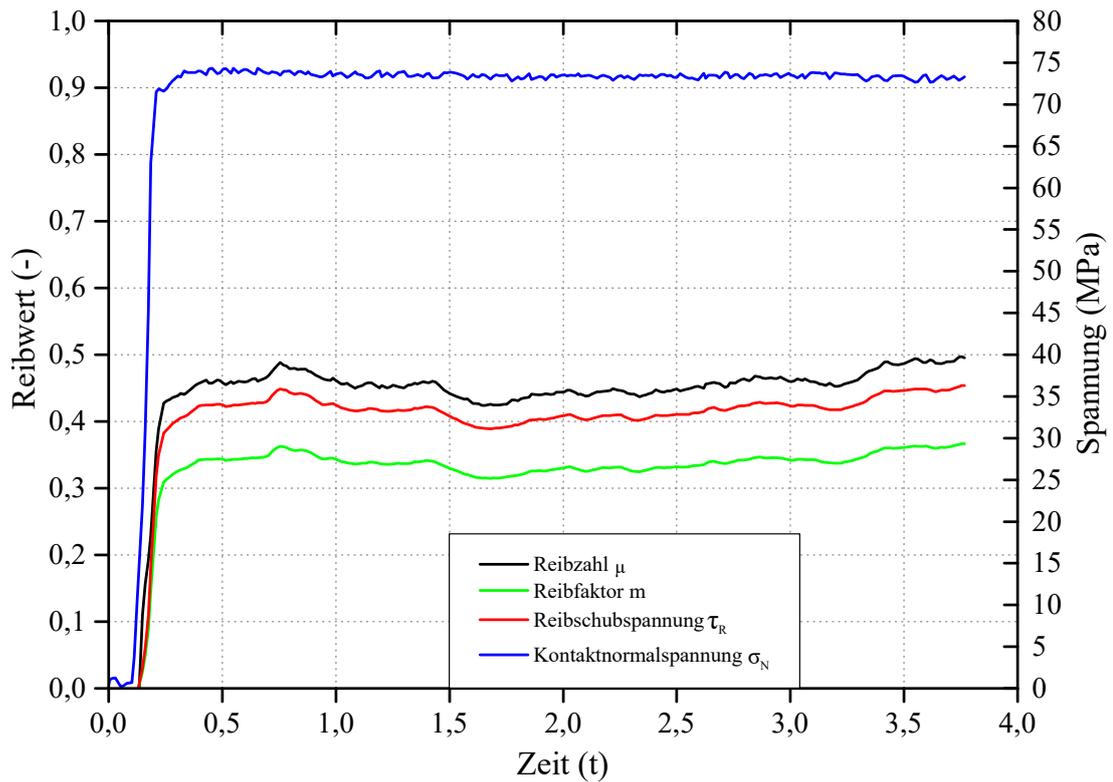


Abbildung 49: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 700°C, ohne Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.

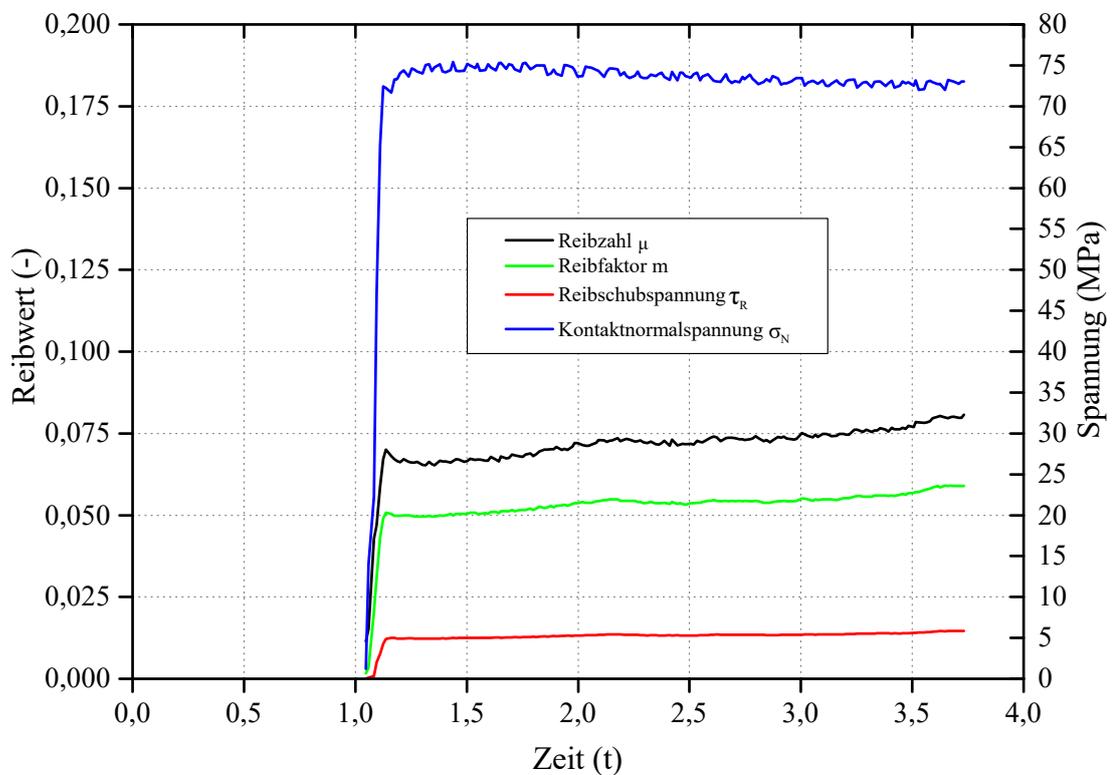


Abbildung 50: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 700°C, mit Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.

5.2.3.4 Versuchsergebnisse 450°C-RST

Die Versuche bei 450°C sind mit der Werkstoffpaarung X38CrMoV5-1/AA6082 (Werkzeug/Probe) durchgeführt worden. In Abbildung 51 sind die Ergebnisse bei 450°C und keiner Werkzeugschmierung dargestellt. Die Kontaktnormalspannung bei Versuchen mit Aluminium-Proben liegt im Mittel bei $\sigma_N = 31\text{MPa}$. Ohne Schmierung war es nicht möglich einen aussagekräftigen Versuch durchzuführen, da die Probe an dem Werkzeug anhaftete und sie sich im Spannfutter durchdrehte. Dadurch sind der Reibfaktor m und die Reibzahl μ über die maximalen möglichen Werte von $m = 1$ bzw $\mu = 0,5$ angestiegen. Die Ergebnisse können infolgedessen nicht mit den anderen Ergebnissen verglichen werden und wird nicht mehr weiter behandelt.

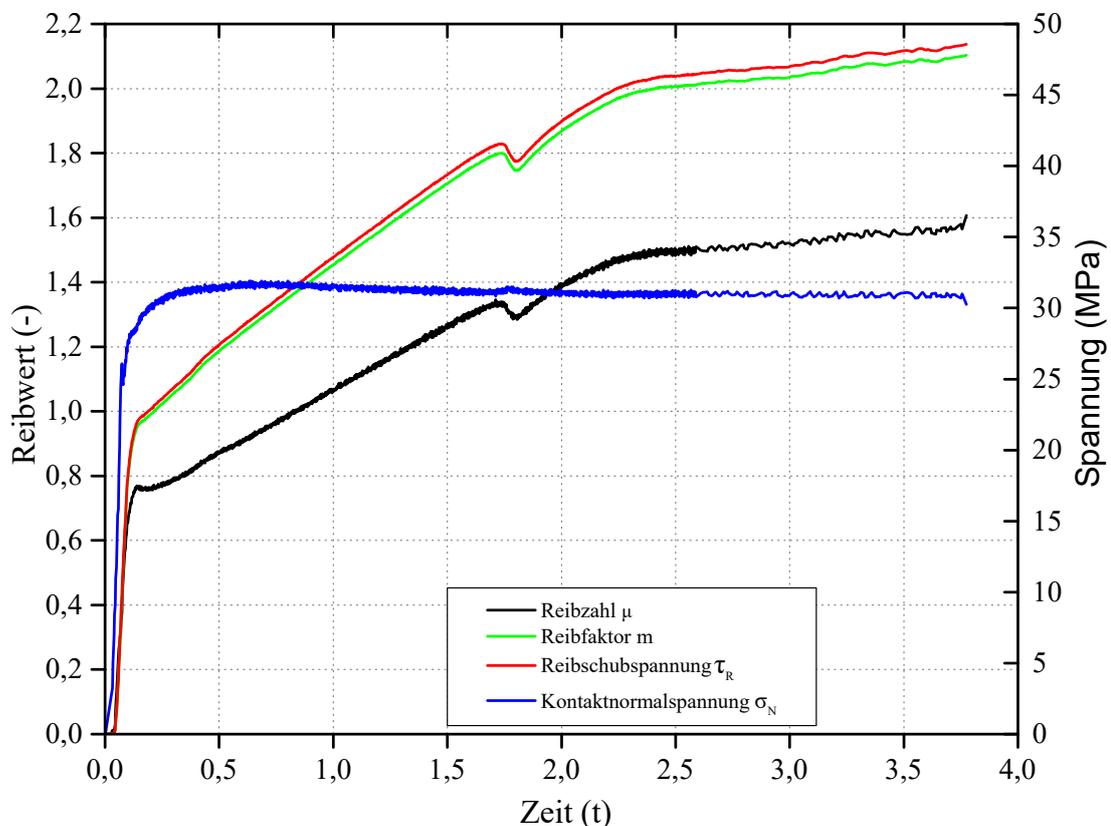


Abbildung 51: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 450°C, ohne Schmierung und einer AA6082 Probe.

Hingegen zu den Versuch mit ungeschmierten Werkzeug, (Abbildung 52) gab es kein durchrutschen der Probe im Spannfutter bei den Versuchen mit geschmierten Werkzeug. Die Folge eines Materialabtrags ist ein plötzlicher Abfall des Reibfaktors m und der Reibzahl μ . Der Versuch ergab einen Reibfaktor von $m = 0,04$ und einer Reibzahl von $\mu = 0,025$.

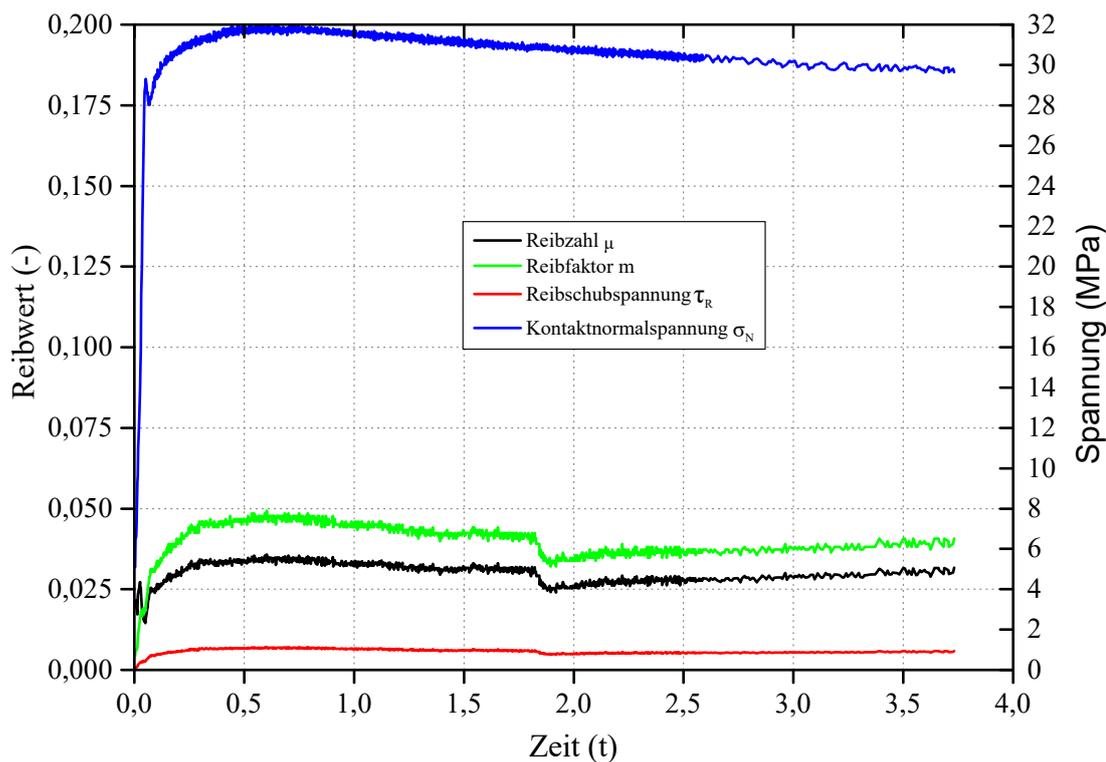


Abbildung 52: Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 450°C, mit Schmierung und einer AA6082 Probe.

5.2.4 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die Versuche auf dem RST wurden mit konstanter Kontaktnormalspannung σ_N durchgeführt um den Einfluss der Temperatur auf die Reibzahl μ bzw. den Reibfaktor m darzustellen. Es hat sich gezeigt, dass die Temperatur bei diesem Versuch so gut wie keinen Einfluss auf die Reibzahl μ hat. Dennoch senkte sich der Reibfaktor mit der Temperatur anhand der Steigenden Fließspannung durch die Temperatursenkung. Das Ergebnis der geschmierten Aluminium-Probe korrelierte mit den Ergebnissen der geschmierten Stahl-Proben. Die ungeschmierten Aluminium-Probe haftete jedoch sehr stark an dem Werkzeug, sodass die Probe im Spannfutter durchdrehte.

5.3 TORA-Versuche

Die Torsions-Reibschweiß-Anlage (TORA) wurde für Fließkurvenermittlung mit Verdrehversuche und für Reibschweißversuche konzipiert. Ziel war die Aufnahme der Reibkräfte und Ermittlung des Reibfaktors mit einer auf der Maschine befindlichen Kraftmessdose und einer Wägezelle. Über die Kraftmessdose erfolgt die Messung der Normalkraft und über die Wägezelle wird das Moment (in diesem fälle das Reibmoment τ_R) ermittelt.

5.3.1 Versuchsdurchführung

Die Temperaturmessung erfolgte mittels eines Thermoelements an der Oberfläche der Probe. Wie schon bei den bisherigen Reibversuchen war auch hier die Werkstoffpaarung X38CrMoV5-1 (Werkzeug) und 42CrMo4 (Probe). Die Probengeometrie wurde identisch den Proben der Reibversuche auf der Rotational-Forging-Tribometer (RST) (Abbildung 43) gewählt mit einem Außendurchmesser von $d = 16\text{mm}$ und einer Bohrung mit einem Durchmesser von $d_B = 5\text{mm}$.

Wie in Abbildung 53 zu erkennen ist wird das Werkzeug und die Probe jeweils in ein Spannfutter eingespannt, wobei das Spannfutter auf der Werkzeugseite sich mit einer Umdrehungszahl von $n = 500 \text{ 1/min}$ dreht. Die Probe wurde mit einer Induktionsspule auf die Versuchstemperatur von 900°C aufgeheizt und anschließend auf das drehende Werkzeug mit einer Kraft von $F_N = 1\text{kN}$ gedrückt.

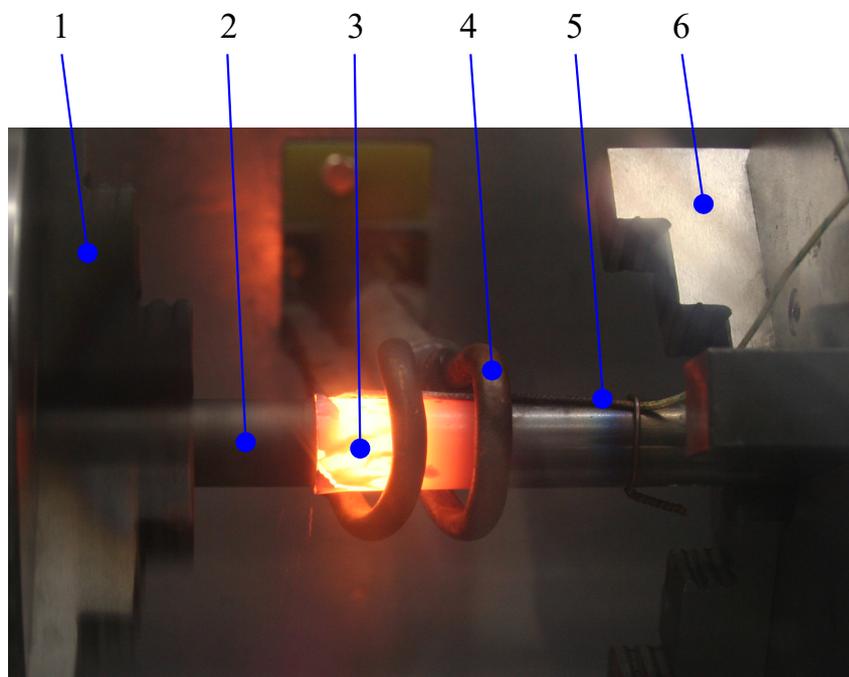


Abbildung 53: Versuchsaufbau des Reibversuchs auf der TORA. (1) drehende Werkzeugspannfutter; (2) Werkzeug; (3) Probe; (4) Induktionsspule; (5) Thermoelement; (6) horizontal bewegliches Probenspannfutter.

5.3.2 Versuchsauswertung und Interpretation

In Abbildung 54 und Abbildung 55 sind die Proben dargestellt mit denen versucht wurde den Versuch bei 900°C durchzuführen. Es ist an den Stirnseiten der Proben deutlich eine Verformung der Auflagefläche zu erkennen.

Aufgrund der Temperatur und der hohen Normalkraft auf die Probe begann sie bei Kontakt mit dem Werkzeug zu fließen. Die hohe Umdrehungszahl des Werkzeuges erwärmte die Probe weiter wodurch es bei einigen Versuchen zum Verschweißen der Probe und des Werkzeuges kam. Infolge dieser weiteren Erwärmung und dem fließen des Materials sind

die Kontakte mit dem Thermoelement gebrochen und es konnte keine Temperatur aufgezeichnet werden. Die Umdrehungszahl des Werkzeugs konnte nicht verringert werden ohne den Motor zu sehr zu belasten oder sogar zu überlasten. Ebenso war es nicht möglich die Normalkraft zu senken, da der Vorschub der Maschine und dessen Servomotor kraftabhängig gesteuert wird und es bei geringer eingestellter Normalkraft kein Vorschub mehr gab.



Abbildung 54: Vorderansicht der Proben nach dem Reibversuch auf der TORA. An der rechten äußeren Probe ist ein Bruch zu erkennen der durch das Trennen des verschweißten Werkzeugs entstanden ist.



Abbildung 55: Draufsicht der Proben nach dem Reibversuch auf der TORA.

5.3.3 Bewertung der Versuchsergebnisse

Aufgrund des übermäßigen Materialflusses im Probenwerkstoff konnten keine verwertbaren Daten gesammelt werden. Auch das unkontrollierte Erwärmen durch die hohe Drehzahl machte es unmöglich den Versuch zu rekonstruieren. Die Testergebnisse sind dadurch nicht gültig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, unterschiedlich Methoden zur Ermittlung des Reibfaktors bei erhöhter Temperatur zu finden und mit den am Lehrstuhl für Umformtechnik (LUT) zur Verfügung stehenden Maschinen durchzuführen und bewerten. Es konnten durch eine umfassende Literaturrecherche gängige Methoden zur Reibwertermittlung eruiert und behandelt werden. Aus den ausgearbeiteten Methoden wurden zwei zur näheren Betrachtung herangezogen und diese mit praktischen Versuchen untermauert. Dabei sind für den Ringstauchversuch eigene Simulationen erstellt worden die mit praktischen Versuchen angepasst wurden. Die Entwicklung dieser Simulation und die ersten praktischen Versuche sind in der Arbeit von Buchmayr [BE18] dargelegt. Aus den Simulationen konnten für den Werkstoff 42CrMo4 bei den Temperaturen von 1000°C, 900°C, 800°C und 700°C eigene Ringstauch-Nomogramme ausgewertet werden. Für den Werkstoff AA6082 wurde bei einer Temperatur von 450°C ein Ringstauch-Nomogramm erstellt. Die Ergebnisse von den praktischen Untersuchungen konnten in diese Ringstauch-Nomogramme aufgenommen und anschließend gegenübergestellt werden. Die praktischen Versuche wurden mit und ohne geschmierten Werkzeug durchgeführt. Dadurch sind die Einflüsse der Temperatur und der Reibung auf die Umformkraft zum Vorschein gekommen. Als zweite Beurteilung des Reibfaktors ist ein dem Pin-on-Disk Test ähnlicher Reibversuch an einem Rotational-Forging-Tribometer (RST) herangezogen worden. Dabei konnten die Einflüsse der Temperatur bei konstanter Kontaktnormalspannung σ_N auf die Reibschubspannung τ_R und auf die Reibung (Reibzahl μ und Reibfaktor m) aufgezeigt werden. Es zeigte sich, dass bei konstanter Kontaktnormalspannung σ_N und sinkender Temperatur die Reibschubspannung τ_R und die Reibzahl μ annähernd kontinuierlich verliefen jedoch der Reibfaktor m abnahm. Der Abfall des Reibfaktors m ist resultieren aus der steigenden Fließspannung bei fallender Temperatur des Werkstoffs. Zur Untermauerung der Ergebnisse des RST sind ähnliche Versuche auf einer Torsions-Reibschweiß-Anlage (TORA) durchgeführt worden. Durch die hohe Mindestdrehzahl dieser Maschine konnte jedoch keine kontrollierbare Erwärmung aufgebracht werden. Dadurch war es nicht möglich verwertbare Daten zu sammeln und der Versuch war nicht rekonstruierbar und somit ungültig.

Der Ringstauchversuch zeigt sehr gute Ergebnisse und ist einfach Durchzuführen. Jedoch wird für jede Temperatur und jedes Material ein separates Ringstauch-Nomogramm benötigt um den Reibfaktor m zu bestimmen. Die Reibversuche des RST weichen nur gering von den Werten des Ringstauchversuchs ab. Um diese Abweichungen weiter auszumergen sind in Zukunft weitere Versuche bei den unterschiedlichen Kontaktnormalspannungen σ_N nötig. Um diese Untersuchungen in absehbarer Zeit und kostengünstig durchzuführen könnten weitere Test an der TORA durchgeführt werden. Jedoch muss ein langsameres Getriebe und eine schwächere Kraftgebundene horizontale Wegsteuerung eingebaute werden. Es ist abzuschätzen ob solch ein Umbau dieser Maschine lohnenswert ist.

Abbildungsverzeichnis

1	Tribologisches Gesamtsystem [Web07].	2
2	Stribeck-Kurve für verschiedene Schmierzustände. Hierbei stehen η für die dynamische Viskosität, p für den Druck oder die Flächenpressung, v für die Gleitgeschwindigkeit [Lan02].	3
3	Detailprozesse des abrasiven Verschleißes. (a) Mikropflügen, (b) Mikrospannen, Mikroermüden, (d) Mikrobrechen [Czi10].	5
4	Reibmodell nach Coulomb-Amonton [BHM ⁺ 12].	6
5	Einfluss der Kontaktnormalspannung σ_N auf die Reibschubspannung τ_R (links) und die Reibzahl μ (rechts) [Lan02].	7
6	Reibfaktormodell [BHM ⁺ 12].	8
7	Kontakt zwischen Werkzeug und weicheren Werkstück mit plastischer Deformation von Unebenheiten: (a) Die reale Kontaktfläche A_r ist zu klein um die Kontaktnormalspannung σ_N aufzunehmen. Dadurch kommt es zu einer plastischen Verformung, dass die reale Kontaktfläche A_r vergrößert (b) [Buc08].	9
8	Asymptotische Annäherung der relativen Kontaktfläche α an die scheinbare Kontaktfläche A_α [Web07].	10
9	Kombinierte Reibmodell vereinfacht dargestellt [BBL ⁺ 14].	10
10	Kombiniertes Reibmodell nach Finnie und Shaw [Sha63].	11
11	Annäherung von Betten an Finnie und Shaw [Bet75].	12
12	Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibschubspannung [BBL ⁺ 14] . .	14
13	Kristallstruktur von Graphit [HEW08]	16
14	Aufbau eines kombinierten Messstiftes [BL72]	17
15	Schematische Darstellung eines Ringstauchversuchs [DB07].	18
16	Darstellung eines rechnerisch ermitteltes Diagramms, aus dem sich durch die Änderung der Innendurchmesser und die Änderung der Höhe der Ringstauchprobe ein Reibwert bzw. ein Reibfaktor ermitteln lässt [JMC ⁺ 09]. . .	19
17	Schematische Darstellung des WHUST [DDD14].	20
18	Schematische Darstellung einse Pin-on-Disk-Tests [Buc08].	21
19	Versuchsaufbau eines Pin-on-Disk-Tests auf einem Rotational-Forging-Tribometer (RST) am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben (Abschnitt 3.2.4).	21
20	Aufbau des RST mit einer schematischen Darstellung eines Ring-on-Disk Versuchs [Mar06].	22
21	Auswahl der Prozessparameter im User-Interface von simufact.forming. . .	24
22	Darstellung des Simulationsmodells mit oberen und unteren Werkzeug sowie der geviertelten und vernetzten Ring-Probe.	25
23	Lage des Post-Partikels am Innendurchmesser der Ringstauchprobe.	26

24	Partikelverfolgungsdiagramm: X-Verschiebung (Änderung des Innendurchmessers) über Hub des Werkzeugs.	27
25	Ringstauch-Nomogramm der Simulation bei 1000°C und sieben unterschiedlichen Reibfaktoren von $m = 0$ bis $m = 1$	27
26	Gegenüberstellung der Reibmodelle mit einem praktischen Versuch bei 1000°C und ohne Schmierung.	28
27	Fertigungszeichnung der Ringstauchprobe.	30
28	Probenaufnehmer des Warmumformsimulators mit eingespannter Ringstauchprobe und angeschlossenem Thermoelement.	31
29	Induktor des Warmumformsimulators und im Aufnehmer eine eingespannte Ringstauchprobe.	31
30	Oberes und unteres Werkzeug des Warmumformsimulators.	32
31	Ringstauchprobe mit stark verformten Innendurchmesser durch den Effekt der Gefügeinhomogenität.	33
32	Messpunkte der Ringstauchprobe: d_{MP1} erster Messpunkt des Durchmessers, d_{MP2} zweiter Messpunkt des Durchmessers, d_{MP3} dritter Messpunkt des Durchmessers, h_{MP1} erster Messpunkt der Höhe, h_{MP2} zweiter Messpunkt der Höhe und h_{MP3} dritter Messpunkt der Höhe.	33
33	Ringstauch-Nomogramm bei 1000°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug. . . .	34
34	Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 1000°C und dem Werkstoff 42CrMo4.	35
35	Ringstauch-Nomogramm bei 900°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug. . . .	35
36	Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 900°C und dem Werkstoff 42CrMo4.	36
37	Ringstauch-Nomogramm bei 800°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug. . . .	37
38	Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 800°C und dem Werkstoff 42CrMo4.	38
39	Ringstauch-Nomogramm bei 700°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug. . . .	39
40	Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 700°C.	39
41	Ringstauch-Nomogramm bei 450°C und dem Werkstoff 42CrMo4. Gegenüberstellung Ringstauchproben ohne und mit geschmierten Werkzeug. . . .	40
42	Vergleich des Kraftverlaufs des Stempels von geschmierten und ungeschmierten Werkzeug bei 450°C und dem Werkstoff AA8082.	41
43	(a) Fertigungszeichnung der Probe für die Reibversuche auf dem RST und der TORA.(b) Abbildung einer bereits verwendeten Probe.	42

44	Versuchsaufbau des Reibversuchs auf dem RST mit einer gleichmäßigen Schmierfilmschicht auf dem Werkzeug.	43
45	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 900°C, ohne Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.	45
46	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 900°C, mit Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.	45
47	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 800°C, ohne Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.	46
48	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 800°C, mit Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.	47
49	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 700°C, ohne Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.	48
50	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 700°C, mit Schmierung und einer 42CrMo4 Probe.	48
51	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 450°C, ohne Schmierung und einer AA6082 Probe.	49
52	Reibwert- und Spannungsverläufe des RST-Reibversuchs bei 450°C, mit Schmierung und einer AA6082 Probe.	50
53	Versuchsaufbau des Reibversuchs auf der TORA.(1) drehende Werkzeugspannfutter; (2) Werkzeug; (3) Probe; (4) Induktionsspule; (5) Thermoelement; (6) horizontal bewegliches Probenspannfutter.	51
54	Vorderansicht der Proben nach dem Reibversuch auf der TORA. An der rechten äußeren Probe ist ein Bruch zu erkennen der durch das Trennen des verschweißten Werkzeugs entstanden ist.	52
55	Draufsicht der Proben nach dem Reibversuch auf der TORA.	52

Literaturverzeichnis

- [Ala08] M. Alasti. *Modellierung von Reibung und Wärmeübergang in der FEM-Simulation von Warmmassivumformprozessen*. Dissertation, Uni Hannover, 2008.
- [Bar87] W.-J. Bartz. *Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik: Typen, Eigenschaften, Anwendung und Grenzen der Schmierstoffe am Beispiel ausgewählter Umformprozesse ; mit 63 Tabellen*, volume 220 of *Kontakt & Studium*. Expert-Verl., Sindelfingen, 1987.
- [BB04] W.-J. Bartz and L. Barnert. *Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung*, volume 13 of *Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik*. Expert-Verl., Renningen, 2004.
- [BBL⁺14] B.-A. Behrens, A. Bouguecha, I. Lüken, J. Mielke, and M. Biströn. Tribology in hot forging. In *Comprehensive Materials Processing*, pages 211–234. Elsevier, 2014.
- [BBM⁺10] B.-A. Behrens, A. Bouguecha, J. Mielke, G. Hirt, M. Bambach, M.-A. Baouini, and A. Demant. Verbesserte numerische Prozesssimulation mittels eines innovativen Reibgesetzes für die Warmmassivumformung. *Schmiede-Journal*, pages 20–24, März 2010.
- [BE18] B. Buchmayr and Elser J. High temperature friction and wear testing for closed-die steel and aluminium forgings. *Conference Proceeding 8th International Conference on Tribology in Manufacturing Processes & Joining by Plastic Deformation*, Denmark, 2018.
- [Bet75] J. Betten. Bemerkungen zum Versuch von Hohenemser. *ZAMM - Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 55(3):149–157, 1975.
- [BHM⁺12] A. Bouguecha, T. Hadifi, J. Mielke, and B.-A. Behrens. Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit bei der numerischen Abbildung von Warmmassivumformprozessen durch verbesserte Reibmodellierung. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 43(10):839–850, 2012.
- [BL72] H. Bühler and J. Löwen. Verfahren zum messen des Reibungswiderstandes für die instationären Umformverfahren. *Stahl und Eisen*, 92(14):698–704, 1972.
- [BMB06] B. Buchner, K. Markut, and B. Buchmayr. Bestimmung der Reibzahl unter Schmiedebedingungen mithilfe des Rotationsreibversuches. In *XXV. Verformungskundliches Kolloquium*, pages 100–117. 2006.

- [Buc08] B. Buchner. *Investigation of friction in closed-die warm forging of aluminium alloys*. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2008.
- [CHS03] H. Czichos, K.-H. Habig, and E. Santner. *Tribologie-Handbuch: Reibung und Verschleiß*. Vieweg, Wiesbaden, 2., überarb. und erw. Aufl., 2003.
- [CK78] C. C. Chen and S. Kobayashi. Rigid-plastic finite element analysis for ring compression, *Appl. Num. Methods, Proc. ASME*,. *ASME*, (28):163, 1978.
- [Czi10] H. Czichos. *Tribologie-Handbuch*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2010.
- [DB07] E. Doege and B.-A. Behrens. *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [DDD14] A. Dubois, M. Dubar, and L. Dubar. Warm and hot upsetting sliding test: Tribology of metal processes at high temperature. *Procedia Engineering*, 81:1964–1969, 2014.
- [FS56] I. Finnie and C. Shaw. The friction process in metal cutting. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, (78):1649–1657, 1956.
- [HEW08] E. Hornbogen, G. Eggeler, and E. Werner. *Werkstoffe: Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen*. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 9th edition, 2008.
- [Hor13] D. Horwatitsch. *Entwicklung eines Reibmodells für hohe Temperaturen und hohe Umformgrade*, volume 3 of *Berichte zur Metallformgebung*. Kassel University Press, Kassel, 2013.
- [JMC⁺09] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, and B. Y. Jun. Effects of friction laws on metal forming processes. *Tribology International*, 42(2):311–319, 2009.
- [KK06] F. Klocke and W. König. *Fertigungsverfahren 4: Umformen*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 5., neu bearbeitete auf-lage edition, 2006.
- [Lan02] K. Lange, editor. *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft*. Springer, Berlin, 2. Aufl., Nachdr. in veränd. Ausstattung, limitierte Studien-ausg edition, 2002.
- [Mar06] K. Markut. *Design and commissioning of a rotational forging tribometer*. Master thesis, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2006.
- [Mil14] I. Milosevic. *Charakterisierung unterschiedlicher Schmiermittel zum Schmieden von Aluminiumlegierungen mittels Ringstauchversuch*. Diplomarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2014.

- [MN02] U.-J. Möller and J. Nassar. *Schmierstoffe im Betrieb*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage edition, 2002.
- [MSC] MSC Software. Marc 2015: Volume a: theory and user information.
- [Neu03] T. Neumaier. *Zur Optimierung der Verfahrensauswahl von Kalt-, Halbwarm- und Warmmassivumformverfahren*. Dissertation, Uni Hannover, 2003.
- [Pig01] O. Pigors. *Werkstoffe in der Tribotechnik: Reibung, Schmierung und Verschleissbeständigkeit von Werkstoffen und Bauteilen ; mit 189 Tabellen*. Wiley-VCH and Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Weinheim and Leipzig, 1. Aufl. [nachdr. der ausg. 1993] edition, 2001.
- [Pop09] V.-L. Popov. *Kontaktmechanik und Reibung: Ein Lehr- und Anwendungsbuch von der Nanotribologie bis zur numerischen Simulation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Sha63] M. C. Shaw. The role of friction in deformation processing. *Wear*, 6(2):140–158, 1963.
- [Web07] A. Weber. *Charakterisierung des Einflusses des Beanspruchungskollektivs auf die Reibung beim Schmieden der Aluminiumlegierung AA6082*. Bakkalaureatsarbeit, Montanuniversität Leoben, 2007.