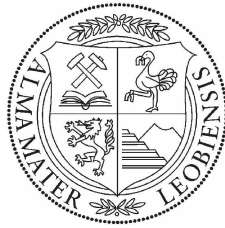


Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,

Montanuniversität Leoben



DIPLOMARBEIT

CHARAKTERISIERUNG UNTERSCHIEDLICHER SCHMIERSTOFFE
HINSICHTLICH DES REIBZAHNVERLAUFS BEIM SCHMIEDEN
EINER ALUMINIUMLEGIERUNG

Gerhard Maderthoner

Studienrichtung Metallurgie (940)

November 2006

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

Leoben, 24. November 2006

Gerhard Maderthoner

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben in Zusammenarbeit mit der Firma Schmiedetechnik Pankl (Kapfenberg) durch Zuschüsse des Zukunftsfonds des Landes Steiermark.

Zu Beginn möchte ich dem Vorstand des Lehrstuhls für Umformtechnik, Herrn o.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr, für seine Vorschläge die zu erweiterten Betrachtungsmöglichkeiten der Ergebnisse führten danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Bernhard Buchner für die direkte Betreuung und Ermöglichung der Diplomarbeit sowie Durchsicht und Korrektur und mir stets in beratender sowie fachlicher Weise beistand.

Auch einen besonderen Dank an die Firma Pankl i.b. Herrn Dipl.-Ing. Georg Haberz für die problemlose Zusammenarbeit und der Verfügungstellung des Probenmaterials.

Mein Dank gilt dem Institut für Maschinenbau, zur uneingeschränkten Nutzung der Geräte für die Vermessung von Proben und Werkzeugen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei meinen Eltern für die uneingeschränkte Unterstützung während des gesamten Studiums bedanken.

Weiters möchte ich Respekt und Anerkennung an unseren Ahnen bekunden, die einst einen edlen Menschengeschlecht entsprangen und durch unermüdliche Schaffenskraft, Idealismus sowie den Glauben an Größeres eine Erkenntnisfähigkeit erlangten, deren Umsetzung maßgeblich das Hier und Jetzt beeinflusste.

Kurzfassung

Bei der Fertigung von komplexen Aluminiumbauteilen durch Gesenkschmieden stellt das Schmiermedium neben dem verwendeten Werkstückmaterial einen wesentlichen Faktor für einen erfolgreichen Prozess dar. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden in Zusammenarbeit mit einem Schmiedebetrieb unterschiedliche Schmierstoffe hinsichtlich ihres Einflusses auf die Reibzahl und der Stabilität ihrer Schmierfilme charakterisiert. Dabei wurden Versuche an einen Rotationstriebometer durchgeführt, mit dem es möglich ist, reale Vorgänge, welche in der Wirkfuge beim Gesenkschmieden auftreten, durch eine einfache Versuchsanordnung reproduzierbar zu modellieren.

Als Gesenkwerkstoff wurde der Warmarbeitsstahl 1.2344, für das Schmiedeteil wurde die Al-Knetlegierung AA 2618 verwendet. Die Gesenktemperaturen betragen 250 °C und 450 °C, die Temperatur des Werkstückes wurde mit 480 °C festgelegt. Die Untersuchungen wurden mit Flächenpressungen bis 325 MPa, Relativgeschwindigkeiten bis 200 mm/s und Reibwegen bis 80 mm durchgeführt, um die realen Verhältnisse in der Wirkfuge möglichst authentisch abzubilden.

Die Bewertung der Schmierstoffe erfolgte hinsichtlich Reibzahlverlauf, Einfluss auf die Oberflächengestalt von Gesenk und Werkstück sowie Handhabung. Die Untersuchungen münden in der Empfehlung von drei Schmierstoffen zur Erprobung in Feldversuchen.

Abstract

The quality achieved in the production of complex shaped aluminium parts by the means of drop forging is mainly influenced by the workpiece material and the doping-media. Therefore a number of lubricants where tested for their influence on the coefficient of friction and the stability of the lubricating film. This was done in cooperation with a forging company. These tests where conducted on a custom built testing machine that simulates the parameters of real life production. The tool was made of hot working steel 1.2344, the specimens were made of AA2610. The temperature of the tool was varied from 250 °C to 450 °C, the temperature of the workpiece was 480 °C. Surface pressure was up to 325 MPa, speed up to 200 mm/s and the friction length was 80 mm. Thus it was possible to model the real life process quite well. The lubricants where assessed considering the coefficient of friction, the influence on the surface of workpiece and tool as well as handling. The tests resulted in the recommendation of three lubricants for further investigation in field tests.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.3 Stand der Technik	3
1.3.1 Charakterisierung von Schmierstoffen	3
1.3.2 Indirekte Methoden der Schmiermittelcharakterisierung	3
2 Grundlagen	6
2.1 Tribologie in der Massivumformung	6
2.1.1 Grundlagen und Definitionen	6
2.1.2 Mechanismen zwischen metallischen Kontaktflächen	7
2.1.3 Grundlegende Reib- und Verschleißmechanismen	9
2.1.4 Reibzustände	11
2.1.5 Reibgesetze	12
2.1.6 Analyse der Reibvorgänge bei der Warm- und Halbwarmumformung	15
2.1.7 Einflussgrößen auf die Reibung	16
2.2 Das Gesenkschmieden	19
2.2.1 Der Prozess	19

2.2.2	Beanspruchungen der Gesenke	21
2.2.3	Warmarbeitsstähle für Schmiedegesenke	23
2.2.4	Aluminium Schmiedelegerungen	26
2.3	Schmierstoffe	31
2.3.1	Anforderungen und Wirkung	31
2.3.2	Allgemeines und Einteilung der Schmierstoffe	33
2.3.3	Systeme der Schmierstoffaufbringung	36
2.3.4	Aspekte der Schmierstoffverwendung	37
3	Experimentelles	39
3.1	Prüfanlage und Versuchsdurchführung	39
3.1.1	Anforderungen an die Versuchsanlage und Prüfmethodik	39
3.1.2	Aufbau der Versuchsanlage	40
3.1.3	Das Messsystem	42
3.1.4	Der Werkzeugsatz und Probengeometrie	46
3.1.5	Festlegung des Prüfprogramms	50
3.1.6	Der Versuchsablauf	52
3.2	Planung der Versuche	55
3.2.1	Festlegung des Stichprobenumfangs	55
3.2.2	Komponenten des Tribosystems	58
3.2.3	Festlegung des Beanspruchungskollektivs	59
3.2.4	Auswahl der Schmierstoffe	61
3.2.5	Der Versuchsplan	65
3.3	Die Versuchsauswertung	69
3.3.1	Auswertung der Kraftverläufe	69
3.3.2	Vorgang bei der Rauigkeitsmessung	74
3.3.3	Festlegung der Kriterien zur Bewertung der Schmierstoffe	77

4	Ergebnisse und Diskussion	82
4.1	Nomenklatur und Bezeichnung	82
4.2	Ergebnisse der Reibkraftmessung	82
4.2.1	Ergebnisse der Auswahlversuche bei $T_{WZG} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$	83
4.2.2	Ergebnisse der Auswahlversuche bei $T_{WZG} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	94
4.2.3	Auswertung der Detailversuche bei $T_{WZG} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$	103
4.2.4	Auswertung der Detailversuche bei $T_{WZG} = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$	105
4.2.5	Einfluss der unterschiedlichen Parameter bei den Detailversuchen	107
4.2.6	Diskussion der Versuche	111
4.3	Ergebnisse der Oberflächenvergrößerung	111
4.3.1	Einfluss auf die Haftreibungszahl	111
4.3.2	Einfluss der Temperatur	114
4.4	Ergebnisse der Oberflächenvermessung	114
4.4.1	Ergebnisse und Diskussion der Auswahlversuche	114
4.4.2	Bildwerk zur Oberflächenvermessung	116
4.5	Ergebnisse aus der Untersuchung des Kurvenverlaufs	118
4.6	Ergebnisse zur Bewertung der Schmierstoffe	120
4.6.1	Ergebnisse zur Bewertung der Schmierstoffe im Prozess	120
4.6.2	Ergebnisse zur Bewertung der Hantierbarkeit	124
5	Abschließende Betrachtung	126
5.1	Betrachtungen der Versuchsmethode	126
5.2	Betrachtung der Ergebnisse	126
	Abbildungsverzeichnis	128
	Tabellenverzeichnis	132
	Literaturverzeichnis	134

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
α	Signifikanzniveau, [1]
A	Firma Acheson
AA	Aluminiumlegierung
Al	Aluminium
Abb.	Abbildung
AV	Auswahlversuche
A_D	gedrückte Fläche, [m^2]
A_N	nominelle Kontaktfläche, [m^2]
A_r	reale Kontaktfläche, [m^2]
d_1	Durchmesser der Proben quer zur Reibrichtung, [mm]
d_1	Durchmesser der Proben in Reibrichtung, [mm]
d_m	mittlere Durchmesser der Proben, [mm]
d_A	Ausgangsdurchmesser der Proben, [mm]
d_G	Durchstoßpunkt der Geradengleichung, [1]
D	direkt verwendbar
DBV	Druckbegrenzungsventil
DV	Detailversuche
d.h.	das heißt
F	Firma Fuchs
$F_{Fmax,Maschine}$	Maximale Maschinenkraft, [N/mm^2]
HV	Härte Vickers, [N/mm^2]
k	Steigung der Reibkurve, [$1/mm$]
LUT	Lehrstuhl für Umformtechnik
l_r	Einzelmessungen der Oberflächenrauigkeit
μ_H	Haftreibungszahl, [1]
μ_{MG}	mittlere Reib- bzw. Gleitreibungszahl, [1]
μ_i	Reibwert für den i-ten Punkt, [1]
m_{ST}	Masseanteil für den Schmierstoff, [1]
m_{VM}	Masseanteil für das Verdünnungsmittel, [1]
MV_{SM}	Mischungsverhältnis für das Schmiermittel, [1]
O_V	Oberflächenvergrößerung, [1]
SA	Standardabweichung der Summenkurve [1]
SA_{EK}	Standardabweichung der Einzelkurven [1]
SW	Steigungswinkel der Kurve [$^\circ/mm$]
SW_{gew}	gewichteter Steigungswinkel der Kurve [$^\circ/mm$]
S_O	Pilzsymmetrie [1]

Abkürzung	Erläuterung
μ_{MG}	Mittlere Gleitreibzahl, [1]
n	Stichprobenumfang
N	Anzahl der experimentell bestimmten Werte
PC	Rechenmaschine
RT	Rotationstribometer
$R\bar{V}$	Reibzahlverlauf, [1]
σ_N	Normalspannung, [N/m^2]
σ_F	Fließspannung, [N/m^2]
$\sigma_{1/3}$	minimale Normalspannung, [N/m^2]
$\sigma_{2/3}$	mittlere Normalspannung, [N/m^2]
σ_{Max}	maximale Normalspannung, [N/m^2]
σ_{Min}	minimale Normalspannung, [N/m^2]
σ_{Mittel}	mittlere Normalspannung, [N/m^2]
SN	Schmiermittelnummer, [1]
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
R_p	arithmetischer Mittelwert der Profilspitzen, [μm]
R_v	arithmetischer Mittelwert der Profiltäler, [μm]
R_z	Oberflächenrauigkeit, [N/m^2]
Tab.	Tabelle
τ_R	Reibspannung, [N/m^2]
τ_{Max}	maximale Scherfestigkeit, [N/m^2]
T_{WZG}	Temperatur Werkzeug, [$^{\circ} C$]
T_{WST}	Temperatur Werkstück, [$^{\circ} C$]
V	Kovarianz der Matrix, [1]
v_{Max}	maximale Reibgeschwindigkeit, [mm/s]
v_{Min}	minimale Reibgeschwindigkeit, [mm/s]
v_{Mittel}	mittlere Reibgeschwindigkeit, [mm/s]
v_R	Relativgeschwindigkeit, [mm/s]
VV	Vorversuche
W	Wahrscheinlichkeit, [1]
x_R	Reibweg, [mm]
z	spezifischer Wert der Standardnormalverteilung, [1]
Tab.	Tabelle
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Durch die technische Verfügbarkeit von großen Mengen an Aluminium und der metallurgischen Möglichkeit Legierungen mit anderen Metallen zu bilden, mit denen die bereits bekannten Eigenschaften von Aluminium komplementiert werden, entwickelte sich dieser Werkstoff neben der Stahlindustrie zum zweitstärksten Metallmarkt, neben der Stahlindustrie mit einem stetig anwachsenden Verbrauchermarkt.

Aluminiumlegierungen stellen aufgrund der geringen spezifischen Masse zu Stahl, der Bildung einer Passiva sowie durch die Möglichkeit mit Legierungsmetallen besonders hohe Festigkeiten zu erzielen, einen besonderen Stellenwert für den Bereich der Luft und Raumfahrt und der Automotive dar. Daher erfolgt zunehmend eine genauere wissenschaftliche Betrachtung für die Methoden die zur Fertigung von Produkten aus vorgewärmten knetbaren Al-Legierungen führen.

Besonders das Gesenkschmieden stellt für die Metalle auf NE-Basis eine wichtige Bedeutung dar. Da eine Fertigung von immer komplexeren Schmiedestücken gefordert wird stellen sich Fragen hinsichtlich der Bedeutung der Wirkflächenreibung für den Prozessablauf und der Oberflächenqualität der Schmiedeteile. Daher ist es notwendig den Einfluss von Prozessgrößen genau zu kennen um Fragen hinsichtlich der Vorgänge bei der Gesenkschmiedung die durch Tribomodelle beschreiben werden. Um die genannten Feststellung sind in das Interesse verschiedener Forschungsarbeiten gerückt.

Gerade beim Schmieden von Aluminiumlegierungen zeigen Schmiedestücke mit hohen Stegen Probleme. Da es einerseits durch Anhaftungen „Kleber“ zu Störungen des Arbeitsablaufs kommt und andererseits durch zu lange Reibwege (hohe Stege) zu einer unvollständigen Formfüllung kommt, führt dies zu einem Ausschuss von Produkten.

Daher soll die Gesenkschmiedung einen störungsfreien Arbeitsablauf gewährleisten, die Gesenkschmiedmengen erhöhen und eine gute Schmiedeteilqualität absichern. Wenn diese Anforderungen nicht erfüllt werden, entstehen für den Schmiedebetriebs nachteilige Effekte die sich auf die Qualität der Produkte und auf die Wirtschaftlichkeit auswirken können. Somit sind wichtigste Voraussetzungen zu erfüllen wie eine Schmierstoffauswahl und -erprobung, richtige Schmiertechnik und Schmierstoffhandhabung.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Der Aufgabenstellung wurde zugrunde gelegt, dass eine Prüfmethode entwickelt werden soll um qualitative Aussagen zu tätigen die eine Charakterisierung und Beurteilung der Wirksamkeit von

Schmierstoffen hinsichtlich der Bedingungen für das Gesenkschmieden von Al-Schmiedestücken mit langen Reibwegen (Stege) ermöglichen.

Durch den Projektpartner „Schmiedetechnik Pankl“ erfolgte eine Festlegung, dass eine Charakterisierung von Schmierstoffen bei Werkzeugtemperaturen von 250°C und 450°C an einer Al-Legierung AA-2618 durchzuführen ist. Da bei sehr hohen Stegen Probleme hinsichtlich unvollständiger Formfüllung auftreten wurde der Reibweg auf 80 mm festgelegt. Unter Einbeziehung der Schmiermittelfirmen wurde eine Liste mit möglichen Produkten für das genannte Problem erstellt und gemeinsam mit dem Projektpartner eine Auswahl der Schmiermittel für die Versuchsreihen getroffen.

Aus Vorversuchen wurde eine Anpassung der Geometrien von Werkzeug und Proben sowie eine Festlegung der Prüfmatrix durchgeführt. Gemeinsam erfolgte eine Festlegung der variablen Parameter (gestützt durch Ergebnisse einer umformtechnischen Simulation) für Vor- und Detailversuche. Anhand der Auswahlversuche (Relativgeschwindigkeit wurde bei 150 mm/s und bei mittleren und maximalen Druckstufen festgelegt) soll durch Verwendung von drei Konzentrationen je Schmierstoff, eine Auswahl der beiden besten Konzentrationen für die unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen erfolgen. Bei den Detailversuchen wurden die besten Schmierstoffkonzentrationen für erweiterte Druck- und Geschwindigkeitsstufen untersucht um einerseits mögliche Grenzen für den Schmierstoff zu prüfen und andererseits die erhaltenen Ergebnisse mit den Ergebnissen der Auswahlversuche zu vergleichen um die Qualität der Versuchsmethode darzustellen.

In der vorliegenden Arbeit werden folgende Zielstellungen bei der Untersuchung und der Verwendung der unterschiedlichen Schmierstoffe verfolgt:

- i) Ermittlung der mittleren Gleitreibungszahlen μ_{MG} für die entsprechende Parametersätze sowie eine Möglichkeit die zur Darstellung der Ergebnisse mit maximaler Informationsdichte führt.
- ii) Definieren einer Größe, mit der eine qualitative Aussage über das Verhalten der Reibzahlen über den Reibweg ermöglicht wird.
- iii) Aus den Einzelmessungen für die jeweiligen Bedingungen sollen die Abweichungen der Einzelkurven berechnet werden, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Versuche zu treffen.
- iv) Erstellen einer Ergebnismatrix mit der eine einfache Möglichkeit zur Aussage über die Qualität der Schmierstoffe für die verschiedenen Bedingungen ermöglicht wird.
- v) Eine Beurteilung der Schmierstoffe hinsichtlich der potentiellen Eignung für den Prozess sowie Aussagen über die Hantierbarkeit.
- vi) Beurteilungen der Oberflächenrauheiten der Werkzeuge, um Aussagen über die Qualität der Probenoberfläche und der Bedeutung für das Gesenkschmieden zu ermöglichen.
- vii) Vergleich der Ergebnisse und Feststellung i.b. aus den Detailversuchen mit der Literatur, um eine Aussage über die Qualität der Prüfmethode zu tätigen.

1.3 Stand der Technik

1.3.1 Charakterisierung von Schmierstoffen

Die Messverfahren zur Bewertung und Charakterisierung von Schmierstoffen lassen sich unterteilen in direkte und indirekte Messungen [1]:

i) indirekte Messungen

Aus der Veränderung bestimmter Parameter (z.B. Kräfte oder Formänderungen) wird auf eine über die gesamte Bruchfläche gemittelte Reibzahl geschlossen.

ii) direkte Messungen

Die Ermittlung der Kontaktnormalspannungen erfolgt in einer kleinen Teilfläche der Wirkfläche, in der damit näherungsweise die Spannungen als konstant angenommen werden können, woraus sich die örtlichen Reibzahlen ergeben.

Da direkte Untersuchungen zur Messung der örtlichen Spannungszustände einen hohen versuchstechnischen Aufwand erfordern, werden die indirekten Methoden häufiger angewandt da diese zur Prüfung und Charakterisierung von Schmierstoffen herangezogen werden können.

1.3.2 Indirekte Methoden der Schmiermittelcharakterisierung

Es ist festzustellen, dass bei der Anwendung von Prüfverfahren zur Bestimmung von Reibzahlen stets Vereinfachungen getroffen werden müssen. Die Methoden der unmittelbaren Kraftmessung bieten die Möglichkeit die Versuchsbedingungen in weiten Bereichen zu variieren und so die Verhältnisse der Realität möglichst genau nachzubilden.

Im Folgenden werden die Methoden zur Reibwertermittlung aus dem Formänderungsverlauf und aus Kraftmessungen dargestellt und erklärt.

1.3.2.1 Methoden der Schmiermittelcharakterisierung der Formänderung

Einer der bekannteste Vertreter ist der Ringstauchversuch, der von Kunogi [2, 3] entwickelt und von Male und Cockcroft [4] für Reibungsmessungen adaptiert wurde.

Der große Vorteil des Ringstauchversuchs ist die einfache Versuchsdurchführung und Auswertung, und die Wirkflächenreibung wird nicht durch das Messverfahren beeinflusst. Hier wird die Änderung des Innendurchmessers eines Ringes, der zwischen ebenen, parallelen Werkzeugen gestaucht wird, als Maß für die Wirkflächenreibung herangezogen. Durch den Vergleich der Durchmesseränderung kann mithilfe der Plastizitätstheorie der Formänderungsverlauf berechnet werden woraus sich die Reibzahl und damit eine Charakterisierung des Schmierstoffs ergibt.

Weitere Vertreter der indirekten Verfahren sind der Barreling-Test von Ebrami [5] (Berechnung des Reibwertes aus der Ausbauchung eines gestauchten Zylinders), der Spike-Test wie er beispielsweise bei Sofuoglu [6] Anwendung findet (Bestimmung der Reibung über die Höhe des Zapfens in der Bohrung des Werkzeuges) und der Double-Cup-Extrusion-Test, wie er von Kim et al. [7] beschrieben wird (Bestimmung des Reibwertes über das Höhenverhältnis der Näpfe).

Eine Besondere Eignung zur Schmierstoffcharakterisierung ergeben sich aus den Verfahren nach dem Ringstauchversuch, Spike-Test und Double Cup Extrusion Test.

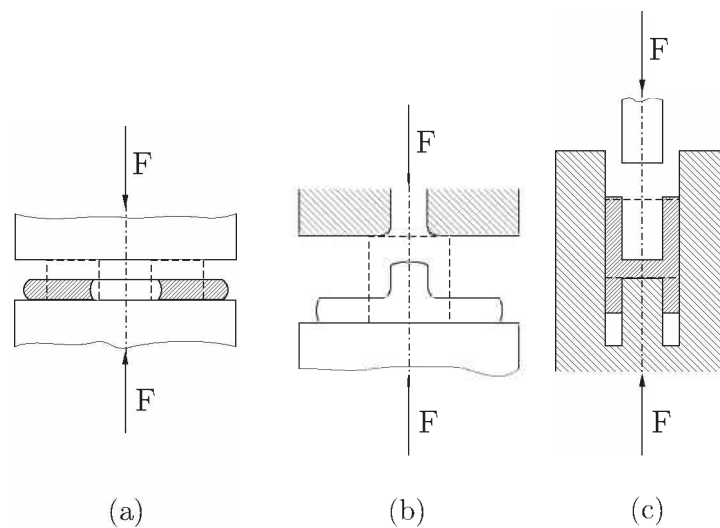


Abbildung 1.1: Verfahren zur Charakterisierung von Schmierstoffen durch Ermittlung des Reibwertes aus dem Formänderungsverlauf:(a) Ringstauchversuch, (b) Spike-Test, (c) Double-Cup-Extrusion-Test

1.3.2.2 Methoden der Schmiermittelcharakterisierung aus Kraftmessungen

Vertreter der zweiten Kategorie von Reibversuchen sind der Gleitstauchversuch [8, 9] und das Napf-Rückwärtsfließpressen nach Doege [10] die in Abbildung 1.2 dargestellt werden.

Beim Gleitstauchversuch wird eine zylindrische Probe zuerst mit einem speziellen Oberwerkzeug gestaucht um an der Probenunterseite eine möglichst homogene Oberflächenvergrößerung zu erzielen. Dann wird - unter Aufrechterhaltung des Stauchdrucks - das Unterwerkzeug linear verschoben. Aus Stauchkraft und Zugkraft ergibt sich die Reibzahl.

Beim Napf-Rückwärtsfließpressen werden die Spannungen in der Wirkfuge durch unterhalb der Unterstempeloberfläche angebrachte Dehnmessstreifen, erfasst. Die Rückrechnung auf die Kontaktnormalspannung ist ausschließlich durch numerische Simulationsverfahren möglich [10].

Weitere Methoden zur qualitativen Beurteilung von Schmierstoffen bei kontrollierten Bedingungen für das Kaltschmieden werden durch Hansen und Bay [11] angeführt. Die Methode für hohe Normalspannung gleicht sich mit der Anordnung in Abbildung 1.2 (b).

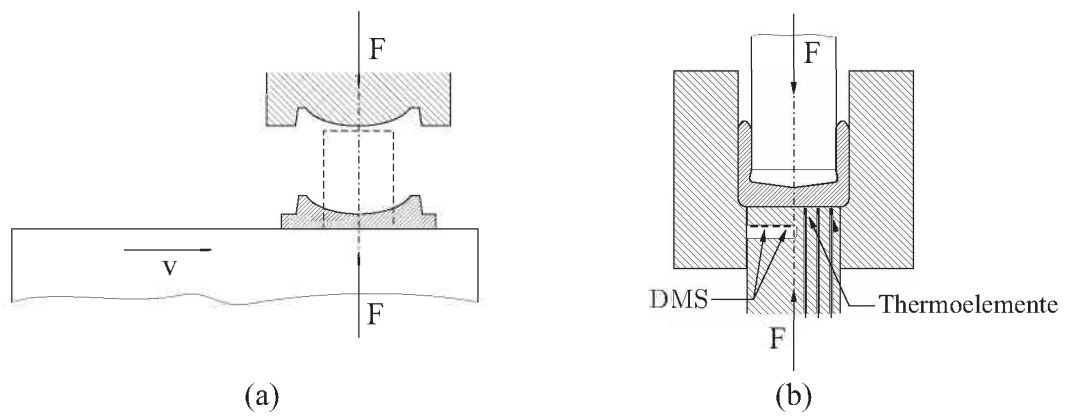


Abbildung 1.2: Verfahren zur Charakterisierung von Schmierstoffen zur Ermittlung des Reibwertes aus Kraftmessungen: Gleitstauchversuch (a) und instrumentiertes Napf-Rückwärtsfließpressen nach Doege (b).

2 Grundlagen

2.1 Tribologie in der Massivumformung

2.1.1 Grundlagen und Definitionen

Reibung ist eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern, die einer Relativbewegung entgegen wirkt [12]. Reibung äußert sich als Energieverlust, wobei ein Teil der mechanischen Bewegungsenergie in andere Energieformen, hauptsächlich in Wärme, umgewandelt wird. Für die Beschreibung der Reibung muss zwischen nomineller und realer Kontaktfläche unterschieden werden (siehe Abbildung 2.3).

Nach der DIN 50320 ist der Begriff *Verschleiß* wie folgt definiert: „Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“ [13]. Heute wird Verschleiß meist als Materialübertrag definiert, da auch Aufschweißungen zu unzulässigen Gestaltabweichungen führen.

Unter *Verschleißmechanismen* versteht man die bei einem Verschleißvorgang, infolge der kräftemäßigen bzw. energetischen und stofflichen Wechselwirkungen zwischen den Kontaktpartnern, ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse. Mit der Einteilung in verschiedene Verschleißarten ist eine Unterscheidung des Verschleißes nach der Art der tribologischen Beanspruchung (speziell der Kinematik) und der beteiligten Stoffe möglich [14].

Reibung ist jedoch im Falle zweier miteinander in Kontakt befindlicher, gegeneinander bewegter Oberflächen eine Systemeigenschaft, die aus dem Zusammenspiel des Beanspruchungskollektivs mit der Struktur des vorhandenen und bestehenden Tribosystems erwächst [13].

Die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers wird als *tribologische Beanspruchung* bezeichnet.

Die Analyse tribologischer Beanspruchungen muss sowohl den Aufbau technischer Oberflächen sowie ihre Physik und Chemie, als auch geometrische, kinematische, kräftemäßige, energetische und thermische Verhältnisse in Kontaktgrenzflächen untersuchen. In Abbildung 2.1 erfolgt eine Darstellung der Einflussgrößen die in der Massivumformung auf das Tribosystem wirken.

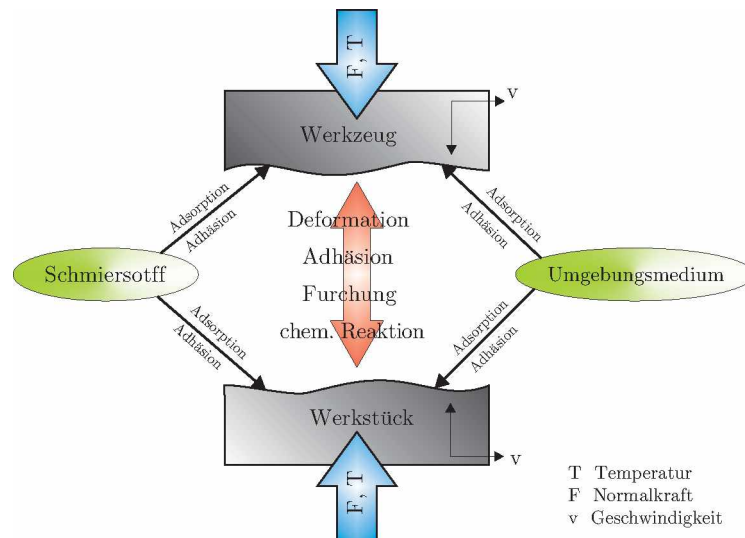


Abbildung 2.1: Einflussgrößen des Tribosystem [15].

2.1.2 Mechanismen zwischen metallischen Kontaktflächen

2.1.2.1 Aufbau technischer Oberflächen

Wichtig für die Kontaktvorgänge bei tribologischen Beanspruchungen sind besonders die dargestellten Unterschiede zwischen Grundwerkstoff und Grenzschichtbereichen technischer Oberflächen sowie die chemische Zusammensetzung, Härte und Gefüge.

Der Schichtaufbau technischer Oberflächen für metallische Werkstoffe gliedert sich in drei Schichten (Grundwerkstoff - innere Grenzschicht - äußere Grenzschicht) und ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

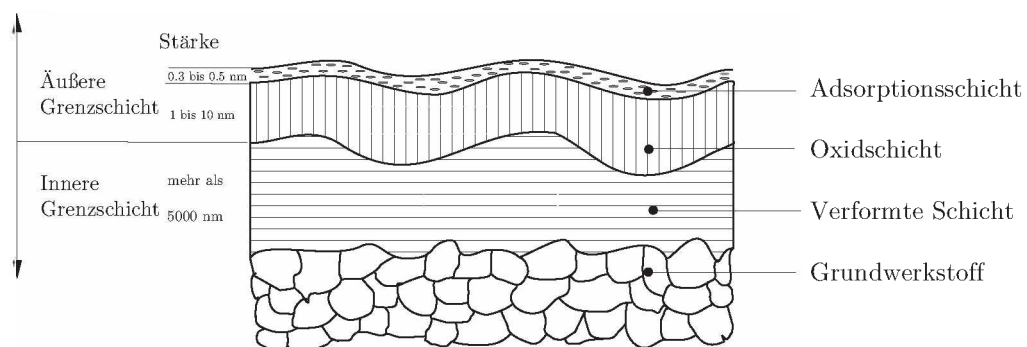


Abbildung 2.2: Aufbau technischer Oberflächen: Schematische Darstellung des Querschnittes einer Metall-Oberfläche [14].

Die innere Grenzschicht besteht in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren aus einer an den Grundwerkstoff anschließenden Verformungs- oder Verfestigungszone. Die äußere Grenzschicht besitzt meist eine vom Grundwerkstoff abweichende Zusammensetzung und kann aus Oxidschichten, Adsorptionsschichten und Verunreinigungen bestehen.

2.1.2.2 Vorgänge zwischen realen Kontaktflächen

Aus den Überlegung nach Tabor und Tabor [16] und Ming-Feng [17] zur Beschreibung der Vorgänge in der Kontaktzone von metallischen Oberflächen, geht hervor, dass auch sorgfältig bearbeitete Oberflächen immer Unebenheiten besitzen.

Die nominelle Kontaktfläche A_n ist die gegenseitige Überdeckungsfläche und setzt sich aus Flächenteilen A_{r_i} zusammen, die im direkten Kontakt stehen und solchen, die sich nicht direkt berühren. Die Summe aller berührenden Flächen wird als reale Kontaktfläche A_r definiert. [14].

Daher erfolgt der Kontakt zweier Körper an der realen Kontaktfläche A_r , lokal auf den einzelnen Rauheitsgipfeln, und es kommt dabei zu lokal plastischen Verformungen bis eine Abstützung der Fläche durch die aufgebrauchten Druckspannungen σ_N entsteht (siehe Abbildung 2.3).

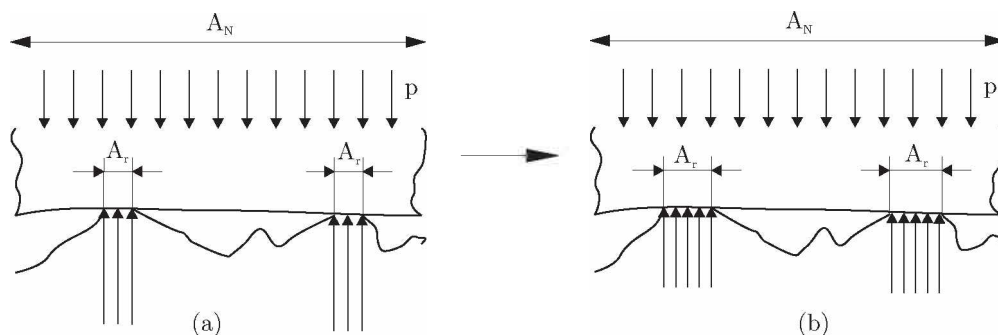


Abbildung 2.3: Beschaffenheit der Oberfläche in der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug. Bild (b) zeigt die Vergrößerung der Kontaktflächen durch plastische Deformationen der Rauheitsgipfel durch Aufbringung einer äußeren Spannung bei erreichter Abstützwirkung der Oberfläche im Vergleich zur unbelasteten Oberfläche von Bild (a).

Die reale Kontaktfläche hängt unmittelbar von der Kontaktspannung ab, die sich bei steigender Beanspruchungen asymptotisch der nominellen Kontaktfläche annähert (siehe Abbildung 2.4).

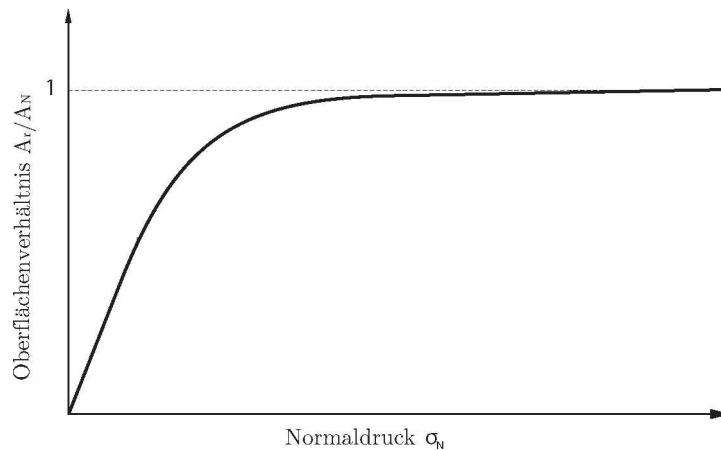


Abbildung 2.4: Im Bereich der geringen Normalspannung σ_N besteht ein linearer Zusammenhang zwischen realer Kontaktfläche A_r und dem Oberflächenverhältnis A_N/A_r . Bei hohen Kontaktnormalspannung nähert sich A_r asymptotisch der nominellen Fläche A_N an.

2.1.3 Grundlegende Reib- und Verschleißmechanismen

Nach den Postulat von Bowden und Tabor wird als Hauptgrund der Reibung das *Abscheren von Mikroverschweißungen*, die sich aufgrund der hohen Beanspruchung an den Rauheitstipfeln bilden, angegeben. Dagegen wird in der Expertise von Ming-Feng Reibung durch das mechanische *Abscheren von ineinander verhackten Oberflächenhügeln* begründet, die infolge von Abschervorgängen mögliche Mikroverschweißungen bilden können.

Dagegen zeigen Untersuchungen, dass beide Mechanismen in der Reibfläche auftreten [18]. Daneben wirken noch weitere Reibmechanismen wie Adhäsion und Scheren, plastische Deformation, Furchung, elastische Hysterese und Dämpfung

Als Reib- und Verschleißmechanismen versteht man die im Oberflächenbereich der Elemente eines Tribosystem ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgänge. Dabei wirken tribologische Beanspruchungen in Form von kräftemäßiger und stofflicher Wechselwirkung, verbunden mit der Umsetzung von Reibenergie, auf die Komponenten eines tribologischen Systems ein. Man unterscheidet grundlegend zwischen Adhäsion, Abrasion und Ablation die in Abbildung 2.5 dargestellt werden [19].

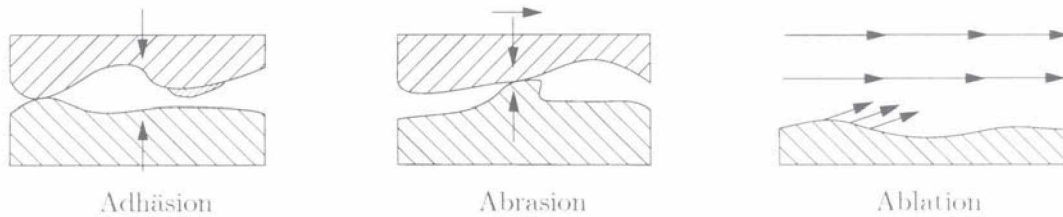


Abbildung 2.5: Reib- und Verschleißmechanismen. Bei der Adhäsion kommt es zum metallischen Kontakt mit nachfolgendem Materialübertrag. Bei der Abrasion dringen die Rauheitsspitzen eines Reibpartners in die Oberfläche des anderen Partners ein (Mikrozerspannung). Bei der Ablation kommt es durch Einwirkung mechanischer Beanspruchungen zu chemischen Reaktionen [20].

2.1.3.1 Adhäsion

Bei der Adhäsion werden durch chemische Bindungen zwischen zwei sich berührenden Körpern Grenzflächen-Haftsichten wirksam.

Durch ein Abreißen des Schmiermittelfilms aufgrund von plastischen Deformationen kommt es zum metallischen Kontakt der Reibpartner und in weiterer Folge zu Mikroverschweißungen. Die verschweißten Bereiche erfahren unter Druck meist auch eine Kaltverfestigung. Bei weiterer Schubbeanspruchung brechen diese Verschweißungen und es kommt zu Energieverlusten in Form von Reibung.

Das Aufbrechen der Verbindungen geschieht nicht in der Wirkfuge, sondern der weichere Werkstoff wird in der Umgebung der Naht abgeschert, wobei Metallstücke von einem Reibpartner auf den anderen übertragen werden. Dieser Verschleiß ist als „Kaltverschweißung“ oder als „Fresser“ bekannt [14, 19].

2.1.3.2 Abrasion

Bei der Abrasion dringen die Rauheitsspitzen eines Reibpartners oder in der Reibfläche befindliche Fremdkörper in die Oberfläche des anderen Partners ein. Durch das Ineinandergreifen der Rauheitsspitzen werden diese bei Bewegung zuerst elastisch, dann plastisch verformt, wodurch es zu einem Energieverlust in Form von Reibung kommt.

Werden Grund und Gegenkörper relativ zueinander bewegt, so entstehen Riefen. Durch einen Mikrozerspannungsvorgang werden Werkstoffpartikel aus der Oberfläche herausgelöst, welche Kaltverfestigen und einen weiteren Verschleiß der Oberfläche bewirken [19].

2.1.3.3 Ablation

Ablation liegt vor, wenn durch das Einwirken mechanischer Beanspruchungen im tribologischen System chemische Reaktionen zwischen Grund- und Gegenkörper, Zwischenstoff und angrenzendem Medium ablaufen. Da die Prozesse mit einer thermischen Anregung verbunden sind und durch Verschleiß immer wieder neue Oberflächen entstehen, ist allgemein eine hohe chemische Reaktionsbereitschaft vorhanden, die zu einer Änderung der Stoffeigenschaften in der Grenzschicht führt. Die Bildung von Reaktionsschichten kann verschleißfördernd oder -mindernd sein.

2.1.4 Reibzustände

Bei der Umformung metallischer Werkstoffe kommt der Reibung (bzw. der Schmierung, die die Aufgabe hat, die Reibung zu vermindern) eine bedeutende Rolle zu. Nach dem Kontaktzustand der Reibpartner wird zwischen *Festkörperreibung*, *Grenzreibung*, *Flüssigkeitsreibung* und *Mischreibung* unterschieden. In Abbildung 2.6 erfolgt eine Darstellung der Stribek-Kurven für die einzelnen Reibzustände.

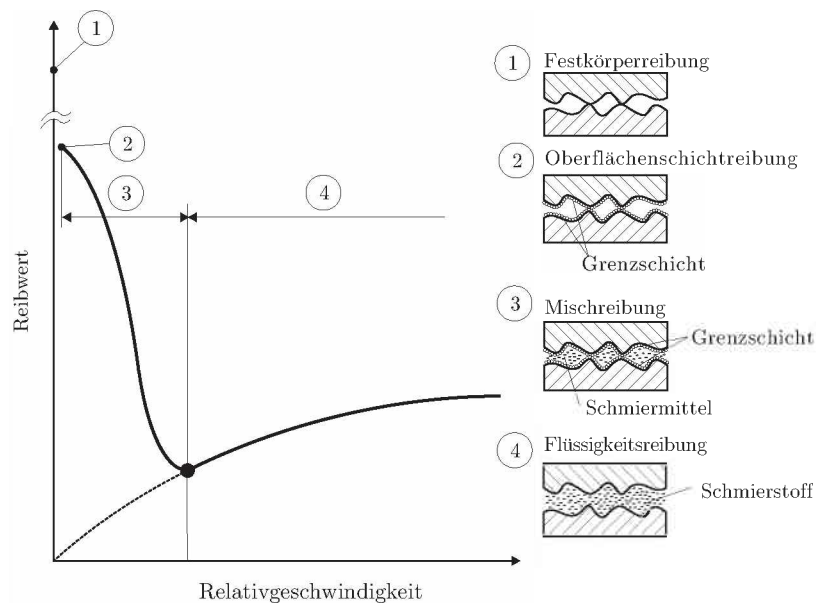


Abbildung 2.6: Stribekkurve mit den einzelnen Bereichen der Reibzustände [20].

2.1.4.1 Festkörperreibung

Festkörperreibung oder trockene Reibung liegt vor, wenn in einem tribologischen System die durch Belastung und Bewegung eingebrachte Energie von den einem Reibpartner auf den anderen ohne Vorhandensein eines Zwischenstoffs übertragen wird. Der Reibmechanismus wird ausschließlich durch die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Reibpartner bestimmt.

Da der Reibvorgang in keiner Weise begünstigt wird, sind Reibung und Verschleiß hoch wobei die Festkörperreibung in der Praxis nur sehr selten vorkommen, da sich zwischen den Reibpartnern Oxidschichten und Adsorptionsschichten durch den Einfluss des Medium bilden [19, 20].

2.1.4.2 Oberflächenschichtreibung

Bei der Oberflächenschichtreibung befindet sich eine wenige Moleküllagen dicke, nichtmetallische Schicht zwischen den Reipartnern, bestehend aus einer Oxid- und Adsorptionsschicht, sodass der direkte metallische Kontakt verhindert wird. Diese nichtmetallischen Trennschichten begünstigen den Reibvorgang und vermindern Reibung und Verschleiß, wobei die Grenzreibung bei Prozessen der Warmumformung, insbesondere beim Schmieden, auftritt [19, 20].

2.1.4.3 Flüssigkeitsreibung

Bei der Flüssigkeitsreibung, auch hydrostatische Reibung genannt, sind die Oberflächen der Reibpartner vollständig durch eine tragfähige flüssige Schmierstoffschicht getrennt.

Der Reibungsvorgang findet hier vollkommen in der Flüssigkeitsschicht statt. Als Einflussgröße auf die Reibung ist hier vor allem die Viskosität des Schmierstoffes ausschlaggebend. Die Beteiligung der Reibpartner am Reibvorgang wird nur durch ihre Reaktionsbereitschaft mit dem Schmiermittel bestimmt. Bei Bewegung der Reibpartner ist zur Aufrechterhaltung der hydrodynamischen Schmierung eine ausreichende Menge an Schmierstoff in der Wirkfuge notwendig [19].

2.1.4.4 Mischreibung

Bereits bei Vorhandensein kleiner Schmierstoffmengen an den Reibstellen, die flüssig oder pastös sein können, wird der Reibungsvorgang begünstigt. Es gibt Bereiche wo die Reibpartner miteinander in Kontakt stehen (Festkörperreibung), Bereiche wo die Oberflächen durch einen dünnen Schmierfilm getrennt sind (Oberflächenschichtreibung) und Teilbereiche wo hydrostatische Reibungsbedingungen vorliegen. Dieser Zustand wird als Mischreibung bezeichnet. Vor allem in Kaltumformprozessen liegen Mischreibungszustände vor [14, 20].

2.1.5 Reibgesetze

Unter Reibgesetze versteht man mathematische Formulierungen, die es ermöglichen Schubspannung in der Reibgrenzfläche in Abhängigkeit von äußeren Einflüssen zu ermitteln. Eines der bekanntesten Reibgesetze stellt das *Coulomb'sche Reibgesetz* (Gesetz nach Amontons) dar, wo ein direkter linearer Zusammenhang zwischen der Reibspannung τ_R und der Normalspannung

σ_N definiert ist. Dabei ist der Reibwert μ ein Proportionalitätsfaktor, der die Eigenschaften des Tribosystem wiedergibt.

$$\tau_r = \mu \cdot \sigma_N \quad (2.1)$$

Es konnte nach Bowden und Tabor [16] festgestellt werden, dass die Annahme für geringe Kontaktspannung gilt, d.h. solange die reale Kontaktfläche mit der Normalkraft linear zunimmt. Daher lassen sich durch das Reibgesetz von Coulomb Vorgänge in der Zwischenschicht (Mischreibzustände) ausreichend beschreiben.

Für das Reibfaktorgesetz gelten die Voraussetzungen, dass die maximale übertragbare Schubspannung τ_r die für das Fließen erforderliche τ_{max} ist, durch den weicheren Reibpartner nicht überschritten werden kann.

$$\tau_r = m \cdot \tau_{Max} \quad (2.2)$$

Der Reibfaktor m definiert sich zwischen 0 (keine Reibung) und 1 (vollständiges Haften).

Nach den Untersuchungen von Shaw [21] haben beide Reibgesetze bei unterschiedlichen Beanspruchungen ihre Gültigkeit. Das Reibgesetz von Coulomb hat ihre Gültigkeit nur für geringe Kontaktspannungen, jedoch nähert sich die reale Kontaktfläche asymptotisch an die nominelle Kontaktfläche an (siehe Abbildung 2.4) und die übertragbare Reibspannung wird durch die Scherspannung des Reibpartners begrenzt.

Shaw führte Berechnungen durch, mit denen eine kombinierte Darstellung der eben beschriebenen Verhältnisse ermöglicht wird. Daher soll nach Abbildung 2.7 der Ansatz die Gültigkeiten der Gesetze nach Coulomb (Bereich I) und den Reflektionsgesetz (Bereich II) umfassen. Levanov [22] schlägt folgenden Ansatz zur Berechnung vor:

$$\frac{\tau_r}{\tau_{Max}} = m \cdot \left(1 - \exp \left(-1,25 \cdot \left(\frac{\sigma_N}{k_f} \right) \right) \right) \quad (2.3)$$

Dabei gibt das Verhältnis zwischen Reibspannung τ_R und der maximalen Scherspannung τ_{Max} als normalisierte Reibspannung den Zusammenhang der Reibpartner (Werkzeug und Werkstück) durch den Reibfaktor m , der Kontaktnormalspannung σ_N und der entsprechenden Fließspannung k_f an [22].

Ein allgemeinerer Analytischer Ansatz erfolgte durch das Modell nach Stephenson [23] der eine Beziehung zwischen der wahren und nominellen Kontaktfläche vorsieht.

$$\frac{\tau_r}{\tau_{Max}} = m \left(1 - \exp \left(-\frac{f \cdot \sigma_N}{\tau_{Max}} \right) \right) \quad (2.4)$$

Dabei hängt der Faktor f weitgehend von der realen Kontaktfläche, die im Bereich zwischen 0,1 bis 1,0 liegt, ab. In weiterer Folge ergeben sich Abhängigkeiten für den Faktor hinsichtlich Temperatur, äußere Einflüsse, gleitenden Materialien usw.

Für hohe Kontaktspannung nähert das Verhältnis τ_r/τ_{Max} aus den Gleichungen 2.6 und ?? dem Reibwert m an. Das Modell von Wanheim [24] postuliert wurde. Der Ansatz geht von der „Gleitlinienfeld“ Theorie aus und ergibt dabei ein ähnliches Verhalten wie der Lineare Zusammenhang im Bereich I zwischen σ_N und τ_r . Folgende Zwei Fälle mit den jeweiligen Bedingungen ergeben sich:

$$\frac{\tau_r}{\tau_{Max}} = \left(1 - \sqrt{1 - m}\right) \cdot \frac{q}{B \cdot \sigma_0} \quad (2.5)$$

für $\frac{\sigma_N}{k_f} \leq B$ und

$$\frac{\tau_r}{\tau_{Max}} = A + (m - A) \left(1 - \exp\left(\frac{A \left(1 - \frac{\sigma_N}{k_f}\right)}{m - A}\right)\right) \quad (2.6)$$

für $\frac{q}{\sigma_0} > B$ mit

$$A = \frac{\tau'}{\tau_{Max}} = 1 - \sqrt{1 - m} \quad (2.7)$$

$$B = \frac{\sigma'}{k_f} = \frac{1 + \frac{\pi}{2} + \arccos(m) + (1 - m^2)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3} \cdot (1 + \sqrt{1 - m})} \quad (2.8)$$

Um die Reibmodelle zu vervollständigen wird nach Doege der analytische Ansatz [25] in Gleichung 2.9 und der experimentelle [10] Ansatz in Gleichung 2.10 dargestellt:

$$\frac{\tau_{max}}{k} = \sqrt[n]{\tanh\left(\left(\frac{\mu \cdot \sigma_N}{k}\right)^n\right)} \quad (2.9)$$

mit $n \geq 4$.

$$\frac{\tau_R}{k_f} = \frac{1}{100} \cdot \left(2,5 + 4,25 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_N}{k_f}} - 3 \cdot \frac{v_{rel}}{50mm/s}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-10 \cdot \left(\frac{\sigma_v}{k_f}\right)^{1,5}\right)\right) \quad (2.10)$$

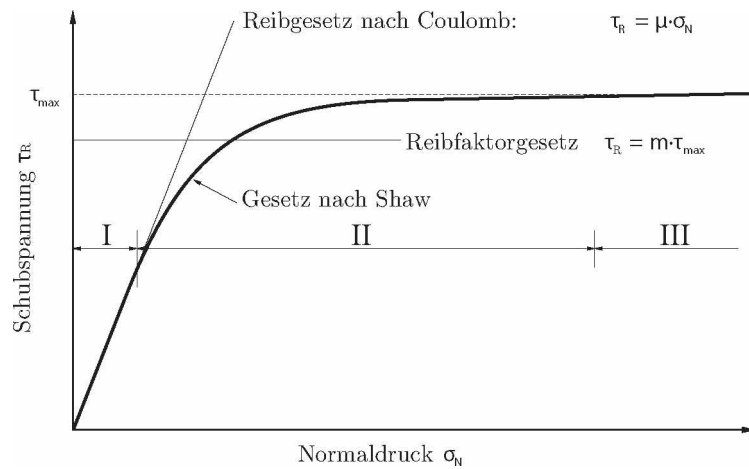


Abbildung 2.7: Änderungen der Reibspannung τ_R mit der Normalspannung σ_N nach bekannten Reibgesetzen [21].

2.1.6 Analyse der Reibvorgänge bei der Warm- und Halbwarmumformung

Die Reibung wirkt sich auch auf den Ablauf eines Umformvorgangs und damit auch auf das Umformergebnis aus. So wird z.B. der Stofffluss teilweise ganz entscheidend von den jeweils herrschenden Reibbedingungen bestimmt, was besonders bei den Verfahren der Massivumformung von großer Bedeutung ist. Die Auswirkungen zeigen sich dabei nicht nur in der äußeren Form des Formteils sondern auch in den mechanischen Eigenschaften und ihrer Verteilung über den Querschnitt des Werkstücks. Da im Allgemeinen die Inhomogenität der Formänderung mit der Reibung zunimmt, treten damit auch größere Unterschiede in den örtlichen Festigkeiten des umgeformten Bauteils auf [9].

Durch die Tatsache, dass bei den Verfahren der Massivumformung teilweise erhebliche Oberflächenvergrößerungen, aufgrund der tribologischen Beanspruchungen wie hohe Temperaturen, Kontaktdrücke und Relativgeschwindigkeiten zutreten, kommen während des Umformvorgangs immer neue, zum Teil erst durch das Umformen neu gebildete Oberflächen in der Wirkfuge miteinander in Berührung. Dadurch ergeben sich Gleitverhältnisse, wie sie für Einlaufvorgänge typisch sind.

Die für die industrielle Fertigung wichtigsten Folgen der Reibungserscheinung äußern sich zum einen im Verschleiß der Werkzeuge und zum anderen in Oberflächenschäden am Werkstück.

Für den Werkzeugverschleiß ist in vielen Fällen hauptsächlich die von der Standzeit der Werkzeugaktivteile verantwortlich. Er wirkt sich aber gleichzeitig auch auf die Qualität der Produkte aus, und zwar sowohl auf die Maßgenauigkeit als auch auf die Oberflächengüte. Reibung führt ferner zu Energieverlusten und damit zur Erhöhung des Kraft- und Arbeitsbedarfs des Umformvorgangs. Als Folge des höheren Kraftbedarfs kommt es aber auch zu einer höheren Werkzeug-

belastung mit entsprechender Auswirkung auf die Standzeit. Maßgeblich wird der Werkzeugverschleiß durch den Beanspruchungsfall beim jeweiligen Umformverfahren bestimmt.

Der Schmierstoff hat neben einer chemischen Funktion zur Bildung einer Reaktionsschicht zur Isolierung der Reibpartner noch eine Kühlfunktion, die besonders beim Arbeiten mit erhöhten Temperaturen eine Ableitung der Reibungswärme bewirken soll. Das Temperaturfeld beeinflusst hierbei u. a. die Reaktionsschichtbildung und die Festigkeitsverminderung [26].

Bei den Verfahren der Massivumformung zeigen sich höhere Reibzahlen infolge des Kraft- und Energiebedarf die maßgeblich den Werkstofffluß beeinflussen und somit die Formänderungs- und Festigkeitsverteilung innerhalb des Werkstücks wodurch eine Erhöhung der Oberflächentemperatur eintritt und es am Werkzeug bevorzugt zu Verschleiß kommt. Dadurch kann die Maßgenauigkeit und die Oberflächengüte des Werkstücks beeinflusst werden. Umgekehrt wirken eine Vielzahl von Parametern auf die Reibung zurück. Für die fertigungstechnisch ausgelegten Verfahren der Massivumformung mit ihren leistungsstarken Maschinen ist die Grenze der Wirtschaftlichkeit durch die im Einsatz befindlichen Werkzeuge gegeben [26].

2.1.7 Einflussgrößen auf die Reibung

Die unterschiedlichen Reibzustände und Reibmechanismen werden durch physikalische und chemische Wirkmechanismen zwischen den Reibpartnern geprägt. Während des Reibvorgangs können diese Mechanismen jedoch wechseln bzw. sich gegenseitig ergänzen. Die für die Reibungserscheinungen charakteristische Reibungszahl hängt dabei ebenfalls von der wahren Kontaktfläche ab, die ebenso wie die vorherrschenden Reibmechanismen von den Reibbedingungen beeinflusst wird. Die verschiedenen Reibbedingungen haben damit unterschiedlichen Einfluss auf die Reibmechanismen.

2.1.7.1 Einfluss der Werkstoffpaarung

Die Werkstoffpaarung Werkstück-Werkzeug spielt hier eine bedeutende Rolle. In diesem Bereich spielt sich ferner die teilweise beträchtliche Änderung der ursprünglichen Werkstückoberfläche ab. Der Einfluss des Werkstoffs auf die Reibung ist sowohl von der chemischen Zusammensetzung als auch von den physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Reibpartner abhängig [27, 28].

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Affinität zwischen den Reibkörpern sowie der Reibkörper zum Schmierstoff von der Zusammensetzung bestimmt wird. Eine starke Affinität zwischen Reibkörper und Schmierstoff erschwert die Adhäsion zwischen den Reibkörper und verbessert die Schmierwirkung.

Bei hohem Genauigkeitsanspruch empfiehlt sich eine auf die Werkstoffpaarung, die Temperatur und den verwendeten Schmierstoff abgestimmte Ermittlung der Reibzahl [29].

2.1.7.2 Einfluss des Schmierstoffes

Aufgrund der komplexen tribologischen Zusammenhänge der Einflussgrößen existieren keine universalen Prüfmethode, sondern Verfahren die eine Prüfung für speziell adaptierte Prozesse ermöglichen.

Versuche und Messungen im Rahmen des Einflusses der Schmierstoffe auf die Reibungserscheinungen eignen sich oftmals nur für einen qualitativen Vergleich der Schmierstoffe.

Der Einfluss des Schmierstoffes auf den Reibungszustand steht in engem Zusammenhang mit den beschriebenen Parametern. Die Wahl des Schmierstoffes bestimmt in Kombination mit diesen genannten und betrachteten Parametern wesentlich die Veränderung der Reibwerte in umformtechnischen Prozessen.

2.1.7.3 Einfluss der Temperatur

Im Bereich der Halbwarm- und Warmumformung wurde gezeigt, dass die Temperatur eine der wichtigsten Einflussgrößen für den Reibungszustand ist.

Beim Umformen ohne Schmierstoff wirkt sich vor allem eine starke Verzunderung auf den Reibfaktor aus, während bei Verwendung von Schmierstoffen deren Temperaturverhalten für den Reibzustand entscheidend ist. Es konnte gezeigt werden [30], dass sich der Reibfaktor mit zunehmender Temperatur erhöhte. Jedoch ergaben sich teilweise erhebliche Unterschiede zwischen Ergebnissen aus Experimenten und der Finite-Elemente-Berechnungen.

Durch weiterführende Untersuchungen wurde festgestellt, dass der Reibwert in Abhängigkeit von der steigenden Umformtemperatur bis auf einen Maximalwert (Aluminium bis 300°C) ansteigt und im weiteren Temperaturanstieg erheblich abfällt [31].

2.1.7.4 Einfluss der Relativgeschwindigkeit

Über die Abhängigkeit der Reibzahl von der Gleitgeschwindigkeit sind aus der Literatur zahlreiche Untersuchungen bekannt die übereinstimmend feststellen, dass der Einfluss der Gleitgeschwindigkeit auf die Reibzahl vom Schmierzustand abhängig ist.

Weitere Untersuchungen stellten eindeutig fest, dass mit zunehmender Werkzeuggeschwindigkeit der Reibwert abnimmt. [32]. Diese Tendenz wurde nicht nur für pastenförmige Schmierstoffe festgestellt, sondern trat auch bei Festschmierstoffen auf.

Versuche im Rahmen des Warmstauchens von Ringproben führten ebenfalls zu der obigen Erkenntnis, dass der Reibwert bei erhöhter Werkzeuggeschwindigkeit absinkt [33].

Ergebnisse die den Einfluss der Werkzeuggeschwindigkeit auf die Reibzahl über das Verhalten von Schmierstoffe überprüften, führten zu gleiche Ergebnissen [34] und zeigten, dass gegensei-

tige Beeinflussungen und Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Parametern wie Temperatur, Reibzustand und Gleitgeschwindigkeit bestehen.

2.1.7.5 Einfluss der Oberflächenfeingestalt

Allgemein kann festgehalten werden, dass die realen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück zu Beginn des Umformprozesses sehr klein sind. Diese tatsächliche Berührungsfläche nimmt jedoch mit steigender Flächenpressung zu. Die Vergrößerung der Kontaktfläche erfolgt durch plastische Deformation der oberflächennahen Schichten des weicheren Kontaktpartners. Diese plastischen Deformationen treten nicht nur zu Beginn des Umformprozesses auf, sondern bei Prozessen die durch große Relativbewegungen der Kontaktpartner in der Wirkfuge gekennzeichnet sind [9].

Während Coulomb keinen Zusammenhang zwischen wahrer Kontaktfläche und Normalkraft voraussah, konnte festgestellt werden, dass sich mit dem Einfluss der Druckspannung sich die Oberflächenfeingestalt und damit die Schmierbedingungen ändern [27].

Durch diese plastische Verformung werden die Gipfel der Kontaktoberflächen abgeflacht. Dadurch vergrößert sich der Anteil der Oberfläche der die Belastung aufnimmt. Bei Einsetzen der Gleitbewegung vermindert sich die plastische Verformung wodurch der elastische Anteil zunimmt, und dabei die Normalbelastung wesentlich zur Änderung der Reibmechanismen beiträgt [27].

2.1.7.6 Einfluss der Flächenpressung

Eine Veränderung der Flächenpressung bedingt durch die unterschiedlichen Umformgrade zwischen Werkzeug und Werkstück die von der Kontaktnormalspannung abhängt, steht im direkten Zusammenhang mit der Änderung des Reibwerts. Eine Erhöhung der Flächenpressung bewirkt zunächst eine Zunahme der wahren Kontaktfläche zwischen den Reibpartnern. Dabei konnte tendenziell festgestellt werden, dass mit der Vergrößerung der wahren Kontaktfläche eine Reduzierung des Reibwerts eintritt, wobei eine starke Abhängigkeit vom Schmierungsstatus herrscht. Bei Untersuchungen des Napffließpressens zeigte sich, dass mit größer werdender Flächenpressung eine kleinere Reibzahl ermittelt wurde [35].

2.1.7.7 Einfluss der Oberflächenvergrößerung

Bei der Berührung zweier Körper kann sich aufgrund der Rauheit der Oberflächen die Größe der wahren Kontaktfläche im Vergleich zur Querschnittsfläche des kleineren Reibpartners deutlich unterscheiden.

Bei den Verfahren der Massivumformung treten in Abhängigkeit vom Prozess sehr große Oberflächenvergrößerungen auf die während des Umformvorgangs immer neue, zum Teil erst durch

das Umformen neu gebildete Oberflächen in der Wirkfuge miteinander in Berührung bringt. Dadurch ergeben sich Gleitverhältnisse, wie sie für Einlaufvorgänge typisch sind [9]. Untersuchungen zeigten, dass mit größer werdendem Oberflächenverhältnis und größerer Flächenpressung eine kleinere Reibungszahl ermittelt wird, wenn der Schmierstofffilm sich ebenfalls ausdehnt [36].

Verschiedene Verformungen der Reibpartner führen zu Strukturveränderungen der Oberfläche. Wenn sich die Kontaktfläche vergrößert, kann sie weniger Schmierstoff aufnehmen und es entsteht außerdem eine neue Oberfläche, die nicht geschmiert ist. Das verschlechtert im allgemeinen die Schmierbedingungen. Wenn sich die Kontaktoberfläche verkleinert, wird ein Teil des Schmierstoffs aus dem Oberflächenprofil herausgepreßt. Die Ölspeicherkapazität wird zwar verkleinert, aber die zu benetzende Oberfläche verringert sich ebenfalls. Das Verhältnis zwischen dem auf der Oberfläche befindlichen Schmierstoff und der Oberfläche hat sich deshalb vergrößert und der Reibwert verringert sich [27].

2.1.7.8 Darstellung der Einflussmöglichkeiten

Aus den Betrachtungen der letzten Abschnitte geht hervor, dass folgende Prozessparameter einen erheblichen Einfluss auf die Reibungserscheinungen haben und für Untersuchungen, die mit umformtechnischen Prozessen zu haben, von Bedeutung sind:

- i) Umformtemperatur T_U
- ii) Relativgeschwindigkeit v_R
- iii) Kontaktnormalspannung σ_N
- iv) Oberflächenvergrößerung O_V

2.2 Das Gesenkschmieden

2.2.1 Der Prozess

Eine besondere Eignung des Prozesses ergibt sich durch Forderungen an den Einsatz von höherwertigen Werkstoffen, geringerer Bearbeitungsaufwand, Herstellen von Serien und hohe Bauteilfestigkeit.

Die Schmiedetemperatur liegt bei etwa 80 % der Schmelztemperatur des verwendeten Materials, d. h. etwa 500°C bei Aluminiumlegierungen und 1200°C bei unlegierten Stählen.

Der Gesenkschmiedeprozess ist ein Umformverfahren zur Herstellung von Schmiedeteilen in hohen Stückzahlen. Die Aufbringung des Schmiermittels erfolgt auf das Werkzeug und ein erwärmter Rohling, der schon in etwa die Form bzw. die Größe des späteren Schmiedeteils

haben sollte (Formgebung erfolgt möglichst nahe an der Fertigungskontur), wird in das Untergesenk gelegt. Von oben schlägt das Obergesenk auf den Rohling und formt ihn zum gewünschten Schmiedestück. Für den Umformvorgang können mehrere Arbeitstakte nötig sein (siehe Abbildung 2.8).

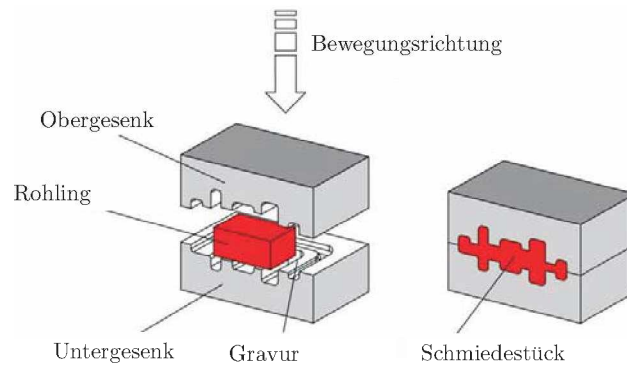


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Gesenkschmiedeprozesses.

Die Form der Schmiedestücke wird als Negativ in das Ober- bzw. Untergesenke nach unterschiedliche Verfahren gefertigt. Die Gesenke unterscheiden sich nach der Anzahl der Teilungen in eine oder mehrere *Teilfugen*. Die Anzahl in einem Gesenkblock enthaltenen Gravuren führt zur Gliederung in *Ein- und Mehrstufengesenke*. Bei *Vollgesenken* ist die Gravur unmittelbar im Gesenk eingearbeitet und bei *Einsatzgesenken* werden die Gravuren durch Gesenkeinsätze im Gesenkhalter befestigt [37].

Nach dem Schmiedevorgang muss im Allgemeinen noch der aus überstehendem Material entstandene Grat entfernt werden. Die Formgebung für die Gravuren in den Gesenkböcken erfolgt mit Hilfe von Computersimulationen. Dabei wird das spezifische Fließverhalten des jeweiligen Materials simuliert, um der Entstehung von Strukturfehlern im Schmiedestück vorzubeugen.

Die wesentlichen Vorgänge im Gesenk lassen sich mit zunehmendem Kraftbedarf in *Stauhen* (Höhenänderung ohne Gleitungen an den Gesenkwänden) *Breiten* (Stofffluss quer zu Werkzeugrichtung, hohe Reibung und Umformkräfte) und *Steigen* (Fließwiderstand im Gratspalt muss größer sein als jener für die Bewegung des Werkzeugs) einteilen.

Beim Stauchen geht man davon aus, dass der Werkstofffluss immer in der kürzesten Richtung der einwirkenden Stauchkraft ausweicht. Der Gratspalt hat eine wichtige Funktion bei der Beeinflussung des Fließwiderstandes zur vollständigen Gravurausfüllung. Das Gratverhältnis b/s das sich aus dem Verhältnis der Gratdicke s und der Breite des Gratsteiges b ergibt, ist eine maßgeblichen Größe für den Widerstand gegen das austretende Material.

Die Gesenkschmiedemaschinen unterscheiden sich durch die Art der Kraftaufbringung und lassen sich in *arbeitsgebundene* (z.B. Gesenkschmiedehämmer), *weggebundene* (z.B. Kurbelpressen, Kniehebelpressen) und *kraftgebundene* (z.B. Hydraulische Pressen) Maschinen einteilen.

Ein weiteres wichtiges Charakteristika für den Prozess ist der geringe Verlust an teuren Werkstoff da die Formgebung im Gesenk nahe, bis ganz an der Fertigungskontur erfolgt. Das Verfahren ist hinsichtlich einer hohen Werkstoff- und Formvielfalt, die unter optimaler Anpassung nahezu unbegrenzt geeignet ist, anwendbar.

Die wichtigsten Einflussgrößen auf den Stofffluss im Gesenk sind die Geometrie (Bauteil und Gratspalt), Tribologisches System, Umformgeschwindigkeit und -temperatur und Werkstoffeigenschaften. Dabei werden durch den Stofffluss die Formfüllung, Umformkräfte und der Faser- verlauf beeinflusst.

2.2.2 Beanspruchungen der Gesenke

Analysen nach Haferkamp zeigen, dass die Standmenge der Gesenke zusätzlich von der eingesetzten Umformmaschine, vom Schmiermittel sowie von den geforderten Toleranzen des Schmiedestückes beeinflusst wird [38], (siehe Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9: Einflussfaktoren auf die Lebensdauer der Gesenke [39].

Die Schmiedestücke unterliegen einer komplexen Beanspruchung im Einsatz, die sich aus thermischen, mechanischen, tribologischen sowie auch chemischen Anteilen zusammensetzt [40, 41]. Das Zusammenwirken führt schon in einem frühen Stadium zu mechanischer Rissbildung, thermischer Rissbildung und plastischer Verformung und Verschleiß (siehe Abbildung 2.10).

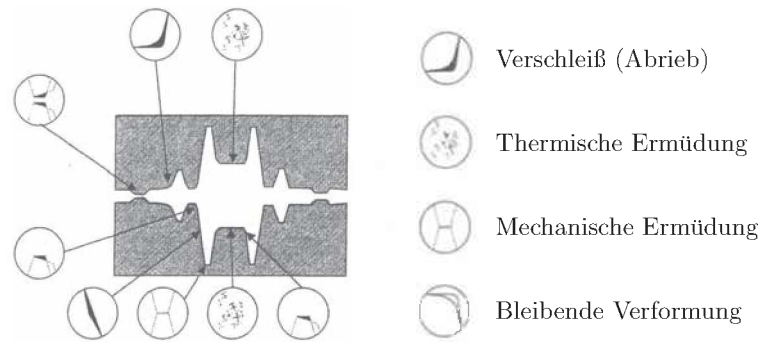


Abbildung 2.10: Darstellung der Schadensarten bei Schmiedegesenken [39].

Verschleiß tritt bevorzugt dort ein, wo bei hohen Flächenpressungen größere Mengen Werkstückwerkstoff mit hoher Relativgeschwindigkeit über die Werkzeugoberfläche gleiten und gleichzeitig ein hoher Wärmeübergang stattfindet. Bereiche wie Gravurecken und -kanten werden besonders beim Gesenkschmieden belastet. Als Verschleißmechanismen wurden immer wieder Abrasion, Adhäsion und Oberflächenzerrüttung beobachtet; der Einfluss tribochemischer Reaktionen war von untergeordneter Bedeutung.

Eine Einteilung der *thermischen Beanspruchung* für die Gesenke kann wie folgt durchgeführt werden [39]:

- i) Wärmedauerbelastung durch die Gesenkgrundtemperatur (200-300°C)
 - a) bei jedem Schmiedezyklus eingebrachte Energie
 - b) zwischen zwei Schmiedezyklen durch Wärmeleitung und Kühlung abgeführte Wärmemenge
 - c) Stabilisierung nach einigen Zyklen
- ii) Thermische Wechselbelastung (Thermische Ermüdung)
 - a) Kontakt mit dem Schmiedegut
 - b) Abkühlung (u.a. durch aufgespritzten Schmierstoff)

Besonders an den Randschichten der Gesenke treten sehr hohe thermische Wechselbelastungen auf.

Die *mechanische Beanspruchung* von Schmiedegesenken variiert örtlich und zeitlich. Während zu Beginn des Schmiedevorganges zumindest die Fließspannung des Werkstückstoffes aufgebracht werden muss um die Umformung einzuleiten, steigt mit zunehmender Gravurfüllung die aufzubringende Spannung an. Durch hohe Relativbewegungen zwischen dem Werkzeug und dem sich plastisch verformenden Schmiedestück werden tribologische Beanspruchungen hervorgerufen [42].

Teils erhebliche *chemischen Beanspruchungen* der Werkzeugoberfläche ergeben sich aus den Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Schmiedestück, Zwischenschicht und Umgebung, wobei die Gesenkoberflächen mit der Schmierstoffschicht verändert werden können (oxidieren oder durch chemische Reaktionen).

Die aus dem Kontakt zum Schmiedegut und dem anschließenden Aufsprühen des Kühlschmiermittels resultierende Temperaturwechselbeanspruchung führt über die Bildung netzwerkartig ausgebildeter Risse zu Oberflächenschäden, die ideale Ausgangspunkte für weitere Werkzeugschädigungen sein können. Eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit, also ein hoher Widerstand des Warmarbeitsstahles gegen thermische Ermüdung, ist eine gute Voraussetzung für eine nur geringe Schädigung der Gesenke. Eine hohe Warmstreckgrenze, hohe Anlassbeständigkeit, ein gutes Zähigkeitsverhalten sowie, eine hohe Wärmeleitfähigkeit sind weitere wichtige Eigenschaften, die die Temperaturwechselrissbildung stark unterdrücken [39].

2.2.3 Warmarbeitsstähle für Schmiedegesenke

2.2.3.1 Anforderungen

In Abbildung 2.1 erfolgt eine Darstellung der wichtigsten Forderungen an die Werkstoffe von Schmiedegesenken.

Tabelle 2.1: Anforderungen für den Werkstoff

Eigenschaften	Anmerkungen
Hohe Wärmeleitfähigkeit	Abfuhr der Wärme aus dem Randbereich (Kontaktbereich des Schmiedestücks) in das Innere des Gesenkes.
Hohe Warmfestigkeit, -Zähigkeit	Hohe Spannungsbeanspruchungen und Temperaturen bei der Überwindung der Fließspannung des Schmiedestücks.
Hohe Härtetemperatur	Um Gesenkschädigungen durch den Einfluss thermischer Beanspruchung auf das Gefüge an der Randschicht zu unterbinden.
Hohe Temperaturwechselbeständigkeit	Ständige Wechselbeanspruchungen der Temperatur durch den Kontakt mit dem heißen Schmiedestück und durch die Kühlung des Schmiermittels
Hoher Warmverschleißwiderstand	Verschleißende Beanspruchung der Oberfläche durch den Schmiedewerkstoff an empfindlichen Bereichen.

Die genannten Anforderungen lassen sich hinsichtlich wirtschaftlicher und funktioneller Betrachtung bestens durch die Verwendung von Warmarbeitsstählen realisieren die im folgenden Abschnitt genauer betrachtet werden.

2.2.3.2 Eigenschaften

Durch die hohen Kontakttemperaturen der Gesenke mit dem Werkzeugwerkstoff treten unvermeidbare Anlasseffekte auf der Gesenkoberfläche auf, die zu einem deutlichen Härteverlust führen. Derartige Werkzeugschäden lassen sich vermeiden, wenn die Wärme aus dem Randbereich gut in das Innere des Gesenks durch eine *hohe Wärmeleitfähigkeit* abgeleitet werden kann.

Die Schmiedegesenke müssen beim Umformvorgang die Fließspannung des Schmiedegutes überwinden und werden dabei einerseits hohen Temperaturen und vielfachen dieser Spannung ausgesetzt wodurch eine *hohe Warmfestigkeit* für die Warmarbeitsstähle zwingend erforderlich ist (siehe 2.11).

Thermische Beanspruchung führt im Gefüge der Randzonen vom Warmarbeitsstählen zu Modifizierungen die durch eine hohe Anlassbeständigkeit (*hohe Härtetemperatur*) verringert werden.

Eine hohe *Temperaturwechselbeständigkeit*, also ein hoher Widerstand des Warmarbeitsstahles gegen thermische Ermüdung, ist eine Voraussetzung für geringe Schädigung der Gesenke. Ebenso *hohe Warmstreckgrenze*, *hohe Anlaßbeständigkeit*, ein *gutes Zähigkeitsverhalten* sowie eine *hohe Wärmeleitfähigkeit* sind weitere wichtige Eigenschaften, die möglichen Temperaturbedingten Rissinitiationen entgegenwirken.

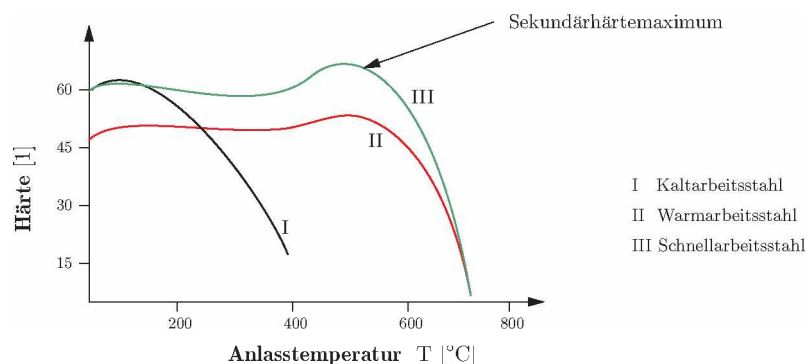


Abbildung 2.11: Anlasstemperatur für unterschiedliche Werkstoffe. Unlegierte Stahlsorten „Schwarz“ zeigen im Vergleich zu Warmarbeitsstählen „rot“ und Schnellarbeitsstählen „grün“ keine ausgeprägten Hochtemperatureigenschaften.

Chrom, *Molybdän* und *Vanadin* sind die Hauptlegierungselemente. *Nickel*, *Silizium* sowie *Wolfram* und *Kobalt* dienen der Einstellung spezifischer Werkstoffeigenschaften. Das Legierungselement *Chrom* fördert die Einhärtbarkeit der Stähle. Es beeinflusst das Umwandlungsverhalten der

Stähle in der Weise, dass sie im Warmbad gehärtet werden können. Diese milde Abschreckung der zu härtenden Werkzeuge sorgt dafür, dass Werkzeuge mit schwierigen Konturen ohne große Verzugsrisiken gehärtet werden können. In Verbindung mit *Kohlenstoff* bildet *Chrom* zusätzlich Carbide, die die Härte und den Verschleißwiderstand des Stahls steigern.

Wolfram, *Molybdän* und besonders *Vanadin* werden als Carbiddbildner bezeichnet. Sie verbessern den Verschleißwiderstand erheblich. Weiterhin sind diese drei Legierungselemente auch für eine hohe Warmfestigkeit und Aufrechterhalten eines Hochtemperaturgefüges durch Einschränkungen von Diffusionsvorgängen verantwortlich. *Nickel* fördert die Durchhärbarkeit der Stähle und steigert die Zähigkeit; analog führt *Silizium* zu erhöhter Zunderbeständigkeit.

Bei legierten Stählen (Warmarbeitsstählen) ist die Wärmeleitfähigkeit aufgrund der hohen Legierungsgehalte geringer als für unlegierte Stahlsorten.

2.2.3.3 Warmarbeitsstahl W-302

In Tabelle 2.2 findet sich eine Aufstellung der wichtigsten Vor- und Nachteile sowie das Legierungsprofil für den Warmarbeitsstahl W302. Daneben besitzt der Stahl ausreichende Warmfestigkeit und Zähigkeiten die eine ausreichende Modellierung der praxisnahen Versuche zur Charakterisierung der Schmiermittel für das Gesenkschmieden ermöglichen.

Tabelle 2.2: Aufbau und Anforderungsprofil für den Warmarbeitsstahl W302 (1.2344)

W302 (1.2344)	Eigenschaften/Legierungselemente	Gehalt	
Chemische Zusammensetzung	C	0,40	%
	Mn	1,00	%
	Cr	0,40	%
	Mo	5,03	%
	V	1,40	%
	W	1,00	%
Vorteile	hohe Warmhärte guter Verschleißwiderstand bei hohen Temperaturen		
Nachteile	heißbrissanfällig bedingt wasserkühlbar		

Die Vorgaben zur Fertigung des Stahls W302 hinsichtlich einer festgelegten Zusammensetzung und Bezeichnung 1.2344 sind nach ISO 4957 geregelt.

2.2.4 Aluminium Schmiedelegerungen

Neben Stahl werden vor allem Aluminiumlegierungen verwendet, wenn das Eigengewicht des Schmiedeteils niedrig gehalten werden soll. Einsatzgebiet von Schmiedeteilen aus Aluminium sind z.B. der Flugzeugbau und Stromklemmen für den Hochspannungsleitungsbau. Außerdem finden NE-Metalle/Legierungen wie Titan & Ti-Legierungen, Kupfer/Messing und Magnesiumlegierung Anwendung. Da in der vorliegenden Arbeit Knetlegierungen zum Einsatz kommen werden im Folgenden kurz die wichtigsten Eigenschaften näher beschrieben.

2.2.4.1 Eigenschaften von Reinaluminium

Eine Darstellung der wichtigsten Eigenschaften für Reinaluminium erfolgt in Tabelle 2.3, wobei Eigenschaften für das Umformvermögen berücksichtigt wurden.

Tabelle 2.3: Physikalische Eigenschaften von Aluminium

Eigenschaft	Beschreibung	
relative Atommasse	26,98154	mol
Gittertyp	kfz	
Gitterkonstante	0,401496	nm
Dichte [ρ]	2,6989	g/cm ³
Stapelfehlerenergie	$200 \cdot 10^7$	J/cm ²
Mittlerer linearer Ausdehnungskoeffizient α (20°C und 100°C)	$23,6 \cdot 10^{-6}$	1/K
Elastizitätsmodul E	66,6	GPa
Schubmodul G	25	GPa
Schmelztemperatur	660	°C
Aktivierungsenergie Selbstdiffusion	120	kJ/mol
Querkontraktionszahl ν	0,35	
Wärmeleitfähigkeit χ	37,67	m/ $\Omega \cdot$ mm ²

2.2.4.2 Eigenschaften und Anforderungen von Knetlegierungen

Aluminiumwerkstoffe werden in Knet- und Gusslegierungen unterschieden wobei bei den Knetlegierungen die plastische Verformbarkeit im Vordergrund steht. Der Legierungsgehalt bei den Knetlegierungen kann sich bei einzelnen Legierung von 1 - 2 % , bis zu 6% bis 8% erstrecken. Abbildung 2.4 gibt einen Überblick über die Vielzahl der Legierungen die zur Verfügung stehen.

Tabelle 2.4: Schematischer Aufbau der Aluminiumknetlegierungen (EN AW, Reihenbezeichnung bezieht sich auf Normung nach DINEN 573.2)

Legierungselemente	Knetlegierung	
Fe	Al Fe Si (1xxx, 8xxx)	Naturharte Legierungen
	Al Mg (5xxx)	
Si	Al Si (4xxx)	
	Al Mn (3xxx)	
Mn	Al Mg Mn (5xxx)	
	Al Zn (7xxx)	
Mg	Al Mg Si (6xxx)	Aushärtbare Legierungen
Zn	Al Cu (Si, Mn) (2xxx)	
	Al Cu Mg (2xxx)	
Cu	Al Zn Mg (7xxx)	
	Al Zn Mg Cu (7xxx)	
	Al Cu (Mg) Li (2xxx)	

Aluminiumlegierungen werden zudem in *aushärtbare* und *nichtaushärtbare* bzw. naturharte Legierungen unterteilt, je nachdem ob eine Änderung der Verfestigung durch die Wirkung von Legierungselementen erreicht werden kann. Daher können Fremdatome als Störungen im Gitter als verfestigend wird. Von Bedeutung ist ob die Fremdatome gelöst oder in Form von fein verteilten Ausscheidungen vorliegen die eine plastische Verformung in verschieden starkem Ausmaß behindern [43]. Dementsprechend wird die Legierungsverfestigung unterschieden in:

- i) Verfestigung durch Mischkristallbildung (nichtaushärtbare Legierung)
- ii) Verfestigung durch Ausscheidung von gelösten Bestandteilen (aushärtbare Legierungen)

Durch die Bedeutung von Al-Knetlegierungen auf vielen Gebieten der Technik ist herausragend, in Tabelle 2.5 sind die wichtigsten Anforderungen an die Al-Knetlegierungen zusammengefasst.

Tabelle 2.5: Wichtige Anforderungen von Al-Knetlegierungen

Eigenschaft	Beschreibung
Festigkeitseigenschaften	Für die verschiedenartigsten Anwendungen stehen genormte Aluminiumwerkstoffe mit Festigkeitseigenschaften (Mindestzugfestigkeiten von etwa 60 N/mm ² bis etwa 600 N/mm ²) zur Verfügung.
Umformbarkeit	Eine gute Umformbarkeit ermöglicht die Herstellung verschiedenster Formen, z.B. von Profilen und Rohren, mit nahezu beliebig komplizierten Querschnittsformen durch die Verfahren des Kalt- und Warmumformens.
Dichte	Die Dichte des Aluminiums beträgt mit 2,7 g/cm ³ nur etwa ein Drittel der Dichte des Stahls. Bei Entwicklung geeigneter Legierungen, wie z.B. Aluminium-Lithium-Legierungen, kann die Dichte nochmals weiter gesenkt werden.
Beständigkeit	Eine gute chemische Beständigkeit durch die Bildung festhaftender Deckschichten ergibt sich eine hervorragende Wartungsfreundlichkeit von Aluminiumkonstruktionen
Leitfähigkeit	Elektrische und thermische Leitfähigkeit insbesondere bei Reinaluminium d.h. wichtige für Anwendungen in der Elektrotechnik

2.2.4.3 Eigenschaften der Knetlegierung AA 2618

In Tabelle 2.6 werden der grundlegende Aufbau und relevante Kenndaten angegeben die für umformtechnische Prozesse von Bedeutung sind.

In Abbildung 2.12 erfolgt eine Darstellung der Fließkurven für unterschiedlich Umformtemperaturen bei Dehnraten $\dot{\epsilon}$ von 0, 1 und 10. Daraus lassen sich Feststellungen für den Schmiedeprozess, hinsichtlich benötigter Kraft und Umformtemperatur in Abhängigkeit der Dehnrates folgen.

Tabelle 2.6: Eigenschaften und Zusammensetzung der Al-Knetlegierung AA 2618

	Eigenschaft	Werte		
Zusammensetzung	Al	93,70	%	
	Si	0,18	%	
	Cu	2,30	%	
	Mg	1,60	%	
	Fe	1,10	%	
	Ni	1,00	%	
	Ti	0,07	%	
Mechanische Eigenschaften	Fließspannung σ_F	370	MPa	25 °C
	Abscherfestigkeit	260	MPa	25 °C
	Bruchdehnung	1000%	kJ/mol	
	Zugfestigkeit	400 - 460	Mpa	25 °C
	Elastizitätsmodul E	70 - 80	MPa	25 °C
	Ermüdungsfestigkeit	125	MPa	25 °C

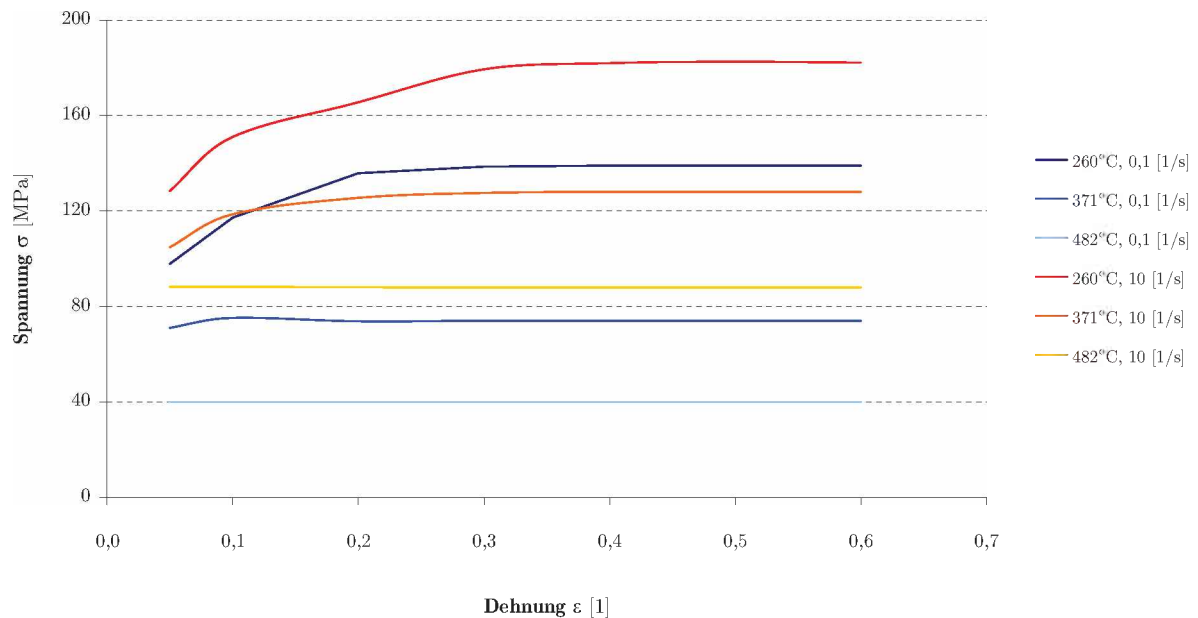


Abbildung 2.12: Fließkurve AA 2618 für unterschiedliche Dehnraten und Umformtemperaturen (aus DEFORM Datensatz).

Kennzeichen der 2xxx Legierungsgruppe sind Festigkeitsteigerungen in den Bereichen von 310 bis 440 N/mm^2 durch Aushärtung. Daher erfolgt nach dem Schmieden eine für den Werkstoff und dem Kunden angepasste Aushärtung.

In Abhängigkeit von der Zusammensetzung zeigt die Legierung bevorzugt Kalt- oder Warmaushärtung wobei folgende technologische und metallkundliche Feststellungen für die jeweiligen Elemente erfolgen kann [43]:

- i) Die in der Legierung vorhandenen Fe-Beimengungen unterbinden die Kaltaushärtung, wobei ein kleiner Mg-Zusatz die Kaltaushärbarkeit wieder herstellt. Darüber zeigt sich das Mg-Zusätze bis 1,5% eine Steigerung der Festigkeit und der Dehngrenze bewirken.
- ii) Durch die enthaltenen Mg-Gehalte (Abbildung 2.13 (b)) tritt der Al-Mischkristall ins Gleichgewicht mit der ternären Phase Al_2CuMg , die gemeinsam mit $(\theta \text{ Al}_2\text{Cu})$ das Aushärtegeschehen bestimmt.
- iii) Zusätze von Silizium (0,5 - 1,2%) erhöhen die Geschwindigkeit der Warmaushärtung durch Bildung von Mg_2Si wobei eine direkte Begrenzung durch den Mg-Gehalt von 1% vorliegt. Kleinere Si-Zusätze dienen wie bei der 2618 Legierung dazu, Fe-Beimengungen aus α (AlFeSi) zu binden um die Ausscheidung der ternären Phase $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ zu verhindern, die den Mischkristall entsprechende Mengen an Cu entziehen würde (Abbildung 2.13 (a)).

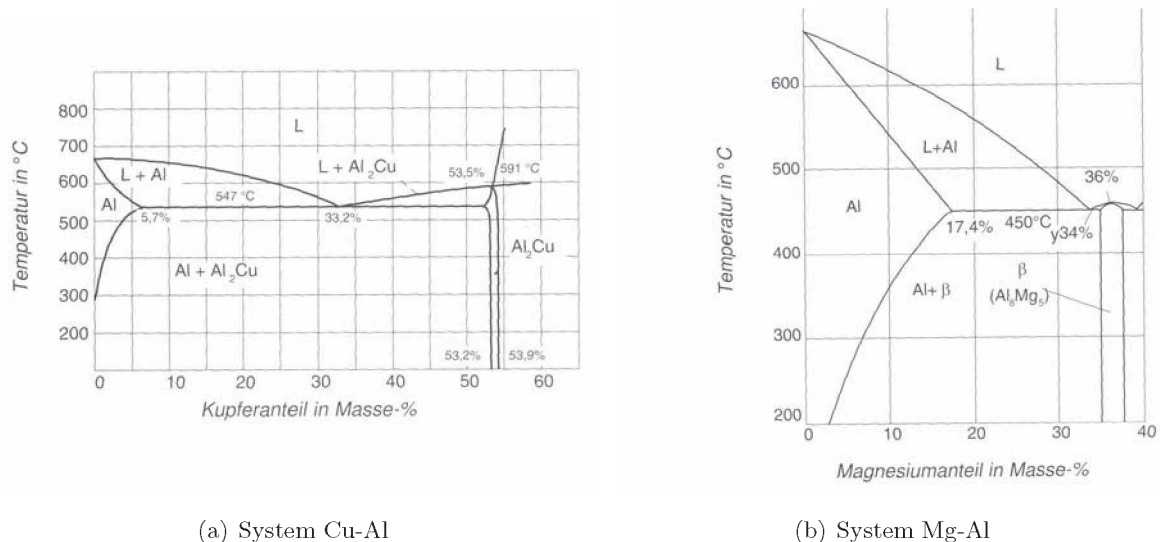


Abbildung 2.13: Binäre Hauptsysteme des Dreistoffsystems AlCuMg-Knetlegierung 2618. In Bild (a) ist das System Cu-Al dargestellt, das primär durch die Aushärtephase zur Festigkeitssteigerung Cu_2Al beiträgt, in Bild (b) ist das Zweistoffsystem Mg-Al angeführt.

2.3 Schmierstoffe

2.3.1 Anforderungen und Wirkung

2.3.1.1 Aufgaben und Anforderungen

In Tabelle 2.7 sind die wichtigsten Anforderungen an die Schmiermittel wiedergegeben, die es ermöglichen sollen, einen weitgehend sicheren Umgang während der Arbeit zu gewährleisten.

Tabelle 2.7: Anforderung an das Schmiermittel [44]

	Anforderung	Beschreibung
Anforderungen an das Schmiermittel	keine Belästigung am Arbeitsplatz	Besonders durch verdampfende oder in sich zersetzende Schmierstoffanteile wie es durch Rauch, Geruch und physiologisch Gase und Dämpfe entstehen kann. Bei Produkten auf Wasserbasis entsteht hauptsächlich Wasserdampf.
	keine Brandgefahr	Ist ein Vorteil von Schmierstoffen auf Wasserbasis. Bei ölhaltigen Schmierstoffen können spezielle Zusatzstoffe brandhämmend wirken.
	Vermeidung von Umweltbelastungen	Tritt meist bei der Verlustschmierung auf und sollte dem Prozess best möglichst angepasst sein und sollen nach Möglichkeit eine einfache betrieblichen Entsorgung gewährleisten.
	einfache Aufbringung	Gewährleistet eine wirtschaftliche Aufbringung unter Berücksichtigung moderner Arbeitsplatzverhältnisse als auch der Einsatz automatisierter Applikationsmethoden.
	sauberes Arbeiten	Aspekte aus arbeits- sowie industriehygienischer Sicht die durch wasserhaltige, insbesondere bei grafitfreien Schmierstoffen vorliegen.
	bakteriologische Resistenz	Um mikrobakteriologische Angriffe (Pilze oder Bakterien) bei Schmierstoffen vorzubeugen werden spezielle Additive hinzugegeben um zeitliche Resistenz zu erhöhen. Besonders anfällig sind Schmiermittel auf Wasserbasis welche entsprechend gelagert werden sollten.

Zielstellung der Gesenkschmierung ist es, den Fertigungsfluss aufrechtzuerhalten sowie eine gute Schmiedeteilqualität und eine hohe Gesenkstandmenge abzusichern, die von einer Vielzahl von Parametern abhängt. In Tabelle 2.8 erfolgt eine Darstellung und Erklärung der wichtigsten Parameter die für das Gesenkschmieden von Bedeutung sind.

Tabelle 2.8: Anforderung der Schmiermittel an den technologischen Prozess beim Gesenkschmieden [44]

	Anforderung	Beschreibung
Anforderungen für den technischen Prozess	gute Schmiereigenschaften	Um den Werkstofffluß zu optimieren, genaue Füllung der Gravuren begünstigen und den Werkzeugverschleiß an Stellen mit hoher Relativbewegung und großen Flächenpressungen vermindern und die Umformkraft herabzusetzen.
	gute Trenneigenschaften	Soll das Loslösen des Werkstücks nach der Umformung aus dem Gesenk begünstigen und das Kleben verhindern.
	gute Treibwirkung	Dabei werden durch Entwicklung eines meist durch Pyrolyse von Schmierstoffanteilen entstehenden Gases hohe Gasdrücke im Gesenk die aufgebaut werden und neben der mechanischen Trennwirkung der Schmierstoffschicht wird auch das Kleben bei tiefen Gravuren vermieden.
	Kühl- und Isolierwirkung	Bei hoher thermischer Werkzeugbelastung ist beim Schmierstoffauftrag eine Werkzeugkühlung erwünscht, die vor allem durch Schmierstoffe auf Wasserbasis erreicht wird. Eine Isolierwirkung der Schmierstoffschicht durch Verminderung des Wärmeübergangs vom Werkstück auf das Gesenk während des Umformvorgangs ist erwünscht, wird aber mit üblichen Schmierstoffen nur in bescheidenem Maße erreicht.
	keine Korrosion	An Werkzeuge und anderer Maschinenteile.
	keine Rückstandsbildung	Versteht man den Schmierstoffaufbau in den Gesenken bei längerer Verwendung des Mediums.
	keine Neigung zum Dieseleffekt	Führt zur Werkzeugzerstörung vor allem bei tiefen Gravuren.
	Ausbildung des Schmierfilms	schnelle Ausbildung eines gleichmäßig dicken und geschlossenen Oberflächenfilms mit guter Anpassung an die jeweils herrschenden Gesenkttemperaturen
	gleichmäßige Benetzung	Gleichmäßige Benetzung der Oberfläche auch bei hohen Gesenkflächentemperaturen; gute Benetzung auch in geometrisch schwierigen und schwer zugänglichen Gravuren
	hohe thermische Stabilität	Bei der Warmumformung von Stahl beträgt die Oberflächentemperatur der Gesenke zwischen 100 bis 400°C, wobei der Bereich um 250°C der am häufigsten verwendete ist. Daher ist bei der Umformung bei Werkstofftemperaturen von 1200°C eine Temperatur der Schmierfilmschicht zwischen 750 bis 800°C zu rechnen. Bei Prozessen der Halbwarmumformung ist bei kurzen Taktzeiten und infolge geringer thermischer Belastung eine Temperatur der Schmierfilmschicht bei weniger als 450°C erwarten

2.3.1.2 Verhalten und Wirkung von Schmierstoffen

Die Wirkung der Schmierung der Schmierstoffe in der Wirkfuge zwischen Werkstück und Werkzeug beruht auf einer Reihe unterschiedlicher Effekte:

- i) Verbesserung der Gleiteigenschaften durch die geringe Scherfestigkeit der Schmierstoffschicht
- ii) Physikalische Absorption von den Schmierstoff zugesetzten Additiven
- iii) Gehemmte chemische Reaktion des Schmierstoffs mit der Reiboberfläche
- iv) Adhäsion zwischen den Reibpartnern

Der Einfluss des Schmierstoffes auf den Reibungszustand steht in engem Zusammenhang mit der Relativgeschwindigkeit, der Flächenpressung, der Oberflächenvergrößerung und der Umformtemperatur.

2.3.2 Allgemeines und Einteilung der Schmierstoffe

2.3.2.1 Einflüsse auf den Schmierstoff

Beim Gesenkschmieden von Metallen, wie Stahl oder Aluminiumlegierungen, entsteht eine hohe Oberflächenreibung zwischen Werkstoff und Werkzeugoberfläche. Die Verwendung von Umformschmierstoffen führt zur Verminderung der Reibung aber auch zu nachteiligen Effekten beim Schmieden. Dabei sollen durch die Schmierwirkung der Schmierstoffe folgende Ziele erreicht werden [45]:

- i) Optimale Qualität der Schmiedestücke
- ii) Hohe Gesenkstandmengen

In Abbildung 2.14 erfolgt eine Darstellung der wichtigsten Einflüsse auf die Schmierung während des Umformprozesses und stellt als Gesamtes das Tribosystem Werkstück, Werkstoff und Schmiermittel dar.

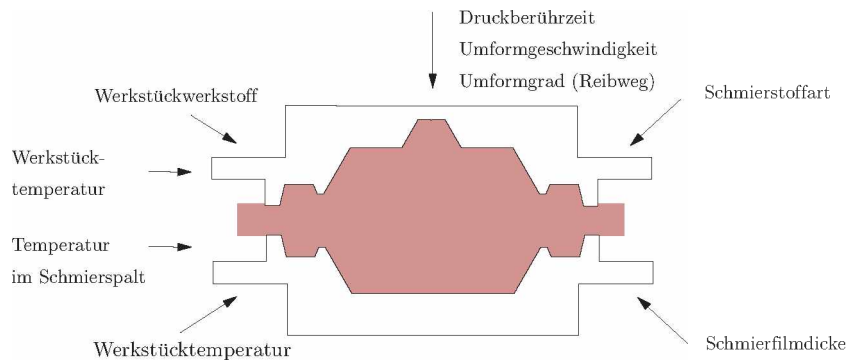


Abbildung 2.14: Einflüsse auf die Schmierung während der Umformung im Gesenk [45].

2.3.2.2 Schmierstoffe für das Gesenkschmieden

Gerade für Anwendungen der Halbwarmumformung, insbesondere beim Gesenkschmieden werden Schmierstoffe auf Flüssigkeitsbasis verwendet. Dabei stellen die wassermischbaren Umformschmierstoffe mit Abstand die Hauptgruppe der flüssigen Schmierstoffe dar.

Die Unterscheidung erfolgt nach ihrer *Farbe* zwischen *schwarzen* (grafithaltigen) und *hellen* (grafitfreien) Gesenkschmierstoffen (siehe Tabelle 2.9). Grafithaltige Schmierstoffe verschmutzen die Betriebsstätten nachhaltig und sichtbar und werden deshalb zunehmend durch helle ersetzt. Beide Schmierstoffarten bestehen aus Festschmierstoffen mit Feststoffanteilen von etwa 20 bis 40 % und Wasser als Trägerflüssigkeit [46].

Zur Stabilisierung werden Dispergiermittel, Schutzkolloide, Emulgatoren, Additive, Biozide und andere Wirkstoffe hinzugemischt.

Grafithaltige Gesenkschmierstoffe haben ein sehr breites Anwendungsspektrum und sind deshalb marktbeherrschend. Natürliches oder synthetisches Grafitpulver mit Teilchengrößen zwischen 1 und 25 μm wird sinnvoll gemischt und mit den genannten Wirkstoffen und Wasser zu einem gebrauchsfertigen Konzentrat angereichert. Der Grafitanteil liegt zwischen 10 und etwa 30 %. Gesenkschmierstoffe mit kleinen Grafitteilchen um ca. 1 μm haben auch bei zerklüfteten Gravurformen einen höheren Flächenbedeckungsgrad mit einem gleichmäßigen und gut haftenden Schmierfilm.

Wegen der guten Trennwirkung und der geringen Rückstandsbildung eignen sich feinkörnige Grafit-schmierstoffe für alle Schmiedearbeiten mit geringen Gleitwegen, besonders aber für Schmiedeteile mit kleinen Kantenradien und für Präzisionsschmiedeteile. Für gröbere Schmiedearbeiten, riefige oder gerissene Gravuroberflächen und große Gleitwege, z. B. für Fließpressoperationen, sind Grafit-schmierstoffe mit Teilchengrößen um 10 μm , teilweise bis 25 μm , besser geeignet und wesentlich niedriger im Preis. Alternativ dazu sind ölhaltige Grafit-schmierstoffe im Gebrauch [44].

Tabelle 2.9: Einteilung der Schmierstoffe in der Massivumformung für den Warm- und Halbwarmbereich

Aufbau	Trägermedium	Beschreibung
Grafitfreie Schmierstoffe (Helle Produkte)	Öl	Öl- / Wachsmischungen Öl-Emulgatormischungen
	Wasser- Ölhaltig	Emulsionen von Ölen Waschen mit Wasser
	Wasser	Lösungen/ Dispersionen von Wirkstoffen in Wasser
Grafit-schmierstoffe (Schwarze Produkte)	Wasserbasis	Dispersionen von Grafit in Wasser
	Wasser-Ölhaltig	Dispersionen von Grafit in Emulsionen
	Mineralöl	Dispersionen von Grafit in Mineralöle

Helle (graftfreie) Gesenkschmierstoffe gewinnen zunehmend an Bedeutung. Ihr Einsatzgebiet ist aber immer noch stark eingeschränkt auf überwiegend flache, wenig zerklüftete Gravuren. Andernfalls ist mit Standmengenverlusten um 30 % wegen starker Riefenbildung an der Gravuroberfläche zu rechnen. Die Entfernung der Schmierstoffreste von Maschinen und Werkzeugen ist problematisch. Über die Umweltverträglichkeit liegen noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Eine Kostenersparnis gegenüber Grafit-schmierstoffen ist nur in speziellen Anwendungsfällen nachzuweisen.

2.3.2.3 Aufbau wassermischbarer Gesenkschmierstoffe

Die Schmierstoffe auf Wasser-Basis stellen die mit Abstand größte Gruppe der Produkte dar die in der Halbwarmumformung für das Gesenkschmieden zu Anwendung kommt. Eine genaue Darstellung und Beschreibung der Wirkung der der Komponenten erfolgt in Tabelle 2.10.

Tabelle 2.10: Wichtige Komponenten bei Schmierstoffen auf Grafit-Wasser-Basis [45]

Komponente	Beschreibung
Feste und/oder flüssige Schmierstoffe	in gelöster und/oder dispergierter Form
Schutzkolloide	wirken als Suspensions- und Haftmittel, gleichzeitig Verdicker und oft mit Treibwirkung
Dispergiermittel	verhindern das Ausflocken dispergierter Festschmierstoffe und verbessern die Sedimentationsstabilität
Emulgatoren	für Öle, Fette, Wachse und synthetische Schmierstoffe
Additive	für Haftung, Benetzung, Trennung, Antischaumwirkung, Korrosionsschutz, Wasserenthärtung, Alkalireservat
Biozide	mikrobakterielle Beständigkeit (Bakterien, Pilze)
Wasser	Träger- und Verdünnungsmedium mit exzellenter Kühlwirkung

Dabei handelt es sich um Konzentrate, die für den Prozess entsprechend verdünnt werden müssen. Da die Funktion und Wirkung von Festschmierstoffen wie Grafit bekannt ist, erfolgt im Allgemeinen eine Unterschätzung der komplexen Wirkung für das jeweils verwendete Wasser.

2.3.3 Systeme der Schmierstoffaufbringung

Die erfolgreiche Gesenkschmierung ist von der gewählten Schmiertechnik abhängig. Auch ein guter Gesenkschmierstoff kann die Nachteile manuellen Schmierens mit Pinsel, Quast oder auch mit einem Handsprühgerät nur bedingt ausgleichen [47].

Dabei lassen sich folgende Möglichkeiten wie Sprühen, Duschen, Tauchen oder Fluten als Aufbringung der Arbeitsflüssigkeiten in der Massivumformung feststellen. Dabei erfolgt für die meisten Anwendungsfälle bevorzugt die Aufbringung der Schmiermittel durch Sprühen.

Bei langhübigen Gesenkschmiedehämmern kann die Sprühpistole durch einfache gesteuerte aber einstellbare stationäre Sprühdüsen abgelöst werden. Wasserverdünnbare Gesenkschmierstoffe müssen mit regelbaren Druckluftsprühsystemen aufgetragen werden.

Bei den zumeist geringen Zykluszeiten muss gleichmäßige kurz und heftig aufgeblasen, gekühlt und geschmiert werden. Diese Aufgabe erfüllen moderne Sprühautomaten mit Mehrkreissystemen und speziellen Sprühköpfen je Gesenkggravur. Alle abweichenden Sprühsysteme arbeiten mit

Verlustschmierung und den daraus entstehenden wirtschaftlichen Nachteilen auf die Schmiedeteilqualität, die Gesenkstandmengen, die Entsorgungskosten usw. [44].

Seit kurzer Zeit werden auch Verfahren zur elektrostatischen Aufbringung von Pulver auf Oberflächen die analog in der Lackiertechnik bekannt sind erfolgreich verwendet. Vorteile für die Gesenkschmierung ergeben sich durch Schmiermitteleinsparung und Verringerung der Arbeitsplatzverschmutzung da das Pulver trocken angewendet wird [48].

2.3.4 Aspekte der Schmierstoffverwendung

2.3.4.1 Schmierstoffverbrauch

Der Schmierstoffverbrauch ist u. a. vom Schmiedeteilsortiment (geometrische Form und Größe), der Anforderungsgenauigkeit an die Schmiedeteilqualität und vom Engagement der betrieblichen Mitarbeiter abhängig. Bei einem breiten Schmiedeteilsortiment, teilweise zerklüfteten Gravuren und automatisierter Schmiertechnik, beträgt der Verbrauch zwischen 3 und 5 kg Grafit-Schmierstoff je Tonne Gesenkschmiedeteile. Der höhere Verbrauch trifft für sehr große und komplexe Schmiedeteile, schlechte Schmiertechnik und lässigen Umgang mit Gesenkschmierstoffen zu. Bei einfachen und kleinen Schmiedeteilen, geringem Teilespektrum, guter Schmiertechnik und diszipliniertem Umgang mit Gesenkschmierstoffen können die genannten Richtwerte auch unterschritten werden.

2.3.4.2 Die Schmierstoffhandhabung

Dem Umgang mit Gesenkschmierstoffen wird im Schmiedealltag meist nicht die Bedeutung beigemessen die ihm in Bezug auf eine wirtschaftliche Arbeitsweise zusteht. Aber auch die örtlichen Bedingungen erfordern oftmals Kompromisse und dadurch sollen einige Grundregeln im Umgang mit Gesenkschmierstoffen eingehalten werden [47]:

- i) Gesenkschmierstoffe sind grundsätzlich frostfrei zu lagern. Das Lagern, Mischen und Auftragen der Schmierstoffe sollte bei Raumtemperatur erfolgen. Einmal angebrochene Schmierstoffbehälter müssen schnellstmöglich aufgebraucht werden. Das Verdünnen mit Wasser soll von geschultem Personal vorgenommen und regelmäßig (mindestens täglich) kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden. Zweckmäßig ist die Verwendung von Dosiereinrichtungen. Übliche Schmierstoff-Wassergemische liegen bei einem Verhältnis von 1:10.
- ii) Bei stark beschädigten, riefigen oder gerissenen Gravuroberflächen ist vorübergehend die Anreicherung des Schmierstoffgemischs mit Grafitkonzentrat hilfreich um die gewünschte Gesenklebensdauer zu erreichen. Je sauberer mit Wasser gemischt und das Schmier-system gereinigt wird, desto geringer ist die Gefahr der Fäulnisbildung. Das Schmierstoff-Wassergemisch ist durch ständiges Rühren (auch an den arbeitsfreien Tagen) in Bewegung

zu halten um das Absetzen der Feststoffe zu vermeiden. Wegen der korrosiven Wirkung der Schmierstoffe muss das gesamte Schmierstoffsystem aus rostfreiem Material bestehen.

- iii) Mit höheren Ansprüchen an die Qualität der Schmiedeteile steigen auch die Ansprüche an die Schmierungstechnik. Einmal festgelegte Mischungsverhältnisse, Sprühbilder, Ausblas- und Sprühzeiten müssen unbedingt eingehalten werden.
- iv) Die gesamte Schmiertechnik ist in die Wartungs- und Reparaturzyklen der Schmiedegruppe mit einzubeziehen oder entsprechend zu erweitern, um die hohen Gebrauchsanforderungen zu erfüllen.

Nur bei Einhaltung der wichtigsten Regeln im Umgang mit Gesenkschmierstoffen ist mit dauerhaftem Erfolg zu rechnen.

3 Experimentelles

3.1 Prüfanlage und Versuchsdurchführung

3.1.1 Anforderungen an die Versuchsanlage und Prüfmethodik

Für die Versuchsanlage und die Komponenten, die bei den vorliegenden Reibversuchen verwendet wurden, sind folgende Forderungen hinsichtlich der Konstruktion und der Beschaffung zu berücksichtigen [49]:

- i) Neben den Reibpartnern müssen die Beanspruchungen und Kontaktbedingungen nachgebildet werden.
- ii) Besonders bei Schmiedevorgängen, die modelliert werden, muss wie Pawelski [50] zeigt neben der Bereitstellung hoher Drücke und einer definierten Relativbewegung auch die Oberflächenvergrößerungen infolge überlagerter Formänderung berücksichtigt werden.
- iii) Es soll eine einfache Einstellbarkeit der prozessbedingten Einflussgrößen in einem weit definierten Bereich möglich sein.
- iv) Die Versuche müssen reproduzierbar und messtechnisch erfassbar sein.
- v) Die Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug muss variabel in relativer Bewegung zueinander erfolgen.
- vi) Die verwendeten Drücke sollen in gleicher Größenordnung gewählt werden wie aus den Ergebnissen der Simulation und zudem einen ausreichenden Umformgrad der Probekörper gewährleisten.
- vii) Die Herstellung der Probekörper für die Versuchsanlagen soll in ausreichender Menge sowie wirtschaftlich erfolgen.
- viii) Die Werkzeuge müssen einfach auswechselbar und ersetzbar sein.
- ix) Die Versuchsergebnisse sollen bei einer geringen Anzahl an Versuchen reproduzierbar sein.
- x) Die Handhabung hinsichtlich Erwärmung, Einlegen der Proben und Aufbringen des Schmiermittels soll einfach und mit vertretbarem Aufwand durchführbar sein.
- xi) Das Messsystem soll eine Möglichkeit zur einwandfreien Bestimmung von Reib- und Stauchkräften erlauben, und dabei nicht von den hohen Werkstück- und Werkzeugtemperaturen beeinträchtigt werden.

Ein besonderes Kriterium bei der Wahl des Prüfprogramms ist die Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf den realen Prozess. Daher ist es möglich durch Einhalten der angeführten Anforderungen einen Prozess möglichst realitätsnah abbilden zu können.

3.1.2 Aufbau der Versuchsanlage

Der Rotationstribometer (RT) wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik (LUT) konzipiert und realisiert, um praxisnahe Untersuchungen von Reibvorgängen beim isothermen Schmieden von Al-Legierungen durchzuführen. Durch die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), kann ein unkompliziertes Anpassen und Ändern der Prüf- und Heizprogramme für den jeweiligen Verwendungszweck in kurzer Zeit erfolgen. Die sehr einfachen Werkzeug- und Probengeometrien gewährleisten ein schnelles Arbeiten sowie eine einfache Anpassung der Maschine für den jeweiligen Versuchszweck. In Tabelle 3.1 sind die wichtigsten Merkmale der Maschine wiedergegeben.

Tabelle 3.1: Wichtige Kenndaten und Besonderheiten des Rotationstribometer

Wichtige Kenndaten		Anmerkungen
Stempelkraft	100 kN	Die Kraftaufbringung erfolgt über einen Hydraulikzylinder
Rotationsgeschwindigkeit	max 200 mm/s	Abhängig von der Drehzahl des Drehstrommotor (7,5 kW) bzw. von der gewählten Prüfanordnung
Werkstücktemperatur	max 600°C	Die Beheizung der Werkstücke erfolgt durch einen Hochfrequenzinduktor (IEW TTH8). Eine Begrenzung tritt durch die Temperaturbeständigkeit der Unteraubauten des RT auf.
Werkzeugtemperatur	max. 450°C	Begrenzt durch die Leistung von 450 W des Heizbandes
Reibweg	80 mm	Begrenzt durch die Prüfanordnung

Um einen Überblick bei der Anordnung und Darstellung der wichtigsten Anlageteile zu bekommen, erfolgt in Abbildung 3.1 eine Darstellung der Versuchsanlage. Die Steuerung der Anlage erfolgt mit Hilfe einer SPS, wobei nur der Anpressdruck des Zylinders manuell über ein Druckbegrenzungsventil (DBV) vorgegeben wird.



Abbildung 3.1: Überblick über die wichtigsten Anlagenteile. **1)** Schutzschrank mit speicherprogrammierbarer Steuerung **2)** Hochfrequenzgenerator für Induktor, **3)** Datenerfassungssystem (Messrechner), **4)** Hydraulikventilblock mit Druckbegrenzungs- und Steuerventil, **5)** Rotationstribo-meter

Eine Begrenzung der Anlage hinsichtlich des Messsystems ist für zu hohe Werkzeug bzw. Proben-temperaturen gegeben, da diese sich nachteilig auf die Messergebnisse und auf die Maschine selbst auswirken. In Abbildung 3.2 erfolgt eine Darstellung der unterschiedlichen Maschinenkomponenten des Rotationstribo-meter.

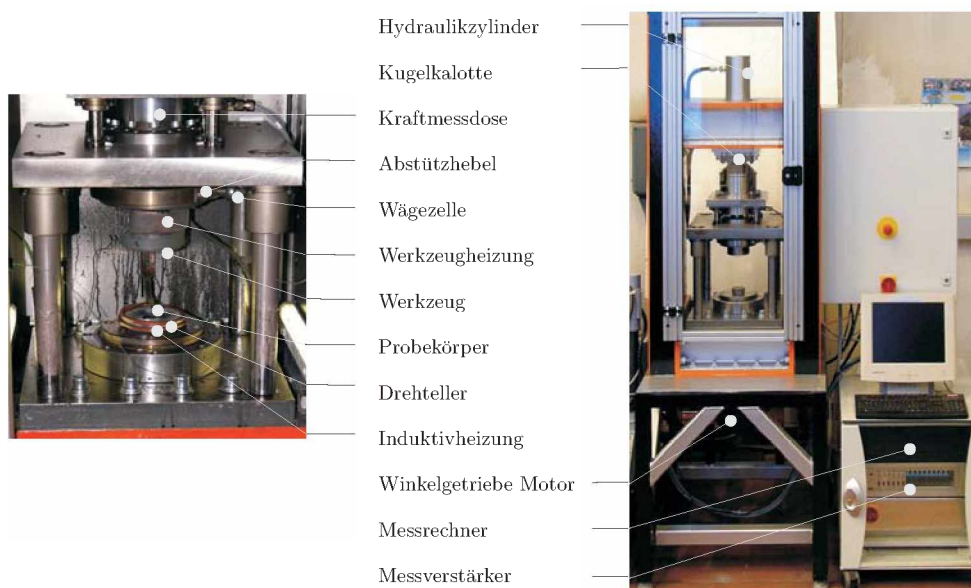


Abbildung 3.2: Überblick und Aufbau der Anlage für den Rotationstribo-meter.

Für genauere Informationen zur Maschinengestaltung, Funktionweise und Kenndaten des Rotationstribometers ist bei Markut [15] nachzulesen.

Die Einbringung der Drehbewegung erfolgt mittels eines 7,5kW Drehstrommotors und eines Winkelgetriebes von unten, während die Stauchkraft durch einen Hydraulikzylinder von oben aufgebracht wird. Die auf dem Drehteller befindliche Probe (Werkstück) überträgt das Reibmoment auf das oben angeordnete drehbar gelagerte Ringwerkzeug. Das Werkzeug stützt sich mittels eines Hebels an einer Wägezelle ab, wodurch eine saubere Messung des Reibmoments gewährleistet ist. Die Erfassung der Stauchkraft erfolgt über eine Kraftmessdose. Die Reibgeschwindigkeit wird aus der gemessenen Motordrehzahl berechnet [51]. Die Aufbringung des Schmierstoffs auf das Werkzeug erfolgt durch eine Handsprühvorrichtung.

3.1.3 Das Messsystem

3.1.3.1 Sensoren der Prüfanlage

Im Rotationstribometer werden zur Ermittlung der Normalkraft bzw. der Torsionskraft Sensoren eingebaut, die mit Dehnungsmessstreifen *DMS* ausgestattet sind.

Zur Ermittlung der Stauchkräfte wurde eine Kraftmessdose mit Zug- und Druckaufnehmer für dynamische und statische Anwendungen mit Vollbrückenausführung verwendet. Bei der Reib- bzw. Torsionskraft wurde eine Wägezelle mit hoher Querkraftstabilität in Vollbrückenausführung benutzt. Dabei kamen zwei Gelenkösen zum Einsatz, wobei eine an der Maschine und die andere beweglich am Werkzeug fixiert wurde, die zur Berechnung der Reibkraft dient. Die Rückrechnung auf das Reibmoment M_T erfolgt nach Abbildung 3.3 wie folgt:

$$M_T = F \cdot a \quad (3.1)$$

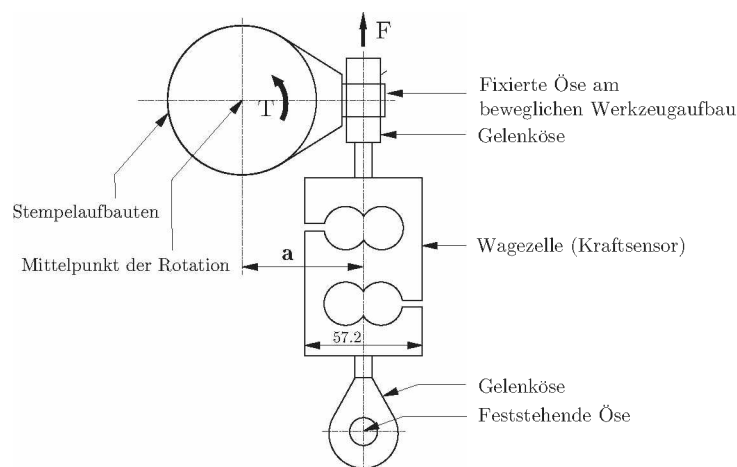


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Wägezelle im Rotationstribometer. Wobei das Torsionsmoment T über den Hebelarm a am Kraftsensor eine Kraft F hervorruft

Bevor die Kraftaufnehmer für die Versuche zum Einsatz kamen, musste eine Justierung der Kennwerte sowie eine Kalibrierung für den jeweiligen Einsatzfall erfolgen. In Tabelle 3.2 erfolgt eine Auflistung der wichtigsten Daten für die Kraftsensoren.

Tabelle 3.2: Technische Daten der Kraftmessdose und der Wägezelle

Technische Daten	Wägezelle	Kraftmessdose
Name/ Type	HBM S9	HBM U10M
Verwendungszweck	Stauchkraft	Torionskraft
Ausführung	Vollbrücke	Vollbrücke
Nennkraft	5 kN	125 kN
Genauigkeitsklasse	0,05	0,04
Nennkennwert	2 mV/V	2 mV/V

Der Triggerschalter ist an der Rückseite des RTs angebracht und dient der Aktivierung für die Aufnahme der Datenerfassung. Dabei kann über eine Fixierschraube die Position variabel eingestellt werden (abhängig von der Proben- bzw. Werkzeuggeometrie). Nachdem das Stauchwerkzeug einen bestimmten Punkt erreicht hat (vor der Stauchung des Probekörpers) erfolgt durch Umlegen des Schalters der Start der Messung (siehe Abbildung 3.4).

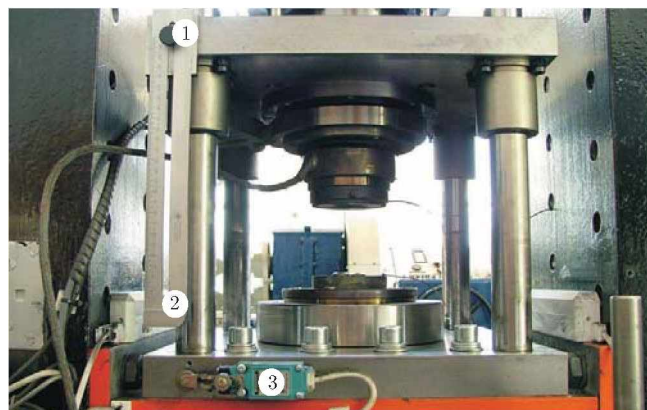


Abbildung 3.4: Der Triggerschalter an der Rückseite der Maschine: 1) Fixierschraube zum Einstellen der Position für die Aktivierung der Messung, 2) Anschlag für Näherungsschalter 3) Näherungsschalter zum Start der Messung.

Die Ermittlung des Reibweges erfolgt durch Rückrechnung der Drehzahl, die sich aus dem Sinussignal des Resolvers und der Versuchsdauer ergibt.

3.1.3.2 Schematische Darstellung der Messkette

In Abbildung 3.5 erfolgt eine schematische Darstellung der Messsensorik für die Versuchsanlage zur Ermittlung von Kraft und Geschwindigkeitsgrößen. Dabei werden die unterschiedlichen Signale von den Sensoren mittels Messverstärker (Transduktoren) in eine Gleichspannung von $\pm 5V$ für den Messrechner vorbereitet. Die Umwandlung der analogen in digitale Signale zur Erfassung der Daten für das Messprogramm, erfolgt über eine im Rechner eingebaute PCI-Steckmesskarte mit 16 analogen Eingängen.

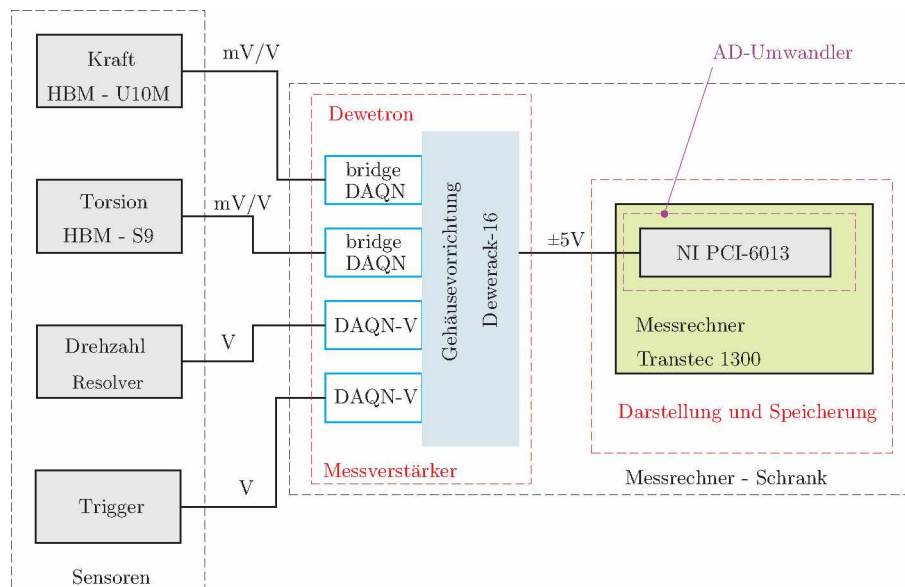


Abbildung 3.5: Schaltplan der Messsensorik für den Rotationstribometer. Zuerst werden die unterschiedlichen Signale von den Sensoren durch Verstärker in eine Gleichspannung umgewandelt, um anschließend in einen AD-Wandler die Daten für das Messprogramm zur Verfügung zu stellen.

Die Umwandlung der Kennwerte von den Kraftsensoren erfolgt über einen Gleichspannungsverstärker auf Brückenbasis. Nachdem das Messprogramm gestartet und der Trigger gedrückt wurde, wird vor der Messaufnahme automatisch ein Nullabgleich der Brückenschaltung durchgeführt, wodurch externe Einflussfaktoren ausgeschaltet und exaktere Messungen ermöglicht werden. In Tabelle 3.3 erfolgt eine Darstellung der technischen Daten für die Verstärker.

Tabelle 3.3: Technische Daten der Verstärker von *DEWETRON*

Technische Daten	DAQN -Brige	DAQN - V
Art	Gleichspannungs und Trägerfrequenzverstärker	Präzessionsspannungs- verstärker
Sensoren	DMS Sensoren, Vollbrücke	Sensoren
Eingangsimpedanz	> 100 MW	> 10 M Ω
Messbereich	$\pm 0,1$ gestuft bis $\pm 5\text{mV/V}$	$\pm 0,1$ gestuft bis $\pm 50\text{ V}$
Genauigkeit	$\pm 0,05\%$	$\pm 0,05\%$
Ausgangssignal	$\pm 5\text{V}$	$\pm 5\text{V}$

In Tabelle 3.4 erfolgt eine Auflistung der wichtigsten Komponenten der Messanlage.

Tabelle 3.4: Wichtige Kenndaten der Messanlage

Komponente	Bezeichnung	Anmerkungen
PC	Trantec 1300 (6F023370TA)	
Messgehäuse	Dewerack-16	
Messkarte	NI PCI-6013, SN: NI-778629-01	16 Bit, 200kS/s, 16 analoge Eingänge
Labview	National Instruments USA	

3.1.3.3 Das Messprogramm

Das Benutzerprogramm dient zur Erfassung der Messdaten, die von den Sensoren während der Versuchsdurchführung übertragen werden. Das Interface wurde unter Verwendung von *Lab View* (Natiaonal Instruments, USA) entwickelt.

Die Signale, die von den Sensoren der Anlage übermittelt werden, gelangen über vorinstallierte Messkarten als interpretierbare Daten für das Schnittstellenprogramm (siehe Abbildung 3.6) an den Messrechner.

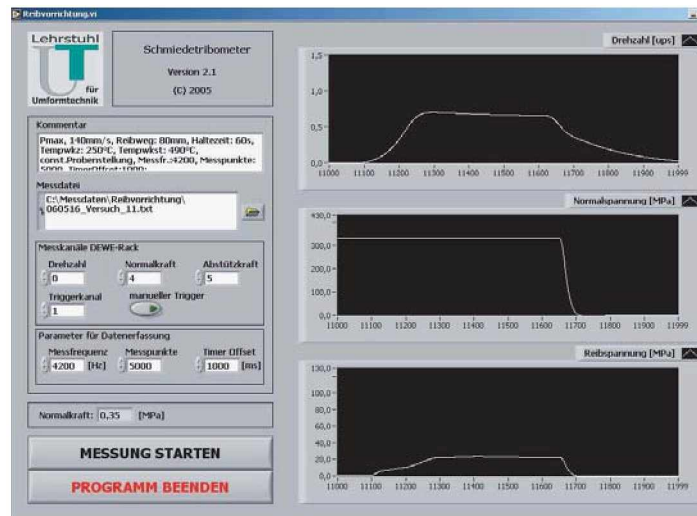


Abbildung 3.6: Benutzerschnittstelle zur Kommunikation und Darstellung der Messdaten von den Sensoren.

Die Erfassung der Messdaten erfolgt zeitbezogen, wodurch die Wegerfassung zu Versuchsbeginn nicht linear ist. Bevor die Messung gestartet wird, müssen in Abhängigkeit von den gewählten Parameter der Versuchsdurchführung folgende Einstellungen an der Benutzerschnittstelle durchgeführt werden:

Messfrequenz:

Die Taktrate (in $[Hz]$) der Datenerfassung bei der Versuchsdurchführung ist abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit. (Bei Hoher Rotationsgeschwindigkeit ist eine hohe Messfrequenz zu wählen).

Messpunkte :

Anzahl der Messpunkte die während der Messdauer erfasst werden sollen.

Timer Offset:

Verbleibende Zeit bis zum Start der Datenerfassung, wenn der Messvorgang durch den Trigger ausgelöst wurde.

In den Einstellungen der Messkanäle DEWE-Rack können Drehzahl, Normalkraft, Abstützkraft und Triggerkanal angegeben werden.

3.1.4 Der Werkzeugsatz und Probengeometrie

Die ursprüngliche Auslegung des RT war für den Ring-On-Disc-Versuch. Im vorliegenden Projekt wird davon ausgegangen, dass eine geschmierte Werkzeugoberfläche „jungfreulich“ übergleitet wird um möglichst lange Reibwege (bis 80 mm), wie sie beim Gesenkschmieden auftreten, zu

simulieren. Daher war die Aufgabe, eine entsprechende Prüfanordnung zu entwickeln und zu dimensionieren, mit der es ermöglicht wird, komplexe Vorgänge qualitativ zu erfassen.

Um eine Untersuchung für lange Reibwege zu ermöglichen, wurde eine Scheibe gefertigt, wobei vom Mittelpunkt ausgehend zwei Zylinder an dafür vorgesehene Vertiefungen eingesetzt wurden und durch Aufbringung einer Drehbewegung konnten entsprechend lange Reibwege die vom Scheibendurchmesser abhängen, simuliert werden.

3.1.4.1 Das Werkzeug

Die Ermittlung der nötigen Daten für das Werkzeug gestalteten sich relativ einfach. Durch den Projektpartner wurden Oberflächenrauheiten, Werkzeughärte sowie der Werkstoff vorgegeben die dem realen Prozess entsprechen. Dabei sollte die Beschaffenheit der Werkzeugoberfläche der von Schmiedegesenken gleichen. Die Temperaturregelung erfolgte über ein Thermoelement das direkt an der Werkzeughalterung am RT angebracht wurde. Im Vordergrund der Versuche stand eine einfache Herstellung der Werkzeuge und deren einfacher Wechsel zwischen den jeweiligen Schmierstoffkonzentrationen. Dabei wurde ein System entwickelt mit dem es ermöglicht wurde, die verschiedenen Werkzeugplatten einfach am Werkzeughalter über eine Halteschraube und dem Exzenterbolzen (Fixierung der Werkzeugplatte) zu tauschen und zu befestigen (siehe Abbildung 3.7).

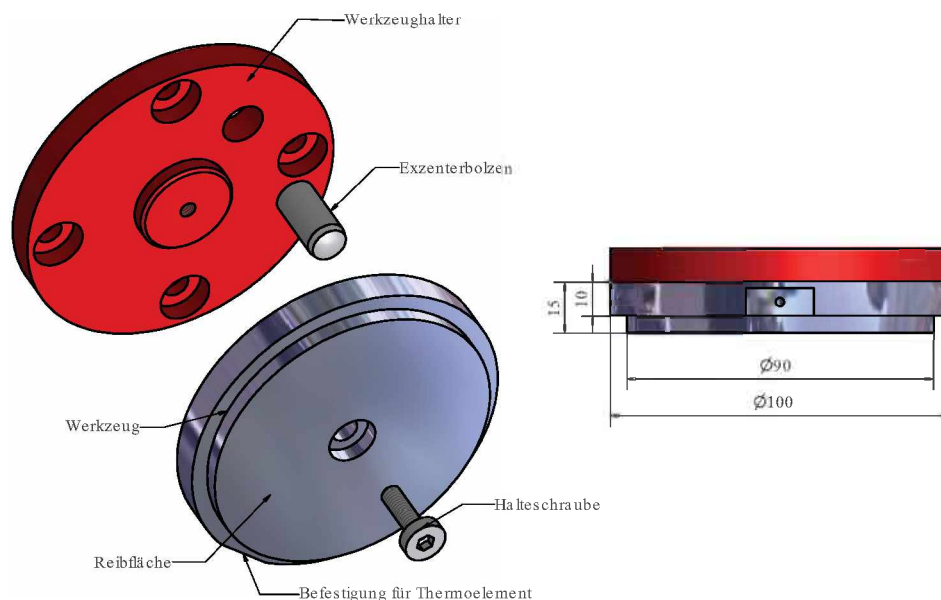


Abbildung 3.7: Darstellung der Geometrie und der Einzelteile für den Werkzeugsatz

Bevor das Werkzeug in die Anlage eingesetzt wurde, mussten die Reibflächen abgedreht und die Rauigkeiten entsprechend den Vorgaben eingestellt werden. Dadurch war eine mehrmalige Verwendung der vergüteten Werkzeuge möglich.

3.1.4.2 Probekörper und Probenhalterung

Besonders die Wahl der Materialien ist neben der Dimensionierung des Probenhalters und der Hülse wichtig. Die Vorversuche zeigten, dass besonders an den Rändern des Probentellers (Einsetzung der Probekörper) hohe Druck und Temperaturen während des Stauchvorgangs wirken, wodurch es zu Verformungen und daraus folgend zu Ungenauigkeiten bei der Messung und der Reproduzierbarkeit kam.

Daher war es nötig, eine Einsetzhülse für den Probenteller zu fertigen die zur Aufnahme der Probezylinder dient. Dabei sind an die Einsetzhülse Forderungen nach einer konstant gestauchten Fläche die durch den Absatz der Hülse realisiert wird und eine hohe Verschleißfestigkeit gestellt. Aus den geschilderten Anforderungen war es nötig, ein Zwei-Teile-System zur Aufnahme der Probezylinder zu konstruieren. Daher erfolgt die Fertigung der Hülsen aus einer Nickel-Basislegierung, wobei das Probenteller aus Warmarbeitsstahl gefertigt wurde.

Die Dimensionierung des Tellers ergab sich direkt aus der Forderung, Versuche für 80 mm Reibweg durchzuführen. Die Anpassung der Hülsen bezüglich der Höhe erfolgte mit dem Ziel einen definierbaren Querschnitt für die Versuche zu schaffen, wodurch eine Berechnung der Normalspannung ermöglicht wurde. Aus der gewählten Geometrie erfolgte eine symmetrische Anordnung zweier Proben am Probenhalter. Durch den festgelegten Querschnitt der gedrückten Fläche A_D der Hülse konnte eine Berechnung der maximalen Normalspannung von $\sigma_{N \max}$ 325 MPa durch die maximale Maschinenkraft F_{Max} von 10 kN erfolgen:

$$\sigma_N = \frac{F_{Max \ Maschine}}{2 * A_D} \quad (3.2)$$

Die Ermittlung der Geometrie für den Probezylinder erfolgte über Vorversuche, bei unterschiedlichen Druckstufen sowie durch Anpassung an die Geometrie welche für die Hülsen bzw. für den Drehteller dimensioniert wurden. Der Durchmesser wurde auf $d_0 = 10 \text{ mm}$ und die Länge des Probezylinders auf $l = 30 \text{ mm}$ festgelegt, wobei durch den Projektpartner der Werkstoff Aluminiumlegierung *AA2618* festgelegt wurde.

In Abbildung 3.8 erfolgt die Darstellung der festgelegten Maße und die schematische Zusammenstellung für Proben, Hülsen und Probenhalter.

Die Anbringung des Thermoelements für die induktive Vorwärmung erfolgte nicht am Probekörper selbst sondern am Drehteller. Aus Vorversuchen konnte die optimale Einstellung für Heizrate und Haltezeit ermittelt werden, um die gewünschte Temperatur von 480°C an den Proben zu erreichen. Die Herstellung der Probezylinder erfolgte aus Rundstangen mit Durchmesser $d_A = 22 \text{ mm}$, wobei die Probenoberfläche plangedreht wurde.

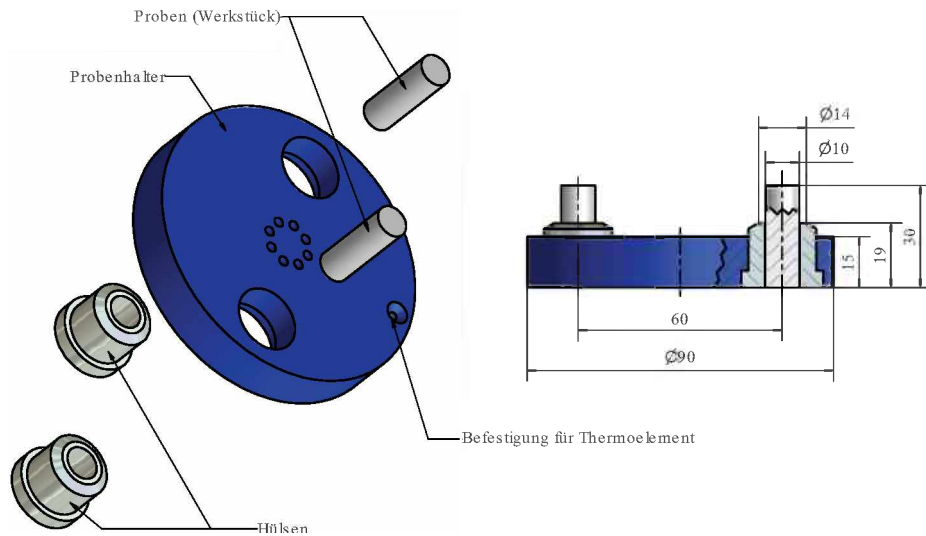


Abbildung 3.8: Darstellung der Geometrie und der Probenhalterung (Probenhalter, Hülsen und Werkstücke).

Der Werkzeugsatz stellt mit dem gewählten Prüfprogramm die zentrale Anordnung für die Reibversuche dar, wobei zusammen mit dem Messerfassungssystem die Kenngrößenermittlung für den nachzubildenden Prozess erfolgt. In Abbildung 3.9 erfolgt eine schematische Darstellung des Werkzeugsatzes für den RT.

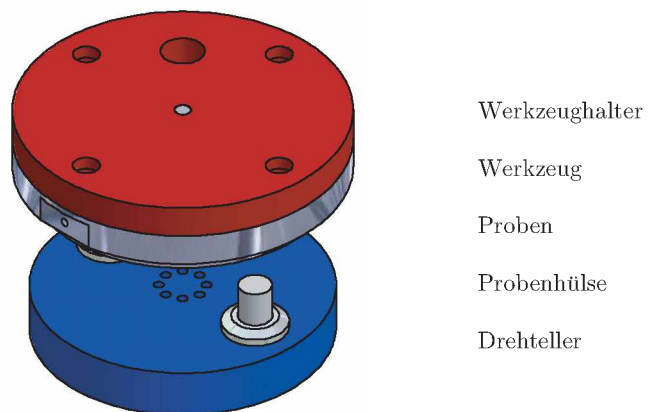


Abbildung 3.9: Darstellung des bestückten Werkzeugsatzes für die Versuchsdurchführung.

3.1.5 Festlegung des Prüfprogramms

3.1.5.1 Überblick und Beschreibung der Prüfprogramme

In Abbildung 3.10 erfolgt eine schematische Darstellung der Arbeitsfolge sowie eine Einteilung der Prüfprogramme PI, PII und PIII die zur Auswahl standen.

Beim **Prüfprogramm 1** PI kann der Verlauf der Normalspannung σ_N näherungsweise als konstant angesehen werden. Der Ablauf des Programms ist mit zwei Schritten festgelegt, wobei zuerst der Stauchvorgang durchgeführt und anschließend die Drehbewegung v_R gestartet wird. Der Geschwindigkeitsverlauf ist von der Sollgeschwindigkeit, nicht aber von der Belastung abhängig. Jedoch zeigen die Ergebnisse für den Ring-On-Disc-Versuch nach Buchner [51], dass es aufgrund der voreingestellten Regelparameter im Frequenzumrichter des Antriebsmotors, schon bei niedrigen Geschwindigkeiten und bei höheren wird während der gesamten Versuchsdauer zu keinem stationären Zustand kommt. Aufgrund des äußerst geringen Geschwindigkeitseinflusses auf die Reibzahlen kann von einer prinzipiellen Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die mit Ablauf PI gewonnen wurden, ausgegangen werden.

Beim **Prüfprogramm 2** (PII) kann im Gegensatz zum Ablauf bei PI die Reibgeschwindigkeit v_R als konstant betrachtet werden. Im Unterschied zu PI wird die Drehbewegung des Probentellers zuerst gestartet und im zweiten Schritt der Stauchvorgang durchgeführt. Weiters wurde durch Buchner [51] gezeigt, dass der Verlauf der Flächenpressung nicht nur von deren Sollwert, sondern auch von der Reibgeschwindigkeit abhängt. Im Gegensatz zur Geschwindigkeitsregelung in PI wird bei der Druckregelung in PII jedoch innerhalb der Versuchsdauer immer ein stationärer Zustand erreicht. Dies ist deshalb entscheidend, weil die Reibzahl auf Änderung der Normalspannung weit sensitiver reagiert als auf Änderungen der Relativgeschwindigkeit. Zumindest nach dem Erreichen der stationären Normalspannung kann von einer prinzipiellen Vergleichbarkeit der Kurven ausgegangen werden.

Das **Prüfprogramm 3** (PIII) wurde während der Vorversuche als ein erweitertes Prüfprogramm zu PI entwickelt, wobei die Schrittfolge (1 und 2 sowie 3 und 4) gleich zu PI ablaufen. Der Unterschied besteht darin, dass eine Trennung zwischen Stauch- und Reibvorgang stattfinden soll, mit dem Ziel eine bessere Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu schaffen und den Einfluss möglicher Störgrößen (beispielsweise der Einfluss der Oberflächenvergrößerung nach 14 mm Reibweg, die durch den Stauchvorgang entsteht), auszuschalten. Dabei erfolgte auch zwischen Stauch- und Reibvorgang eine Schmierung der Werkzeugoberfläche.

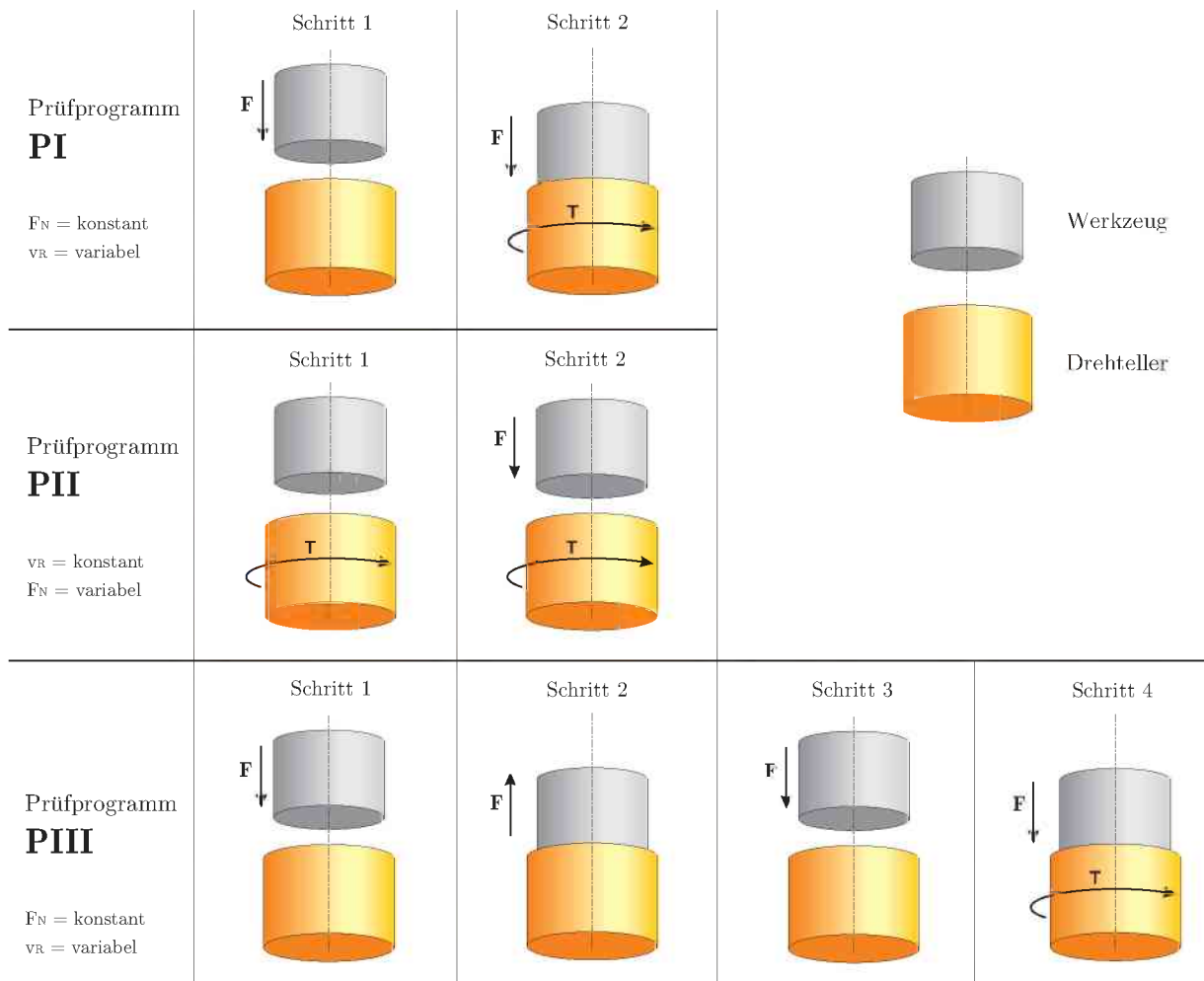


Abbildung 3.10: Schematischer Schrittfolgenablauf für die Prüfprogramme 1, 2 und 3.

3.1.5.2 Wahl des Prüfprogramms

Für die Prüfprogramme gilt, dass durch Änderung der Ablaufschritte eine nachhaltige Auswirkung auf die Messergebnisse und deren Interpretierbarkeit zu erwarten ist. Daher ist die Wahl und Gestaltung der Prüfprogramme stark von der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den realen Prozess abhängig.

Die Festlegung für das Versuchsprogramm PI (siehe Abbildung 3.10) erfolgte gemeinsam mit dem Projektpartner das sich wie folgt begründen lässt:

- i) Durch den geringen Einfluss der Geschwindigkeit über den Reibweg (Trennung der Relativgeschwindigkeit und Normaldruck) lässt sich damit eine aussagekräftige Betrachtung sowie Interpretation der Ergebnisse bei verschiedenen Druckstufen ermöglichen (Forderung LUT).

- ii) Eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei Versuchen mit hohen Geschwindigkeiten und Normaldrücken (Forderung LUT).
- iii) Durch den praxisnahen Bezug des Prüfvorgangs wird eine einfache Möglichkeit zur Beschreibung von qualitativen Vorgängen hinsichtlich langer Reibwege beim isothermen Schmieden gegeben (Forderung Pankl).
- iv) Eine dem Prüfvorgang angepasste Beurteilung und Charakterisierung der Schmierstoffe für das Gesenkschmieden.
- v) Durch den zeitgesteuerten Versuchsablauf wird es durch das Prüfprogramm PI ermöglicht, Versuche bei unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeiten und Reibwegen durchzuführen.
- vi) Genauere Regelung und Einhaltung der Reibwege (80 mm), die durch das Prüfprogramm PII nicht exakt möglich sind.

3.1.6 Der Versuchsablauf

3.1.6.1 Schritte zur Vorbereitung der Versuche

Um den Einfluss möglicher Fehler seitens des Benutzers so klein wie möglich zu halten, wurden vor jeder Versuchsdurchführung bzw. bei Änderung der Schmierstoffkonzentration folgende Schritte mit größter Sorgfalt durchgeführt:

- i) Bei der Verwendung eines neuen Schmiermittels erfolgte eine sorgfältige Reinigung der Handsprühvorrichtung um den möglichen Einfluss der Rückstände vom letzten Schmiermittel zu unterbinden.
- ii) Vor jeder Versuchsdurchführung erfolgte eine genaue Kontrolle des Thermoelements am Drehteller, sodass es durch gebrochene Kontakte zu keinem falschen Vorwärmen des Werkstücks (Probezylinder) kommen konnte.
- iii) Weiters wurden Probeteller und Hülsen nach jedem Versuch gründlich von Rückständen gereinigt und auf mögliche Beschädigungen kontrolliert.
- iv) Bei jedem Werkzeugwechsel (Änderung des Schmiermittels) musste der Einbau des neuen Werkzeugs besonders gründlich erfolgen, um Unebenheiten der Fläche die zu falschen Ergebnissen bei der Messung führen zu unterbinden.
- v) Bei jeder Versuchsdurchführung wurde auf den Kontaktflächen der Einsetzhülsen ein Trennmittel (Montagepaste *Anti-Fress*) aufgetragen um zu gewährleisten, dass es nicht zu möglichen Verschweißungen bzw. Anhaftungen kommt, wodurch das Ausschlagen der Proben aus den Hülsen erschwert worden wäre.

- vi) An der Grundplatte worauf das Drehteller eingesetzt wurde, erfolgte eine gründliche Reinigung von Anhaftungen, die durch das Trennmittel entstanden.
- vii) Einstellen der variablen Parameter (Geschwindigkeit, Reibweg, Temperatur, ...) an der SPS sowie das Einstellen der jeweiligen Druckstufe am DBV.
- viii) Vor jeder Versuchsdurchführung musste am Messrechner eine Messdatei erstellt werden und bei Änderungen der variablen Parameter, erfolgte eine Anpassung nötiger Einstellung für die Datenerfassung (Messfrequenz, Offset, ...)
- ix) Nach jeder Versuchswiederholung wurde der Probeteller an die gleiche Position zurückgestellt um Einflüsse der Unplanheit auf die Ergebnisse zu minimieren.
- x) Weiters wurde ein Versuchsprotokoll geführt, um eine Beurteilung über das Verhalten der Schmierstoffkonzentration bei den Versuchen zu dokumentieren.

3.1.6.2 Versuchsablauf

Nach der Durchführung der vorbereiteten Schritte, wurden die Probekörper in den Drehteller eingesetzt und mit anschließender Besprühung der Werkzeugfläche der Versuch durch die SPS gestartet. Die Erwärmung des Werkstücks erfolgte durch den Induktor, wobei eine Haltezeit nach Erreichen der Solltemperatur von 60 Sekunden festgelegt und im Anschluss der Versuch nach dem gewählten Prüfprogramm PI automatisch gestartet wurde.

Die Aufbringung der Stauchkraft erfolgte durch den Hydraulikzylinder und nach Erreichen einer bestimmten Position des Werkzeugs wurde die Datenerfassung durch den Trigger ausgelöst. Nach einer Sekunde wurde die Drehbewegung eingebracht, währenddessen die Stauchkraft durch einen Hydraulikzylinder weiter gehalten wurde. Die Erfassung des Reibmoments fand durch die oberhalb des Werkzeugs angeordnete Wägezelle statt, welche auf einer Seite abgestützt wird. Die Rückrechnung auf das Reibmoment erfolgt über den Hebelarm wobei das Reibmoment genau gemessen werden konnte. Die Ermittlung der Stauchkraft erfolgte durch eine Kraftmessdose. Die Reibgeschwindigkeit berechnete sich aus der gemessenen Motordrehzahl. Nachdem der festgelegte Reibweg durch die SPS erreicht wurde, hebt sich der Hydraulikzylinder automatisch und der Versuch ist beendet.

In Abbildung 3.11 sind der bestückte Probeteller und die Reibspuren am Werkzeug nach der Versuchsdurchführung dargestellt.

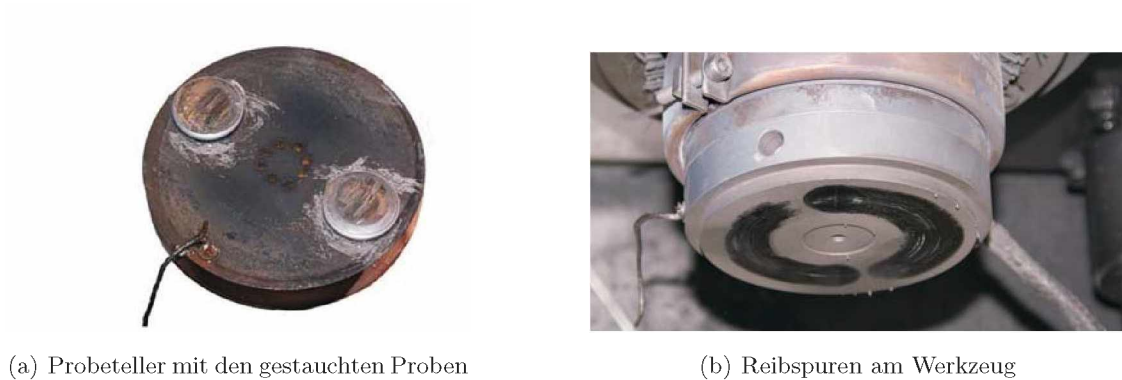


Abbildung 3.11: Werkzeugsatz nach der Versuchsdurchführung: Bild a) zeigt den Probeteller mit den gestauchten Probenpilzen die durch einen Durchschlagbolzen ausgeschlagen wurden. Bild b) zeigt deutlich die Reibspuren "dunkel" die durch Rotation des Drehtellers von den Probenkörper hervorgerufen wurden. Die "helle Flächen" zeigen die unberührte Schmierfilmschicht.

3.1.6.3 Darstellung der Fließlinien im Probenquerschnitt

Um eine Vorstellung zu erhalten wie der Fließlinienverlauf im Querschnitt einer Probe aussieht wurde wie in Abbildung 3.12 gezeigt eine Probe geschnitten und für die Betrachtung im Lichtmikroskop vorbereitet.

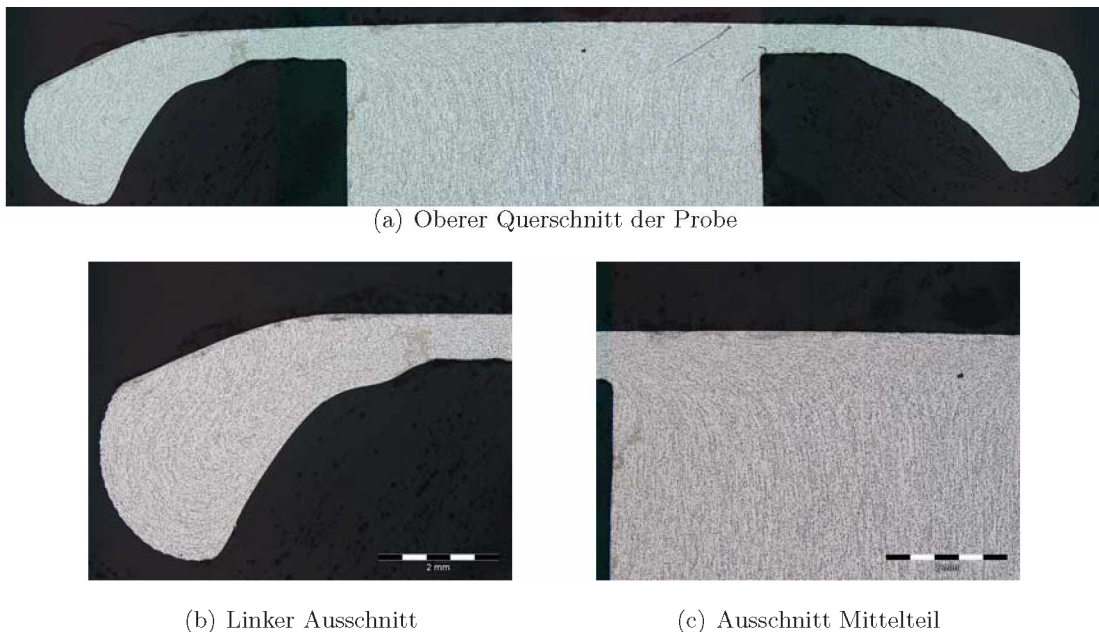


Abbildung 3.12: Bild (a) zeigt den gesamten Fließlinienverlauf einer geschnittenen Probe ($T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$, 80 mm Reibweg, P_{Max} und $v_R = 150 \text{ mm/s}$) bei 2,5x Vergrößerung nach Polierung der Oberfläche. Bild c) zeigt deutlich den symmetrischen Übergang der Kraftlinien in Richtung der Pilzausläufer, und wie in Bild (b) dargestellt beginnt an den Pilzenden ein Eindrehen der Fließlinien.

Dabei zeigen sich in Bild (c) Linien, welche in Richtung der Pilzausläufer wandern. Besonderes Augenmerk sollte an den Pilzenden, wie in Bild (b) dargestellt, gelegt werden, da durch den Stauchprozess der Werkstofffluss an der Oberseite der Probe stärker als in den darunter liegenden Schichten war und daher Zonen mit eingedrehten Fließlinienverläufen zu erkennen sind.

3.2 Planung der Versuche

3.2.1 Festlegung des Stichprobenumfangs

Bei der Festlegung des Stichprobenumfangs für die Planung und Durchführung standen statistische Werkzeuge zur Verfügung. Da im Rahmen des Projektes aus zeitlichen sowie finanziellen Gründen keine Feststellung des Stichprobenumfangs durchführbar war, wird in Tabelle 3.5 eine Auflistung der nötigen Schritte für ein fiktives Beispiel wiedergegeben.

Tabelle 3.5: Wichtige Kenngrößen der Stichprobenberechnung

Schrittfolge	Beschreibung der Vorgangsweise
1	Durchführung von n Vorversuchen zur Bestimmung des Reibwerts μ
2	Einteilung der Reibzahlen in Klassen und Bestimmung der Häufigkeit
3	Durchführung: Test auf Normalverteilung
4	Berechnung des Erwartungswertes und Festlegen eines Signifikanzniveaus α
5	Bestimmung der Zahl der Versuche über eine geeignete Methode, die nötig ist, damit die erhaltenen Ergebnisse innerhalb des Intervalls liegen

Im Weiteren soll die Berechnung der nötigen Stichprobenumfänge über die Methode „Ziehen mit Zurücklegen“ exemplarisch illustriert werden. Dabei werden aus den angenommenen 85 Versuchen, die bei konstanten Parametern (Druck- und Geschwindigkeitsstufe, Werkzeugtemperatur und Reibweg) aufgenommen wurden, die Reibzahlen in acht Klassen eingeteilt und die Häufigkeit je Klasse festgestellt, wie in Abbildung 3.13 dargestellt. Um nun den notwendigen Stichprobenumfang zu ermitteln, ist es nötig nachzuweisen, ob die Auswahlversuche eine Normalverteilung aufweisen.

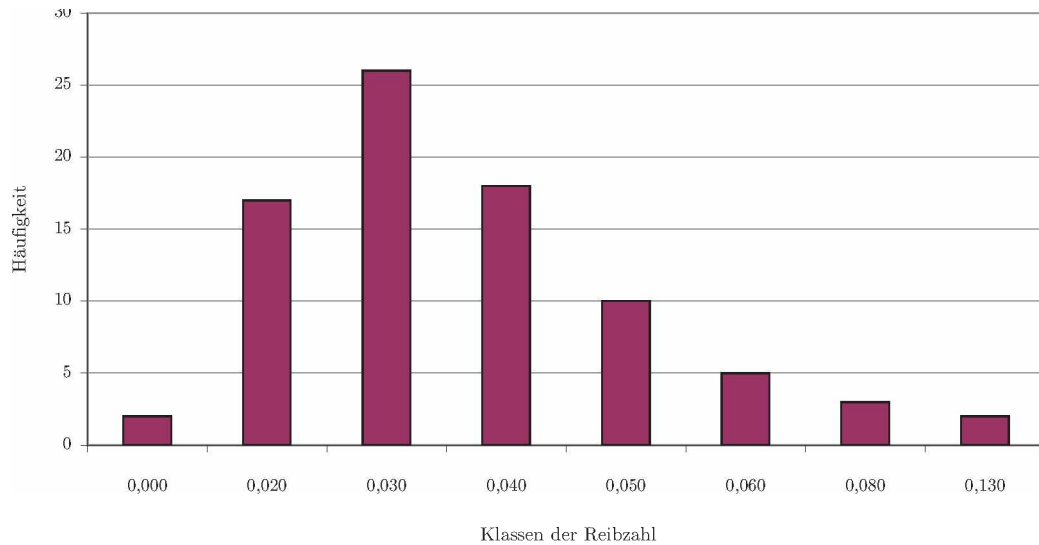


Abbildung 3.13: Häufigkeitsverteilung der Reibklassen für die Berechnung des Stichprobenumfangs (normalverteilt).

Der Test auf Normalverteilung nach *Shapiro Wilk* zeigt, dass die Anzahl der beobachteten Messwerte entsprechend der Klassenzugehörigkeit normalverteilt ist. Die Berechnung von W erfolgt demnach:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i \cdot \mu_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\mu_i - \mu_m)^2} \quad \text{Shapiro Wilk} \quad (3.3)$$

$$(a_1, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{m^T V^{-1} V^{-1} m} \quad (3.4)$$

$$(m = (m_1, \dots, a_n)^T) \quad (3.5)$$

Wobei die Größen a_1, \dots, a_n spezifische Werte der Standardnormalverteilung sind und V die Kovarianz Matrix dieser statistischen Werte angibt. Die Berechnung erfolgte über die Bildung des Quotienten über die Summe der Häufigkeit der Klassen unter der Anforderung das der Anpassungstest bei dem gewählten Signifikanzniveau normalverteilt ist. Daher wurde der Test unter Annahme der Hypothese, dass die Gesamtheit $N(\mu, \alpha)$ normalverteilt, gegen die Alternative, dass die Grundgesamtheit nicht normalverteilt ist durchgeführt [9] Der mittlere Reibwertes wurde durch Multiplikation des Klassenreibwertes μ_i mit der jeweiligen Häufigkeit k_i wie folgt berechnet:

$$\mu_m = \frac{\sum(\mu_i \cdot k_i)}{\sum k_i} \quad (3.6)$$

Mithilfe des gesetzten Signifikanzniveaus wird aus Tabellen der Standardnormalverteilung der Wert für die Verteilungsfunktion z herausgelesen.

Tabelle 3.6: Quantile der Normalverteilung

$$z_{1-\alpha} = -z_{\alpha}$$

z_{α}	0.55	0.65	0.75	0.85	0.925	0.950	0.960	0.970	0.980	0.990
α	0.126	0.385	0.674	1.036	1.440	1.645	1.751	1.881	2.054	2.326
z_{α}	0.992	0.994	0.996	0.998	0.9991	0.9993	0.9995	0.9997	0.9998	0.9999
α	2.409	2.512	2.652	2.878	3.121	3.195	3.291	3.432	3.540	3.719

Der nötige Stichprobenumfang wird nach dem Modell „Ziehen mit Zurück legen“ berechnet, sodass in diesem Fall die Reibwerte nicht voneinander abhängig sind. Daher ergibt sich der nötige Stichprobenumfang n aus [9]:

$$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{\Delta\mu^2} \quad (3.7)$$

Aus den zusammengefassten Ergebnissen im unteren Abschnitt der Tabelle 3.7 ergibt sich für den Stichprobenumfang n ein Wert von 2.35, der auf drei Versuche je Einstellung aufgerundet wurde. Daher sind für die Bestimmung des Reibwertes drei Versuche nötig woraus der Mittelwert gebildet wird.

Tabelle 3.7: Wichtige Kenngrößen der Berechnung des Stichprobenumfangs

Bezeichnung	Abkürzung	Wert	Bemerkung
Signifikanzniveau	α	0,05	Festgelegt für Test auf Normalverteilung
Wahrscheinlichkeit	W	0,885	Test nach Shapiro Wilk
Mittelwert des Reibwertes	μ_m	0,056	Durch die Reibklassen festgelegt
Standardabweichung des Reibwertes	σ	0,006	Anhand der Auswahlversuche festgelegt
Absoluter Fehler	$\Delta\mu$	0,0063	Gibt die Bandbreite des Mittelwerts an bei einer Sicherheit von 1-a.
Wert der Verteilungsfunktion	z	1,645	Die Ermittlung erfolgt aus Tabellen der Standardnormalverteilung für die Wahrscheinlichkeit
Stichprobenumfang	n	3	Nach der Methode "Ziehen mit Zurücklegen" festgelegt

3.2.2 Komponenten des Tribosystems

3.2.2.1 Werkstückwerkstoff

Als Werkstoff für die Versuchsproben wurde die aushärtbare Aluminium Schmiedelegerung der Type AA-2618 durch den Projektpartner festgelegt. In Tabelle 3.8 ist ein kurzer Überblick über die wichtigsten Eigenschaften der Legierung gegeben.

Bei der Legierung ist Cu als Hauptbestandteil enthalten, sowie Zusätze an Mg, Si, Ti und den stets vorhandenen Fe-Beimengungen. Anhand des Dreistoffsystems Al-Cu-Mg kann nur eine teilweise Beschreibung erfolgen, da sich die verschiedenen Elemente in unterschiedlichen Phasen am Gefügebau beteiligen und die Eigenschaften wesentlich mitbestimmen.

Tabelle 3.8: Wichtigsten Eigenschaften der Aluminium Knetlegierung AA 2618

Eigenschaften	Anforderungen	Anmerkungen
Type	AA-2618	2xxx Knetlegierung
Aushärtbar	Ja	Ausscheidungsphase Al_2Cu und Al_2CuMg
Hauptlegierungselemente [%]	Hauptlegierungselemente [%] Cu 2,3 Mg 1,6 Fe 1,1	daneben noch Ni, Ti und Si
Fließspannung	370 MPa	
Abscherfestigkeit	260 MPa	
Bruchdehnung	10%	
Zugfestigkeit	400 - 450 MPa	Abhängig vom Grad der Aushärtung
Anwendung	Schmiedelegerung für Luftfahrt und kommerzielle Zwecke	Anwendung für hitzebeständige Teile zB. als Oberflächenhaut für Flugzeuge

3.2.2.2 Werkzeugwerkstoff

Die Anforderungen der Werkzeuge bezüglich der Fertigung und der Versuche sind in Tabelle 3.9 aufgelistet. Der Warmarbeitsstahl muss ein einfaches Nachbearbeiten der Oberfläche durch eine Drehmaschine und ausreichende Druckbeständigkeit für bis zu 450°C (sekundäres Härtemaximum bei 500°C) gewährleisten. Eine genauere Erklärung der Werkstoffe für Warmarbeitsstähle erfolgt in Kapitel 2.2.3.

Tabelle 3.9: Anforderungen an den Werkzeugstahl Böhler W302

Eigenschaften	Werte	Anmerkungen
Warm und Druckfestigkeit	sehr hoch	Einsatz bei 250°C und 450°C muss gewährleistet sein
Bearbeitbarkeit	sehr gut	Einfaches Abdrehen der Arbeitsflächen ohne der Verwendung besonderen Werkzeuge
Oberflächenhärte	40 HV	Der Werkzeugstahl wurde vergütet um die gewünschten Oberflächenhärten zu erzielen
Oberflächenrauhigkeit	3-4 µm längs 1-2 µm quer	Das Schleifen der Werkzeugoberflächen erfolgte durch ein Schleifpapier an der Drehmaschine
Anzahl der Werkzeuge	7	Für jeden Schmierstoff einen Werkzeugsatz

3.2.3 Festlegung des Beanspruchungskollektivs

Die Festlegung der *Werkzeugtemperatur* erfolgte nach Gesichtspunkten, die es ermöglichen einen relativ weiten Bereich für das Aluminiumgesenkschmieden abzudecken. Angaben über die Gesenkttemperaturen während des Betriebes schwankten je nach Anwendungsfall von 50 bis 450°C. Die Festlegung der Werkzeugtemperaturen erfolgte primär durch den Projektpartner und wurde in Abhängigkeit des Prozesses bei 250°C bzw. 450°C (*isotherm*) festgelegt.

Im Vergleich zu Schmiedestücken aus Stahl bei denen Temperaturen zwischen 800 und 1200°C zur Anwendung kommen, wurde die *Werkstücktemperatur* für die verwendete Al-Knetlegierung bei 480°C angesetzt. Für die AA-2618 Legierung zeigte sich, dass die gewählte Temperatur bereits im oberen Bereich liegt und eine weitere Temperaturerhöhung die Bildung spröder Phasen begünstigt, die sich negativ auf den Schmiedeprozess auswirken können.

Durch praktische Versuche des Projektpartners wurde festgestellt, dass besonders bei Werkstückgeometrien mit hohen Stegen (z.B. Motorkolben), es zu Problemen hinsichtlich der Materialfüllung während des Schmiedeprozesses kommt. Daher wurde ein *Reibweg* von 80 mm festgelegt.

In weiterer Folge wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartner beschlossen, dass jeder Versuch *drei* mal zu wiederholen ist, um möglichst reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Die Festlegung der variablen Parameter für die Versuchsdurchführung erfolgte gemeinsam mit dem Projektpartner unter Einbeziehung folgender Faktoren:

- i) Durch Auswertung einer umformtechnischen Simulation für einen Motorkolben mit sehr hohen Fließwegen im Bereich der Stege, erfolgt eine genaue Ermittlung der auftretenden Drücke und Geschwindigkeiten.
- ii) Praktische Erfahrungen des Projektpartners die ein Abschätzen des variablen Bereichs erleichterte.
- iii) Berücksichtigung der technischen Grenzen der Versuchsanlage.

Aus der Simulation für den Motorkolben, wurden die auftretenden Drücke und Geschwindigkeiten genau ermittelt, wodurch ein Abschätzen des Beanspruchungskollektivs erleichtert wurde. Aus Vorversuchen wurden die Grenzen für die Relativgeschwindigkeiten und Drücke ermittelt und an die Ergebnissen der Simulation angepasst.

In Tabelle 3.10 sind die variablen und fixen Parameter Parameter für die Versuchsreihen aufgelistet, wobei die maximale Grenze für die Relativgeschwindigkeit bei 200mm/s festgelegt wurde.

Tabelle 3.10: Variables und fixes Parameterkollektiv für Versuchsreihen

	Parameter	Festgelegte Werte	
Fixe Parameter	Temperatur des Werkzeugs, T_{wzg}	250°C bzw. 450°C	
	Temperatur des Werkstücks, T_{wst}	480°C	
	Reibweg	80 mm	
	Versuchswiederholungen	3	
Variable Parameter	Druckstufen [MPa]	P_{max}	325
		$P_{2/3\text{Max}}, P_{\text{mittel}}$	215
		$P_{1/3\text{Max}}, P_{\text{min}}$	110
	Geschwindigkeitsstufen [mm/s]	v_{max}	200
		v_{mittel}	150
		v_{min}	20

3.2.4 Auswahl der Schmierstoffe

3.2.4.1 Überlegungen zur Auswahl der Schmiermittel

Die Schmierstoffe wurden hauptsächlich nach folgenden Gesichtspunkten ausgewählt:

- i) Die Anwendung der Schmiermittel sollte für Werkzeugtemperaturen von 250°C oder 450°C erfolgen.
- ii) Die Schmiermedien sollen eine Eignung für sehr lange Reibwege (80 mm) beim Gesenkschmiedeprozess aufweisen.
- iii) Durch Rücksprache und Schilderung des Problems mit den Herstellfirmen wurde eine Liste möglicher Schmiermittel zusammengestellt.
- iv) Erfahrungen des Projektpartners bei der Auswahl und Entscheidungsfindung der Schmierstoffe für die Untersuchung.

Die Bewertung der Eigenschaften der unterschiedlichen Schmierstoffe ergab, dass für diesen Problemfall ausschließlich Schmierstoffe auf Grafitbasis (keine synthetischen bzw. grafitfreien Produkte) verwendet werden können. Eine Einteilung der grafithaltigen Schmierstoffe (*schwarze Produkte*) nach Trägermedium (Wasser, Öl und kombiniert) erfolgt im unteren Teil von Tabelle 3.11.

Das Aufbringen des Schmierstoffes auf die Werkzeugoberfläche sollte bevorzugt über eine Hand-sprühvorrichtung, andernfalls auch mittels eines Pinsels, erfolgen. Damit sollte eine möglichst praxisnahe Arbeiten erfolgen, da ein automatisiertes Aufbringen nicht immer machbar ist und auf mögliche Produktionsschwankungen unflexibel reagieren kann.

3.2.4.2 Technische Daten der Schmierstoffe

Im Folgenden soll über Klasseneinteilung eine kurze Beschreibung der wichtigsten Kenndaten und Eigenschaften der verwendeten Schmierstoffe erfolgen.

Schmiermittel auf Wasserbasis

Deltaforge *F31* ist eines der ältesten Produkte der Firma *Acheson*, nimmt aber durch ständige Weiterentwicklung einen sehr weiten Anwendungsbereich seiner Klasse (wasserbasis) ein. Anwendung findet *F31* vor allem im Bereich der Warmumformung sowie bei Präzessionsschmieden. Die möglichen hohen Verdünnungsraten (bis zu 1:30) zeigen für den jeweiligen Anwendungsfall ein mögliches Potential für Kosteneinsparung. Die obere maximale Einsatztemperatur für Schmiedeanwendung wird durch den Hersteller bei 371°C festgelegt.

Ein weiterer Vertreter der Schmierstoffe auf Wasserbasis ist das Produkt *F25 PLE* von der Firma *Fuchs*. Anwendung findet *F25 PLE* als Hochleistungs- bzw. Gesenkschmierstoff, welcher mit Wasser mischbar und bei der Warmumformung für Stahl eingesetzt werden kann. Über die Angabe des Temperaturbereiches sowie der möglichen Konzentration kann direkt beim Hersteller

für den jeweiligen Anwendungsfall nachgefragt werden. Als obere Grenze wurden Gesenkttemperaturen von 250°C für die Versuchsreihen festgelegt.

Schmiermittel auf Wasser-Ölbasis

Ein Vertreter ist das Schmiermittel *F-508*, das durch die Firma *Acheson* zur Verfügung gestellt wurde. Ein Kennzeichen des Schmierstoffs ist der sehr spezifische Anwendungsbereich von 250°C für die Versuchsreihen. Das Produkt ist für jede Art der Warmumformung geeignet. Daneben kann das Produkt direkt (ohne zu Mischen) verwendet werden, jedoch besteht auch die Möglichkeit, eine maximale Verdünnung mit Wasser bei einer Konzentration von 1:1 für den jeweiligen Anwendungsbereich festzulegen.

Schmiermittel auf Mineralölbasis

Die stärksten Vertreter hinsichtlich Hochtemperaturanwendung für das Aluminium-, Gesenkschmieden sind die Schmierstoffe auf Ölbasis. Gerade bei der Anwendung von ölhaltigen Schmierstoffen ist es nötig eine Vorwärmung durchzuführen um dadurch eine leichteres Vermischen zwischen Schmierstoff und Verdünnungsmittel zu gewährleisten und andererseits wird das Aufbringen des Schmierstoffs über eine Aufheizvorrichtung erleichtert.

DAG 522 ist ein Schmiermittel der Firma *Acheson*, und kann je nach Anwendungsfall entsprechend verdünnt werden. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich von der Warmumformung bis in die Hochtemperaturschmierung. Das Schmiermittel zeichnet sich, durch die große Möglichkeit an mischbaren Stoffen auf Ölbasis aus. *DAG-522* ist das einzige Schmiermittel in der Versuchsreihe, das sowohl bei 250°C als auch bei 450°C Anwendung findet.

Ein weiterer Vertreter der Firma *Acheson* ist *F-509F* und ist eine entsprechende Neuentwicklung des Vorgängers *F-509D*. Dieser Schmierstoff ist speziell für Hochtemperaturanwendung (bis 450°C) beim isothermen Schmieden von Aluminium entwickelt worden. Die entsprechende Verdünnung sollte je nach Anwendungsfall selbst angepasst werden, da aufgrund der Neuentwicklung der Kenntnisgrad darüber relativ gering ist. Das Schmiermittel lässt sich direkt auf das Schmiedestück aufbringen bzw. und durch Mineralöle entsprechend verdünnt werden.

Der letzte Vertreter wurde von der Firma *Fuchs* mit der Bezeichnung *Hykogen 87/3* zur Verfügung gestellt und bevorzugt bei der Schmierung von Werkzeugen beim Warmpressen von Messing eingesetzt. Das Produkt ist direkt einsatzfertig.

Tabelle 3.11: Eigenschaften und Kenndaten der verwendeten Schmierstoffe

Type	Lubrodal					Hykogeen	
	F - 31	F25 PLE	F - 508	DAG 522		F - 509F	87 / 3
	Acheson	Fuchs	Acheson	Acheson		Acheson	Fuchs
T_{Einsatz} [°C]	250 - 316°C	250°C	250°C	250°C	450°C	450°C	450°C
Feststoffart	Grafit	Grafit	Grafit	Grafit		Grafit	Grafit
Feststoff [%]	n.b. ³	n.b.	47	20		13	n.b.
Haltbarkeit org. Verpackt [Monate]	6	12	12	12		24	12
VM ²⁾	Wasser	Wasser	Wasser	Mineralöl		Mineralöl	Direkt einsetzbar
Viskosität [mPa], 25°C	n.b.	n.b.	3000	550		1000 - 3000	mittelviskos
Korngröße [µm]	fein	n.b.	mittel	1 - 8		fein	n.b.
Mischung Verhältnisse	1 : 7 1 : 15 ¹⁾ 1 : 22	1 : 3 1 : 7 1 : 15	D 1 : 0.5 1 : 1	1 : 2 1 : 5 1 : 10	D 1 : 2 1 : 5	D 1 : 0.5 1 : 1	D ⁴
Träger	Wasserbasis		Wasser- Ölbasis	Ölbasis			
Medium	Dispersionen von Grafit in Wasser		Grafitdisp. in Emulsionen	Dispersionen von Grafit in Mineralöle			

¹⁾ jene Konzentration, die seitens des Projektpartners eingesetzt wurde

²⁾ Verdünnungsmittel

³⁾ nicht bekannt

⁴⁾ direkt verwendbar

3.2.4.3 Festlegung der Konzentrationen und deren Anwendung

Eine Übersicht der verwendeten Schmierstoffe in Abhängigkeit der festgelegten Konzentration, ist in Tabelle 3.11 dargestellt. Die angeführte Tabelle spiegelt nicht die in der Planungsphase dargestellten Konzentrationsverhältnisse wieder, sondern die erweiterten Konzentrationen, die teils an die veränderten Werkzeugtemperaturen angepasst wurden. Als Grund sind die schlechten Ergebnisse bzw. die Anhaftungen von Aluminium am Werkzeug bei 450°C anzuführen. Nach

Tabelle 3.11 können die verschiedenen Konzentrationen der Schmierstoffe hergestellt werden. Dabei wurde folgende Berechnungsgrundlage zur quantitativen Schmiermittelherstellung zugrunde gelegt. Die Angabe der Verhältnisse erfolgt immer in Anteilen (siehe Gleichung (3.10))

$$m_{ST} = \frac{A_{ST}}{A_{ST} + A_{VM}} \cdot m_{Mischung} \quad (3.8)$$

Dabei ist m_{ST} der *Masseanteil für den Schmierstoff*. Der selbe Vorgang erfolgt für die Berechnung des Masseanteils für das Verdünnungsmittel m_{VM} wobei der der *Anteil für das Schmiermittel* A_{ST} durch den *Anteil für das Verdünnungsmittel* A_{VM} ersetzt wird, um das Gesamtmischungsverhältnis für den Schmierstoff MV_{SM} wie folgt zu erhalten:

$$\text{Angabe der Mischung } (A_{ST} : A_{VM}) \quad (3.9)$$

$$MV_{SM} = m_{ST} + m_{VM} \quad (3.10)$$

Die Eigenschaften der verwendeten Verdünnungsmittel sind in Tabelle 3.12 gegenübergestellt. Für die Herstellung der Verhältnisse auf Ölbasis wurde unter Nachfrage der Schmierstoffproduzenten kein besonderes Produkt auf Mineralölbasis empfohlen, und somit wurde ein handelsübliches Motoröl von *Shell Helix Plus 5W-40* als Verdünnungsmittel verwendet.

Tabelle 3.12: Eigenschaften der verwendeten Verdünnungsmittel

Bezeichnung der Verdünnungsmittel	Dichte	Verdampfungspunkt	Gefrierpunkt	kinematische Viskosität	
	kg/m ³ bei 25°C	°C (min)	[°C] (max)	25°C	$\frac{\text{mm}^2/\text{s}}{100^\circ\text{C}}$
Shell Helix Plus 5W-40	850	230	-36	82,9	14,8
Wasser	1	100	0	653	282

3.2.4.4 Kriterien zur Aufbringung der Schmiermittel

Aufgrund zu hoher Kosten und zeitintensiver Vorbereitungen war es nicht möglich, eine Heizung für ölhaltige Schmierstoffe zu adaptieren, um somit einen weiteren praxisnahen Bezug zur Schmierstoffaufbringung zu schaffen. In der Versuchsreihe waren alle Schmiermittel bis auf die Type *Hykogeon 87/3* der Firma Fuchs mit der Handsprühvorrichtung problemlos aufbringbar. Trotz Rücksprache mit dem Schmierstoffproduzenten gelang es nicht, den Schmierstoff über die Düse auf das Werkzeug aufzubringen, wodurch ein Benetzen der Arbeitsfläche nur durch einen Pinsel möglich war.

Die wichtigsten Kriterien und Richtvorgaben die zum Aufbringen der Schmierstoffe durch die Sprühvorrichtung erfolgte, sind aus Tabelle 3.13 zu entnehmen

Tabelle 3.13: Festgelegte Kriterien zur Aufbringung der unterschiedlichen Schmiermittel

Eigenschaften	Lubrodal				Hykokeen	
	F - 31	F - 508	F25 PLE	D A G 5 2 2	F - 509F	87 / 3
	Acheson	Acheson	Fuchs	Acheson	Acheson	Fuchs
Aufbringung	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Pinsel ¹⁾
Sprühdruck	2 - 3 bar	2 - 3 bar	2 - 3 bar	4 - 5 bar	4 - 5 bar	unmöglich
Abstand	Sprühabstand liegt zwischen Düse und Werkzeug bei 80 bis 120 mm					-
Winkel	Handsprühvorrichtung wurde senkrecht zum Werkzeug bewegt 90°					-
Zeit	4 - 5 s	4 - 5 s	4 - 5 s	7 - 10 s	7 - 10 s	-
Bewegung	Das Aufbringen des Schmierstoffes erfolgte kreisförmig entlang der Reibwege					

¹⁾ Aufgrund der Dickflüssigkeit des Schmiermittels versagt die Sprühvorrichtung

Das Aufbringen der Schmierstoffe erfolgte stets in gleicher Weise d.h. in kreisförmiger Bewegung entlang der Reibspuren wurde durch die Handsprühvorrichtung das Schmiermittel aufgebracht. Vor Gebrauch erfolgte ein minutenlanges Schütteln um somit eine Homogenisierung der Mischung herzustellen.

Die Drücke die für die Handsprühvorrichtung wurden so gewählt dass eine erkennbare Schmierfilmschicht auf der Werkzeugoberfläche vorhanden war. Daher war es bei den ölhaltigen Schmierstoffkonzentrationen nötig, höhere Drücke und längere Sprühzeiten zu verwenden.

3.2.5 Der Versuchsplan

Um einen genaueren Überblick und Zweck der Versuchsreihen, wie Vorversuche (Festlegen von Rahmenbedingungen), Auswahlversuche (Charakterisierung der Schmiermittel), Detailversuche (genauerer Charakterisierung ausgewählter Schmiermittel) und Beurteilung des Steigungsverhalten, zu bekommen soll im Folgenden genauer betrachtet werden.

- i) Die *Vorversuche* wurden durchgeführt um Geometrien für Werkzeug und Werkstück, Grenzen der Maschine, Reib- und Aufheizprogramme zu optimieren und für die folgenden Versuchsreihen festzulegen.
- ii) Die *Auswahlversuche* wurden für jedes Schmiermittel mit fest definierten variablen Parametergruppen (Druckstufen: P_{max} und P_{Mittel} , Relativgeschwindigkeit v_R von 150 mm/s und 3 Konzentrationen je Schmierstoff) durchgeführt, um eine Beurteilung und Charakterisierung der Schmierstoffe zu ermöglichen
- iii) Die *Detailversuche* ergeben sich aus den Ergebnissen der Auswahlversuche. Dabei erfolgte eine genauere Beurteilung bestimmter Schmierstoffkonzentrationen für erweiterte Parame-

tergruppen um einerseits mögliche Grenzen des Schmierstoffs und andererseits eine Vergleichbarkeit mit den Auswahlversuchen durchzuführen.

- iv) Um die unterschiedlichen Kurvenverläufe der Auswahlversuche darstellen zu können, wurde eine *Charakterisierung des Steigung* für unterschiedliche Reibwege durch die Auswahl bestimmter Schmierstoffe durchgeführt, um ein besseres Verständnis der Steigungsrichtung zu erhalten.

In Tabelle 3.14 sind bereits die definierten Parameter aus dem Teilkapitel für die Versuchsdurchführung in einer Matrix zusammengefasst. Daraus erfolgte eine Berechnung der Anzahl der Versuche der jeweils durchgeführten Versuchsreihen (Auswahl-, Detailversuche sowie Versuche zur Charakterisierung der Steigung), um daraus die Zahl aller Versuche bei 15 prozentigen Zuschlag zu ermitteln. Die Größe des Zuschlags ergab sich aus der Zahl an möglichen Fehlversuchen, woraus die Berechnung gemessen an den Gesamt durchgeführten erfolgte. Im weiteren wurde auf die Gesamtanzahl der Proben zurückgerechnet, um eine Darstellung der Größenordnung der durchgeführten Versuche zu erhalten.

Ziel der Auswahlversuche ist das Erstellen einer Ergebnismatrix und Durchführung der Versuche für die Schmiermittel anhand der zuvor festgelegten Konzentrationen sowie Druck- bzw. Geschwindigkeitsstufen. Aus den erhaltenen Ergebnissen werden die zwei besten Schmierstoffkonzentrationen für jeweils 250°C und 450°C Werkzeugtemperatur in Detailversuchen genauer untersucht um über mögliche Grenzen bzw. eine besseren Charakterisierung des Schmierstoffs für einen erweiterten Geschwindigkeits- und Druckbereich zu ermöglichen. Gerade bei den Schmierstoffen bei T_{WZG} von 450°C erfüllte nur der Schmierstoff *F 509F* das Kriterium sodass nur ein Schmierstoffverhältnis untersucht wurde.

Tabelle 3.14: Versuchsmatrix für die Versuchsplanung mit nachfolgender Berechnung der Versuchs- bzw. Probenanzahl für die Versuchsreihen

Versuchparameter	Werkzeugtemperatur	Werkstücktemperatur 480°C	Relativgeschwindigkeiten v_R	Anzahl der Normaldrücke	Versuchswiederholungen	Schmierstoffe	Schmierstoffverhältnisse	Reibwege	Anzahl der Versuche
Auswahlversuche	250	1	1	2	3	4	3	1	72
	350	1	1	2	3	1	3	1	18
	400	1	1	2	3	2	3	1	36
	450	1	1	2	3	3	3	1	54
Detail Versuche	250	1	3	3	3	2	1	1	54
	450	1	3	3	3	1	1	1	27
Charakt. Steigung	250	1	1	1	3	2	1	4	24
							Zuschlag	15 %	
Anzahl der Versuche									328
Anzahl der Proben für die Versuche									656

Bei der Versuchreihe zur Charakterisierung der Steigung (siehe Tabelle 3.14) wurde durch Wahl zweier aussagekräftiger Schmiermittelverhältnisse, aus den Reibkraftmessungen, eine Bewertung hinsichtlich der Steigung der Kurven und Rauigkeiten entlang unterschiedlicher Reibwege durchgeführt.

Um eine Übersicht der verwendeten Schmierstoffe, sowie der festgelegten Parameter für die jeweilige Versuchsreihe bzw. der Schmierung zu erhalten, wurde ein erweiterter Versuchsplan erstellt (siehe Tabelle 3.14) mit dem eine tabellarische und übersichtliche Darstellung der Kenngrößen für die durchgeführten Versuche ermöglicht wird.

Tabelle 3.15: Erweiterter Versuchsplan zur übersichtlichen Darstellung der Parameter für die jeweiligen Versuchsreihen (*Auswahl-, Detailversuche* und *Steigungscharakterisierung*) bzw. die Annahmen bei der *Schmierung*.

		Schmierstoffe						
		Lubrodal				Hykogeen		
Parameter	F - 31	F - 508	F25 PLE	D A G 5 2 2		F - 509F	87 / 3	
	Acheson	Acheson	Fuchs	Acheson		Acheson	Fuchs	
Reibweg [mm]	80	80	80	80		80	80	
T _{WZG} [°C]	480	480	480	480		480	480	
Schmierung	Trägermedium	Wasser	Wasser-Öl	Wasser	Öl		Öl	
	Verdünnungsmedium	Wasser	Wasser	Wasser	Mineralöl		Mineralöl	
	Aufbringung	Düse	Düse	Düse	Düse		Pinself 1)	
	Sprühdruk	2 - 3 bar	2 - 3 bar	2 - 3 bar	4 - 5 bar		4 - 5 bar	
	Abstand	Sprühabstand liegt zwischen Düse und Werkzeug bei 80 und 120 mm						-
	Winkel	Handsprühvorrichtung wurde senkrecht zum Werkzeug bewegt (90°)						-
	Zeit	4 - 5 s	4 - 5 s	4 - 5 s	7 - 10 s		7 - 10 s	
	Bewegung	Das Aufbringen des Schmierstoffes erfolgte kreisförmig entlang der Reibwege						-
Auswahlversuche	Mischung	1 : 7 1 : 15 ¹⁾ 1 : 22	D 1 : 0.5 1 : 1	1 : 3 1 : 7 1 : 15	1 : 2 1 : 5 1 : 10	D 1 : 2 1 : 5	D 1 : 0.5 1 : 1	
	T _{WZG} [°C]	250	250	250	250	450 400	450 400 350	
	Druckstufen	P _{max} P _{mittel}	P _{max} P _{mittel}	P _{max} P _{mittel}	P _{max} P _{mittel}		P _{max} P _{mittel}	
	Geschwindigkeit	150	150	150	150		150	
Detailversuche	Mischung	1 : 1		1 : 3		D		
	T _{WZG} [°C]	250		250		450		
	Druckstufen	P _{max}		P _{max}		P _{max}		
		P _{mittel}		P _{mittel}		P _{mittel}		
		P _{min}		P _{min}		P _{min}		
v _R [mm/s]	20 150 200		20 150 200		20 150 200			
Steigungscharakterisierung	Mischung			1 : 15	1 : 10			
	T _{WZG}			250	250			
	v _R [mm/s]			150	150			
	Druckstufen			P _{mittel}	P _{mittel}			
				15	10			
Reibweg [mm]			30 50 80	20 30 80				

3.3 Die Versuchsauswertung

3.3.1 Auswertung der Kraftverläufe

3.3.1.1 Ermittlung des mittleren Reibwertes und der Standardabweichung

Wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben werden während der Versuchsdurchführung Reib- und Normalkräfte sowie die Drehzahl ermittelt die für weiterführende Berechnungen als Normalspannung σ_N , Reibspannung τ_R und als Reibweg s_R vorliegen.

Die Berechnung des Reibwertes für den i -ten Messwert eines Versuches erfolgt durch Division der Kräfte bzw. Spannungskomponenten in Normalspannung σ_N und in horizontaler Richtung τ_R wie folgt:

$$\mu_i = \frac{\tau_{Ri}}{\sigma_{N,i}} \quad (3.11)$$

Die Berechnung des mittleren Reibwertes einer Kurve erfolgt durch die Anzahl der experimentell bestimmten Werte N durch einfache Mittelwertbildung der Messwerte μ_i , wie in Gleichung (3.12) dargestellt ist

$$\bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i \quad (3.12)$$

Ein Maß für den Fehler der dabei auftritt, ist die sogenannte Standardabweichung SA für den Mittelwert, die sich wie folgt ergibt:

$$SA = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (\mu_i - \bar{\mu})^2} \quad (3.13)$$

Der Faktor $(N-1)$ wird verwendet, da man sonst bei einer einzelnen Messung und einem Vorfaktor von N einen Fehler von 0 erhalten würde der nicht richtig ist.

3.3.1.2 Einfluss des Geschwindigkeitsverlaufs

Um den Einfluss der Anfahrbeschleunigung, hervorgerufen durch die Trägheitsmasse des Drehstrommotors, genauer Abschätzen und Klassifizieren zu können, sind folgende Überlegungen nötig: Die Beschleunigung ist neben der Masse des Motors, die im folgenden als konstante Größe angenommen wird, hauptsächlich von der gewählten Relativgeschwindigkeit v_R des Drehtellers abhängig. Die Berechnung von v_R für den i -ten Messpunkt ergibt sich durch Rückrechnen aus dem Reibweg wie folgt:

$$v_i = (x_{R\ i+1} - x_{R-i}) \cdot f_M \quad (3.14)$$

Die Berechnung von v_R erfolgt über den Reibweg r_w durch Bildung der Differenz zweier Messpunkte und der gewählten Messfrequenz f_M für die jeweilige Geschwindigkeit.

In Abbildung 3.14 sind die Verläufe der einzelnen Geschwindigkeiten wiedergegeben. Aus den Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass die Druckabhängigkeit sowie die Abweichung bei Versuchswiederholungen bei gleicher Parametereinstellung der Maschine sehr gering ist.

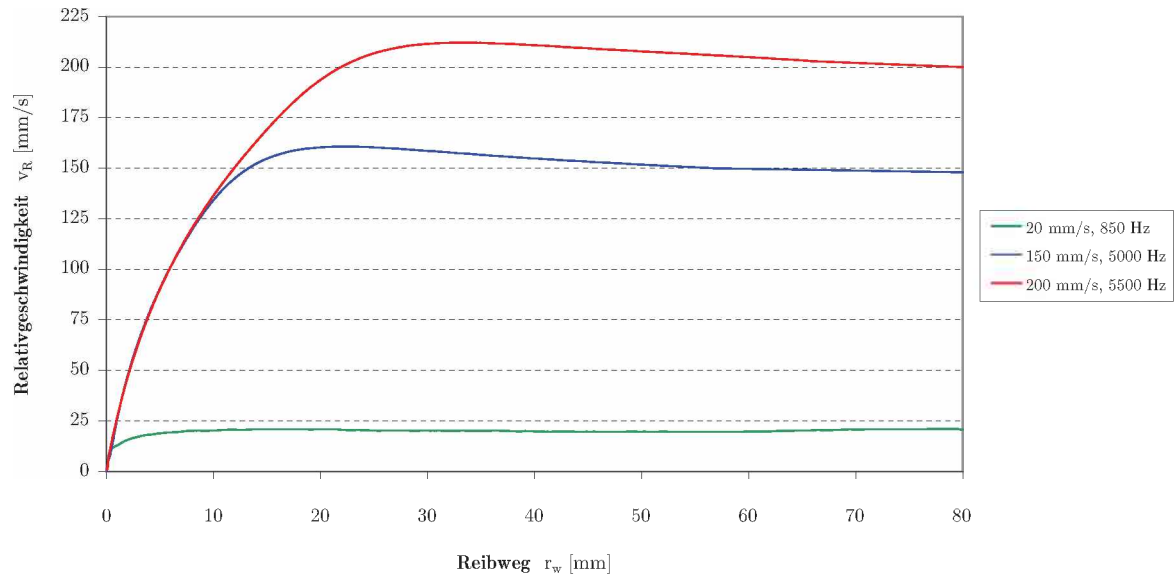


Abbildung 3.14: Geschwindigkeitsverläufe v_R für 20, 150 und 200 mm/s bei 80 mm Reibweg. Da das Prüfprogramm der Versuchsanlage immer gleich abläuft, und die Unterschiede zwischen den Druckstufen sehr gering sind, werden für die jeweiligen Kurven die Geschwindigkeitsstufen als ident angenommen.

Daher ist es möglich durch die in Abbildung 3.14 dargestellten Geschwindigkeitsverläufe, stationäre Bereiche mit konstanter Geschwindigkeit zu definieren, um eine erweiterte Beurteilung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Versuchsreihen zu ermöglichen. (siehe Tabelle 3.16)

Tabelle 3.16: Festgelegte Bereiche konstanter Geschwindigkeit

Geschwindigkeit [mm/s]	Stationärer Bereich [mm]	Bemerkung
20	5 - 80	die Sollgeschwindigkeit wird schnell erreicht
150	20 - 80	leichter Einschwingvorgang bis 50 mm
200	30 - 80	leichter Einschwingvorgang bis 70 mm

3.3.1.3 Bildung der Mittelwertkurve

Da die Messaufnahme bezüglich des Reibweges aufgrund der Beschleunigung des Drehtellers nicht linear erfolgt ist es nötig, für weiterführende Berechnungen der Standardabweichungen sowie zur Erstellung von Häufigkeitsklassen der Einzelkurven eine Linearisierung durchzuführen. Dabei wurde ein Programm erstellt durch dieses der Datensatz für die drei Einzelkurven eines Parametersatzes eingelesen wurde, und durch Vorgabe eines Wertebereichs eine Linearisierung des Weges durchgeführt wird.

Sa kann aus den drei Einzelkurven nach Gleichung (3.12) punktweise der Mittelwerte errechnet und für jeden Messpunkt dargestellt werden. In Abbildung 3.15 wird eine exemplarische Erstellung der mittleren Kurven „rot“ aus den drei Einzelkurven „grau“ dargestellt.

3.3.1.4 Berechnung der Regressionsgerade

Für eine genaue Analyse der der Verläufe der Reibzahlen sowie Möglichkeiten zur besseren Beurteilung und Interpretation ergeben sich folgende Vorteile für die Regressionsgerade:

- i) Erstellen eines lineares Gleichungssystems wodurch eine Beurteilung des Kurvenverlaufs übergreifend ermöglicht wird
- ii) Anhand der Steigung k lassen sich Aussagen, zur Charakterisierung und Richtung der Steigung für alle Reibverläufe vornehmen.
- iii) Weiters lässt sich die mittlere Reibzahl $\bar{\mu}$ aus der Regressionsgerade berechnen und mit Gleichung (3.12) vergleichen, um daraus eine Güte ermittelten Regressionsansatzes zu erhalten.

Es wird bei der deskriptiven Statistik vor allem auf den numerischen Aspekt der Regression Wert gelegt. Es gibt verschiedene Verfahren die Abhängigkeitsstruktur zwischen den x - und y -Werten zu ermitteln. Häufig verwendet wird die Methode der kleinsten Quadrate. Speziell für die Einfachregression gibt es aber auch Verfahren wie etwa das Drei-Gruppen-Verfahren.[52]

Ein lineares Regressionsmodell hat den Vorteil, dass es exakt berechnet werden kann, nichtlineare Systeme müssen dagegen meist näherungsweise gelöst werden. Häufig können diese Regressionsmodelle dann nicht mehr wahrscheinlichkeitstheoretisch analysiert werden. Der Zusammenhang bei der einfachen linearen Regressionsgeraden für die Messwerte x und y über die Regressionsparameter der Steigung k dem Durchstoßpunkt der y -Achse d ist wie folgt definiert:

$$y = k \cdot x + d \quad (3.15)$$

Im Folgenden wird eine exemplarische Ermittlung der Regressionskoeffizienten für die Methode der *kleinsten Quadrate* über den rechnerischen Weg wiedergegeben. Dabei minimiert man die

summierten Quadrate der Residuen (senkrechter Abstand zwischen den momentanen Messpunkt und der angenommenen Gerade) und durch partielles Differenzieren und Nullsetzen der ersten Ordnung erhält man ein System von Normalgleichungen woraus k und d berechnet werden können.[52]

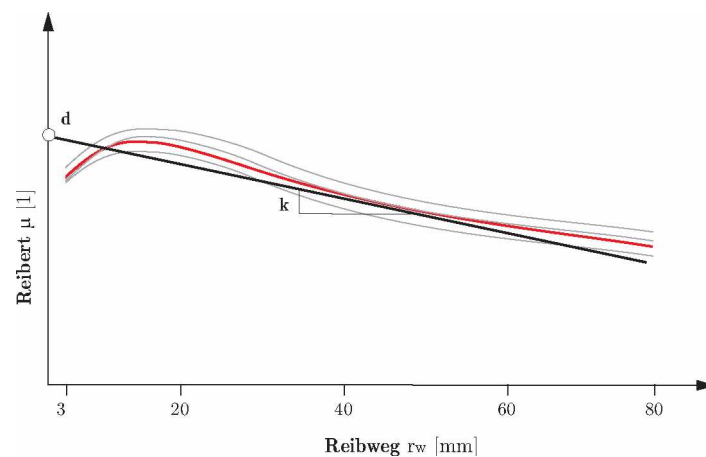


Abbildung 3.15: Die Regressionsgerade „schwarz“ im Bereich zwischen 3 bis 80 mm wird an die Mittelwertkurve der Reibwerte „rot“ linear angenähert. Die Mittelwertkurve wird aus den Einzelkurven „grau“ berechnet.

Die Berechnung der Regressiongerade aus der mittleren Reibkurven erfolgt nicht im gesamten Reibweg, sondern erst ab 3 mm Reibweg, um einen möglichen Einfluss der Haftreibung auszuschalten wie in Abbildung 3.15 gezeigt.

Anhand der durch die lineare Regression erhaltenen Regresionskonstanten lässt sich die Steigung k der Kurve und der mittlere Reibwert im gewählten Bereich nach Gleichung (3.16) berechnen.

$$\mu_{MG} = k \cdot \frac{x_{max} - x_{min}}{2} + d \quad (3.16)$$

Weitere Ergebnisse der Regression sind der quadratische Korrelationskoeffizient „Bestimmtheitsmaß“, die Standardabweichung zur Regressionsgeraden sowie die absoluten Fehler für die Steigung k und den Durchstoßpunkt d .

Da die erhaltenen Werte zur Beurteilung der Steigung k im Allgemeinen sehr klein sind, wurde diese zur verbesserten Darstellung von k , unter Verwendung der Winkelfunktion (siehe Gleichung (3.17)) in einen Steigungswinkel SW umgerechnet.

$$SW = \arctan(k) \quad (3.17)$$

3.3.1.5 Definition und Charakterisierung des Reibzahlverlaufs

Bei der Beurteilung der Güte, „*Schönheit und Gleichmäßigkeit*“ der durch die Versuche erhaltenen Kurven, müssen zwei wichtige Punkte beachtet werden: Einseits soll die neue Größe eine Aussageform schaffen die es ermöglicht, die berechneten mittleren Reibwerte unverfälscht wiederzugeben und andererseits diese in Beziehung mit der Standardabweichung zur Regressionsgerade zu setzen.

Die Gewichtung des mittleren Reibwertes und der Standardabweichung soll in gleicher Potenz bzw. Größenordnung erfolgen. Um eine Darstellung der beiden Größen aus einem zweidiimensionalen Raum in ein skalares Produkt zu ermöglichen wurde als Berechnungsgrundlage das Quadratwurzelgesetz zugrunde gelegt wie in Gleichung (3.18) dargestellt wird.

$$RV = \sqrt{(SW_{gew})^2 + SA^2} \quad (3.18)$$

Der gewichtete Steigungswinkel SW_{gew} wird mit einem Faktor m der in der Größenordnung einer Potenz liegt, dem Reibwert angepasst (siehe Gleichung (3.19)).

$$SW_{gew} = m \cdot SW \quad (3.19)$$

Als Konsequenz dieser Betrachtungen lassen sich folgende Vorteile für den Reibzahlverlauf RV anführen:

- i) Durch den RV ist die Möglichkeit gegeben temperaturübergreifende Vergleiche der Kurven durchzuführen.
- ii) Platzsparende Darstellung der Ergebnisse mit maximaler Informationsdichte.

3.3.1.6 Einbeziehung zweier Größen zur Steigungscharakterisierung

Aus den Ergebnissen der Auswahlversuche für unterschiedliche Schmierstoffe und Konzentrationen geht hervor, dass es Kurven mit steigenden und fallenden Steigungswinkel gibt. Um das Verhalten der Steigung genauer analysieren zu können, wurde für Werkzeugtemperaturen von 250°C sowie durch Wahl zweier Schmiermittelkonzentrationen mit positiver, (p) und negativer (n) Steigung folgende Bedingungen nach Tabelle 3.15 festgelegt.

Hierbei steht das Ziel im Vordergrund, einen direkten Zusammenhang zwischen den erhaltenen Reibkurven für unterschiedliche Wege und der Rauigkeit der Probenkörper zu schaffen um dafür ein besseres Verständnis zu erhalten. In weiterer Folge sollte zur Interpretation auch der mögliche Einfluss der gewählten Geschwindigkeit, hinsichtlich eines stationären Zustandes, in Abhängigkeit des Reibwegs gesetzt werden. In Abbildung 3.16 erfolgt eine schematische Darstellung der Bewertung der Reibkurven für unterschiedliche Reibwege sowie die Ermittlung der Steigung.

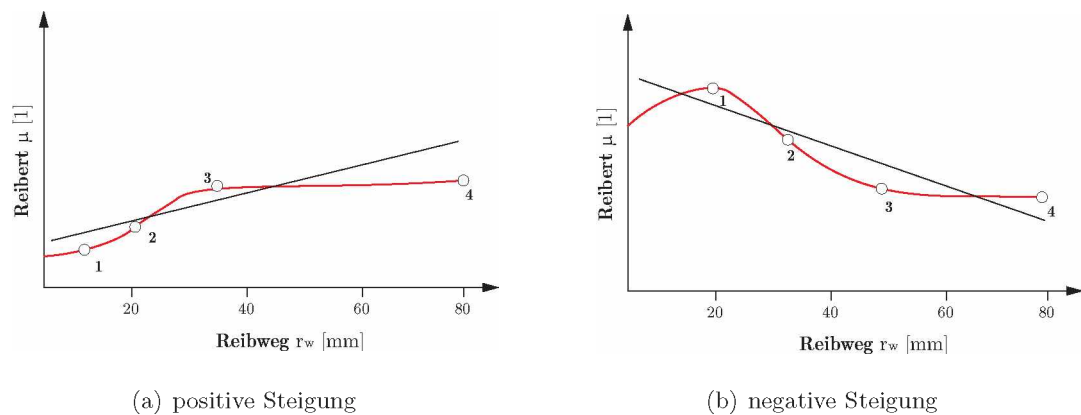


Abbildung 3.16: Darstellung der der Steigungscharakterisierung für Kurven mit positiver und negativer Steigung. Dabei wurde aus den Reibkurven für die unterschiedlichen Kurvenverläufe für die Reibwege 1, 2, 3 und 4 eine Durchschnittskurve berechnet „rot“, und eine Ausgleichsgerade „schwarz“ zur Charakterisierung der Steigung eingefügt.

Die Wahl der Reibwege wurde anhand der bereits vorhandenen Reibkurven getroffen und sollte jeweils einen Messpunkt im quasistationären Bereich der Kurven vor und nach der Steigung sowie dazwischen enthalten (siehe Tabelle 3.17).

Tabelle 3.17: Überblick über die gewählten Reibwege und die Anzahl der Versuche

Schmiermittelname	Untersuchte Reibwege [mm]				Charakter der Steigung
	15	30	50	80	
Acheson DAG 522	15	30	50	80	negativ
(1 : 10)	3	3	3	2	
Fuchs F25 PLE	10	20	30	80	positiv
(1 : 15)	3	3	3	2	

3.3.2 Vorgang bei der Rauigkeitsmessung

3.3.2.1 Durchführung der Rauigkeitsmessung

Die Durchführung der Oberflächenvermessung der Werkzeuge bzw. Probenkörper erfolgt durch ein konfokales Lasermikroskop mit einer Objektiv-Vergrößerung von 1x20. Bei der Werkzeugvermessung erfolgte die Ermittlung der Messpunkte 1, 2 und 3 in Reibspur, wobei ein Messraster in vertikaler und in horizontaler Richtung gelegt wurde, wie in Abbildung 3.17 gezeigt. Im Vergleich

zu den Werkzeugen aus den Auswahlversuchen erfolgt bei den Detailversuchen eine Vermessung beider Reibspuren.

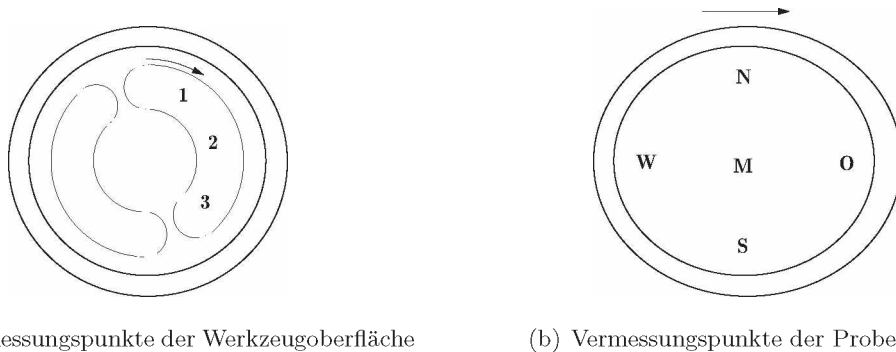
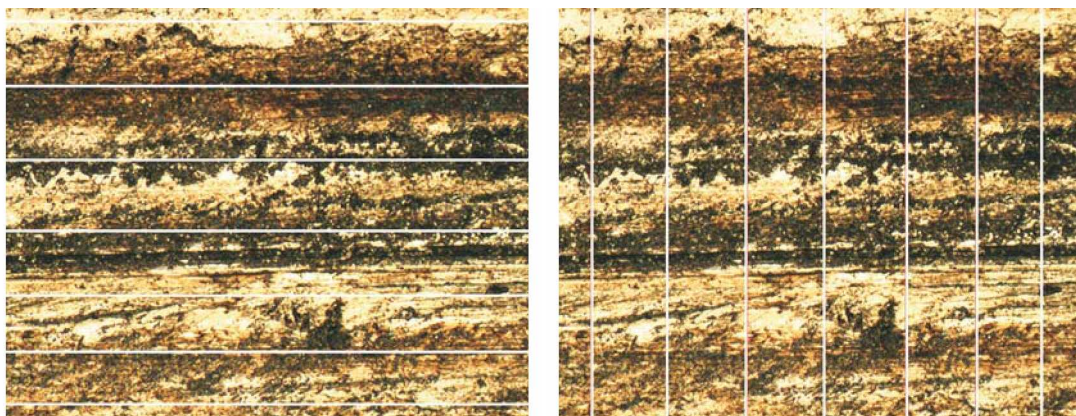


Abbildung 3.17: Messpunkte zur Rauigkeitsmessung. Die Vermessung der Werkzeugoberfläche Bild (a) erfolgt entlang der Spur in Reibrichtung an den Punkten 1, 2 und 3; und die Vermessung der Probenoberfläche Bild (b) erfolgt in Form eines Kreuzes wobei die Punkte *O*, *M* und *W* sowie *N* und *S* vermessen wurden.

Die Vermessung der Probenoberfläche erfolgte weitgehend analog zu den Werkzeugen, mit dem Unterschied, dass die Messpunkte in Kreuzform ermittelt wurden. Abbildung 3.17 zeigt die Messmarken West (*O*), Mittel (*M*) und Ost (*O*) in Reibrichtung sowie Nord (*N*) und Süd (*S*). Zur Erfassung der Rauheit diente ein Messraster (jeweils 7 Linien in horizontaler und vertikaler Richtung). Entlang der Linien erfolgte die Vermessung der Oberfläche woraus die Mittelwerte nach Abbildung 3.18 bestimmt wurden.



(a) Messraster horizontal (Reibrichtung)

(b) Messraster vertikal

Abbildung 3.18: Die Teilbilder zeigen den Messraster in horizontaler und vertikaler Richtung. (Bild (a) und (b) zeigen die Oberflächenstruktur des Schmierstoffs DAG 522 (1:10) bei einer Werkzeugtemperatur von 250°C und 80mm Reibweg die zur Steigungscharakterisierung ermittelt wurde)

Bevor die Rauheitswerte ermittelt wurden, war es nötig unerwünschte Rauheitsgänge „Ausreißer“ von der dreidimensionalen Oberfläche durch einen Filter zu entfernen um somit eine repräsentative Auswertung zu ermöglichen (siehe Abbildung 3.19).

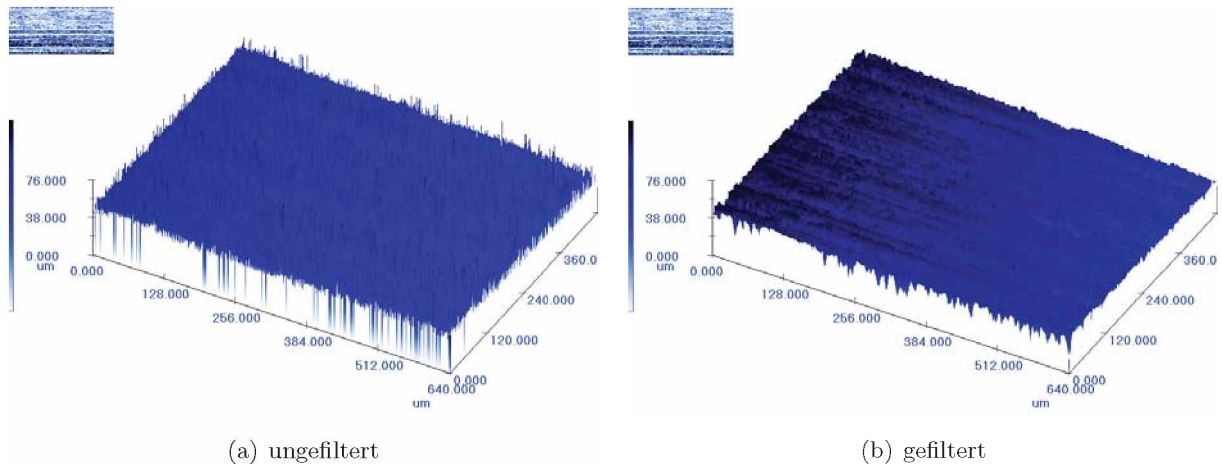


Abbildung 3.19: Die Wirkung des Oberflächenfilters (*Gaußfilter*) wird an Bild b) gezeigt. Dieser dient zum Entfernen von groben Unebenheiten die bei der direkten Aufnahme durch das Mikroskop entstanden, siehe Bild a), um somit eine Beurteilung der Oberfläche zu ermöglichen.

3.3.2.2 Überblick der wichtigsten Rauheitsparameter

Durch die überarbeitete Norm DIN EN ISO 11562 : 1997 wurde der Filter ISO-2RC durch den Gauss-Filter ersetzt, um eine bessere und andere Beurteilung der Oberflächencharakteristik (siehe Abbildung 3.20) als bisher zu ermöglichen.

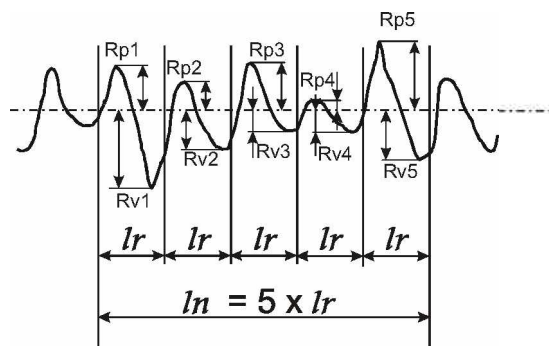


Abbildung 3.20: Darstellung der Oberflächencharakteristik zum Verständnis der Rauheitsparameter

Die Auflistung der wichtigsten Parameter zur Rauheitsbeschreibung sind in Tabelle 3.18 dargestellt. Eine schematische Darstellung der Oberflächencharakteristik ist in Abbildung 3.20 dar-

gestellt. Für die Bewertung wurde neben dem arithmetischen Mittelwert R_a besonderes Augenmerk auf R_z gelegt, worin die arithmetischen Mittelwerte der höchsten und tiefsten Profilspitzen enthalten sind.

Tabelle 3.18: Beschreibung der wichtigsten Rauheitsparameter nach DIN EN ISO 4287 : 1997.

Parameter	Beschreibung
R_a	Arithmetischer Mittelwert der Profilerhebungen innerhalb der Messstrecke l_n .
R_q	Quadratischer Mittelwert der Profilerhebungen innerhalb der Messstrecke l_n .
R_p	Arithmetischer Mittelwert der Höhen der größten Profilspitzen R_{pi} ($i = 1, \dots, 5$) der fünf Einzelmessstrecken l_r .
R_v	Arithmetischer Mittelwert der Tiefen der größten Profiltäler R_{vi} ($i = 1, \dots, 5$) der fünf Einzelmessstrecken l_r .
R_z	Summe von $R_p + R_v$
R_t	$\text{Max}(R_{pi}) + \text{max.}(R_{vi})$ innerhalb der Messstrecke l_n . zB.: $R_t = R_{p5} + R_{v1}$

3.3.3 Festlegung der Kriterien zur Bewertung der Schmierstoffe

Neben Merkmalen zur direkten Charakterisierung der Schmierstoffe nach minimaler, mittleren und maximalen Reibwert μ der Standardabweichung SA , oder im indirekten Sinne die Bewertung nach Rauigkeiten, sollen im Folgenden Größen definiert werden die eine Beurteilung des Versuchs- bzw. Arbeitsablaufes ermöglichen.

3.3.3.1 Kriterien im Prozess

Die Ermittlung der Kriterien erfolgte während der Versuchsdurchführung, um damit eine Übersicht zu geben, wie sich die Schmierstoffe bei praxisnaher Anwendung verhalten. Daher wurde die Beurteilung so gewählt, um das Verhalten der Schmierstoffe während die Versuchsvorbereitung und direkt beim Versuchsablauf best möglich zu erfassen (Tabelle 3.19).

Tabelle 3.19: Kriterien zur Beurteilung der Schmierstoffe während der Versuchsdurchführung. Dabei erfolgte die Festlegung zur Beurteilung des Kriteriums durch die **dick** hinterlegten Wörter.

Kriterien zur Beurteilung	Beschreibung der Kriterien zur Versuchsdurchführung
Art der Schmierstoffaufbringung	Die Schmierstoffe wurden bei den Versuchreihen entweder über eine Düse (Sprühpistole) oder durch einen Pinsel aufgetragen
Rauchentwicklung während der Schmierfilmaufbringung	Die Beurteilung der Rauchentwicklung während der Schmierstoffaufbringung erfolgte zwischen wenig bis sehr stark
Erkennbares Abblättern der Schmierfilmschicht	Die Kriterien wurden mit Ja und Nein festgelegt, wobei sich ein Zusammenhang zwischen erkennbarer Schmierfilmschicht und abblättern ergibt.
Optisch erkennbare Schmierfilmschicht	Abhängig von der erkennbaren Schmierfilmstärke wurde zwischen wenig bis sehr stark unterschieden
Rauchentwicklung nach Versuchsdurchführung	Ähnlich der Rauchentwicklung vor der Versuchsdurchführung erfolgte eine Einteilung zwischen wenig bis sehr stark
Erkennbare Schmierfilmhaut an der Probenoberfläche	Unmittelbar nach der Versuchsdurchführung wurde die Probenoberfläche optisch beurteilt, und dabei zwischen Ja und Nein unterschieden
Anhaftungen von Aluminium am Werkzeug	Die Bewertung erfolgte für die jeweiligen Schmiermittel während der Versuchsdurchführung und wurde mit Nein bis sehr stark festgelegt
Beurteilung der Reibspuren der Werkzeuge	Konzentrationsunabhängige Einschätzung der Werkzeuge nach der Versuchsdurchführung hinsichtlich Schmierstoffreste und Anhaftungen

3.3.3.2 Kriterien zur Beurteilung der Probenoberflächen

Die Bewertungskriterien zur Beurteilung der Probenoberflächen wurden durch optische Merkmale definiert (siehe Tabelle 3.20), sowie durch Erfassung von Messdaten, die eine Abschätzung der Pilz- und der Probengeometrie ermöglichen.

Tabelle 3.20: Kriterien zur Beurteilung der Schmierstoffe anhand der Probenoberfläche. Dabei erfolgte die Festlegung zur Beurteilung des Kriteriums durch die **dick** hinterlegten Wörter.

Kriterien zur Beurteilung	Beschreibung der Kriterien zur Beurteilung der Probenoberfläche
Beurteilung der Oberflächenqualität	Die Beurteilung wurde anhand optischer Merkmale zwischen rau über glatt und von glänzend bis matt durchgeführt
Stärke der erkennbaren Riefen	Die Einschätzung der Riefen, die sich vornehmlich in Reibrichtung erstrecken, erfolgt zwischen wenig bis sehr stark
Schmierstoffreste	Die Festlegung der Schmierstoffreste wurde an den prozentuellen Bedeckungsgrad zwischen wenig bis sehr stark abgestuft
Verteilung der Schmierstoffreste	Dabei fand eine Zuweisung der Schmierstoffreste anhand von oberflächenspezifischen Gegebenheiten und Positionen
Schmierfilmabriss	Die Bewertung (Ja und Nein) fand dahingehend statt, ob an der Probenoberfläche Kerben die senkrecht zu Reibrichtung verlaufen, erkennbar waren.

Zur Ermittlung der Oberflächenvergrößerung bei den Proben, muss eine Beurteilung der Geometrie im verformten zum unverformten Zustand erfolgen. Durch die Unsymmetrie, die sich aufgrund der Rotationsbewegung des Drehtellers ergab, und in Abhängigkeit zur Werkzeugtemperatur steht, erfolgte die Vermessung in Reibrichtung und senkrecht dazu, wie in 3.21 dargestellt wird. Um Ungenauigkeiten bei der Berechnung vorzubeugen wurden jeweils zwei Pilzproben (P1 und P2) bei mittleren und maximalen Drücken für die jeweilige Schmierstoffkonzentration verwendet.

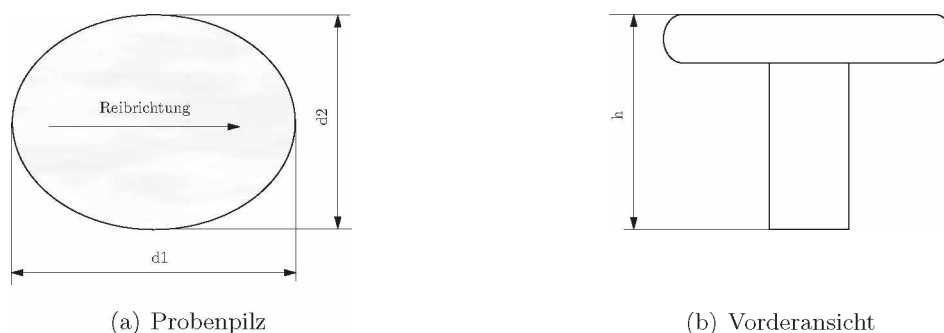


Abbildung 3.21: Bewertung der Probenkörpergeometrie durch Probenkörpervermessung. Um Ungenauigkeiten bei der Vermessung aufgrund der Probenoberfläche bedingt durch den Stauchvorgang mit anschließender Rotation vorzubeugen, erfolgte die Ermittlung des Abstandes d_1 in Reibrichtung und senkrecht dazu d_2 .

Aus den Messdaten für die Probekörper $P1$ und $P2$ lässt sich der mittlere Durchmesser d_m wie folgt berechnen:

$$d_m = \frac{d_1 P1 + d_2 P1 + d_1 P2 + d_2 P2}{4} \quad (3.20)$$

Die Oberflächenvergrößerung O_V wird unter Verwendung des Ausgangsdurchmessers d_0 der Probe von $10mm$ nach Gleichung (3.21) berechnet.

$$O_V = \frac{d_m^2}{d_0^2} \quad (3.21)$$

Um eine zahlenorientierte Betrachtung der Oberflächengeometrie der Probekörper zu ermöglichen, wurde die Pilzsymmetrie S_O definiert, das es möglich ist unter Bildung der Mittelwerte für d_1 und d_2 , eine Beurteilung der Symmetrie bezüglich unterschiedlicher Drücke, Temperaturen und Schmierstoffe durchzuführen.

$$S_O = \frac{d_{m1}}{d_{m2}} \quad , \quad d_{m1} > d_{m2} \quad (3.22)$$

3.3.3.3 Kriterien zur Beschreibung der Hantierbarkeit der Schmierstoffe

Heutzutage wird neben Anforderungen wie geringe Anschaffungskosten je kg, geringer Reibwert, Lebensdauer des Schmiermittels, usw. immer öfter darauf Wert gelegt, dass sich ein neuer Schmierstoff ohne größere Kosten sowie Rüstzeiten in vorhandene Prozesse adaptieren lässt. Dabei sind die Hantierbarkeit des Schmiermediums hinsichtlich eines einfachen, gegebenenfalls automatisierten, Aufbringens über ein Sprühsystem, sowie ein schnelles und unkompliziertes Zubereiten und Einsatzfähig-Machen zu erwähnen.

In Tabelle 3.21 sind die wichtigsten Kenngrößen angeführt. Im weiteren werden Kriterien definiert die es ermöglichen einen Gesamteindruck hinsichtlich der Hantierbarkeit für jeden Schmierstoff zu erhalten.

Tabelle 3.21: Kriterien zur Beurteilung der Schmierstoffe hinsichtlich der Hantierbarkeit

Kriterien zur Beurteilung	Beschreibung der Kriterien zur Beurteilung der Hantierbarkeit
Schmierstoffaufbringung	Die Beurteilung einer einfachen und wirtschaftlichen Aufbringung des Schmierstoffs erfolgt zwischen sehr leicht bis schwer
Vorarbeiten für den Einsatz	Die Erstellung eines einsatzfertigen Schmierstoffverhältnisses soll von sehr leicht bis schwer eingestuft werden
Belästigung am Arbeitsplatz	Störung des Arbeitsplatzes durch Gerüche und bedenkliche Gase bei Öl- und wasserhaltigen Schmierstoffen. (Ja oder Nein)
Umweltverträglichkeit	Einschätzen der Möglichkeit von sehr leicht bis schwer , um eine einfache und schonende Entsorgung von Schmierstoffresten zu ermöglichen
Kundenbetreuung der Schmiermittelfirmen	Beratung bei Problemen hinsichtlich des Schmierstoffaufbringens und Vorbereiten für den Einsatz. (ausgezeichnet bis unzureichend)

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Nomenklatur und Bezeichnung

Damit eine einfache Möglichkeit zur Unterscheidung der verwendeten Schmierstoffe für die unterschiedlichen variablen Parametergruppen ermöglicht wird, soll im folgenden eine Schreibweise definiert werden die dieses Problem behebt:

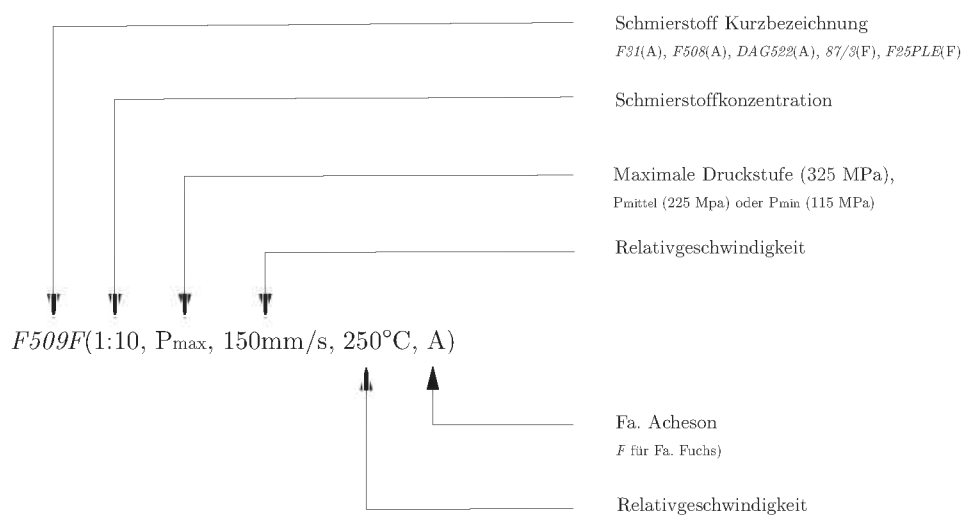


Abbildung 4.1: Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und der variablen Parameter anhand eines illustrierten Beispiels.

Durch die beispielhafte Definition ist es möglich, sich konkret auf bestimmte oder übergreifende Einstellungen bei der Versuchsdurchführung zu beziehen. Die Bezeichnungen können sich verkürzen, wenn im Kapitel Angaben für einheitliche Versuchsbedingungen erfolgen.

4.2 Ergebnisse der Reibkraftmessung

Im folgenden Teilkapitel wird ein besonderes Augenmerk auf den Reibzahlverlauf gelegt, wobei RV als qualitatives Maß aus der Steigung der Summenkurve, die aus den Einzelversuchen der Untersuchung erhalten wurde und aus der Standardabweichung bezogen auf die Regressionsgerade, zusammengesetzt ist. Weitere Abbildungen sollen eine Möglichkeit geben, platzsparend den ursprünglichen Kurvenverlauf der Summenkurve für die jeweilige Parameter-Einstellung zu dokumentieren.

4.2.1 Ergebnisse der Auswahlversuche bei $T_{WZG} = 250 \text{ °C}$

4.2.1.1 Auswertung der Auswahlversuche bei 80 mm Reibweg

Um eine Beurteilung der Kenngrößen zur Charakterisierung der Schmierstoffe zu ermöglichen soll anhand von Einzelabbildungen die den Einfluss für unterschiedliche Konzentrationen und Drücke für die mittlere Reibzahl μ_{MG} , den Reibzahlverlauf $R\bar{V}$ und der Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} exemplarisch dargestellt werden.

In Abbildung 4.2 erfolgt eine Darstellung des Kurvenverlaufs für die einzelnen Schmierstoffe mit Hilfe der mittleren Gleitreibzahl sowie für den maximalen und minimalen Reibwert zwischen 3 bis 80 mm. Es ist zu erkennen, dass die Schmierstoffe auf Grafit-Wasser-Basis wie *F31(A)* und *F-508(A)* fallende, sowie der Schmierstoff *F25PLE(F)* leicht steigende mittlere Reibzahlen bei zunehmender Verdünnung aufweisen. Wie bereits berechnet [53] und durch Untersuchungen für lange Reibwege nachgewiesen werden konnte, wurde beobachtet, dass eine Vergrößerung der Flächenpressung zwischen Werkstück und Werkstoff, eine Reduzierung der Reibwerte zur Folge hat.

Wie in Abbildung 4.2 dargestellt wird, ist dieser Zusammenhang für einen Großteil der Reibwerte für die maximale Druckstufe zu erkennen. Ausnahmen gelten für die folgende Schmierstoffverhältnisse die sich wie folgt begründen lassen:

- i) Für *DAG522(1:10, PMax, A)* wurde bei sehr niedrigen Konzentration ein Schmierfilmabriss bei hohen Drücken beobachtet.
- ii) Bei *F31(1:7, F_{Max} , A)* trat erkennbar ein leichtes Abblättern der Grafitschicht während der Schmierstoffaufbringung auf, wodurch eine unzureichende Schmierwirkung und damit erhöhte Reibwerte entstanden.
- iii) Bei *F-508(D, F_{Max} , A)* traten gegen Ende der Untersuchung (zwischen 60 bis 80 mm Reibweg) erhöhte Reibwerte auf wodurch der Durchschnittswert erhöht wurde.

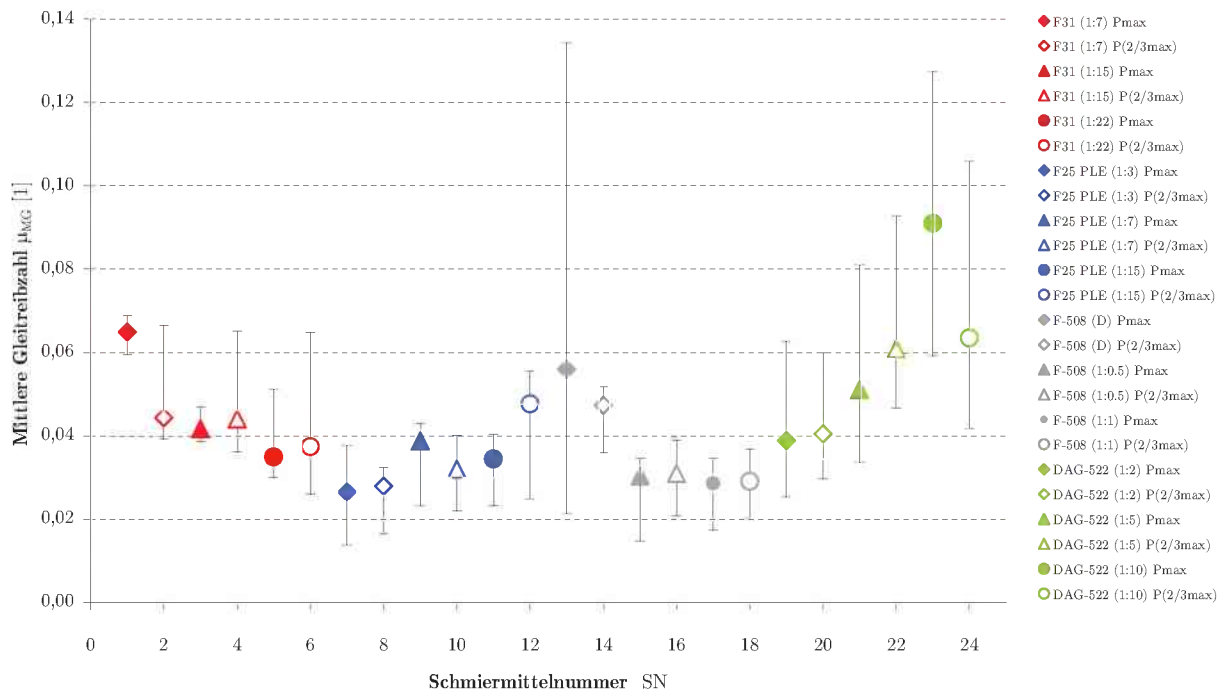


Abbildung 4.2: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg mit den minimalen und maximalen Grenzen des Summenkurvenverlaufs.

Um eine Beurteilung der Reproduzierbarkeit, die auch für den praktischen Einsatz der Schmierstoffkonzentration von Bedeutung ist, darstellen zu können, erfolgte eine Berechnung der Standardabweichung für die Einzelkurven der Versuche, die in Abbildung 4.3 dargestellt ist.

Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass für fast alle Versuche eine bessere Reproduzierbarkeit, d.h. geringe Standardabweichung der Einzelkurven für niedrige Druckstufen, zu erkennen ist. Als Begründung lässt sich einerseits anführen, dass die technischen Grenzen für den Rotationstriebometer bei höheren Drücken erreicht wurde, und andererseits dass während der Umformung bei hohen Drücken ein komplexes Zusammenspiel vieler Parameter wie Temperatur, Oberflächenvergrößerung, Flächenpressung sowie Eigenschaften betreffend der Schmierstoffschicht herrscht. Daher wirken sich geringste Unregelmäßigkeiten nachhaltig auf das Tribosystem aus, wodurch eine stärkere zufällige Streuung der Ergebnisse hervorgerufen wird.

Sind die Standardabweichungen der Einzelkurven SA_{EK} sehr groß, liegen instabile Reibverhältnisse vor. Eine geringe Abweichung bedeutet, dass unabhängig von der Größe der mittleren Reibzahlen für die Einzelversuche, stets reproduzierbare Reibverhältnisse herrschen. Diese Feststellung hat besonders beim Gesenkschmieden, für den jeweiligen Schmierstoff eine besondere Bedeutung hinsichtlich der erbrachten Qualität der Schmiedestücke.

Auch in Abbildung 4.3 ist erkennbar, dass eine schmierstoffbezogene Bildung von Bereichen zu erkennen ist. Weiters sind Tendenzen feststellbar, dass mit einer Abnahme der Konzentration

on für die maximale Druckstufe, höhere Standardabweichungen der Einzelkurven erfolgen. Das geschilderte Verhalten lässt sich für die Schmierstoffe $F31(P_{Max}, A)$, $F25PLE(P_{Max}, F)$ und $DAG522(P_{Max}, A)$ deutlich erkennen. Analog sind Feststellungen tendenziell auch für mittlere Drücke erkennbar.

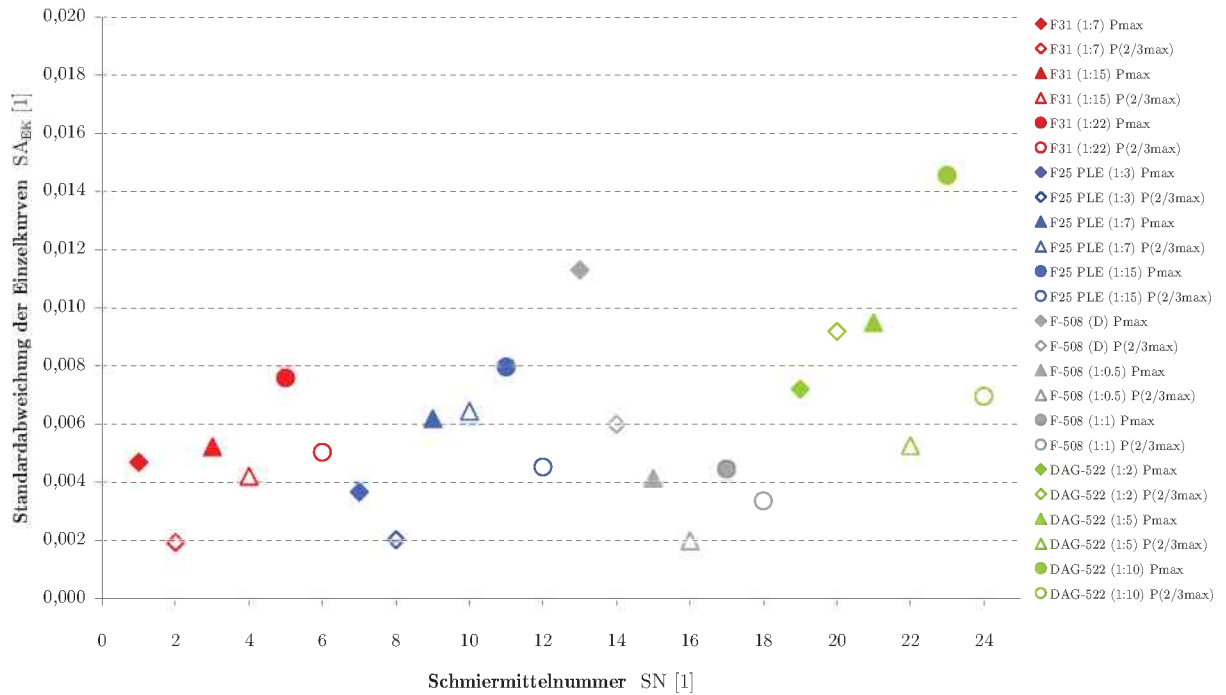


Abbildung 4.3: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} zu Schmiermittelnummer SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

Wie aus Abbildung 4.4 erkennbar, kann über das Vorzeichen für den Reibzahlverlauf direkt auf die Kurvensteigung geschlossen werden, welche im Vergleich zu den unterschiedlichen Konzentrationen und Druckstufen angeordnet ist. Dabei zeigt sich, dass die Abhängigkeit bezüglich der Druckstufen und Konzentrationen gering ist. Aus der Darstellung kann geschlossen werden, dass wenn $R\dot{V}$ gegen Null geht der Schmierstoff über den ganzen Reibweg einen gleichmäßigen Reibwert, „geradliniger Kurvenverlauf“, mit kaum einer Steigung besitzt. Dabei ist besonders auf die Ergebnisse für das Produkt $F31(F)$ zu achten. Der Schmierstoff $DAG522(A)$ zeigt im Vergleich zu den anderen deutlich fallende Reibzahlverläufe bei niedrigen Konzentrationen.

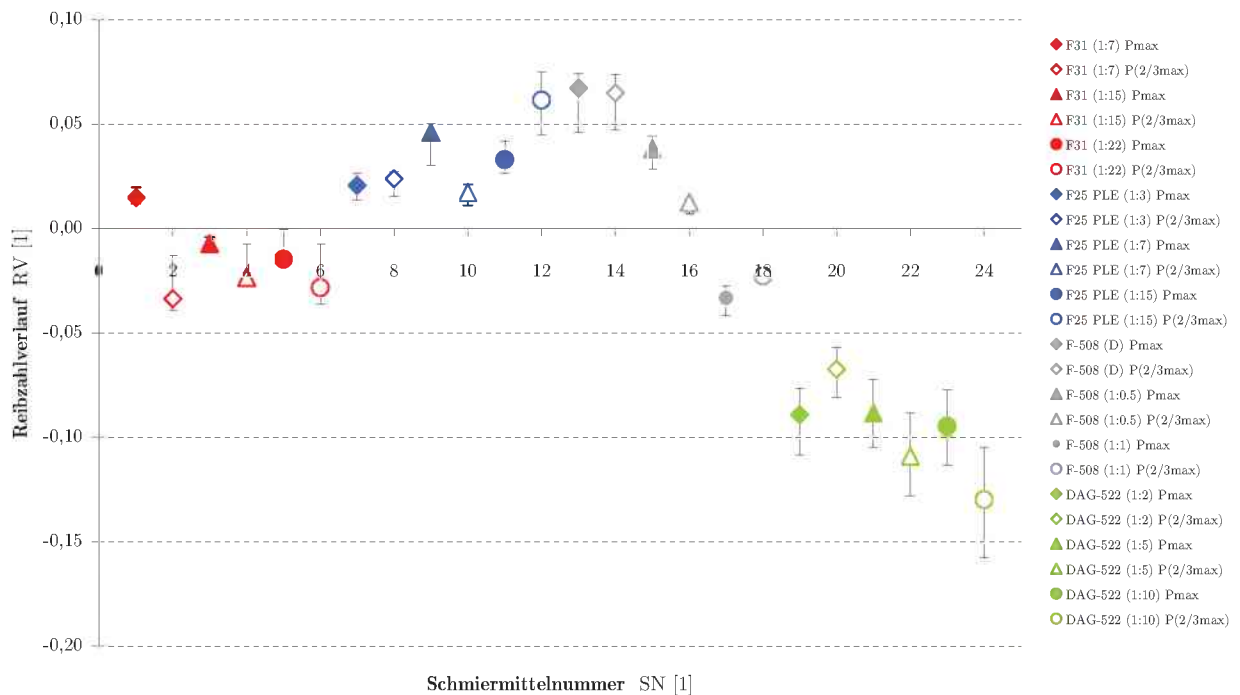


Abbildung 4.4: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ - Reibzahlverlauf RV zu Schmiermittelnummer SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

In Abbildung 4.5 ist die mittlere Gleitreibzahl über den Reibzahlverlauf für unterschiedliche Druckstufen und Schmierstoffkonzentrationen aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schmierstoffe zu einer tendenziellen Gruppenbildung neigen die den Charakter des jeweiligen Schmiermediums darstellen. Über das Vorzeichen des Reibzahlverlaufs lässt sich direkt auf den Steigungswinkel der Summenkurve rückschließen, wobei sich zeigt, dass die Schmierstoffe $F31(A)$ und $DAG522(A)$, im Vergleich zu dem Schmiermitteln mit positiver Kurvensteigung $F25PLE(F)$ und $F508(A)$, fallende Reibzahlen (negativer Steigungswinkel) besitzen. Um weitere Aussagen und Gründe über das Verhalten vorbringen zu können, wurden weitere Untersuchungen für unterschiedliche Reibwege durchgeführt um eine Charakterisierung der Kurvensteigung zu ermöglichen (siehe Kapitel 4.5).

Allgemein kann ausgesagt werden, dass jene Schmierstoffkonzentrationen die einen Reibzahlverlauf nahe Null (geradliniger Summenkurvenverlauf) aufweisen sehr konstante und gleichmäßige Reibzahlen entlang des gesamten Reibwegs besitzen.

Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, zeigt der auf Grafit-Öl-Basis (einziger Schmierstoff bei 250°C) strukturierte Schmierstoff $DAG522(A)$ ein typisches Verhalten: Mit zunehmender Verdünnung ist ein Anstieg der Reibwerte aufgrund der unzureichenden Schmierwirkung zu erwarten. Bei den Schmierstoffen $F31(A)$, $P25PLE(F)$ und $F508(A)$ auf Grafit-Wasser-Basis lässt sich beobachten, dass die erhaltenen Reibwerte sehr stark von den systembedingten Größen der Sprühhvorrichtung wie der Sprühdauer, Druck usw. abhängig sind. Durch die Verdampfung des Wassers beginnt

schon während der Schmierstoffaufbringung ein Abblättern von dickeren Bereichen der Grafitsschicht am Werkzeug, weshalb sich erhöhte Wasserkonzentrationen positiv auf den Reibwert auswirken können. Daher geht aus den Ergebnissen hervor, dass durch eine Erhöhung des Konzentrationgehalts nicht in jedem Fall eine Verminderung der mittleren Reibwerte erreicht wird, sondern dass bei längerer Sprühdauer und höheren Konzentrationen die Reibzahlen größer werden. Eine weitere Zunahme der Reibzahlen ist auch auf den Effekt zurückzuführen, dass Schmierstoffpartikel auf Grund ihres geringen Haftvermögens noch während des Sprühens wieder verblasen werden.

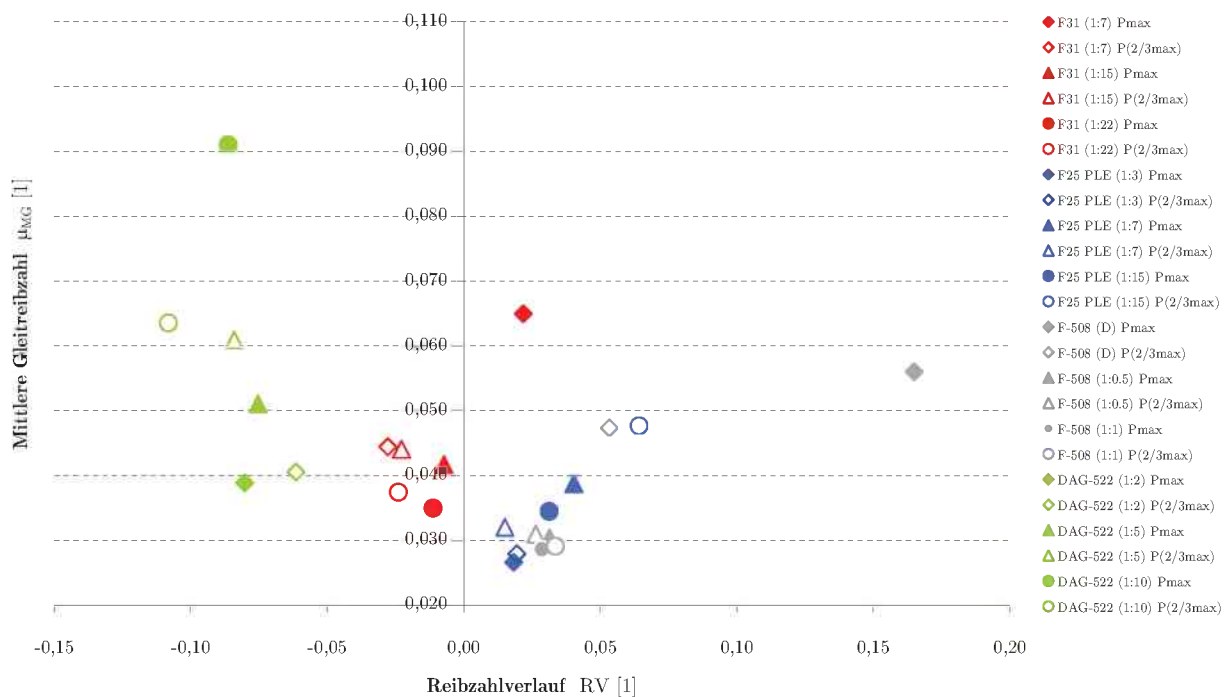


Abbildung 4.5: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf RV im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

Aus den Untersuchungsergebnissen (siehe Abbildung 4.5) lässt sich erkennen, dass die beiden Konkurrenzprodukte der Firma *Fuchs* (*F25PLE*) und *Acheson* (*F508*) in gleichen Bereichen zu finden sind. Durch den Projektpartner wurde festgelegt, dass die zwei Schmierstoffverhältnisse mit den niedrigsten mittleren Reibwerten bei maximalen Druck, einer detaillierten Untersuchung unterzogen werden sollten. Die Festlegung erfolgte daher für das Schmiermittel *F25PLE*(1:3, F) und aus den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit für das Produkt *F508*(1:1, A) mit einer Konzentration von 1:1.

Im Folgenden findet eine zusammengesetzte Betrachtung für den μ_{MG} und der SA_{EK} für die Einzelkurven statt (siehe Abbildung 4.6). Im Unterschied zwischen den Schmierstoffen hinsichtlich des Aufbaus zeigt sich deutlich, dass der Schmierstoff *DAG522*(A) sehr hohe Standardabwei-

chungen zeigt und eine genauere Betrachtung bei hohen Werkzeugtemperaturen erfolgen wird. Somit kann tendenziell gefolgert werden, dass niedrige mittlere Reibwerte auch zu niedrigen SA_{EK} führen. Der besprochene Einfluss der Druckstufe auf die Standardabweichung ist deutlich zu erkennen.

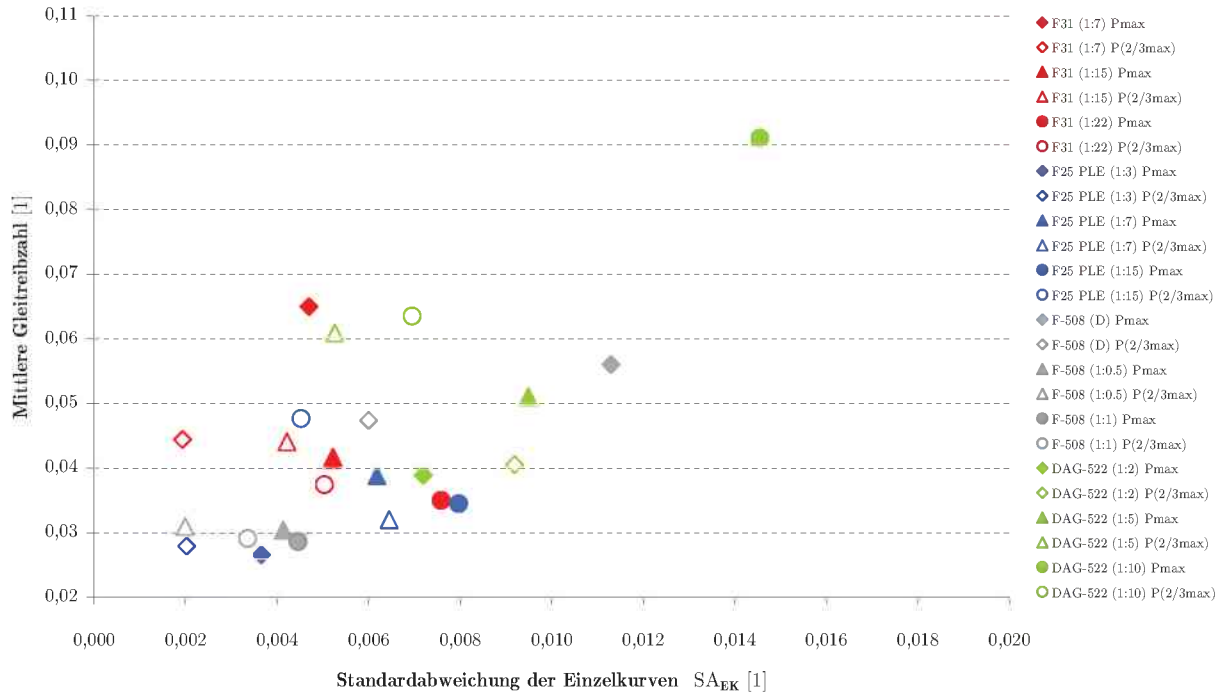


Abbildung 4.6: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

Wie aus Abbildung 4.6 zu erkennen, zeigen die für den Detailversuch ausgewählten Schmiermittel $F508(1:1, A)$ und $F25PLE(1:3, F)$ für die unterschiedlichen Druckstufen eine gute Reproduzierbarkeit der Einzelversuche.

In Abbildung 4.7 erfolgt eine Darstellung des Reibzahlverlaufs zur Standardabweichung der Einzelkurven. Die Werte zeigen eine schmierstoffbezogene Gruppenbildung wobei die Aussage das mit zunehmender SA_{EK} ein besserer Kurvenverlauf erzielt wird, nicht aussagekräftig ist. Daher ist der mögliche Einfluss weniger von der Reproduzierbarkeit sondern vielmehr von den Eigenschaften und den Aufbau des Schmiermediums abhängig. Deutlich erkennbar ist, dass der Schmierstoff $DAG522(A)$ hohe RV und Abweichungen zeigt und daher im unteren Bereich des Feldes liegt.

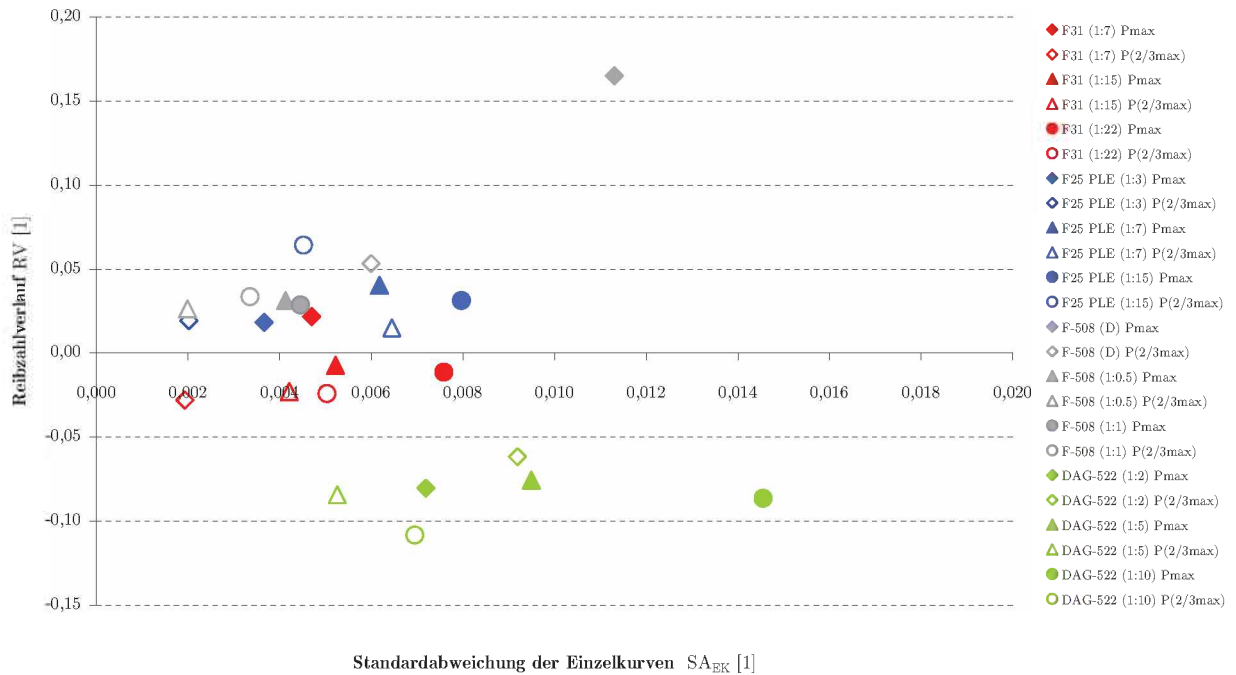


Abbildung 4.7: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ - Reibzahlverlauf RV zu Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

4.2.1.2 Auswertung bei 40 mm Reibweg

Im Folgenden fand eine analytische Auswertung der Auswahlversuche für 40 mm statt die in Abbildungen 4.8 und 4.9 dargestellt werden um eine möglichst exakte Betrachtung für kurze Reibwege, sowie einen direkten Vergleich für Reibwege von 80 mm zu ermöglichen. Weiterführende Betrachtungen erfassen das Verhalten der mittleren Reibzahl sowie den Reibzahlverlauf RV .

Die Werte unterscheiden sich im Vergleich zu Abbildung 4.2 nur soweit, dass Schmierstoffe mit positiven RV niedrigere Reibzahlen und jene mit negativen RV leicht höhere bis gleiche Werte zeigen. Für den Schmierstoff $F25PLE(D, F)$ ist zu erkennen, dass der Reibzahlverlauf und die dazugehörige mittlere Reibzahl sehr viel geringer sind (siehe Abbildung 4.8), bedingt durch das Versagen des Schmierfilms bei 80 mm. Ein starker Anstieg kann für den Reibwert für $DAG-522(1:10, A)$ aufgezeigt werden, welcher bereits durch den erwähnten Schmierfilmverlust erklärt werden kann. Anhand der geringen Abweichungen der Grenzen für den Summenverlauf für μ_{MG} kann man folgern, dass die Tragfähigkeit bzw. der Kurvenverlauf viel stabiler als für 80 mm Reibweg ist.

Die Ergebnisse für den Reibzahlverlauf aus Abbildung 4.9 zeigen Übereinstimmungen mit den Werten aus Abbildung 4.4, wobei jedoch Verschlechterungen für $DAG-522(A)$ bei niedrigen Konzentrationen ablesbar sind.

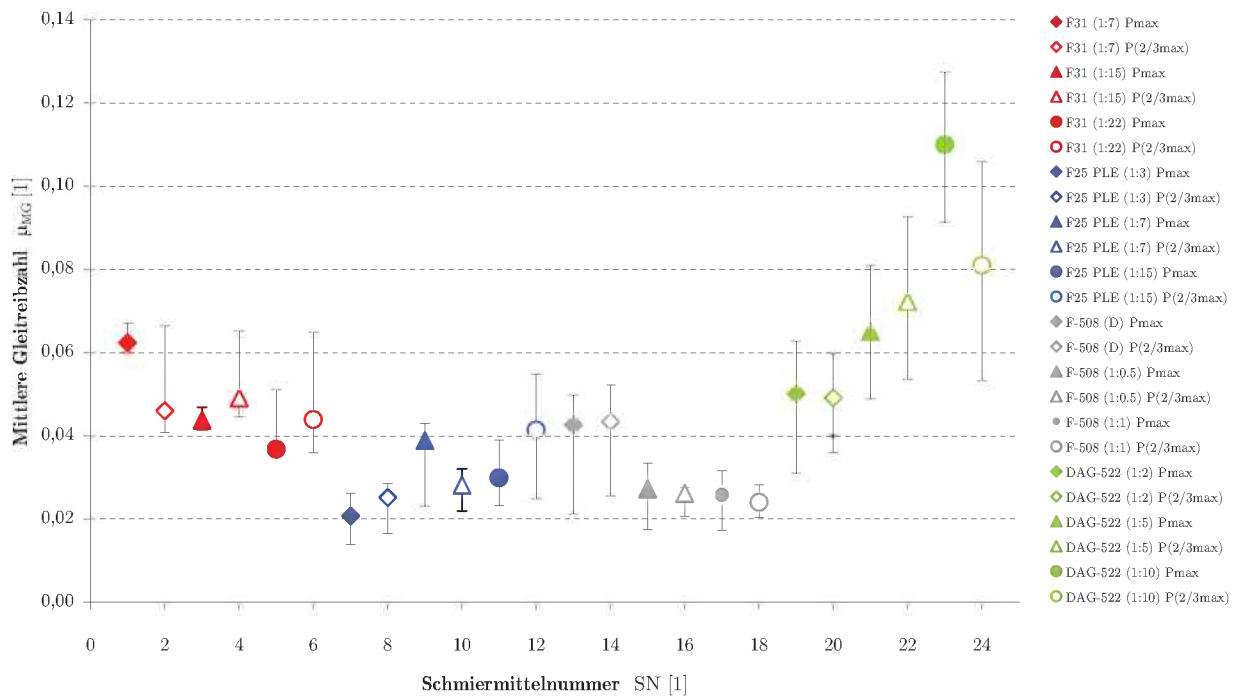


Abbildung 4.8: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} im Bereich von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg sowie mit den Grenzen des für den Summenkurvenverlaufs.

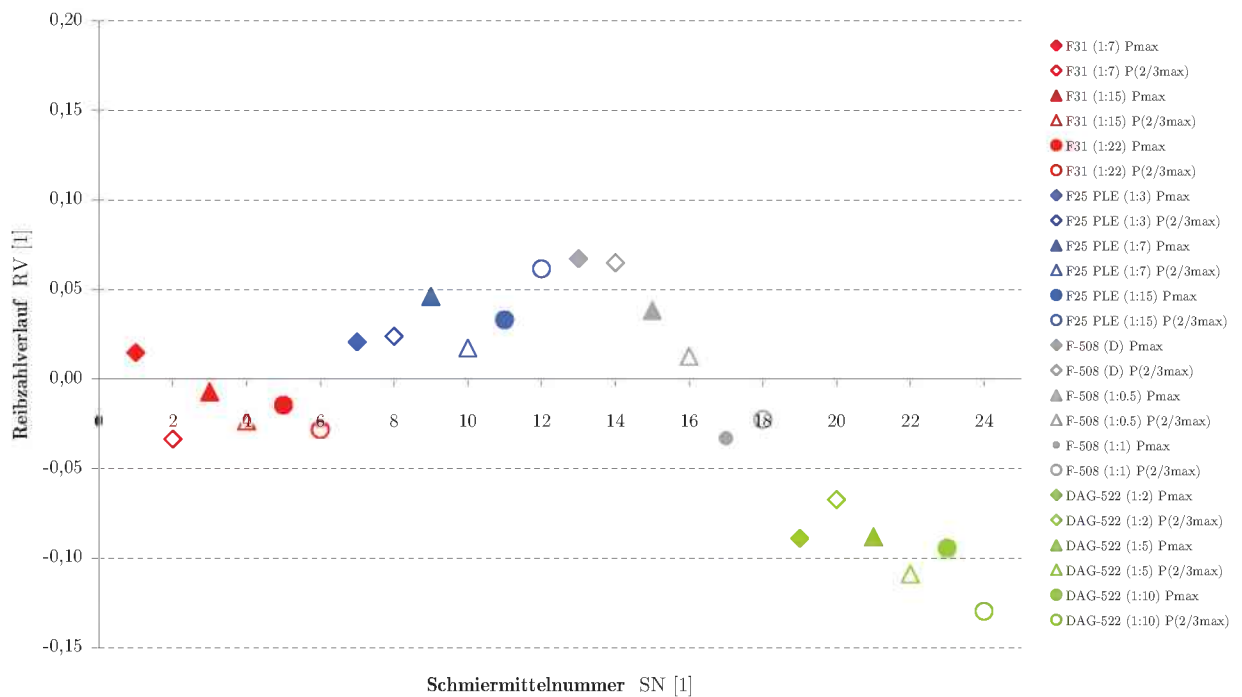


Abbildung 4.9: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Reibzahlverlauf RV zu Schmiermittelnummer SN von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

Für den Schmierstoff *F508*(1:1, A) zeigt sich eine negative Steigung die dadurch begründet werden kann, dass der Schmierstoff zu Beginn des Reibweges eine leichte Zunahme der Reibzahlen mit anschließenden Rückgang aufweist die bei 40 mm ein Minimum besitzen, wodurch die fallende Steigung verursacht wird wie in Abbildung 4.10 dargestellt. Allgemein kann festgestellt werden, dass die Schmierstoffe auf Grafit-Wasser-Basis für 40 mm Reibweg eine niedrigere *RZ* besitzen und sich an die Nullachse annähern. Daher sind die Unterschiede für positiven oder negativen Reibzahlverlauf sehr gering.

Im Vergleich zu Abbildung 4.2 zeigen die mittleren Reibzahlen geringere Grenzen für den Summenkurvenverlauf, die für den Schmierstoff DAG-522(A) in Abbildung 4.8 zu beobachten sind. Da die verschiedenen Standardabweichungen der Einzelkurven und die Versuchsbedingungen für einen Reibweg von 80 mm gelten, siehe Abbildung 4.6, wurde auf eine weitere Darstellungen verzichtet.

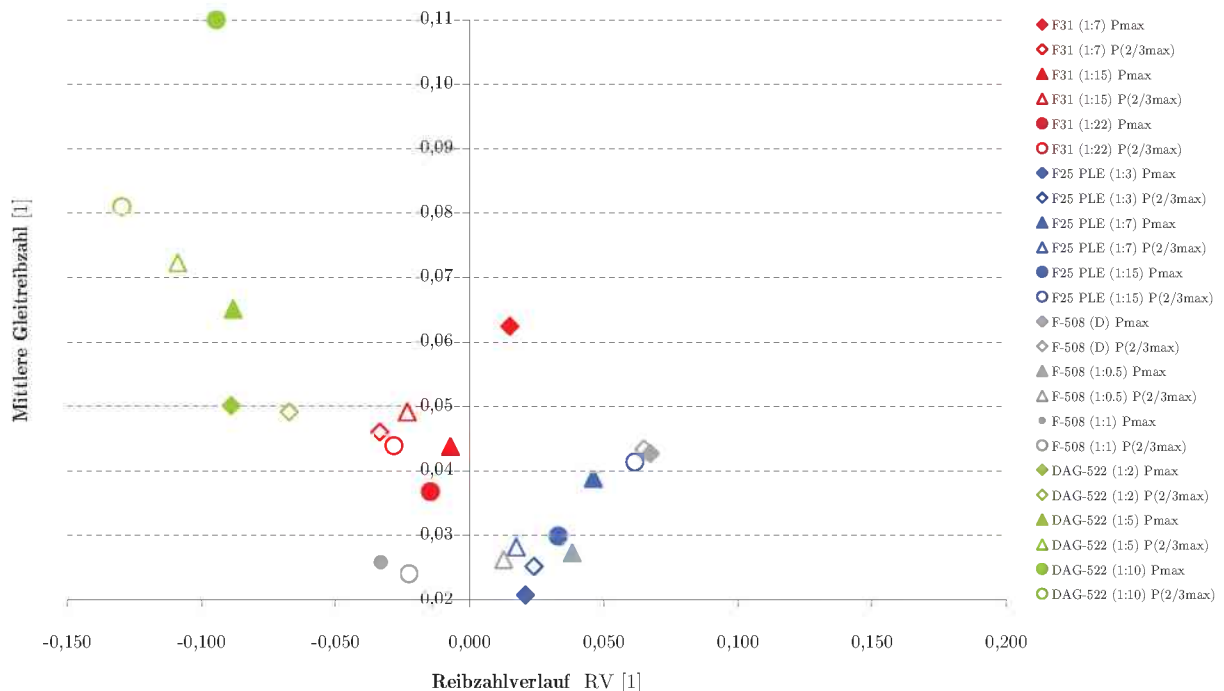


Abbildung 4.10: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf RV im Bereich von 3 bis 4 mm bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg

4.2.1.3 Ergebnistabelle und Diskussion

Aus den Ergebnissen für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ wurde eine Tabelle erstellt, wobei durch unterschiedliche Farben für die Werte eine möglichst einfache optische Zuordnung der Schmierstoffe über die Wirksamkeit erfolgte. Dabei wurden drei unterschiedliche Farben verwendet die nach Tabelle 4.1 wie folgt definiert sind:

Tabelle 4.1: Farbschema zur qualitativen Erfassung der Ergebnisse

Farbe	Bezeichnung	Praktische Sichtweise
Grün	Ausgezeichnet	Das Schmiermittel ist für diese Aufgabe bestens geeignet
Orange	Befriedigend	Der Schmierstoff zeigt Schwächen, jedoch sollte eine Beurteilung der Rahmenbedingung für den jeweiligen Zweck einen Einsatz ermöglichen
Rot	Unzureichend	Der Schmierstoff zeigt Mängel, jedoch sollten die wichtigsten Größen der Charakterisierung genau betrachtet werden

Die Zuordnung der Farben erfolgte relativ für die Werkzeugtemperatur von 250°C, wobei eine Teilung in drei Bereiche für die Ergebnisse des Reibzahlverlaufs, der mittleren Reibzahl, Steigungswinkel und SA der Summenkurve erfolgte. Um eine aussagekräftige Beurteilung der Ergebnisse zu ermöglichen wird im Weiteren besonders auf die beiden wichtigsten Kenngrößen, den mittleren Reibwert und dem Reibzahlverlauf, eingegangen.

Wie aus Tabelle 4.2 erkennbar ist, zeigt der Schmierstoff $F31(A)$ bei unterschiedlichen Konzentrationen und Drücken sehr gute Ergebnisse für den RV , jedoch ist auch erkennbar, dass die Reibzahlen bei höheren Konzentration schlechter werden.

Für die Schmierstoffe $F25PLE(F)$ und $F508(A)$ sind durchgehend gute Werte für den Reibzahlverlauf und der Reibzahlen zu beobachten, jedoch treten Unterschiede für den Schmierstoff $F25PLE(F)$ bei höheren Konzentrationen auf, die zu schlechteren Ergebnissen tendieren und $F508(D, A)$ zeigt bei direkter Anwendung schlechte Ergebnisse. Für das Schmiermedium $F508(A)$ kann gefolgert werden, dass gegebenenfalls noch höhere Konzentrationen mit zufriedenstellenderen Ergebnissen möglich wären.

Aufgrund der Farbeinteilung zeigt der Schmierstoff $DAG522(A)$ im Vergleich zu den anderen durchgehend schlechte Ergebnisse bei dieser Werkzeugtemperatur, die dadurch begründet sind, dass der Schmierstoff bei den angegebenen Temperaturen nicht die optimale Wirkung entfalten konnte. Eine genaue Betrachtung und Diskussion findet in Abschnitt 4.2.5.3 statt. Als einziger Schmierstoff in der Versuchsreihe erstreckten sich die Untersuchungen bei Werkzeugtemperaturen von 250°C bis 450°C.

DELTAForge	
F-508	
Fa.Acheson Twzg=250°C	

(D)	Pmax	325	0,05660	0,1650	0,0459	0,0159	0,0113
	P(2/3max)	215	0,0474	0,0533	0,0127	0,0052	0,0060
	Pmax	325	0,0304	0,0314	0,0084	0,0030	0,0041
(1:0.5)	P(2/3max)	215	0,0310	0,0263	0,0140	0,0022	0,0020
	Pmax	325	0,0286	0,0287	0,0074	0,0028	0,0045
(1:1)	P(2/3max)	215	0,0291	0,0336	0,0117	0,0032	0,0034

DAg-522	
Fa.Acheson	
Twzg=250°C	

(1:2)	Pmax	325	0,0389	-0,0803	-0,0253	0,00762	0,0072
	P(2/3max)	215	0,0405	-0,0615	-0,0207	0,00579	0,0092
	Pmax	325	0,0511	-0,0754	-0,0366	0,00659	0,0095
(1:5)	P(2/3max)	215	0,0609	-0,0841	-0,0294	0,00788	0,0053
	Pmax	325	0,0911	-0,0863	-0,0484	0,00714	0,0146
(1:7)	P(2/3max)	215	0,0635	-0,1082	-0,0517	0,0095	0,0069

Tabelle 4.2: Ergebnistabelle der Auswahlversuche für $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ für 80 mm Reibweg

Schmiermittel		Konzentration	Normaldrucke [Mpa]	mittlere Reibwert	Reibzahlverlauf RV	Steigungswinkel	Standardabweichung der Summenkurve SA	Standardabweichung der Einzelkurven SA _{EK}
LUBRODAL F25 PLE Fa.Fuchs $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$	(1:3)	Pmax	325	0,0266	0,0184	0,0175	0,0006	0,0037
		P(2/3max)	215	0,0279	0,0194	0,0090	0,0017	0,0020
	(1:7)	Pmax	325	0,0388	0,0103	0,0043	0,0010	0,0062
		P(2/3max)	215	0,0320	0,0151	0,0124	0,0009	0,0064
	(1:15)	Pmax	325	0,0346	0,0213	0,0142	0,0028	0,0080
		P(2/3max)	215	0,0177	0,0243	0,0225	0,0069	0,0045
DELTAForge F-31 Fa.Fuchs $T_{WZG}=250^\circ\text{C}$	(1:7)	Pmax	325	0,0650	0,0219	0,0067	0,0021	0,0047
		P(2/3max)	215	0,0444	-0,0279	-0,0127	0,0026	0,0019
	(1:15)	Pmax	325	0,0417	-0,0072	-0,0057	0,0004	0,0052
		P(2/3max)	215	0,0441	-0,0228	-0,0135	0,0018	0,0042
	(1:22)	Pmax	325	0,0350	-0,0112	-0,0060	0,0009	0,0076
		P(2/3max)	215	0,0374	-0,0240	-0,0199	0,0013	0,0050

4.2.2 Ergebnisse der Auswahlversuche bei $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$

4.2.2.1 Auswertung der Auswahlversuche bei 80 mm Reibweg

Im zweiten Teil der Auswahlversuche wurden spezielle Schmiermittel verwendet, die für den Einsatz bei sehr hohen Werkzeugtemperaturen (450°C) gedacht sind. Im Folgenden werden die wichtigsten Größen dargestellt und verglichen.

Aus Abbildung 4.11 lässt sich erkennen, dass die mittlere Reibzahl für den Schmierstoff *F509F(A)* mit zunehmender Verdünnung abnimmt. Daher ist deutlich ein Zusammenhang zwischen der aufgetragenen Menge des Schmierstoffs und der Reibzahl zu erkennen. Bei der Versuchsdurchführung gab es keine Probleme hinsichtlich Anhaftungen sowie der Schmiermittelaufbringung für unterschiedliche Konzentrationen.

Für den Schmierstoff *DAG522(A)* zeigte sich, dass es bei zunehmender Verdünnung zu leichten Anhaftungen von Aluminium kommt, die zu sehr hohen Reibzahlen (siehe Grenzen des Summenkurvenverlaufs in Abbildung 4.11) am Beginn des Reibwegs führten. Daher wurden weitere Versuche bei Werkzeugtemperaturen von 400°C durchgeführt wodurch gezeigt wurde, dass Probleme der Anhaftung bei zunehmender Verdünnung deutlich abnehmen.

Weitere Probleme bei der Schmierstoffaufbringung traten für den Schmierstoff *87/3(D, F)* auf, welcher in direkter Form aufgebracht wurde. Aufgrund der hohen Viskosität war es nicht möglich das Schmiermedium mit der Sprühhvorrichtung aufzubringen. Die Benetzung der Werkzeuge wurde deshalb über einen Pinsel aufgebracht, wobei die Ergebnisse mit Vorbehalt zu betrachten sind. Durch fehlende Mittel war es nicht möglich eine Schmierstoffheizung zu installieren um nähere Untersuchungen durchzuführen. Bei Werkzeugtemperaturen von 450°C waren auch erhebliche Anhaftungen von Aluminiumresten zu beobachten. Daher wurde schrittweise die Werkzeugtemperatur auf 400°C und 350°C gesenkt um ein mögliches Optimum für den Schmierstoff zu finden. Dabei ist zu erkennen, dass die Reibzahlen linear mit Abnahme der Temperaturen sinken. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass bei niedrigen Temperaturen eine bessere Schmierwirkung mit niedrigen mittleren Reibzahlen auftrat und kaum mehr Anhaftungen feststellbar waren. Dennoch sind die Ergebnisse aufgrund der Schmiermittelaufbringung mit Vorbehalt zu betrachten.

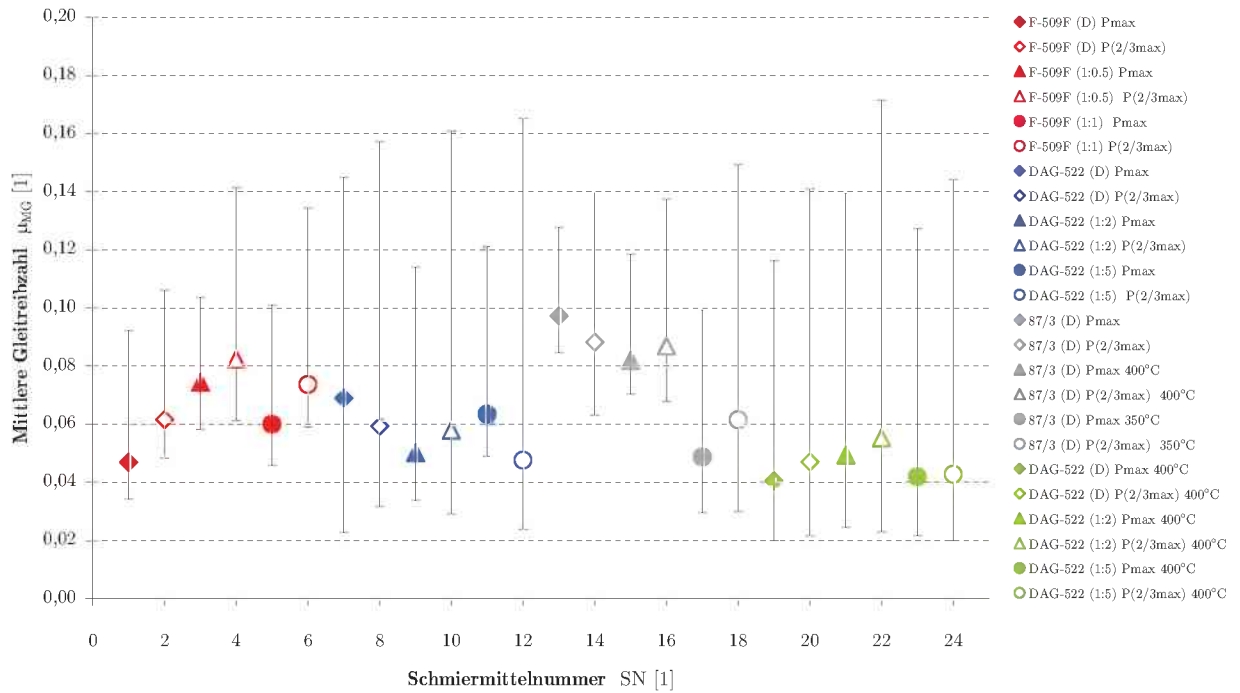


Abbildung 4.11: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Schmiermittelnummer SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg mit den Grenzen des minimalen und maximalen Summenkurvenverlaufs.

Wie aus Abbildung 4.12 erkennbar ist, zeigen die Schmierstoffe $F509F(450^\circ\text{C}, \text{A})$ und $DAG522(450^\circ\text{C}, \text{A})$ Tendenzen, dass die Reproduzierbarkeit bei hohen Werkzeugtemperaturen und Drücken besser ist, d.h. niedrigere Standardabweichungen der Einzelkurven SA_{EK} , als bei mittleren Drücken.

Der Vergleich gegenüber anderen Schmierstoffen ist für $87/3(\text{D}, 450^\circ\text{C}, \text{F})$ nur bedingt durch die starken Aluminiumanhaftungen möglich. Daher wurde eine Reproduzierbarkeit der Einzelkurven äußerst schwierig, wodurch sehr hohe Standardabweichungen zu beobachten sind.

Durch den Versuch bei 400°C für $DAG522(450^\circ\text{C}, \text{A})$ konnte festgestellt werden, dass es bei niedrigeren Werkzeugtemperaturen zu einer Umkehr der A_{EK} kommt und wie für $87/3(350^\circ\text{C}, \text{D}, \text{F})$ gezeigt, dass die Reproduzierbarkeit für mittlere Drücke besser ist (vergleiche Abbildung 4.3). Konzentrationsbedingte Änderungen der SA_{EK} sind für $F509F(450^\circ\text{C}, \text{A})$ und $DAG522(450^\circ\text{C}, \text{A})$ geringer ausgebildet.

Der druckabhängige Einfluss für den Reibzahlverlauf ist in der Abbildung 4.13 wiedergegeben. Daraus geht hervor, dass für fast alle Schmierstoffe der Reibzahlverlauf für maximalen Druck besser ist, d.h. einen gleichmäßigen ebenen Kurvenverlauf zeigen, als bei mittleren Drücken. Als Begründung lässt sich ein signifikanter Einfluss seitens des Schmiermediums begründen. Weiters ist für die Schmiermittel $DAG522(\text{A})$ und $F509F(\text{A})$ andeutungsweise zu erkennen, dass mit zunehmender Verdünnung eine Verschlechterung von RV eintritt. Lineare Tendenzen sind teilweise für die einzelnen Druckstufen über die Schmierstoffkonzentration zu erkennen.

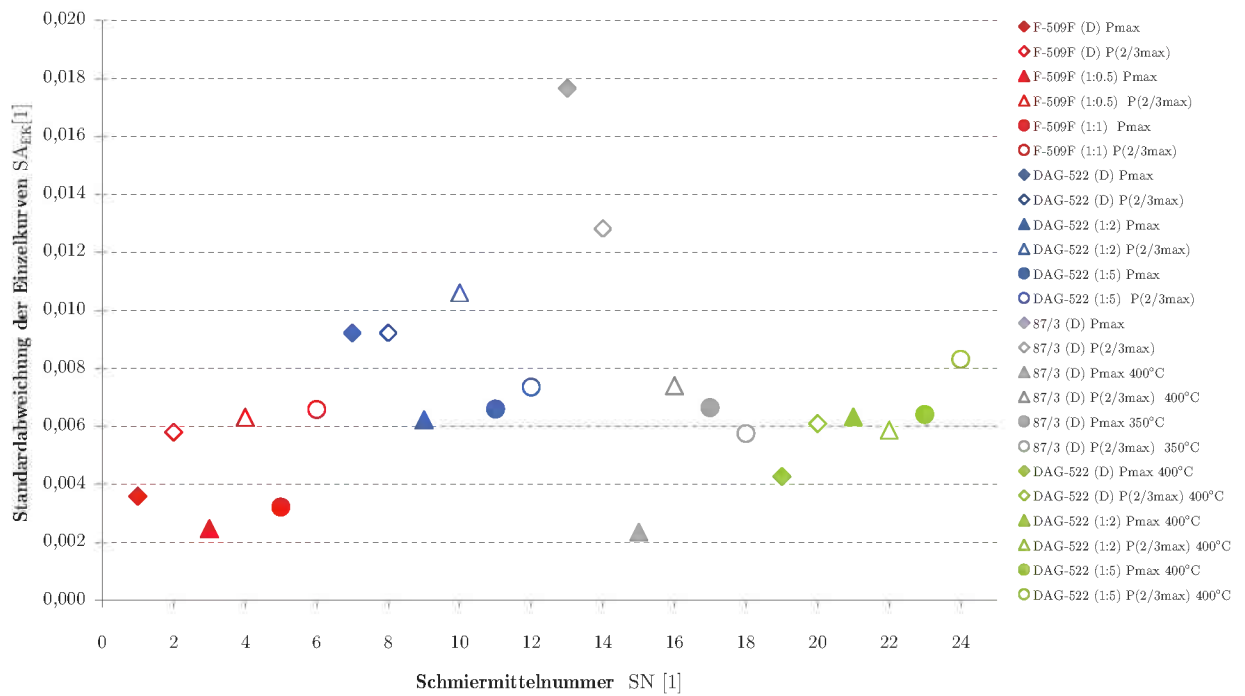


Abbildung 4.12: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} zu Schmiermittelnummer SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

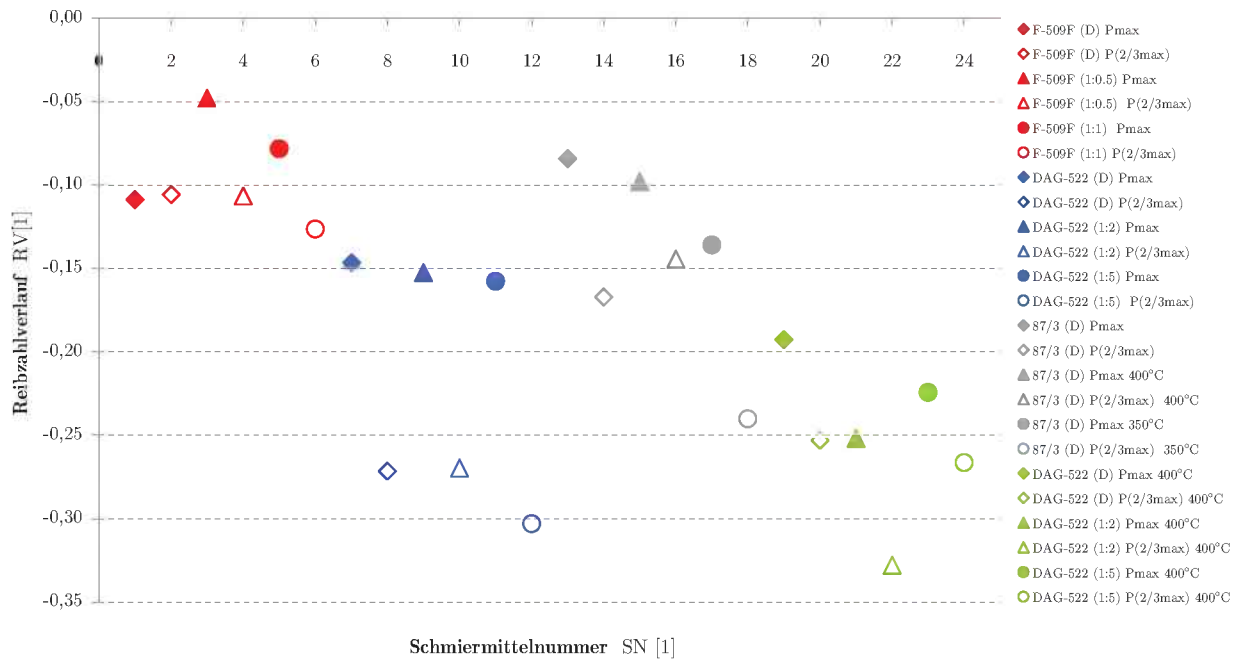


Abbildung 4.13: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Reibzahlverlauf RV zu Schmiermittelnummer SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

Aus der zusammengesetzten Betrachtung für den Reibzahlverlauf und der mittleren Reibzahl nach Abbildung 4.14 ergibt sich, dass das Schmiermedium *F509F*(A) bei direkter Aufbringung die besten Ergebnisse hinsichtlich niedrige Reibzahlen und guten Reibzahlverlaufs liefert. Aufgrund der bereits angesprochenen Probleme der Schmierstoffaufbringung für hohe Werkzeugtemperaturen und der Anhaftungen, wurden die Detailversuche nur mit einer Konzentration durchgeführt, da der Schmierstoff *F509F*(D, F) besonders durch sehr leichte Handhabung erfreute. Daher erfolgte bei den Detailversuchen eine genauere Betrachtung bei unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Druckstufen. Außerdem sind in Abbildung 4.14 schmierstoffbezogene Bereiche zu erkennen wo es zur Gruppenbildung der unterschiedlichen Produkte hinsichtlich der Eigenschaften kommt. Für den Schmierstoff *DAG522*(400°C, A) ist zu erkennen, dass die Reibwerte viel geringer sind als jene bei 450°C.

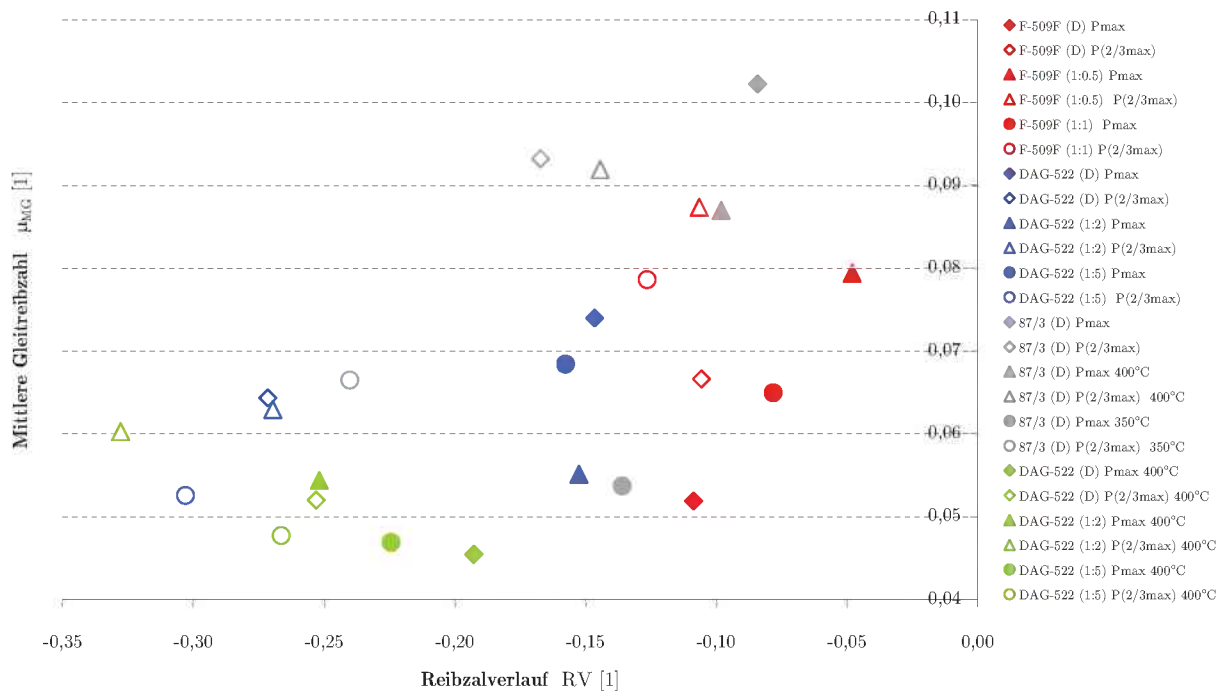


Abbildung 4.14: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf RV im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg

Abbildung 4.15 zeigt, dass der Schmierstoff *DAG522*(A) bei abnehmender Werkzeugtemperatur bessere Reproduzierbarkeiten und Reibwerte besitzt. Besonders deutlich ist der Einfluss der Werkzeugtemperatur hinsichtlich der SA_{EK} für den Schmierstoff *87/3*(D, F). Tendenzen sind zwischen RV und der Standardabweichung der Einzelkurven nach Abbildung 4.16 zu erkennen, wobei mit abnehmender SA_{EK} der Reibzahlverlauf kleiner wird und zu einem geradlinigen Kurvenverlauf führt.

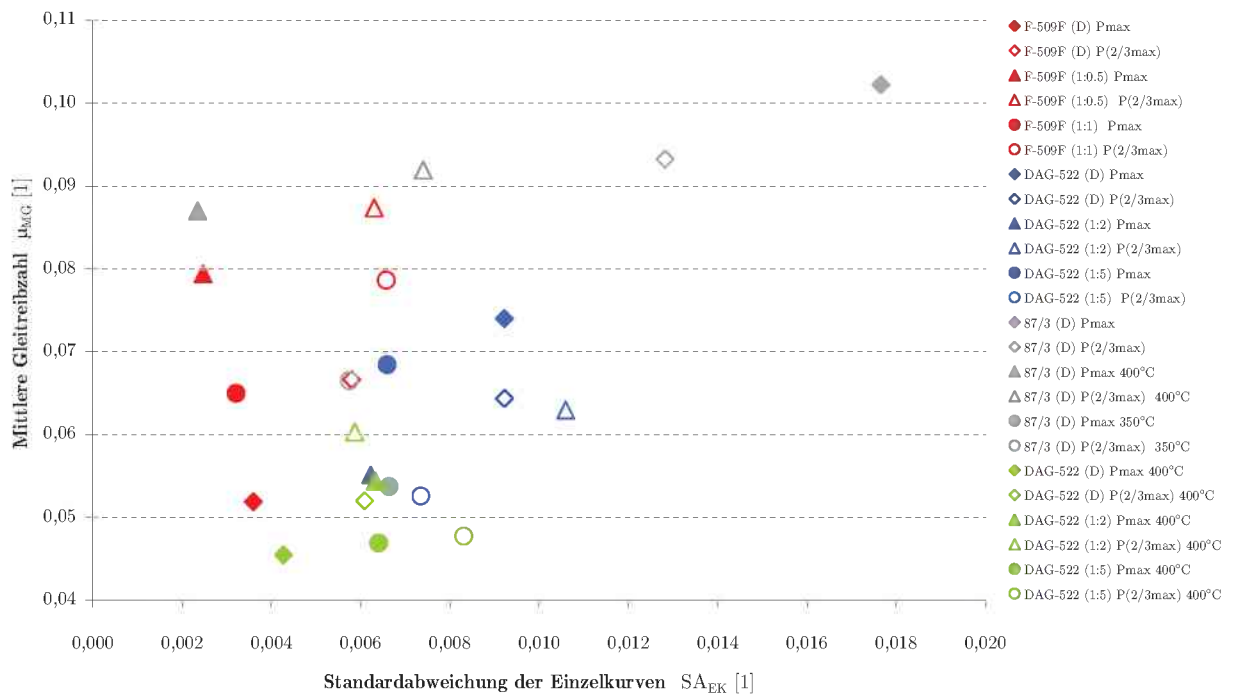


Abbildung 4.15: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

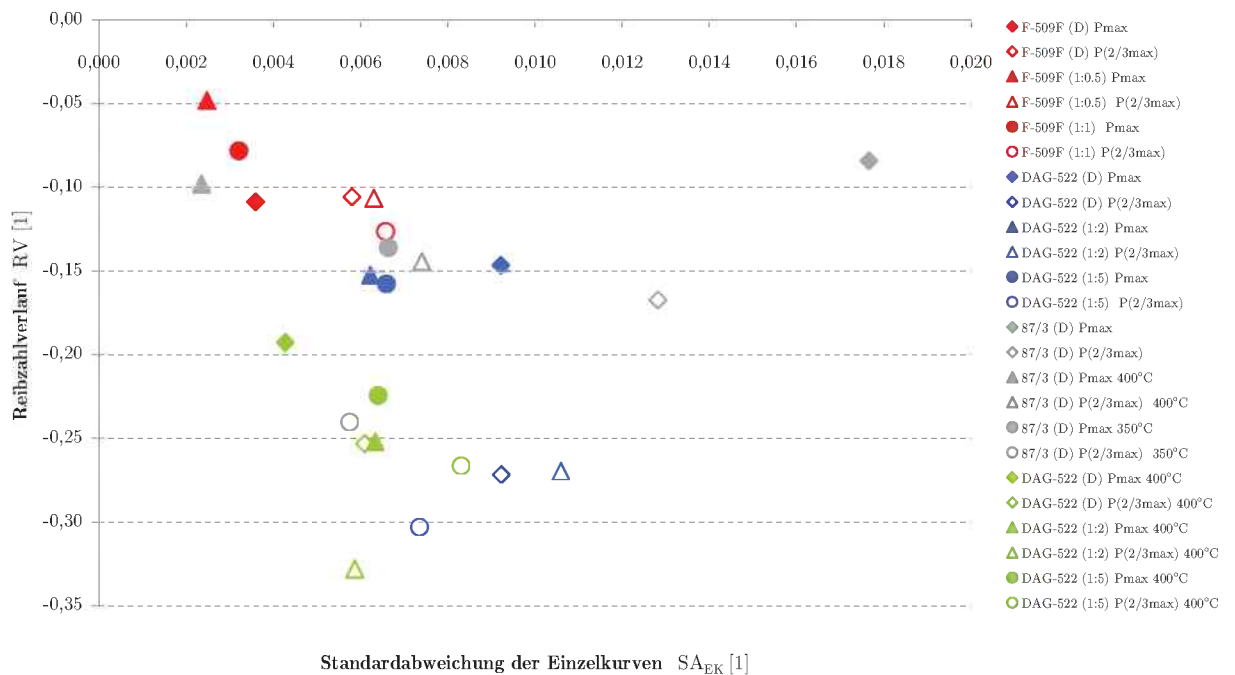


Abbildung 4.16: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Reibzahlverlauf RV zu Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

Aus der vorliegenden Diskussion lässt sich folgern, dass bei hohen Werkzeugtemperaturen der Einfluss für die Temperatur immer größer wird und eine zusammengesetzte Betrachtung, die bei Werkzeugtemperatur von 250°C erfolgte, nur bedingt möglich ist.

4.2.2.2 Auswertung bei 40 mm

Nach Abbildung 4.17 sind für die mittleren Reibzahlen für 40 mm, die gleichen Feststellungen zu treffen die bereits in Abbildung 4.11 erörtert wurden. Ein geringer Unterschied besteht darin, dass die Reibwerte etwas höher liegen als die für einen Reibweg von 80 mm. Weiters sind Tendenzen zu beobachten, die den Bereich der Grenze für den realen Summenkurvenverlauf etwas geringer erscheinen lassen, als bei 80 mm, wobei eine entsprechende Beurteilung nach Abbildung 4.8 erfolgte.

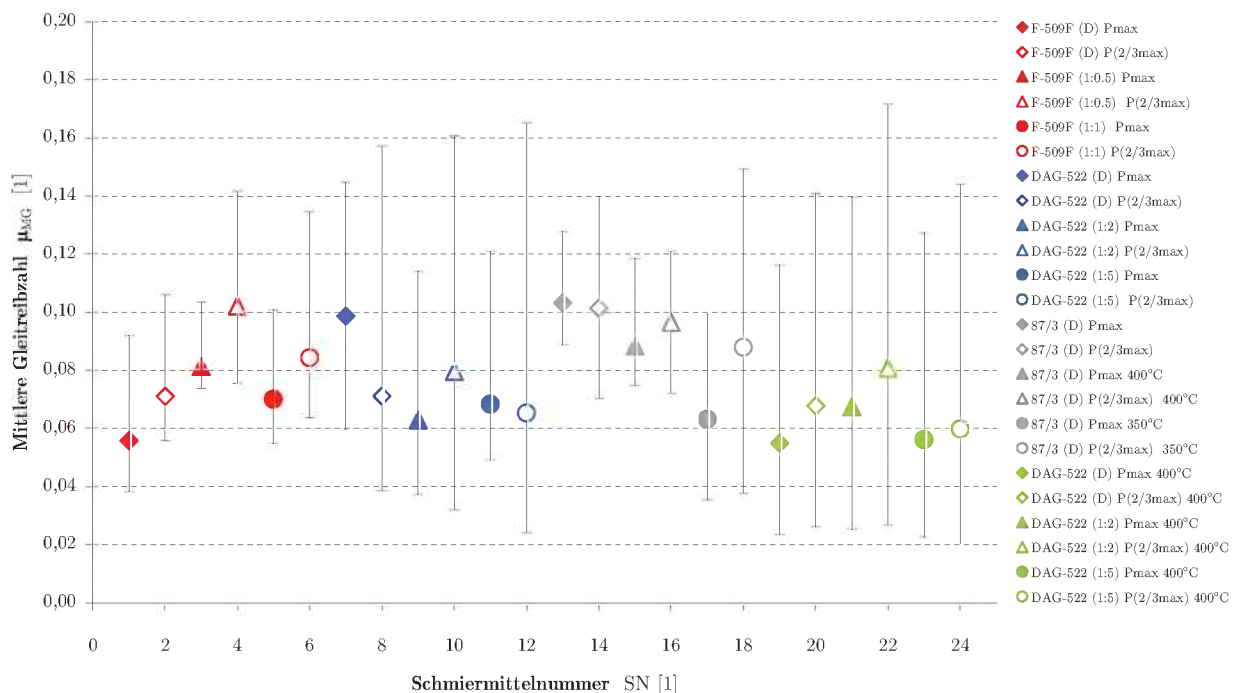


Abbildung 4.17: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Schmiermittelnummer SN im Bereich von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg sowie mit den Grenzen des Summenkurvenverlaufs.

Da die Ergebnisse für die mittleren Reibwerte und den Reibzahlverlauf für 40 mm Reibweg ähnlich sind als für 80 mm, können die erhaltenen Ergebnisse in Abbildung 4.18 und 4.19 mit den Ergebnissen in Abbildung 4.13 und 4.35 verglichen werden. Als Ursache lässt sich der kurze, aber starke Einfluss von Anhaftungen zu Beginn des Reibwegs begründen, wodurch der Charakter der Kurven frühzeitig festgestellt wird, als es bei Werkzeugtemperaturen von 250°C geschieht.

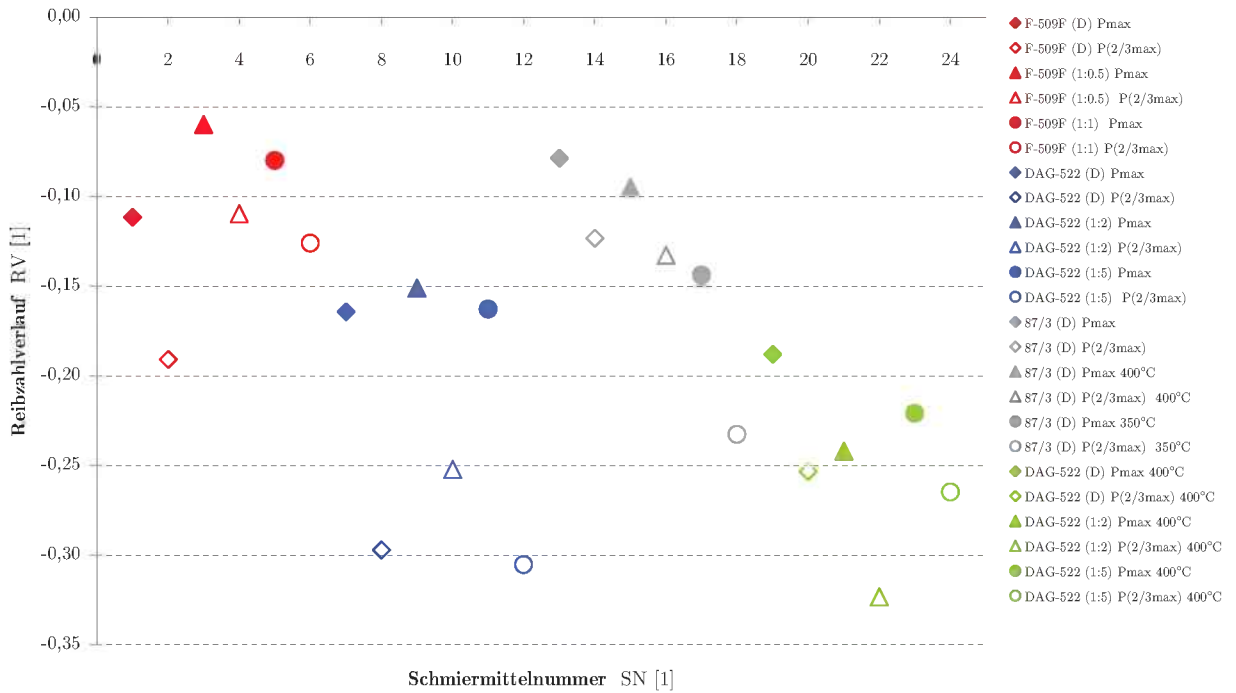


Abbildung 4.18: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Reibzahlverlauf $R\bar{V}$ zu Schmiermittelnummer SN von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

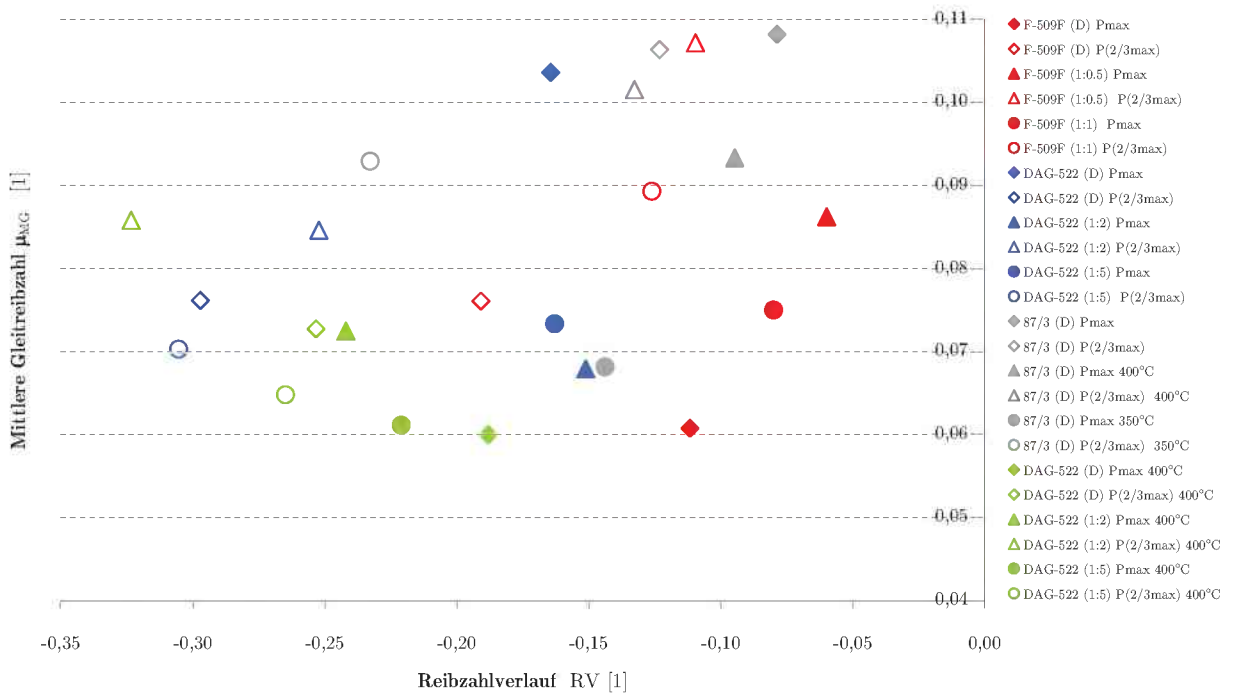


Abbildung 4.19: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf $R\bar{V}$ von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

4.2.2.3 Ergebnistabelle und Diskussion

Wie bereits in Kapitel 4.2.1.3 dargestellt und erklärt wurde, soll nun auch bei hohen Werkzeugtemperaturen eine relative Beurteilung anhand unterschiedlicher Farben in einer Ergebnistabelle erfolgen.

Der Schmierstoff *F509F*(450°C, A) erzielte bei direkter Aufbringung die besten Resultate hinsichtlich Reibzahlverlauf und mittlerer Reibwert. Durch die einfache Hantierbarkeit sticht der Schmierstoff besonders im Vergleich zu den anderen besonderes positiv hervor. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Schmierstoff *F509F* die besten Voraussetzungen verfügt, die eine Eignung für den Einsatz bei hohen Temperatur und Druckbedingungen vorsieht. Da der Schmierstoff eine Neuentwicklung ist liegen durch die Firma *Acheson* keine gesicherten Daten für empfohlene Konzentrationen und Werkzeugtemperaturen vor.

Die Ergebnisse für *DAG522*(450°C, A) zeigen, dass das Schmiermittel für unterschiedliche Konzentrationen annehmbare Werte lieferte, jedoch neigen die Kurvenverläufe aus den Versuchen tendenziell zu nicht stabilen Bedingungen für lange Reibwege. Auch das Problem der Aluminiumanhaftungen sollte berücksichtigt werden, wobei durch die Wahl höherer Konzentrationen eine Verbesserung der Problematik erreicht wurde. Daher wurden Versuche für 400°C durchgeführt wodurch das Problem der Anhaftungen weitgehend gelöst werden konnte. Zwar zeigten die Ergebnisse für Schmiermittel niedrige Reibzahlen jedoch wurde die Kurven-Charakteristik nur gering verbessert. Daher kann ein direkter Vergleich mit den Resultaten aus Tabelle 4.2 für 250°C erfolgen, wobei der Reibzahlverlauf deutlich von den Eigenschaften des Schmiermittels bestimmt und geprägt wird.

Für den Schmierstoff *87/3*(F) zeigte sich, dass für die hohe Viskosität eine beheizte Sprühvorrichtung erforderlich wäre um den Schmierstoff aufbringen zu können. Ein weiteres Problem stellt die in Untersuchungen festgestellte starke Anhaftung von Aluminium bei Werkzeugtemperaturen von 450°C dar. Durch Änderungen der Temperatur konnten zufriedenstellende Resultate für 350°C ermittelt werden. Da die Aufbringung des Schmierstoffs durch einen Pinsel erfolgte, sind die erhaltenen Werte mit Vorsicht zu betrachten, da die Art der Schmierfilmaufbringung eine nachhaltige Änderung für das Ergebnis hinsichtlich Vergleichbarkeit für andere Schmierstoffe bedeutet.

Tabelle 4.3: Ergebnistabelle der Auswahlversuche für unterschiedliche Werkzeugtemperaturen mit Farbschema für 80 mm Reibweg

Schmiermittelbezeichnung	Konzentration		Normaldrücke [MPa]	Mittlerer Gleitreibungwert μ_{MG}	Reibzahlverlauf RV	Steigungswinkel SW	Standardabweichung der Summenkurve SA	Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK}
F509 - F Fa, Acheson $T_{WZG} = 450^{\circ}C$	(D)	Pmax	325	0,0469	-0,1087	-0,0354	0,0103	0,0036
		P(2/3max)	215	0,0617	-0,1057	-0,0369	0,0099	0,0149
	(1:0.5)	Pmax	325	0,0744	-0,0481	-0,0244	0,0041	0,0025
		P(2/3max)	215	0,0824	-0,1065	-0,0566	0,0090	0,0063
	(1:1)	Pmax	325	0,0600	-0,0782	-0,0337	0,0071	0,0032
		P(2/3max)	215	0,0736	-0,1264	-0,0403	0,0120	0,0066
DAG-522 Fa, Acheson $T_{WZG} = 450^{\circ}C$	(D)	Pmax	325	0,0690	-0,1466	-0,0951	0,0112	0,0092
		P(2/3max)	215	0,0594	-0,2715	-0,0894	0,0256	0,0092
	(1 : 2)	Pmax	325	0,0502	-0,1525	-0,0517	0,0144	0,0062
		P(2/3max)	215	0,0580	-0,2697	-0,0859	0,0256	0,0106
	(1:5)	Pmax	325	0,0634	-0,1577	-0,0277	0,0155	0,0066
		P(2/3max)	215	0,0476	-0,3031	-0,0808	0,0292	0,0074
HYKOGREEN 87 / 3 Fa, Fuchs	(D)	Pmax	325	0,0972	-0,0841	-0,0232	0,0081	0,0177
		450°C P(2/3max)	215	0,0882	-0,1672	-0,0440	0,0161	0,0128
	(D)	Pmax	325	0,0820	-0,0981	-0,0271	0,0094	0,0023
		400°C P(2/3max)	215	0,0869	-0,1444	-0,0393	0,0139	0,0074
	(D)	Pmax	325	0,0487	-0,1360	-0,0509	0,0126	0,0066
		350°C P(2/3max)	215	0,0615	-0,2402	-0,0917	0,0222	0,0058
DAG-522 Fa, Acheson $T_{WZG} = 400^{\circ}C$	D	Pmax	325	0,0405	-0,1927	-0,0619	0,0183	0,0043
		P(2/3max)	215	0,0470	-0,2530	-0,0831	0,0239	0,0061
	(1 : 2)	Pmax	325	0,0494	-0,2519	-0,0796	0,0239	0,0063
		P(2/3max)	215	0,0553	-0,3279	-0,1071	0,0310	0,0059
	(1:5)	Pmax	325	0,0419	-0,2243	-0,0647	0,0215	0,0064
		P(2/3max)	215	0,0427	-0,2664	-0,0751	0,0256	0,0083

4.2.3 Auswertung der Detailversuche bei $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$

Aus den Ergebnissen der Auswahlversuche erfolgte eine genauere Betrachtung der Schmierstoffe F-508(1:1, A) und *F25PLE*(1:3, F) für unterschiedliche variable Parameter (Geschwindigkeit und Druckstufen), die in Tabelle 3.14 und im Abschnitt 3.2.5 nachgeschlagen werden können. Ziel der Detailversuche war die wissenschaftliche Feststellung möglicher Grenzen der Schmierstoffe durch Änderung der Versuchsbedingungen und einen Vergleich der Ergebnisse hinsichtlich Reproduzierbarkeit aus den Auswahlversuchen durchzuführen.

Wie aus Abbildung 4.20 erkennbar ist, zeigen sich für die Schmierstoffe *F25PLE*(1:3, F) und F-508(1:1, A) Bereiche mit gleichen Druckstufen. Daher kann gefolgert werden, dass der Druck einen maßgeblicheren Einfluss auf das Ergebnis hat, als die Relativgeschwindigkeiten (siehe Abschnitt 4.2.5). Die Untersuchungen zeigten, dass der Schmierstoff *F25PLE*(1:3, A) bei Relativgeschwindigkeiten $v_R = 200$ mm/s und bei mittleren und minimalen Drücken in den Bereichen von 65 bis 80 mm starke Anstiege der Reibwerte zeigte und dadurch die erhöhten mittleren Reibwerten zu erklären sind. Weiters konnte nicht restlos geklärt werden, warum der Reibzahlverlauf (Steigung der Kurve) für *F508*(1:1, P_{Max} , 20 mm/s) und *F508*(1:1, P_{Min} , 20 mm/s) negative Werte annahm und somit nur begrenzte Aussagen für den Reibzahlverlauf möglich sind. Alle anderen Untersuchungsbedingungen führten zu einer positiven Steigung, d.h. positiver *RZ*, die mit den Werten der Auswahlversuche übereinstimmen.

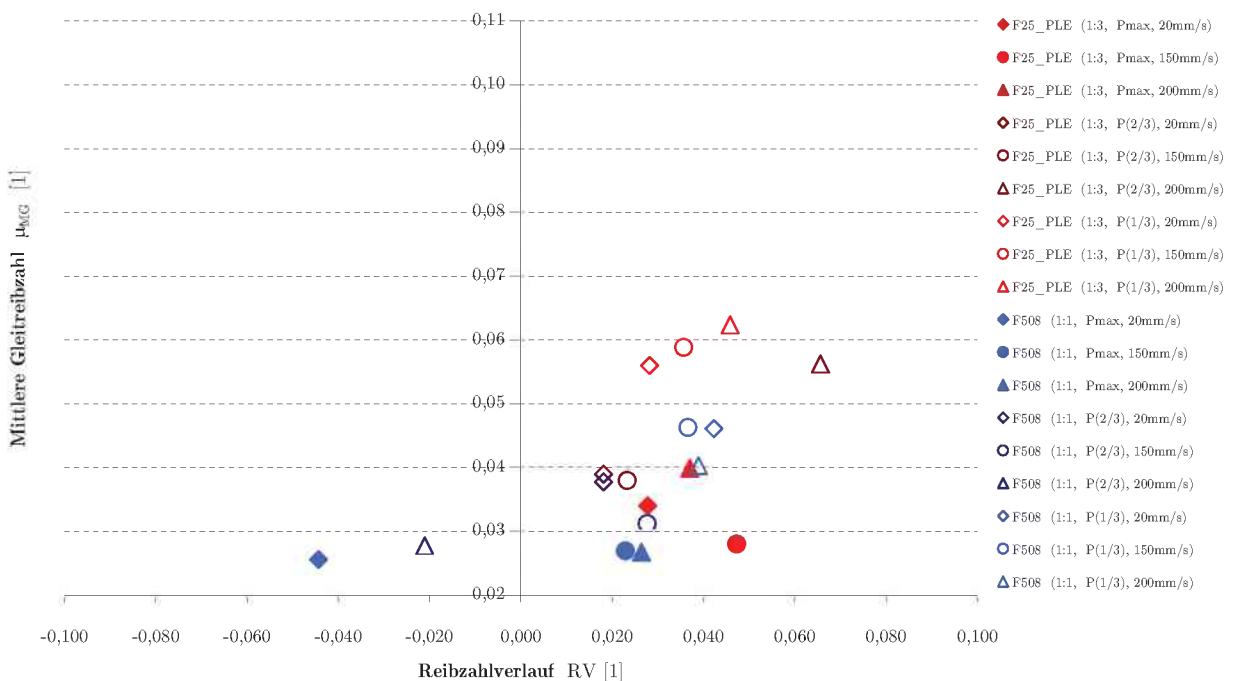


Abbildung 4.20: Detailversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibungzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf *RZ* im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

Es lassen sich nur bedingt Bereiche gleicher Druckstufen erkennen die besonders für das Schmiermittel $F25PLE(1:3, A)$ nach Abbildung 4.20 ausgeprägt sind.

Mit den aus der Abbildung 4.20 erhaltenen Resultate für mittlere und maximale Druckstufen, kann nun ein Vergleich der Reibzahlen und RV mit den Ergebnissen aus den Vorversuchen durchgeführt werden.

In Abbildung 4.21 erfolgt eine Gegenüberstellung woraus erkennbar ist, dass die Reibzahlen für P_{Max} und P_{Mittel} für beide Schmierstoffe in der gleichen Größenordnung liegen. Jedoch sind Unterschiede für den Reibzahlverlauf für das Schmiermittel $F25PLE(1:3, P_{mittel}, F)$ zu erkennen die jedoch auf den zeitversetzten Gebrauch rückschließen lassen. Die meisten der auf Grafit-Wasser-Basis verwendeten Schmierstoffe sollen im verdünnten Zustand mit Wasser rasch verwendet werden, da mit zunehmender Dauer der Verdünnung ein bakteriologischer Befall entstehen kann und damit die Eigenschaften der Schmierwirkung, hinsichtlich Stabilität und Wirkung der Schmierschicht, verloren gehen können.

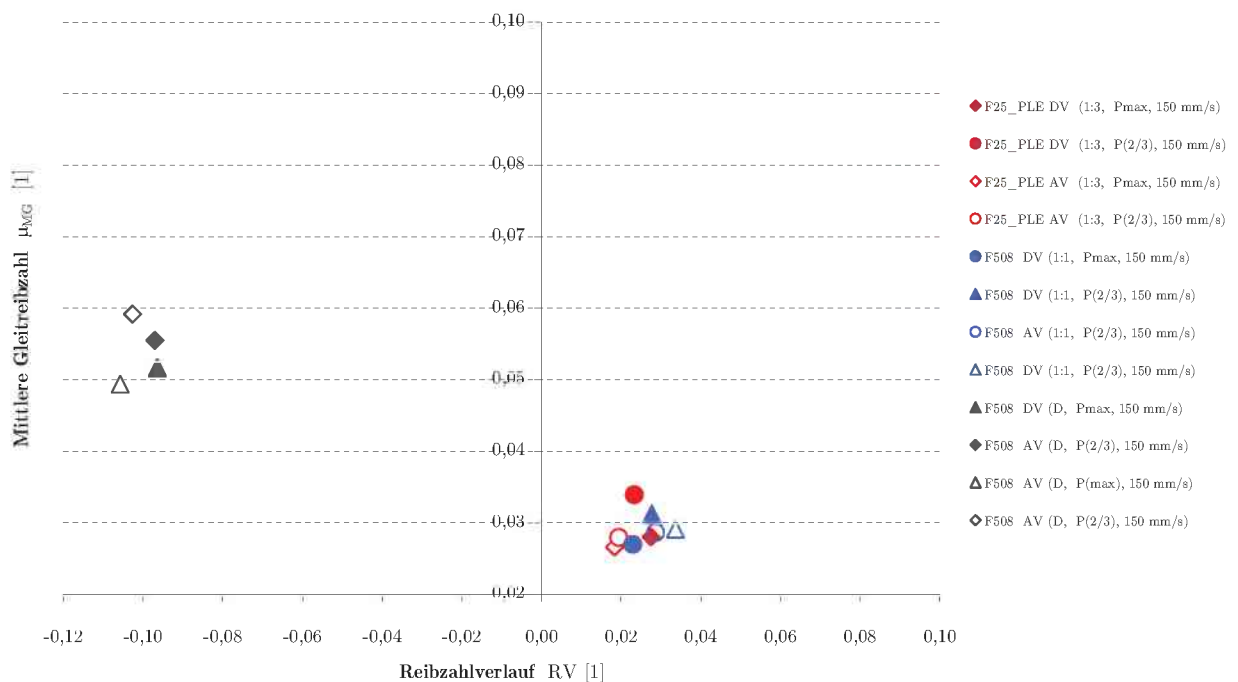


Abbildung 4.21: Auswahl AV - und Detailversuche DV für $T_{WZG} = 250^{\circ}C$ und $450^{\circ}C$ - Vergleich der mittleren Gleitreibzahl μ_{MG} und Reibzahlverlauf RV im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

Aus Abbildung 4.20 ist zu erkennen, dass der Schmierstoff $F25PLE(1:3, 200\text{mm/s}, F)$ für die unterschiedlichen Druckstufen sehr hohe Reibwerte gegen Ende der 80 mm aufweist und sich dadurch ein Versagen der Schmierfilmschicht begründen lässt. Die Ergebnisse der Detailversuche zeigen, dass der Schmierstoff $F508(1:1, A)$ für die unterschiedlichen Druck- und Geschwindig-

keitsverhältnisse leicht bessere Resultate erzielt, besonders bei hohen Relativgeschwindigkeiten, als der Schmierstoff *F25PLE*(1:3, F). Zudem ist deutlich der Einfluss der jeweiligen Druckstufe auf die mittleren Reibwerte für die beiden Schmierstoffe erkennbar.

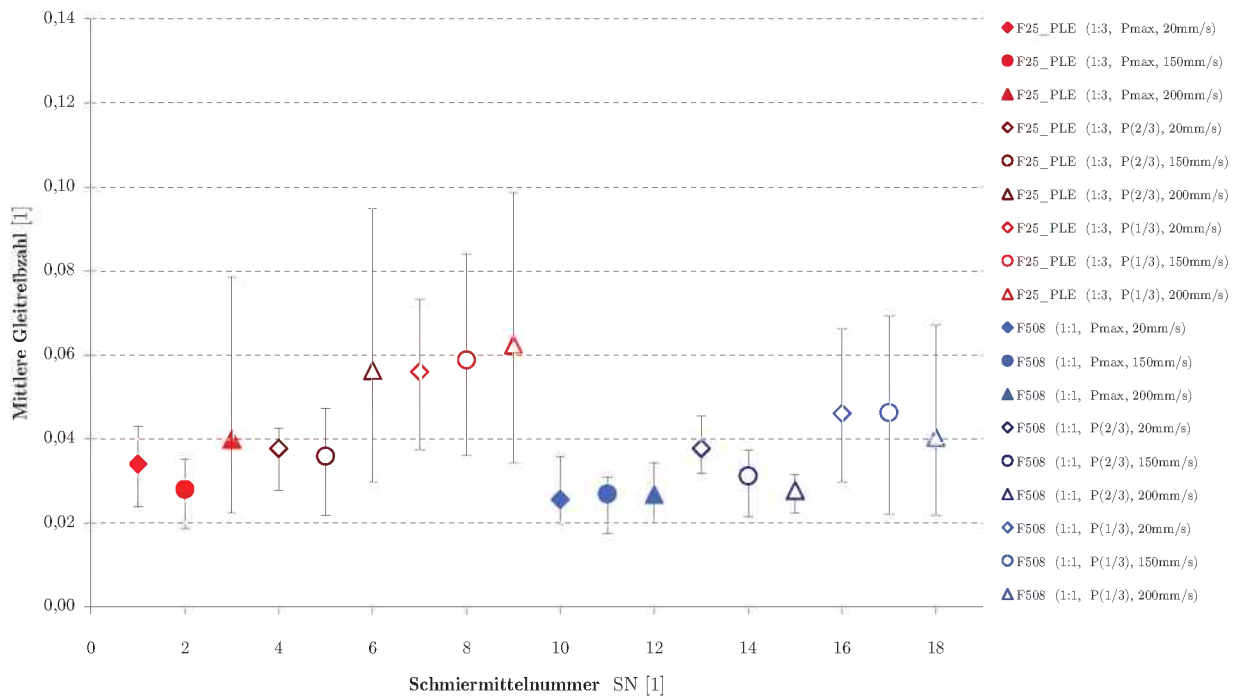


Abbildung 4.22: Detailversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} im gesamten Bereich mit unterschiedlichen Prüfeinstellungen für 80 mm Reibweg sowie mit den Grenzen des minimalen und maximalen Summenkurvenverlaufs.

4.2.4 Auswertung der Detailversuche bei $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$

Aufgrund der schlechten Ergebnisse bezüglich der Anhaftungen konnte nur das Schmiermedium *F509F*(450°C , A) den Anforderungen einer genaueren Analyse genügen. In Abbildung 4.23 erfolgt eine Darstellung der mittleren Reibzahlen, wobei der Einfluss der Geschwindigkeit und der Normalspannung in Abschnitt 4.2.5 genauer erklärt wird. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss des Druckes eine stärkere Bedeutung aufweist als die Geschwindigkeiten. Die Ergebnisse für den Reibzahlverlauf RV und der mittleren Gleitreibzahl μ_{MG} sind für die Detail- und Auswahlversuche nach 4.21 vergleichbar.

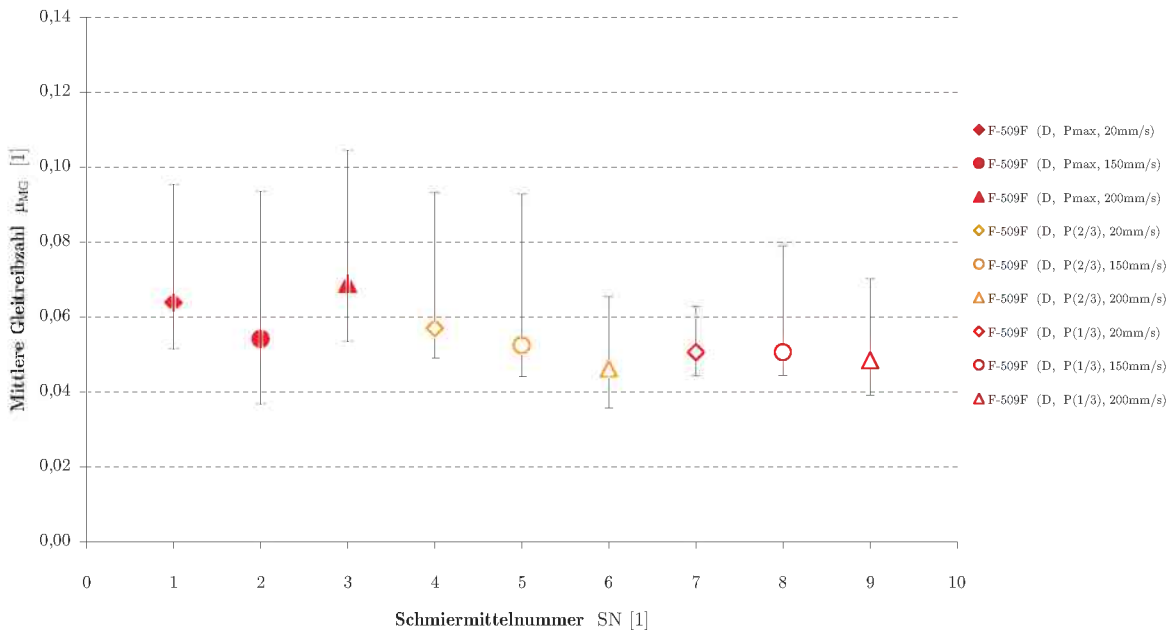


Abbildung 4.23: Detailversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Schmiermittelnummer SN im gesamten Bereich mit unterschiedlichen Prüfeinstellungen für 80 mm Reibweg sowie mit den Grenzen des Summenkurvenverlaufs.

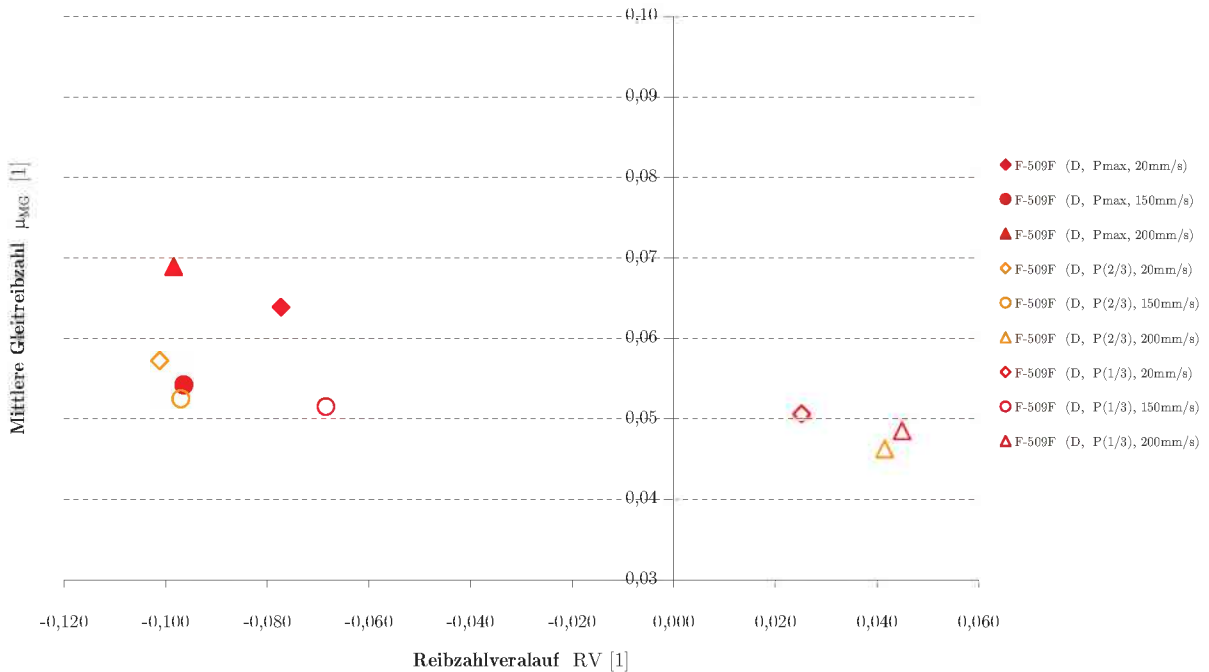


Abbildung 4.24: Detailversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf RV im gesamten Bereich bei $v_R = 150 \text{ mm/s}$ und 80 mm Reibweg.

4.2.5 Einfluss der unterschiedlichen Parameter bei den Detailversuchen

4.2.5.1 Einfluss der Normalkraft

Die Ergebnisse aus den Detailversuchen nach Abbildung 4.25 zeigen, dass die Schmierstoffe *F25PLE*(1:3, F) und *F-508*(1:1, A) für unterschiedliche Geschwindigkeiten mit zunehmendem Normaldruck eine Abnahme der Reibzahl hervorrufen. Das Verhalten deckt sich mit den Feststellungen in der Literatur, dass die Veränderung der Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück und auch der Kontaktnormalspannung in direktem Zusammenhang mit der Änderung des Reibwertes steht. Daher führt eine Erhöhung der Normalspannung zu einer Zunahme der wahren Kontaktflächen zwischen den Reibpartnern. Daher zeigt sich die Tendenz, dass mit der Vergrößerung der Kontaktfläche eine Reduzierung des Reibwertes verbunden ist, die stark vom Schmierzustand und den unterschiedlichen Parametern abhängt.

Dennoch zeigt der Schmierstoff *F509F*(D, A) bei $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ ein entgegengesetztes Verhalten, wobei mit zunehmenden Normaldruck eine Zunahme der Reibwerte festzustellen ist. Ein Grund dafür kann sein, dass es bei sehr hohen Temperaturen und Drücken zu einem direkten Kontakt der beiden Reibpartnern (Werkzeug und Werkstück) kommt und somit nur eine begrenzte Schmierung gegeben ist. Als Folge der vergrößerten Kontaktfläche ist eine unmittelbare Erhöhung der Festkörperreibung und des Reibwertes zu erwarten.

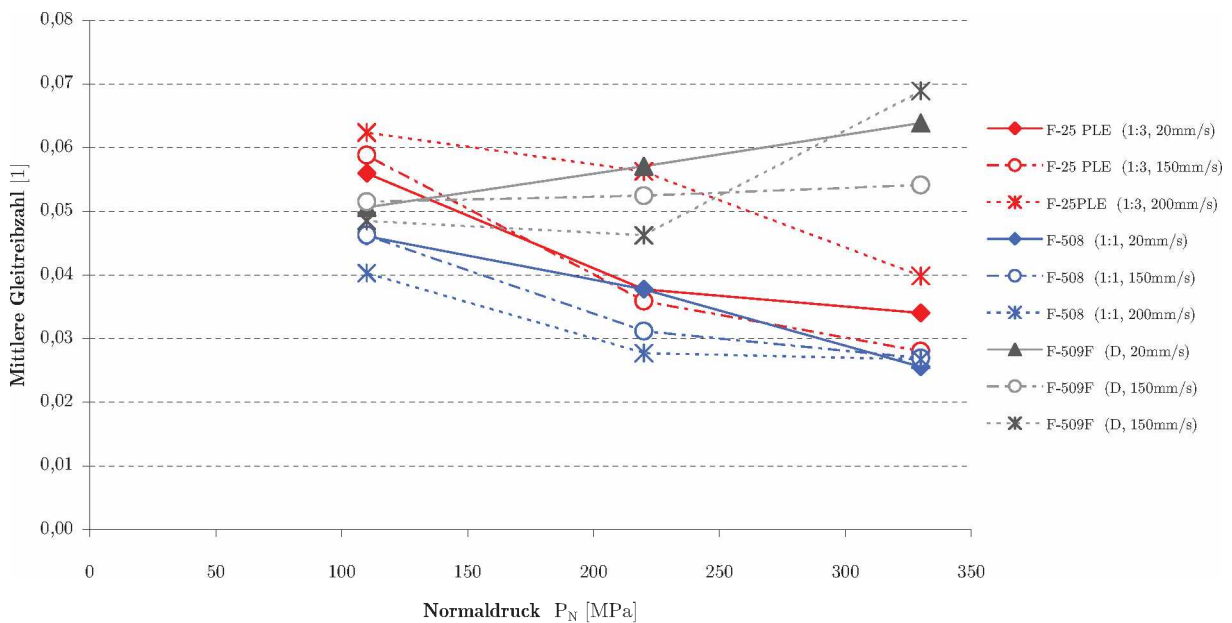


Abbildung 4.25: Mittlere Gleitreibzahl zu Normaldruck P_N für $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ (*F25PLE*(F) und *F508*(A)) und $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ (*F509F*(A)).

Der Einfluss des Druckes (siehe Abbildung 4.26) hinsichtlich der Schmierstoffe $F25PLE(1:3, F)$ und $F508(1:1, A)$ zeigt, einen deutlich geringen Einfluss auf den Reibzahlverlauf

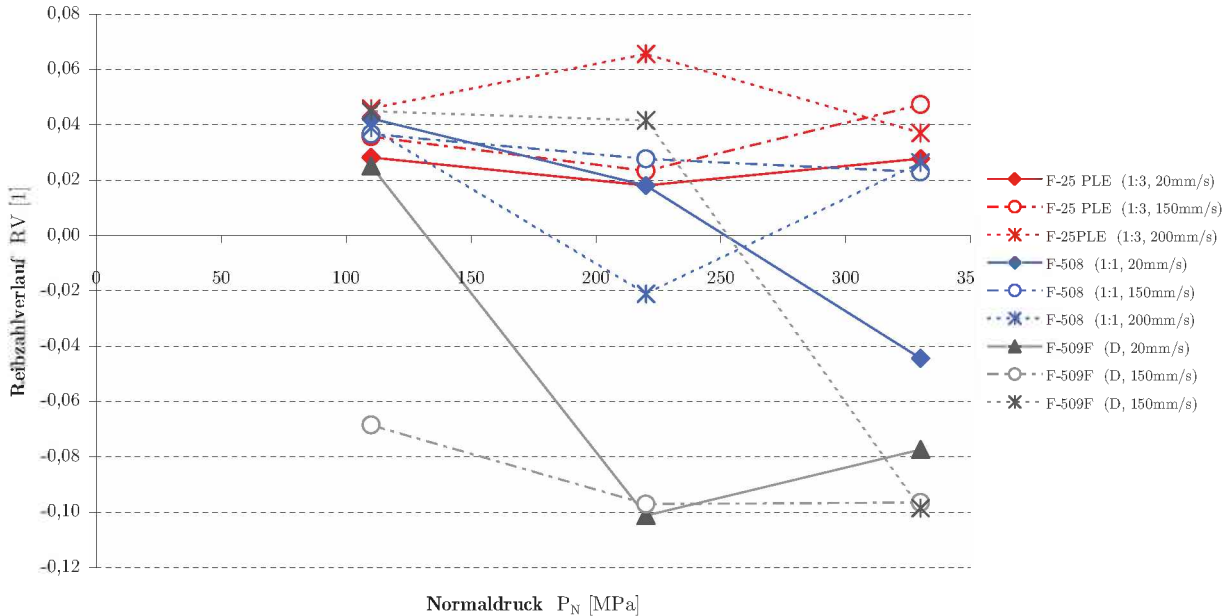


Abbildung 4.26: Reibzahlverlauf R_V zu Normaldruck P_N für $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ ($F25PLE(F)$) und $F508(A)$) und $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ ($F509F(A)$).

4.2.5.2 Einfluss der Relativgeschwindigkeit

Im Vergleich zu Abbildung 4.25 wird in Abbildung 4.27 die Reibzahl zur Relativgeschwindigkeit aufgetragen. Daraus ist erkennbar, dass der Einfluss der Geschwindigkeit im Vergleich zu den Normaldrücken gering ist. Besonders auffallend sind die starken Anstiege für den Schmierstoff $F25PLE$ für $v_R = 200$ mm/s, die bereits in Abbildung 4.20 dargestellt und durch ein teilweises Versagen der Schmierwirkung gegen Ende des Reibwegs begründet wurden. Eine ähnliche Feststellung lässt sich für das Schmiermittel $F509F(D, P_{Max}, 450^\circ\text{C}, A)$ begründen.

Aus Abbildung 4.28 ist zu erkennen, dass der Reibzahlverlauf R_V für Schmierstoffe bei 250°C deutlich weniger von der Relativgeschwindigkeit v_R und der Druckstufe abhängt (siehe Abbildung 4.26). Jedoch zeigt sich, dass der Schmierstoff $F509F(D)$ die Richtung aufgrund des positiven oder negativen Kurvenverlaufs ändert und somit nur eine begrenzte Aussage ermöglicht wird. Aus den Ergebnissen ist erkennbar, dass die Abhängigkeit der Relativgeschwindigkeit v_R auf den Reibzahlverlauf R_V bei niedrigeren Werkzeugtemperaturen geringer als bei höheren ist.

Die Untersuchungen zeigen, dass eine tendenzielle Abnahme der mittleren Reibwerte bei Zunahme der Relativgeschwindigkeit beobachtet werden kann wie bereits experimentelle Versuche nach Schey [32] zeigten.

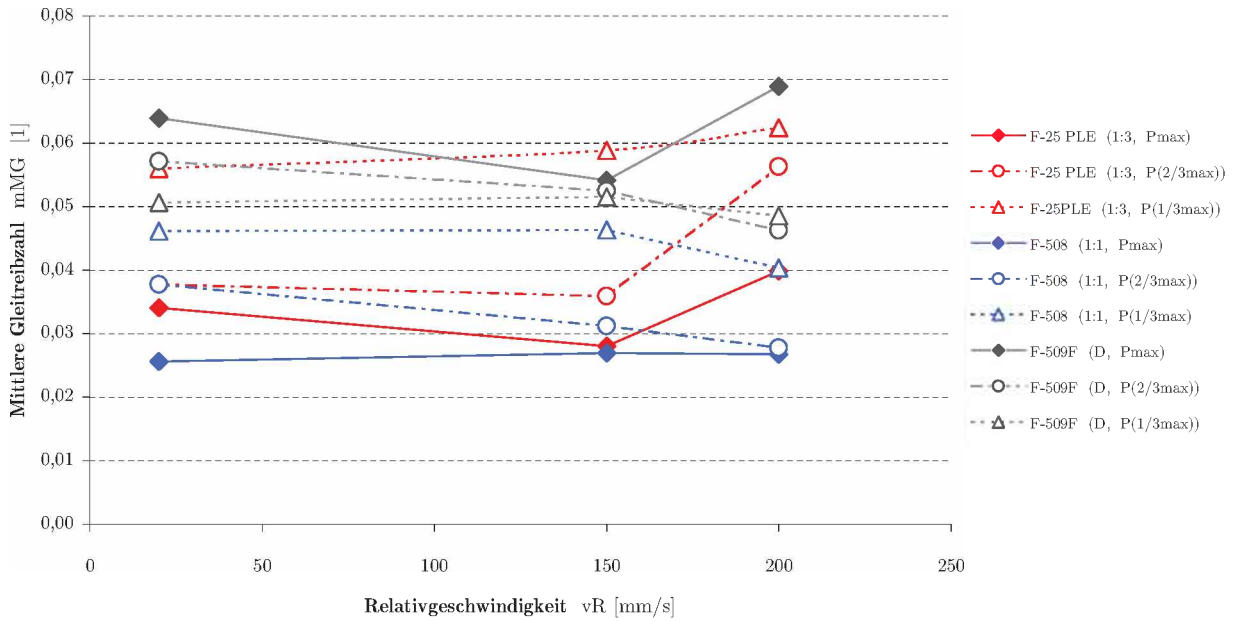


Abbildung 4.27: Mittlere Gleitreibung μ_{MG} zu Relativgeschwindigkeit v_R für $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ ($F_{25PLE}(F)$) und ($F_{508}(A)$) und $T_{WZG} = 450^\circ\text{C}$ ($F_{509F}(A)$).

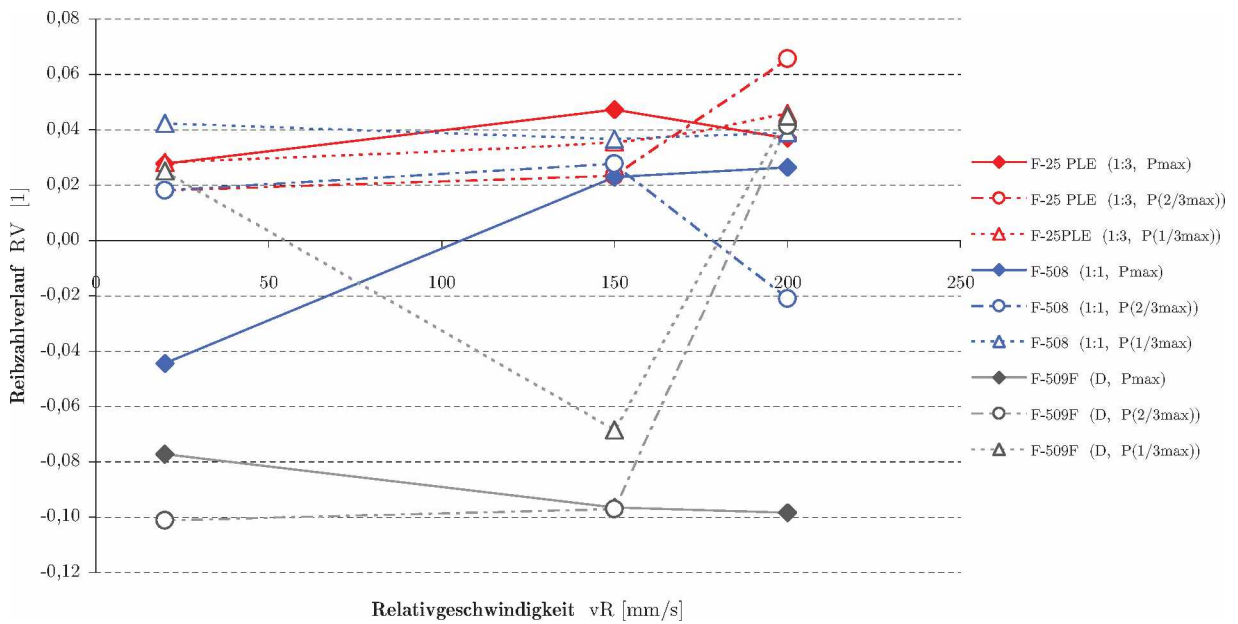


Abbildung 4.28: Reibzahlverlauf RV zu Relativgeschwindigkeit für 250°C ($F_{25PLE}(F)$) und ($F_{508}(A)$) 450°C ($F_{509F}(A)$) Werkzeugtemperatur.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich der druckbezogene Einfluss in Abbildung 4.27 stärker auf die Reibzahl auswirkt als der Einfluss der Relativgeschwindigkeit. Damit decken sich die Feststellungen mit den Angaben in der Literatur [49].

4.2.5.3 Temperaturbezogener Schmiermitteleinfluss

Durch die Vielzahl der durchgeführten Untersuchungen bei unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen ist eine Vergleichbarkeit der Schmierwirkung bezogen auf den Reibwert möglich (siehe Abbildung 4.29). Dabei kann für die Schmierstoffe *DAG522(A)* und *87/3(D,F)* festgestellt werden, dass die mittleren Reibwerte μ_{MG} bei Werkzeugtemperaturen bis 400°C für P_{Mittel} größer, und bei Erreichen der Temperatur von 450°C kleiner werden als für P_{Max} .

Besonders auffallend ist das Verhalten für den Schmierstoff *DAG522(A)* bei den Konzentrationen (1:2) und (1:5) wo die mittleren Reibwerte μ_{MG} bei einer Werkzeugtemperatur von 400°C ein Minimum zeigen. Eine genaue Begründung für das Verhalten könnte dann gegeben werden, wenn die Zusammensetzung der Schmierstoffe bekannt wäre und somit die Möglichkeit bestünde die chemischen und physikalischen Vorgänge zwischen den Reibpartnern besser zu verstehen. Daher kann ausgesagt werden, dass die Schmierstoffe Additive enthalten, die beim Einwirken einer bestimmten Temperatur eine mögliche viskose Phase durch Binder bzw. Netzmittel des Schmierstoffs bilden, die zu einen verminderten Reibwert führen [44, 54].

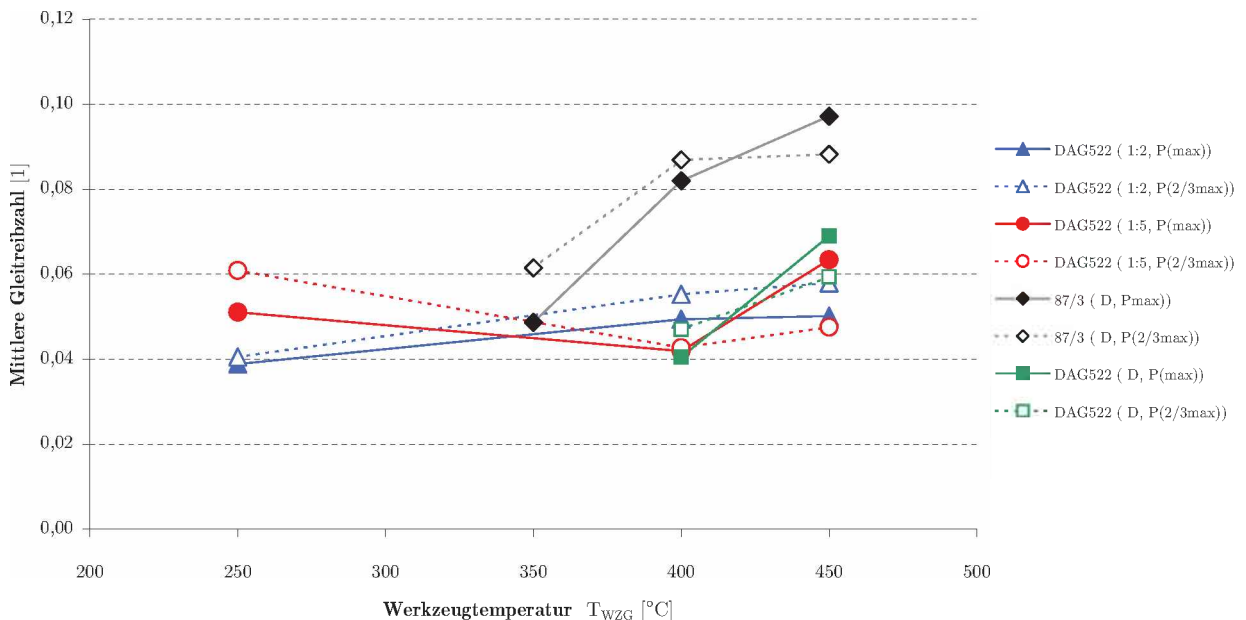


Abbildung 4.29: Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zur Werkzeugtemperatur im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

Die Ergebnisse für das Schmiermittel *87/3(D)* bei $T_{WZG} = 450$ °C sind mit Vorsicht abzu-
lesen, da es zu erheblichen Anhaftungen von Aluminium am Werkzeug kam, und daher zu
Verfälschungen der Ergebnisse führte. Tendenziell ist aber zu erkennen, dass der Schmierstoff
ein Minimum bei einer Temperatur für 350°C besitzt.

4.2.6 Diskussion der Versuche

Die Ergebnisse der Versuche zeigen deutlich, dass eine Diskussion hinsichtlich der mittleren
Gleitreibzahl μ_{MG} besonders schlüssig und für alle Versuchsbedingungen durchführbar ist. Die
erhaltenen Erkenntnisse decken sich mit den Feststellungen in der Literatur und geben die Güte
für die gewählte Prüfmethode wieder.

Die Diskussionen für den Reibzahlverlauf *RV* zeigen, dass die Charakteristik der Kurvenverläufe
wiedergegeben wird, jedoch sind übergreifende Betrachtungen durch Änderung des Vorzeichens
nur begrenzt möglich. Dennoch lässt sich erkennen, dass eine Abhängigkeit von Temperatur und
Schmierstoff besteht.

Durch die Bewertung der Standardabweichung der Einzelkurven SA_{EK} für die Auswahlversu-
che, konnte einerseits die Reproduzierbarkeit der Einzelkurven erfasst und andererseits mögliche
Abhängigkeiten von variablen Parameter nachgewiesen werden.

4.3 Ergebnisse der Oberflächenvergrößerung

4.3.1 Einfluss auf die Haftreibzahl

In Abbildung 4.30 erfolgt eine Darstellung der Haftreibzahl aus den Ergebnissen der Detail-
versuche, die zur Oberflächenvergrößerung aufgetragen sind, welche sich aus den Druckstufen
 P_{Min} , P_{Mittel} , und P_{Max} ergeben. Die Schmierstoffe *F25PLE(1:3)* und *F508(1:1)* zeigen für
250°C ein sehr linearisiertes Verhalten, sodass mit zunehmender Oberflächenvergrößerung ei-
ne Abnahme der Reibzahl einhergeht. Da zu Beginn des Versuchsablaufs eine reine Stauchung
erfolgte, und danach erst die Drehbewegung mit der Aufnahme der Messung startete, musste
folglich der Einfluss der Relativgeschwindigkeit anfangs vernachlässigbar klein sein. Daher sind
die erhaltenen Ergebnisse geschwindigkeitsunabhängig. Für den Schmierstoff *F509F(A)* zeigten
sich hierbei größere Abweichungen, die auf einen möglichen Temperatureinfluss zurückgeführt
werden können.

Zur Abklärung der widersprüchlichen Darstellung für die Reibzahl lassen sich die Untersuchen-
gen nach Wagner [53] in Zusammenhang bringen. In den Untersuchungen wurde durch Stauch-
vorgänge bei vergrößerten Probenausgangshöhen gezeigt, dass mit größer werdenden Ober-
flächenverhältnis und größerer Flächenpressung eine kleine Reibzahl μ ermittelt wird, wenn
sich der Schmierstofffilm ebenfalls ausdehnt.

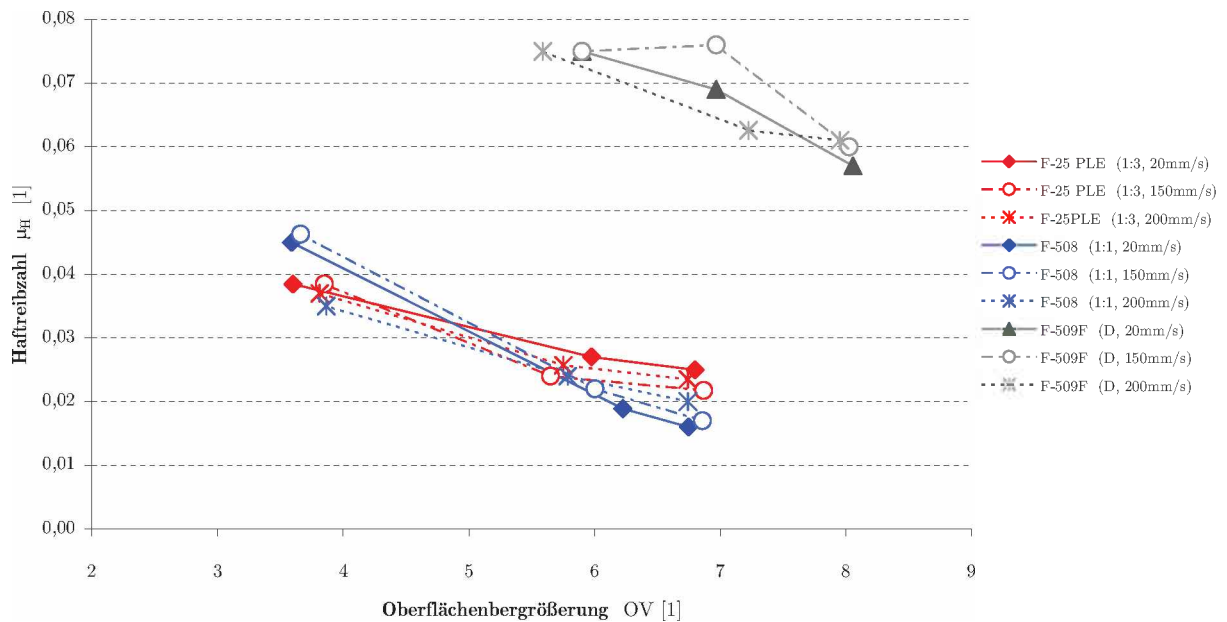


Abbildung 4.30: Haftreibzahl μ_H zu Oberflächenvergrößerung O_V bei 10 mm Ausgangsdurchmesser, im gesamten Bereich wobei Linien gleicher Geschwindigkeit gebildet werden, für $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ ($F508(A)$) und $F25PLE(F)$ und 450°C ($F509F(A)$).

In den Abbildungen 4.31 und 4.32 wird die Oberflächenvergrößerung in Abhängigkeit der verschiedenen Schmierstoffe bei unterschiedlichen Temperaturen und Druckstufen dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Druck und größerer Flächenpressung eine Vergrößerung der Oberfläche stattfindet, die wie gezeigt annähernd linear verläuft. Ungenauigkeiten können auf Mess- und Rundungsfehler zurückgeführt werden. Bei sehr hohen Werkzeugtemperaturen ist erkennbar, dass der Unterschied zwischen mittleren und maximalen Drücken durch den Temperatureinfluss geringer wird. In Abbildung 4.32 ist auf die unterschiedlichen Werkzeugtemperaturen zu achten, die kein geschlossenes Bild eines linearen Verlaufs ergeben.

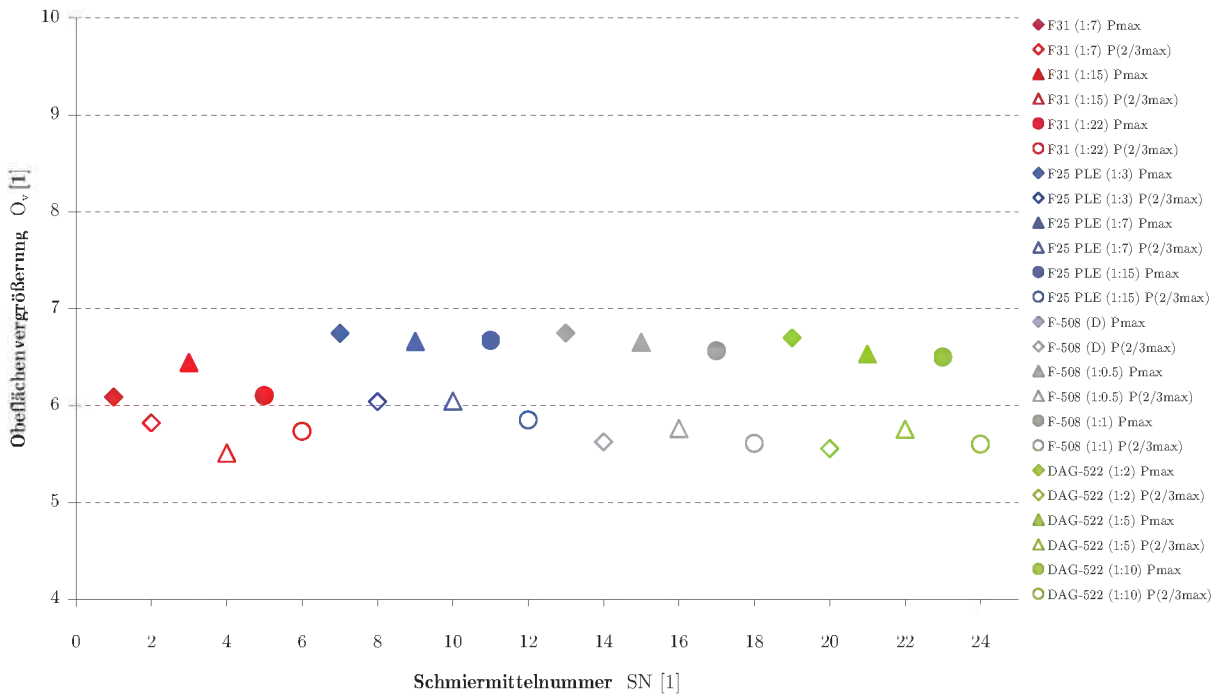


Abbildung 4.31: Auswahlversuche $T_{WZG} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ - Oberflächenvergrößerung O_V der Probekörper für unterschiedliche Druckstufen und Schmierstoffe.

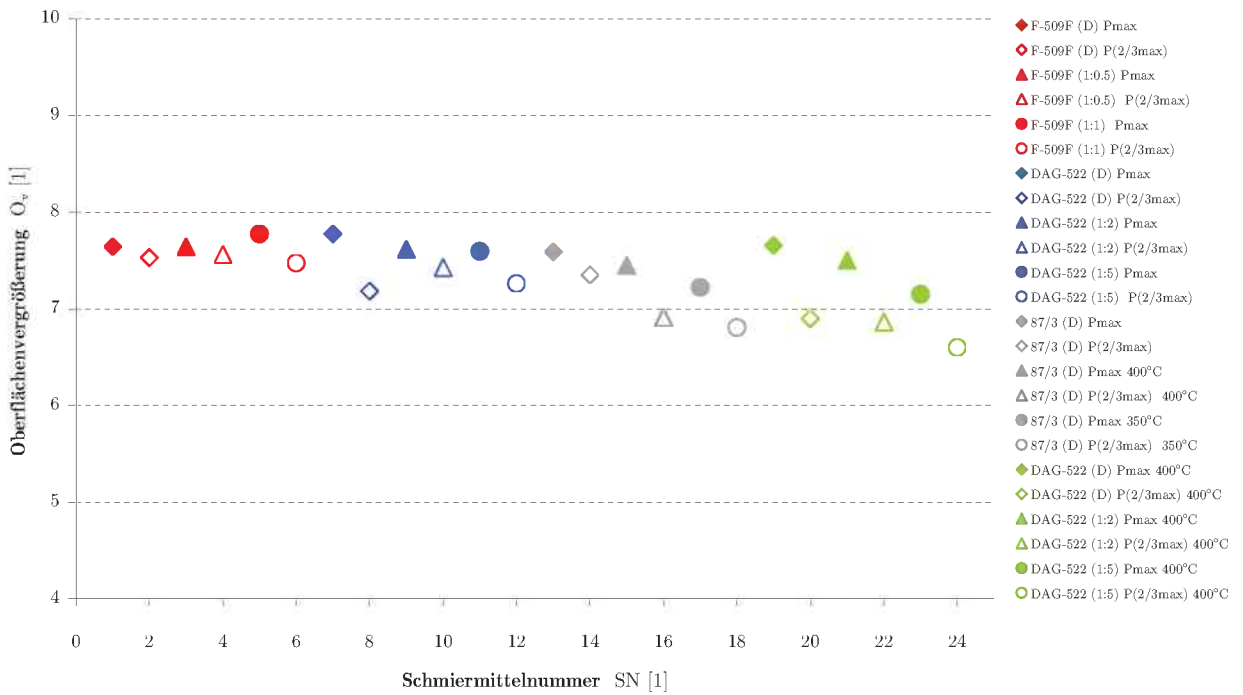


Abbildung 4.32: Auswahlversuche $T_{WZG} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ - Oberflächenvergrößerung O_V der Probekörper für unterschiedliche Druckstufen und Schmierstoffe.

4.3.2 Einfluss der Temperatur

Wie aus Abbildung 4.33 erkennbar, ist ein direkter linearer Zusammenhang zwischen der Oberflächenvergrößerung O_V und der Werkzeugtemperatur für die Schmiermittel *DAG522(A)* und *87/3(F)* zu beobachten. Deutlich zu erkennen ist, dass mit zunehmender Werkzeugtemperatur die Kennlinien aller Schmierstoffe einen gemeinsamen Punkt annähern.

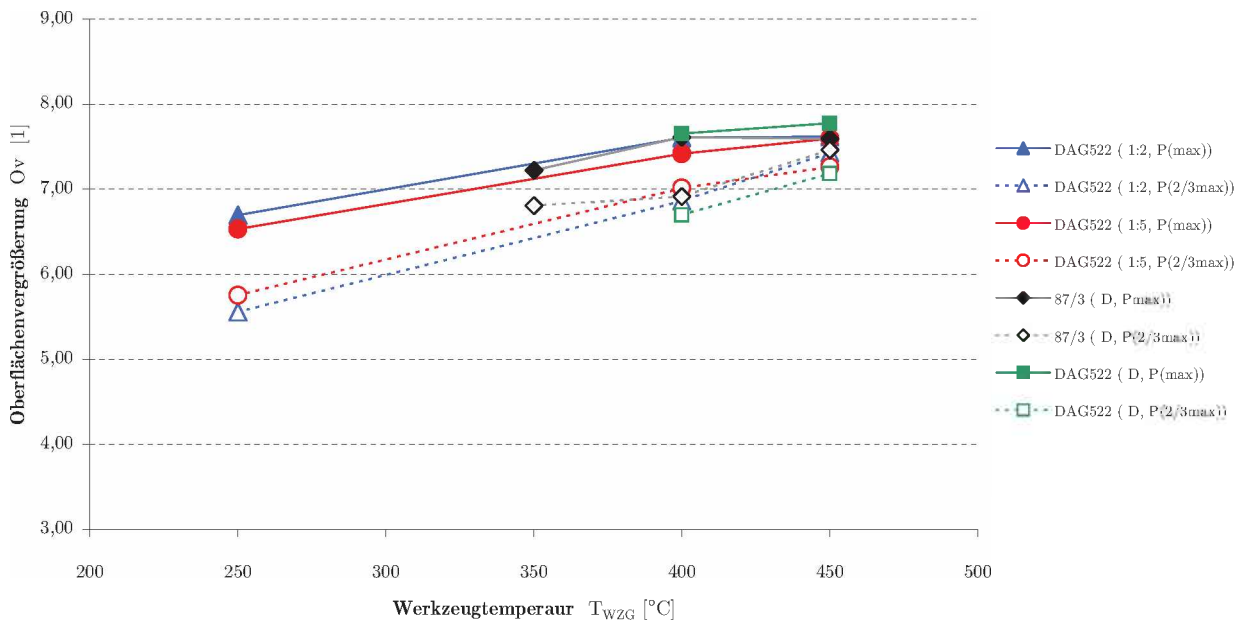


Abbildung 4.33: Oberflächenvergrößerung O_V zu Werkzeugtemperatur $T_{T_{ZG}}$ im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg.

4.4 Ergebnisse der Oberflächenvermessung

4.4.1 Ergebnisse und Diskussion der Auswahlversuche

Da bei den Versuchen für jeden Schmierstoff ein eigenes Werkzeug zur Verfügung stand erfolgte nach Beendigung der Untersuchungen eine Oberflächenvermessung, die in Kapitel 3.3.2.1 näher dargestellt ist.

In Abbildung 4.34 wurden die Rauheitswerte R_Z für die Werkzeuge des jeweiligen Schmierstoffs für Werkzeugtemperaturen von 250°C entlang unterschiedlicher Abstände der Reibspur (15, 40 und 70 mm) ermittelt und zueinander dargestellt. Dabei ist für alle Werkzeuge zu erkennen, dass die Reibwerte in Reibrichtung tendenziell niedriger sind, als jene die quer dazu ermittelt wurden. Durch die Bestimmung der Rauheiten einer Planfläche kann nun ein direkter Vergleich der oberflächlichen Beschaffenheit der Werkzeuge im Vergleich zu einer Unberührten erfolgen. Die Rauheiten der Werkzeuge für die Schmierstoffe *F31(A)*, *F25PLE(F)* und *F-508(A)* zeigen

eine Zunahme der Rauheit in Längsrichtung, wie diese auch für R_Z begrenzt in Querrichtung zu erkennen ist. Das Werkzeug für den Schmierstoff $DAG522(A)$ zeigt ein umgekehrtes Verhalten, nämlich dass mit zunehmenden Reibweg eine Abnahme der Rauheiten in Längs- und Querrichtung erfolgt. Aus der Darstellung ist erkennbar, dass der Schmierstoff selbst erheblichen Einfluss auf die Ausbildung der Werkzeuge bzw. auf die Gestalt der Probenoberfläche ausübt. Die niedrigsten Werte für R_Z zeigen die Schmierstoffe $F25PLE(F)$ und $F508(A)$ gefolgt von $DAG522(A)$ und $F31(A)$.

Um qualitative Vergleiche der Oberflächenrauheiten der Werkzeuge zu ermöglichen wurden die R_Z -Werte für die gemittelte Planoberfläche eingetragen.

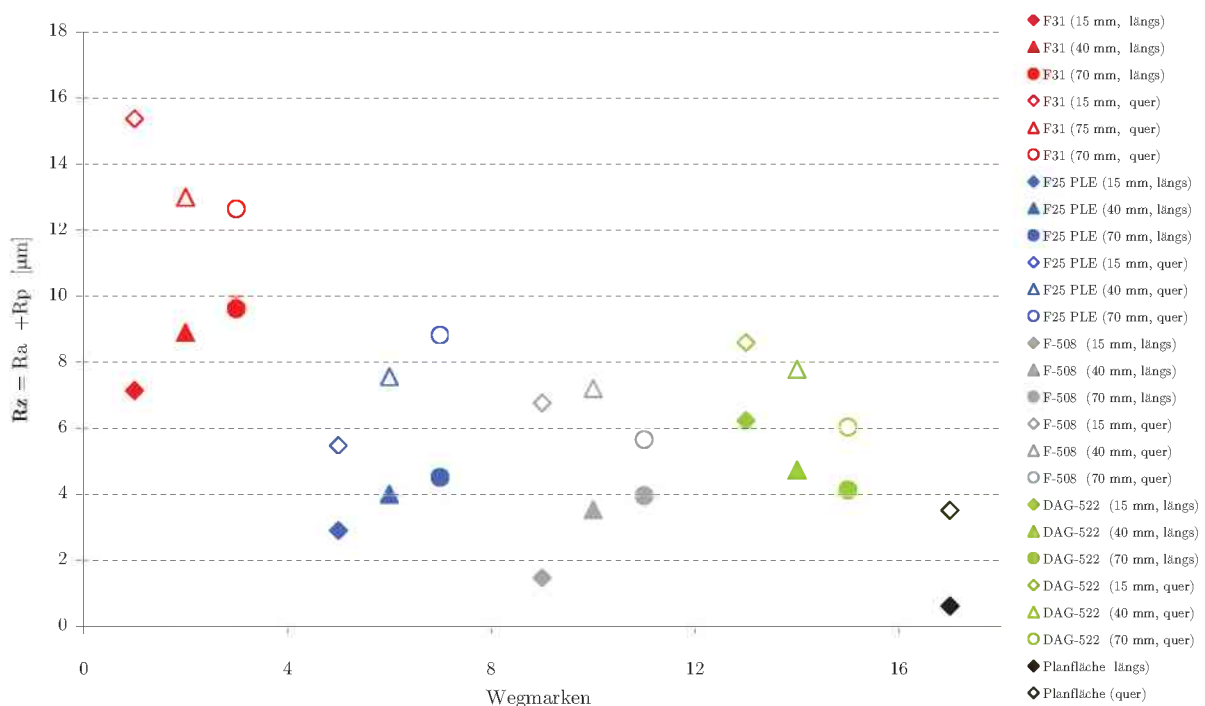


Abbildung 4.34: Auswahlversuche - Oberflächenrauheit R_Z bei Werkzeugtemperaturen von 250°C für den jeweiligen Schmierstoff entlang bestimmter Reibwege für 15, 40 und 80 mm im Vergleich zur unbenutzten Werkzeugoberfläche.

Die Ergebnisse zeigten, dass im Allgemeinen eine Zunahme der Oberflächenrauigkeit im Vergleich zur unbenutzten Oberfläche stattfindet und ein teilweises lineares Verhalten der Reibwerte entlang der Reibspur zu beobachten ist. Bei der optischen Beurteilung der Probenoberfläche konnte festgestellt werden, dass die Oberflächen für die Schmierstoffe $F25PLE(F)$ und $F-508(A)$ im Vergleich zu den anderen besonders *schön* und *glatt* sind, jedoch mit leichter Riefelung, wie der Zusammenhang durch R_Z zu erkennen lässt.

Die gleiche Darstellung wurde für die Werkzeuge der Schmierstoffe im oberen Temperaturbereich durchgeführt, wobei angemerkt werden sollte, dass das Werkzeug für den Schmierstoff

87/3(F) sowohl für 350°C als auch für 400°C verwendet wurde. Aus Abbildung 4.35 ist erkennbar, dass die Schmierstoffe *DAG522(A)* und *87/3(F, 450°C)* im Vergleich zu der Darstellung in Abbildung 4.35 sehr gestreute Rauheitswerte und hohe Werte entlang der Reibspur zeigen. Dieser Umstand lässt sich durch die Anhaftung von Aluminiumresten am Werkzeug erklären. Im Vergleich dazu zeigen die Ergebnisse für die Schmierstoffe *F509F(A)* und *87/3(F, 350°C)* tendenziell lineare Zusammenhänge wie sie auch bei den Messungen für 250°C zu beobachten sind.

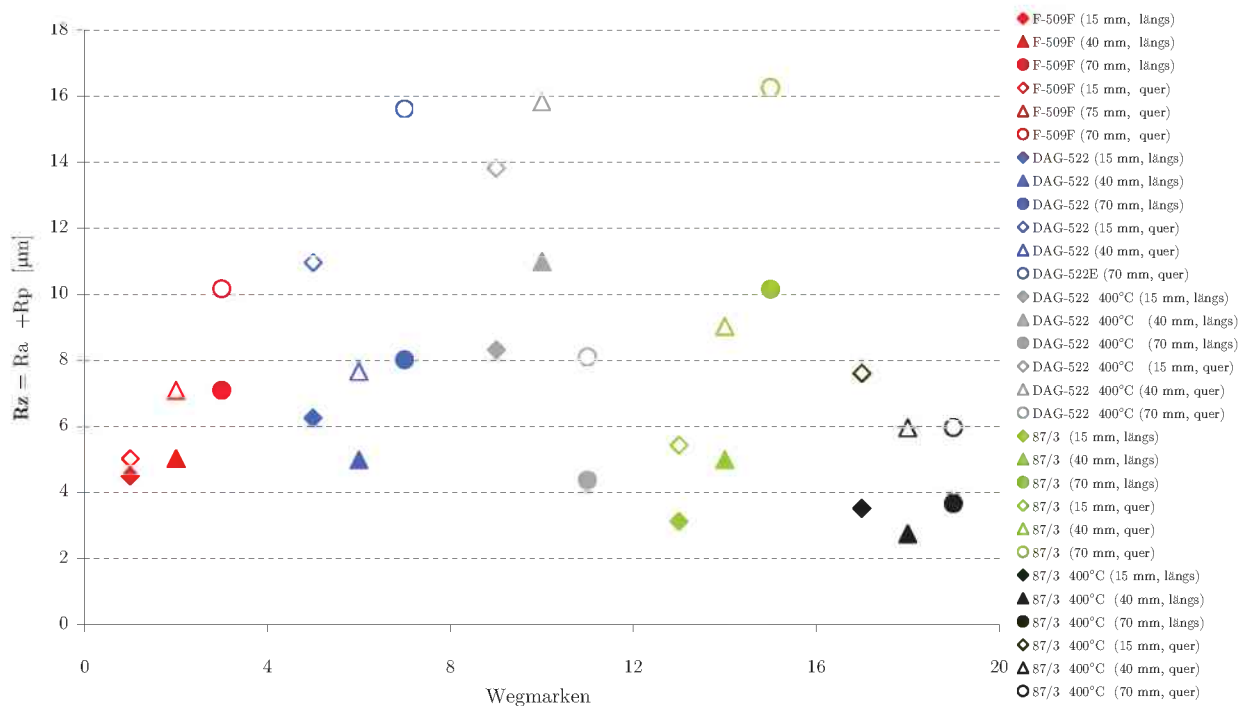


Abbildung 4.35: Auswahlversuche - Oberflächenrauheit R_Z bei Werkzeugtemperaturen von 450°C (Angegebene Temperaturen sind Ausnahmen) für den jeweiligen Schmierstoff entlang bestimmter Reibwege für 15, 40 und 80 mm.

4.4.2 Bildwerk zur Oberflächenvermessung

Um eine Vorstellung zu bekommen, wie die Werkzeugoberflächen unter Verwendung unterschiedlicher Schmierstoffe, strukturiert und aufgebaut sind, erfolgten entlang der Reibspuren Farbaufnahmen, welche durch ein Weißlichtmikroskop entstanden. Dabei wurde versucht, für jedes Werkzeug ein aussagekräftiges Bild wiederzugeben (siehe Abbildung 4.36) und anhand einer einfachen optischen Beurteilung die mögliche Oberflächenrauheit und deren Beschaffenheit für den jeweiligen Schmierstoff zu deuten.

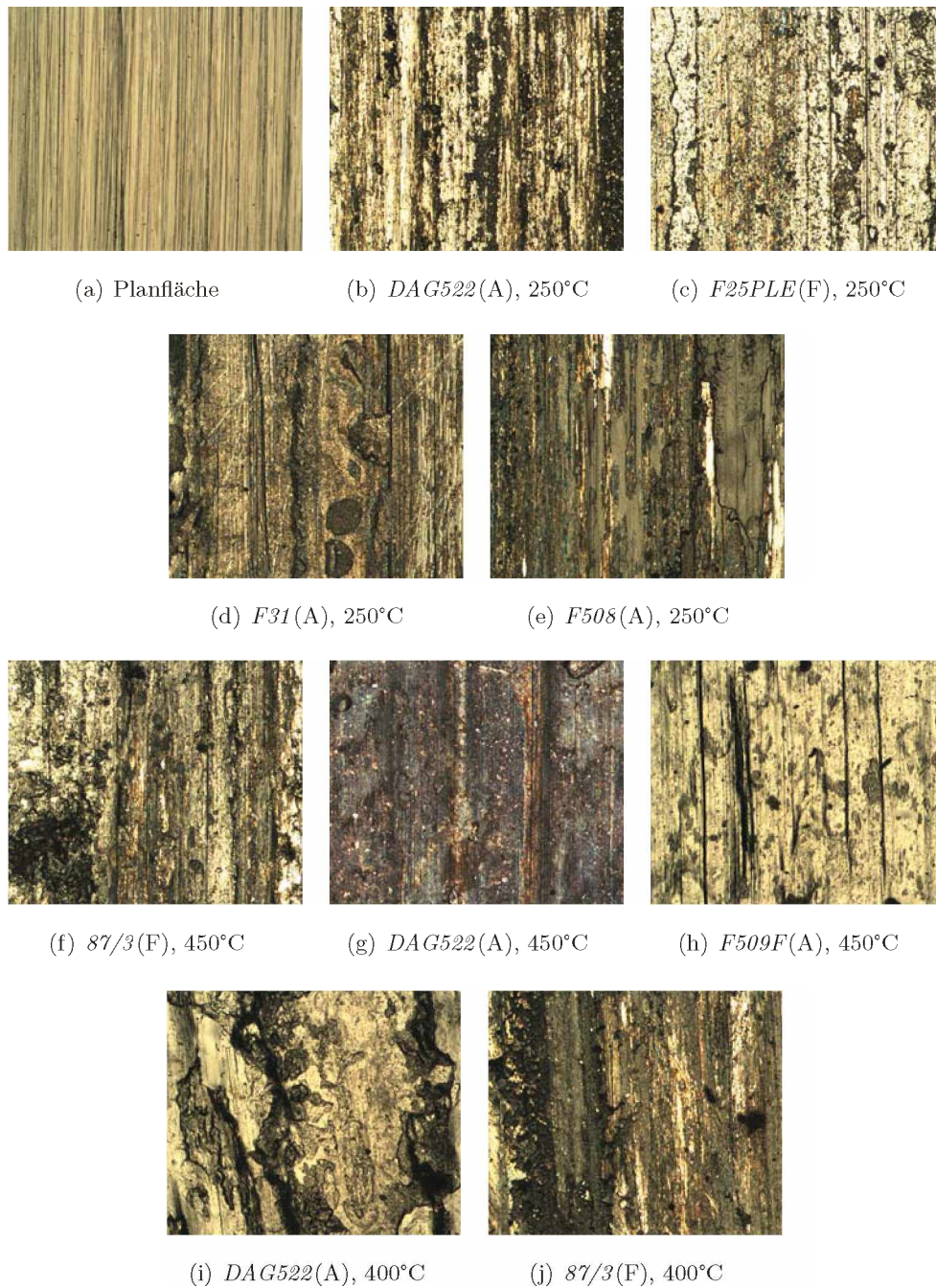


Abbildung 4.36: Farbaufnahmen der Oberflächenbeschaffenheit der Werkzeuge anhand eines repräsentativen Punktes entlang der Reibspur bei 15x facher Vergrößerung für unterschiedliche Vergleiche. Bild a) zeigt die Planoberfläche in Relation zu den verwendeten Werkzeugen. Die Bilder (b), (c), (d) und (e) zeigen eine erkennbare Riefelung der teilweisen Rückstände der Schmierstoffe. Die Bilder (f), (g), (i) und (j) zeigen eine etwas grobere Struktur mit Rückständen von Schmierstoffen und Anhaftung. Im Gegensatz zeigt das Bild (h) eine feinere Struktur und geringe Rückstände des Mediums. Daraus können ungefähre Abschätzungen für R_z erfolgen, die mit einer Vergleichbarkeit der Abbildungen 4.34 und 4.35 konform sind.

4.5 Ergebnisse aus der Untersuchung des Kurvenverlaufs

Anhand der Ergebnisse der Auswahlversuche für $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$ wurden folgende Bedingungen für die Schmierstoffe *DAG522*(1:10, A) mit „negativer“ und *F25PLE*(1:15, F) mit „positiver“ Kurvensteigung in den Abbildungen ?? und 3.17 festgelegt, um einen Zusammenhang von Steigung und Rauheit der Probenoberfläche darzustellen.

In Abbildung 4.37 erfolgt die Darstellung der Kurve anhand einer Mittellinie *ML* für den Reibzahlverlauf *DAG522*(1:10, A) aus den Auswahlversuch „blau“ im Vergleich zu der Summenkurve *ML2* „rot“, die sich als Mittellung der verschiedenen Einzelkurven entlang der unterschiedlichen Reibwege ergab und gegeneinander aufgetragen wurde. Die Abweichungen der Einzelkurven wurden entlang der Reibwegpunkte in den „weißen Kästchen“ eingetragen. Aus den Kurvenverläufen ist erkennbar, dass eine reproduzierbare Messung gegeben und die Abweichungen der beiden Summenkurven für den Auswahlversuch „blau“ und der Mittelkurve aus den Wegpunkten „rot“ gering ist. Um eine bessere Betrachtung hinsichtlich des Reibwertes zu ermöglichen, erfolgte zusätzlich die Eintragung der Kurve für die Relativgeschwindigkeit v_R „Grün“ für 150 mm/s. Daraus ist der direkte Einfluss der Geschwindigkeit, wie in Abbildung 3.14 angeführt wurde, und dessen Korrelation mit den Reibwert erkennbar. Aus Abbildung 4.38 ist zu erkennen, dass eine tendenzielle Übereinstimmung von der Rauheit in der Mitte der Probenoberfläche $R_Z(M)$ in Reibrichtung gegeben ist und nach Erreichen eines maximalen Wertes abfällt und einen quasistationären Bereich bildet. Ähnliches ist für $R_Z(M)$ quer zur Reibrichtung zu beobachten. Weiters erfolgte die Messung der Rauheit nicht nur in der Mitte der Probe, sondern wurde in Form eines Kreuzes (siehe Abbildung 3.17) woraus gemittelte R_{Z_M} Werte ($R_{Z_M}(W,M,O)$ in und $R_{Z_M}(N,M,S)$ quer zur Reibrichtung berechnet, welche gleiche Tendenzen zeigen.

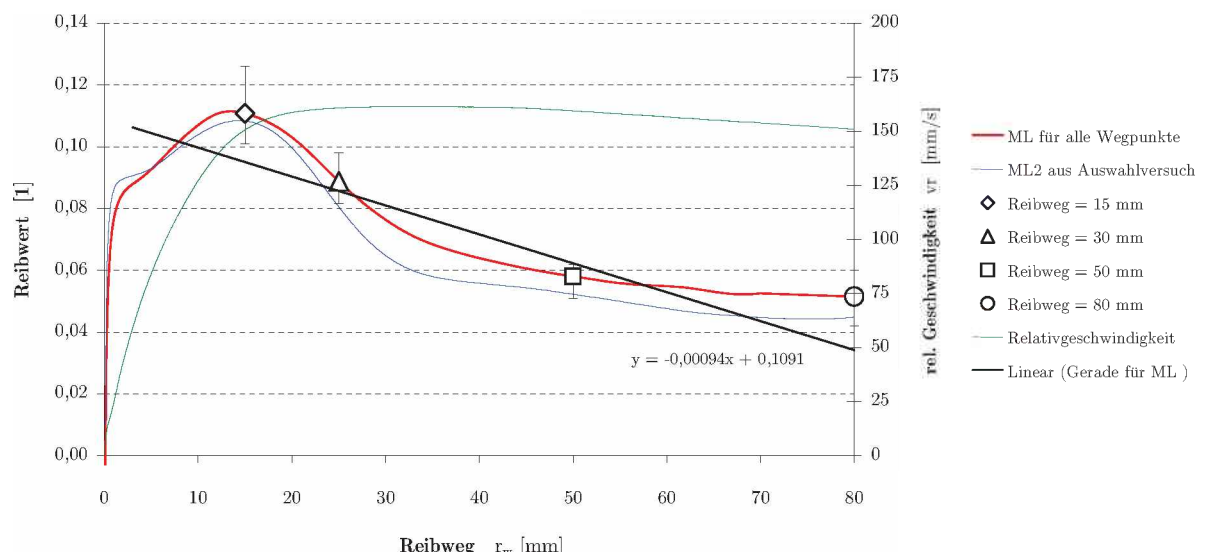


Abbildung 4.37: Steigungscharakterisierung - negative Steigung für Acheson *DAG522*(1:10, $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$, $v_R = 150$ mm/s, F_{Mittel}) - Mittlere Reibwerte für 15, 30, 50 und 80 mm Reibweg.

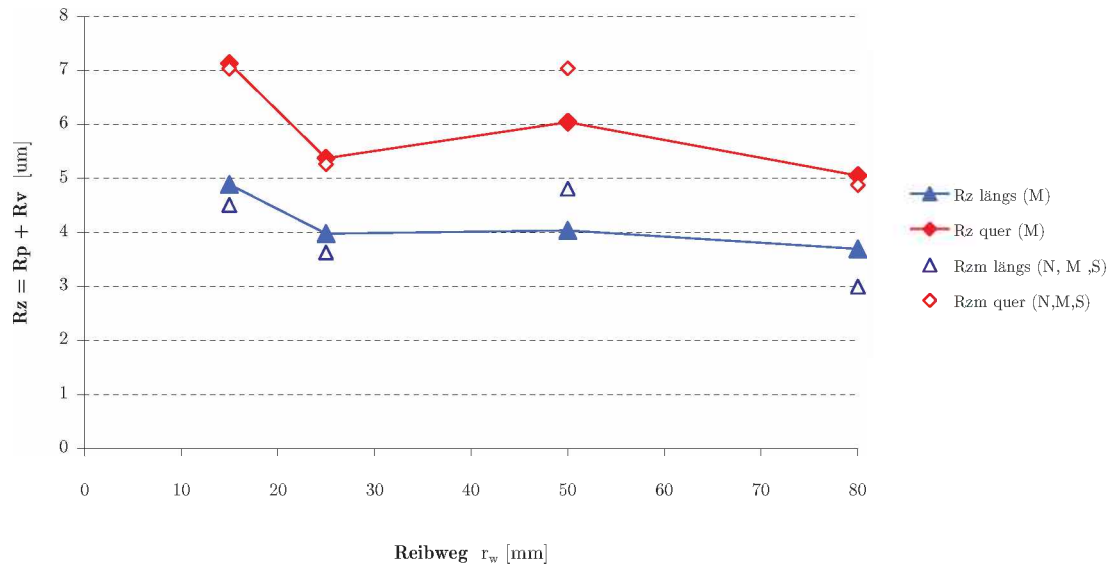


Abbildung 4.38: Steigungscharakterisierung - Rauheit der Probenoberfläche $DAG522(1:10, T_{WZG} = 250^\circ C, v_R = 150 \text{ mm/s}, F_{Mittel})$ für 15, 30, 50 und 80 mm Reibweg.

Ein ähnliches Bild zeigten die Versuche für $F25PLE(1:15, F)$ nach Abbildung 4.39 und ?? für eine positive Steigung. Dabei ist zu erkennen, dass ein Ansteigen des Reibwertes und von R_Z in Längs- und Querrichtung bis 30 mm Reibweg erfolgt und bis 80 mm einen stabilen Zustand analog zum Geschwindigkeitsverlauf einnimmt.

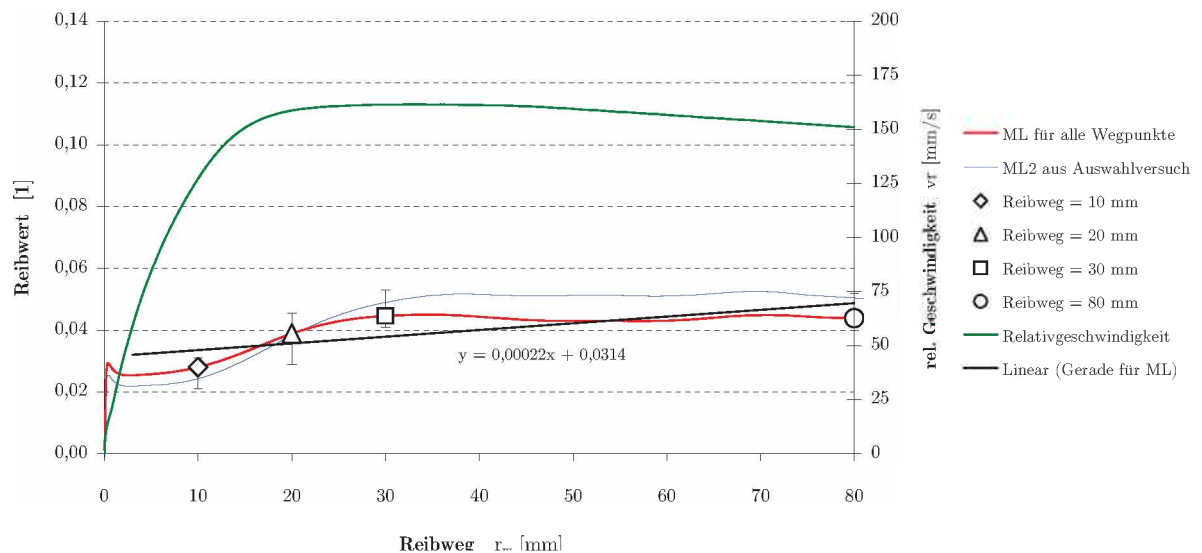


Abbildung 4.39: Steigungscharakterisierung - positive Steigung für Fuchs $F25PLE(1:15, T_{WZG} = 250^\circ C, v_R = 150 \text{ mm/s}, F_{Mittel})$ - Mittlere Reibwerte für den gesamten Bereich von 10, 20, 30 und 80 mm Reibweg.

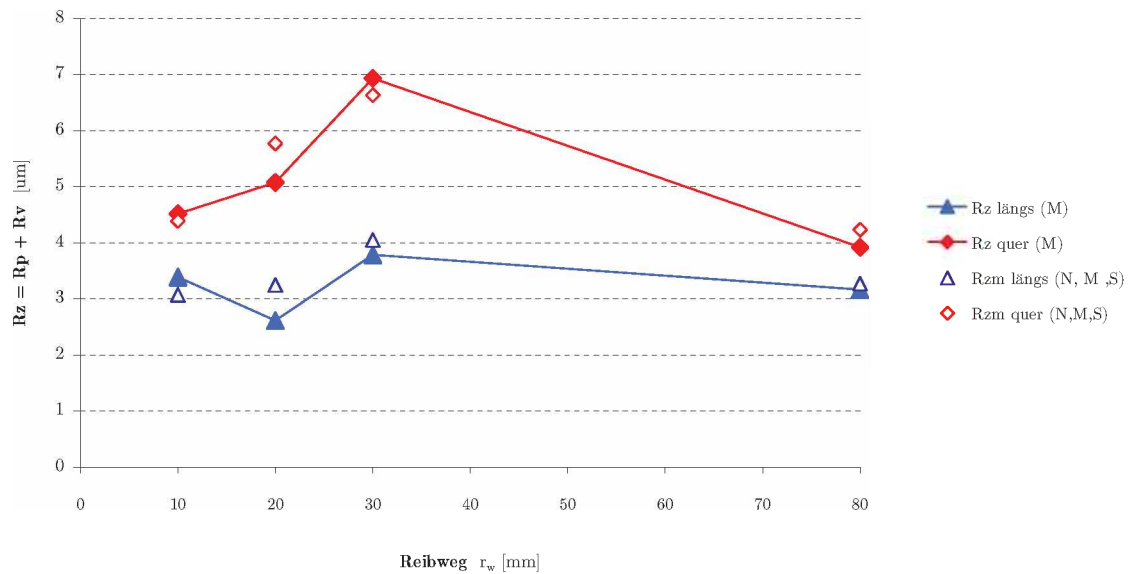


Abbildung 4.40: Steigungscharakterisierung - Rauheit der Probenoberfläche $F25PLE(1:15, T_{WZG} = 250^\circ\text{C}, v_R = 150 \text{ mm/s}, P_{Mittel})$ für 10, 20, 30 und 80 mm Reibweg.

Um das Verhalten zu erklären kann angenommen werden, dass die reale Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug zu Beginn des Versuchs sehr klein ist, und die tatsächliche Wirkfläche sich durch Flächenpressung, wie auch durch plastische Deformation der Oberfläche, durch große Relativbewegungen vergrößert, wodurch eine Abnahme der Rauheit und ein stationärer Reibwert erreicht wird.

4.6 Ergebnisse zur Bewertung der Schmierstoffe

4.6.1 Ergebnisse zur Bewertung der Schmierstoffe im Prozess

4.6.1.1 Diskussion der Kriterien im Prozess

Um eine Möglichkeit zu geben eine Bewertung der Schmierstoffe hinsichtlich des Verhaltens während des Prozesses zu definieren, wurden Kriterien erhoben, die eine Beurteilung der Schmierstoffe während der Versuchsdurchführung als auch eine Bewertung der Probenoberflächen ermöglichen.

Dabei wurden die Kriterien für die Auswahlversuche bei 250°C in Tabelle 4.4 und für höhere Werkzeugtemperaturen in Tabelle 4.5 dargestellt.

Beim Schmiermittel $F31(A)$ fand bei niedrigen Konzentrationen ein Abblättern der Schmierfilmschicht statt. Die Qualität der Probenoberflächen zeigten einen rauen Charakter mit wenigen Schmierstoffresten.

Der Schmierstoff *F25PLE* zeigte, dass die Proben nach der Versuchsdurchführung eine dünne Schmierfilmhaut besaßen und die Oberflächen der Proben sehr glatt und vom Schmierstoff befreit waren.

Bei *F508(A)* ist nach der Untersuchung festzuhalten, dass es zu einer Rauchentwicklung der Schmierstoffkomponenten nach Lufttritt in den Versuchsraum kam. Die Oberflächen der Proben waren mit einer Schmierfilmhaut versehen und die Probenoberflächen zeigten einen glänzenden und kaum verunreinigten Eindruck.

Das Produkt *DAG522(250°C, A)* war das einzige Schmiermittel auf Grafit-Öl-Basis für den unteren Temperaturbereich (*250°C*), wobei die Proben bei niedrigen Konzentrationen zu einem Schmierfilmabriss neigten.

Für die Schmierstoffe auf Grafit-Wasser-Basis bei *250°C* gestaltete sich die Zubereitung sowie die Handhabung relativ einfach. Neben einem raschen Wechsel der Schmiermedien in der Sprühvorrichtung, war mit diesen Produkte ebenfalls ein sehr schnelles und sauberes Arbeiten möglich. Dagegen gestaltete sich der Umgang mit dem Schmiermedium auf Öl-Basis schwieriger.

Bei dem Schmierstoff *87/3(F)* war die Schmierstoffaufbringung durch hohe Viskosität relativ problematisch. Die Aufbringung erfolgte durch einen Pinsel wobei starke Anhaftungen bei hohen Werkzeugtemperaturen auftraten. Durch Änderung der Temperaturen konnte bessere Ergebnisse erzielt werden.

Die Handhabung gestaltete sich für den Schmierstoff *F509F(450°C, A)* sehr einfach wobei das Medium bei Raumtemperatur problemlos versprüht werden konnte. Nach der Versuchsdurchführung konnten keine Anhaftungen von Aluminium an der Werkzeugoberfläche beobachtet werden.

Bei Schmierstoffen auf Öl-Basis wurde während der Schmierstoffaufbringung bei hohen Werkzeugtemperaturen eine relativ starke Rauchentwicklung festgestellt, die durch das Abbrennen von leicht brennbaren Inhalten verursacht wurde.

4.6.1.2 Kriterien zur Bewertung der Schmierstoffe im Prozess

Auswahlversuche für eine Werkzeugtemperatur von 250 °C													
Bezeichnung	Schmiermittel	DAG-522 Fa. Acheson T _{wzg} 250°C			F-508 Fa. Acheson T _{wzg} 250°C			LUBRODAL F25 PLE Fa.Fuchs T _{wzg} 250°C			F-31 Fa. Fuchs T _{wzg} 250°C		
	Konzentration	(1:7)	(1:5)	(1:2)	(1:1)	(1:0.5)	(D)	(1:15)	(1:7)	(1:3)	(1:22)	(1:15)	(1:7)
	Drücke PN	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)
Kenngößen bei der Versuchsdurchführung	Erkennbare Schmierfilmschicht	wenig	wenig	wenig	deutlich	deutlich	deutlich	deutlich	deutlich	deutlich	deutlich	deutlich	wenig
	Abblättern der Schmierfilmschicht	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	wenig
	Art der Schmierstoffaufbringung	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse
	Rauchentwicklung nach Aufbringung	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	gering	gering	gering	gering	gering	gering
	Anhaftungen von Aluminium am Werkzeug	wenig	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Schmierfilmhaut an der Probenoberfläche	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
	Rauchentwicklung nach Versuch	wenig	wenig	wenig	sehr stark	sehr stark	stark	wenig	wenig	wenig	wenig	wenig	kein
Bewertung der Probenoberfläche	Optische Oberflächenqualität	matt	glänzend	glänzend glatt	glänzend glatt	glänzend	glänzend rauh	schön glatt	schön glatt	schön glatt	rau	rau	rau
	Oberflächenqualität - Rifen an der Oberfläche	stark	mässig	wenig	stark	mässig	wenig	wenig	kaum	wenig	stark	mässig	wenig
	Schmierstoffreste an Oberfläche	wenig	wenig	sehr wenig	wenig	wenig	sehr wenig	wenig	wenig	mässig	mässig	mässig	wenig
	Schmierfilmaabriß Oberflächendeformation	Nein Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Schmierrestverteilung	stark am Rand	stark am Rand	leicht am Rand	leicht am Rand	leicht am Rand	leicht am Rand	Mitte	Mitte	Mitte	entlang Riefen	entlang Riefen	entlang Riefen

Tabelle 4.4: Kriterien zur Bewertung der Schmierstoffe während der Prozessführung bei $T_{WZG} = 250^\circ\text{C}$

Auswahlversuche für unterschiedliche Werkzeugtemperaturen													
Bezeichnung	Schmiermittel	DAG-522 Fa. Acheson T _{wzg} 400°C			HYKOGREEN 87/3 Fa. Fuchs			DAG-522 Fa. Acheson T _{wzg} 450°C			F509 - F Fa. Acheson T _{wzg} 450°C		
	Konzentration	(1:5)	(1 : 2)	D	(D)	(D)	(D)	(1:5)	(1 : 2)	(D)	(1:1)	(1:0.5)	(D)
	Drücke PN	P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)	P _{max} P(2/3max)
Kenngrößen bei der Versuchsdurchführung	Erkennbare Schmierfilmschicht	wenig kaum	deutlich	deutlich	mäßig	mäßig	mäßig	leicht	deutlich	deutlich	wenig	wenig	deutlich
	Abblättern der Schmierfilmschicht	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
	Art der Schmierstoffaufbringung	Düse	Düse	Düse	Pinzel	Pinzel	Pinzel	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse	Düse
	Rauchentwicklung nach Aufbringung	sehr stark	stark	stark	mäßig	mäßig	stark	sehr stark	stark	mäßig	sehr stark	sehr stark	sehr stark
	Anhaftungen von Aluminium am Werkzeug	wenig	sehr wenig	Nein	wenig	wenig	mäßig	stark	wenig	wenig	kaum	kaum	Nein
	Schmierfilmbildung an der Probenoberfläche	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja
	Rauchentwicklung nach Versuch	wenig	wenig	wenig	kein	kein	kein	kein	kein	kein	kein	wenig	wenig
Bewertung der Probenoberfläche	Optische Oberflächenqualität	rau	rau	rau	mettalisches glänzend	matt	rau	rau	rau	rau	rau	rau	matt
	Oberflächenqualität - Rifen an der Oberfläche	stark	stark	stark	stark	mässig	mässig	sehr stark	stark	mässig	stark	mässig	wenig
	Schmierstoffreste an Oberfläche	mässig	mässig	stark	stark	mässig	wenig	stark	stark	sehr stark	stark	stark	sehr stark
	Schmierfilmbriß / Oberflächendeformation	Nein / Ja	Nein / Ja	Nein / Ja	Ja / Ja	Nein / Ja	Nein / Ja	Ja / Ja	Nein / Ja	Nein / Ja	Nein / Ja	Nein / Ja	Nein / Ja
	Schmierrestverteilung	gesamte Fläche	gesamte Fläche	gesamte Fläche	gesamte Fläche	in Mitte	am Rand und	gesamte Fläche	gesamte Fläche	gesamte Fläche	gesamte Fläche	gesamte Fläche	gesamte Fläche

Tabelle 4.5: Kriterien zur Bewertung der Schmierstoffe während der Prozessführung für hohe Werkzeugtemperaturen.

4.6.2 Ergebnisse zur Bewertung der Hantierbarkeit

Anhand der in Tabelle 3.21 dargestellten Kriterien erfolgte eine Beurteilung der Schmierstoffe hinsichtlich unterschiedlicher Werkzeugtemperaturen, wobei zusätzlich ein Farbschema verwendet wurde um eine relative Bewertung für jedes Kriterium zu ermöglichen. Dabei können die Farben sinngemäss für (*Rot* „Unzureichend“, *Orange* „Befriedigend“ und *Grün* „Ausgezeichnet“) interpretiert werden.

	F-31 Fa. Fuchs T _{WZG} = 250°C	LUBRODAL F25 PLE Fa. Fuchs T _{WZG} = 250°C	F-508 Fa. Acherson T _{WZG} = 250°C	DAG-522 Fa. Acherson T _{WZG} = 250°C	F509 - F Fa. Acherson T _{WZG} = 450°C	DAG-522 Fa. Acherson T _{WZG} = 400 bis 450°C	HYKOGREEN 87/3 Fa. Fuchs T _{WZG} = 350, 400 und 450°C
Schmierstoffaufbringung	Sehr leicht	Sehr leicht	Sehr leicht	Leicht	Sehr leicht	Leicht	sehr schwer Schmierstoffvorwärmung
Vorbereitung für den Einsatz	Sehr leicht	Sehr leicht	Sehr leicht	Leicht	Sehr Leicht auch Direkt verwendbar	Leicht	Sehr Leicht, Direkt verwendbar
Belästigungen am Arbeitsplatz	Nein	Ja, Raumentwicklung nach Versuch	Nein	Nein	Ja, Raumentwicklung	Ja, Raumentwicklung	Ja, Raumentwicklung
Umweltverträglichkeit	schwer	schwer	schwer	sehr schwer	sehr schwer	sehr schwer	sehr schwer
Kundenbetreuung der Schmiermittelfirmen	ausgezeichnet	ausgezeichnet	ausgezeichnet	ausgezeichnet	ausgezeichnet	ausgezeichnet	ausgezeichnet

Tabelle 4.6: Kriterien zur Hantierbarkeit der Schmierstoffe.

Nach den Kriterien in Tabelle 4.6 können folgende Feststellungen getroffen werden.

Besonders bei Schmierstoffen auf Öl-Basis sollte darauf geachtet werden, dass Maßnahmen installiert werden, die ein rauchfreies und störfreies Arbeiten bei Werkzeugtemperaturen größer 250°C ermöglichen.

Die meisten Schmierstoffe sollen die Möglichkeit bieten, eine wirtschaftlich einfache und schnelle Aufbringung ohne zusätzlichen Aufwand an speziellen Geräten zu ermöglichen. In der Versuchspraxis zeigte sich, dass lediglich der Schmierstoff 87/3(F) Probleme macht, die durch eine gegebenenfalls durchgeführte Erwärmung des Schmierstoffs gelöst werden kann.

Steigende Entsorgungskosten und Umweltauflagen erfordern eine höhere Verantwortung im Umgang mit Gesenkschmierstoffen auf Grafit-Basis, wie z.B. den Einsatz verbesserter Schmiertechnik und Kontrolle der Mengen für den jeweiligen Anwendungsfall.

5 Abschließende Betrachtung

5.1 Betrachtungen der Versuchsmethode

Im Rahmen der Untersuchungen war es nicht möglich, eine chemische Analyse der Schmierstoffe hinsichtlich des Aufbaus durchzuführen, mit deren es möglich gewesen wäre, konkrete Fragen, die in den Ergebnissen auftraten, zu klären. Da jede Firma bei der Schmiermittelherstellung zusätzliche Additive, Komponenten usw. beimgibt, die nachweislich das Verhalten steuern können, war es nicht möglich diese in Erfahrung zu bringen. Weiterführende Untersuchungen könnten mehr Aufschluss darüber geben.

Eine kritische Betrachtung der Ergebnisse ergibt sich hinsichtlich der manuellen Schmierstoffaufbringung. Jedoch zeigte sich, dass mit einer genauen Planung und Durchführung der Schmierstoffaufbringung dennoch aussagekräftige Ergebnisse möglich sind. Bei sehr komplizierten Gesenkformen oder bei auftragsbezogener Herstellung von niedrigen Stückzahlen erfolgt heute noch immer eine manuelle Aufbringung, wonach die erhaltenen Ergebnisse einen praktischen Nutzen darstellen. Bei zukünftigen Untersuchungen auf dem Gebiet der Schmierstoffe und Reibung werden Möglichkeiten bestehen, Versuche mit automatischer Schmierstoffaufbringung durchzuführen.

Eine weitere Betrachtung der Ergebnisse schließt die Methodik ein die zur Auswertung der Reibzahlen über den Reibweg verwendet wurde. Vorstellbar wäre, dass die Auswertungen nur in bestimmten definierten Bereichen durchgeführt werden. Dabei könnten Einflussfaktoren die gerade zu Beginn bei niedrigen Reibwegen wirken minimiert und genauer klassifiziert werden; jedoch würden die erhaltenen Ergebnisse den geforderten praxisnahen Charakter verlieren.

Die Wahl des Prüfprogramms wurde durch die Vorgaben des Industriepartners hinsichtlich eines möglichst praxisnahen Bezugs bei einfachen Versuchsbedingung festgelegt. Aus wissenschaftlicher Sicht wären Untersuchungen interessant, die nach Prüfprogramm III durchgeführt werden, um dadurch Betrachtungen für Reibwege ohne den direkten Einfluss der Stauchung auf die Schmierschicht der Werkzeugoberfläche zu ermöglichen.

5.2 Betrachtung der Ergebnisse

Bei der Charakterisierung der Schmierstoffe konnte festgestellt werden, dass eine aussagekräftige Untersuchung bei Werkzeugtemperaturen von 250°C weitgehend problemlos durchgeführt werden konnte. Daher geht aus den Ergebnissen hervor, dass die Schmierstoffe *F-508* (Fa. Acheson) und *F25 PLE* (Fa. Fuchs) auf Grafit-Wasser-Basis besonders für Anwendungen in denen sehr lange Reibwege auftreten, sowie für mittlere Werkzeugtemperaturen geeignet sind, da niedrige Reibwerte auftraten und die Qualität der Probenoberfläche im Vergleich zu Proben bei anderen

Schmierstoffen sehr gut ist. Der Industriepartner konnte durch eigene Versuche im Schmiedebetrieb diese Feststellungen bestätigen.

Überraschend zeigten sich, dass bei Werkzeugtemperaturen von 450°C nur der Schmierstoff *F-509F* (Fa. Acheson) durch einfache Hantierbarkeit überzeugen konnte. Als Probleme bei der Anwendung der anderen Schmierprodukte konnte festgehalten werden, dass es in Abhängigkeit des verwendeten Schmierstoffs zu erheblichen Aluminiumanhaftungen am Werkzeug kam, sodass nur mehr unzureichende Schmierwirkung gegeben war.

Die erhaltenen Ergebnisse zeigen deutlich die Abhängigkeit des Reibwertes vom verwendeten Schmierstoff und bestimmten Systemgrößen wie dem Normaldruck, der Relativgeschwindigkeit, der Temperatur, der Konzentration und der Oberflächenvergrößerung. Zusammenfassend lässt sich darstellen, dass die Abhängigkeit der Reibwerte stärker vom Druck als von der Geschwindigkeit beeinflusst wird und, dass bei Zunahme dieser Größen der Reibwert niedriger wird. Außerdem zeigte sich, dass bei der Charakterisierung des Kurvenverlaufs ein Zusammenhang der unterschiedlichen Reibwege zwischen Reibwert und Rauheit der Probenoberfläche besteht. Die Ergebnisse bei hohen Werkzeugtemperaturen zeigten deutlich, dass der Einfluss der Temperatur ausgeprägter ist und es deshalb sehr schwierig ist, exakte Aussagen über mögliche Einflüsse zu tätigen, da bis heute noch keine hinreichenden theoretischen Ansätze aufgestellt wurden, mit denen eine qualitative Beschreibung von Temperatur und Reibwert möglich ist.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Verfahren zur Charakterisierung von Schmierstoffen - Formänderung	4
1.2	Verfahren der indirekten Messung - Kraftmessung	5
2.1	Einflussgrößen des Tribosystem	7
2.2	Aufbau technischer Oberflächen	7
2.3	Rauheiten der Kontaktflächen zwischen Werkstück und Werkzeug	8
2.4	Zusammenhang zwischen realer und nomineller Kontaktfläche	9
2.5	Grundlegende Reib- und Verschleißmechanismen	10
2.6	Stribekkurve mit den einzelnen Bereichen der Reibzustände	11
2.7	Änderungen der Reibspannung nach bekannten Reibgesetzen	15
2.8	Schematische Darstellung des Gesenkschmiedeprozesses	20
2.9	Einflussfaktoren auf die Lebensdauer der Gesenke	21
2.10	Darstellung der Schadensarten bei Schmiedegesenken	22
2.11	Anlasstemperatur für Warmarbeitsstähle	24
2.12	Fließkurve AA 2618	29
2.13	Binäre Hauptsysteme des Dreistoffsystems AlCuMg-Knetlegierung	30
2.14	Einflüsse auf die Schmierung während des Umformung	34
3.1	Überblick der Anlageteile	41
3.2	Wichte Komponenten und Aufbau der Rationtribometer Anlage	41
3.3	Schematische Darstellung der Wägezelle im RT	42
3.4	Der Trigger an der Rückseite der Maschine	43
3.5	Schaltplan der Messsensorik für den Rotationstribometer	44
3.6	Die Benutzerschnittstelle für das Messprogramm	46
3.7	Komponenten und Geometrie für den Werkzeugsatz	47
3.8	Darstellung der Geometrie für den Probenhalterung	49
3.9	Darstellung des Werkzeugsatzes	49
3.10	Darstellung der Schrittfolge für die Versuchsprogramme	51

3.11	Werkzeugsatz nach der Versuchsdurchführung	54
3.12	Probenquerschnitt nach Versuch bei 2,2x Vergrößerung	54
3.13	Häufigkeitsverteilung der Reibklassen für Stichprobenberechnung	56
3.14	Geschwindigkeitsverläufe	70
3.15	Darstellung der Regressionsgerade	72
3.16	Darstellung der der Steigungscharakterisierung	74
3.17	Messpunkte zur Rauigkeitsmessung	75
3.18	Messraster zur Rauheitsvermessung	75
3.19	Wirkung des Obeflächenfilters	76
3.20	Darstellung der Oberflächencharakteristik	76
3.21	Bewertung der Probenkörpergeometrie durch Probenkörberversmessung	79
4.1	Kurzbezeichnung der Schmierstoffe und der variablen Parameter	82
4.2	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Minimale, mittlere und maximale Gleitreibzahl im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	84
4.3	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - SA_{EK} zu SN im gesamten Bereich bei $v_R =$ 150 mm/s und 80 mm Reibweg	85
4.4	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - RV zu SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	86
4.5	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu RV im gesamten Bereich bei $v_R =$ 150 mm/s und 80 mm Reibweg	87
4.6	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R =$ 150 mm/s und 80 mm Reibweg	88
4.7	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - RV zu SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R =$ 150 mm/s und 80 mm Reibweg	89
4.8	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - Minimale, Mittlere und Maximale Gleitreibzahl von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	90
4.9	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - RV zu SN von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	90
4.10	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu RV von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	91
4.11	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu SN im gesamten Bereich bei $v_R =$ 150 mm/s und 80 mm Reibweg mit den Grenzen des Summenkurvenverlaufs. . .	95

4.12	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - SA_{EK} zu SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	96
4.13	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - RV zu SN im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	96
4.14	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu RV im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	97
4.15	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	98
4.16	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - RV zu SA_{EK} im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	98
4.17	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu SN im Bereich von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	99
4.18	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Reibzahlverlauf RV zu Schmiermittelnummer SN von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	100
4.19	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Reibzahlverlauf RV von 3 bis 40 mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	100
4.20	Detailversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu RZ im gesamten Bereich mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	103
4.21	Auswahl AV - und Detailversuche DV für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ und 450°C - μ_{MG} und RZ im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	104
4.22	Detailversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu SN im gesamten Bereich mit unterschiedlichen Prüfeinstellungen	105
4.23	Detailversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu SN im gesamten Bereich mm bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	106
4.24	Detailversuche $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ - μ_{MG} zu RV im gesamten Bereich bei $v_R = 150$ mm/s und 80 mm Reibweg	106
4.25	Mittlere Gleitreibzahl zu Normaldruck F_N für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$	107
4.26	Reibzahlverlauf RV zu Normaldruck F_N für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$	108
4.27	Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Relativgeschwindigkeit v_R für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$	109
4.28	Reibzahlverlauf RV zu Relativgeschwindigkeit v_R für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$	109
4.29	Mittlere Gleitreibzahl μ_{MG} zu Werkzeugtemperatur T_{WZG}	110
4.30	Haftreibzahl μ_{OV} zu Oberflächenvergrößerung OV	112
4.31	Auswahlversuche $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ - OV der Probekörper	113

4.32	Auswahlversuche $T_{WZG} = 450\text{ °C}$ - O_V der Probekörper	113
4.33	Oberflächenvergrößerung O_V zu Werkzeugtemperatur T_{TZG}	114
4.34	Auswahlversuche - R_Z bei Werkzeugtemperaturen von 250 °C	115
4.35	Auswahlversuche - R_Z bei Werkzeugtemperaturen von 450 °C	116
4.36	Farbaufnahmen der Oberflächenbeschaffenheit der Werkzeuge.	117
4.37	Steigungscharakterisierung - negative Steigung für $DAG522(1:10, T_{WZG} = 250\text{ °C},$ $v_R = 150\text{ mm/s}, F_{Mittel})$	118
4.38	Steigungscharakterisierung - Rauheit der Probenoberfläche $DAG522(1:10, T_{WZG}$ $= 250\text{ °C}, v_R = 150\text{ mm/s}, F_{Mittel})$	119
4.39	Steigungscharakterisierung - positive Steigung $F25PLE(1:15, T_{WZG} = 250\text{ °C}, v_R$ $= 150\text{ mm/s}, F_{Mittel})$	119
4.40	Steigungscharakterisierung - Rauheit der Probenoberfläche $F25PLE(1:15, T_{WZG}$ $= 250\text{ °C}, v_R = 150\text{ mm/s}, F_{Mittel})$ für 10, 20, 30 und 80 mm Reibweg.	120

Tabellenverzeichnis

2.1	Anforderungen einem optimalen Warmarbeitsstahl	23
2.2	Aufbau und Anforderungsprofil für den Warmarbeitsstahl W302(1.2344)	25
2.3	Eigenschaften von Reinaluminium	26
2.4	Schematischer Aufbau der Aluminiumknetlegierung	27
2.5	Anforderungen an Aluminium Knetlegierungen	28
2.6	Eigenschaften und Zusammensetzung der Al-Knetlegierung AA 2618	29
2.7	Anforderung an das Schmiermittel	31
2.8	Anforderung der Schmiermittel an den technologischen Prozess	32
2.9	Einteilung der Schmierstoffe in der Massivumformung	35
2.10	Wichtige Komponenten bei Schmierstoffen auf Grafit-Wasser-Basis	36
3.1	Kenndaten des Rotationstribometer	40
3.2	Technische Daten der Kraftmessdose und der Wägezelle	43
3.3	Technische Daten der Verstärker von <i>DEWETRON</i>	45
3.4	Kenndaten der Messanlage	45
3.5	enngrößen der Stichprobenberechnung	55
3.6	Quantile der Normalverteilung	57
3.7	enngrößen der Stichprobenberechnung	57
3.8	Die wichtigsten Eigenschaften der Aluminium Knetlegierung <i>AA 2618</i>	58
3.9	Anforderungen an den Werkzeugstahl Böhler <i>W302</i>	59
3.10	Variables und fixes Parameterkollektiv	60
3.11	Eigenschaften und Kenndaten der verwendeten Schmierstoffe	63
3.12	Eigenschaften der verwendeten Verdünnungsmittel	64
3.13	Festgelegte Kriterien zur Aufbringung der unterschiedlichen Schmiermittel	65
3.14	Versuchsmatrix für die Versuchsplanung	67
3.15	Erweiterter Versuchsplan zur übersichtlichen Darstellung der Parameter	68
3.16	Festgelegte Bereiche konstanter Geschwindigkeit	70

3.17 Überblick über die gewählten Reibwege und die Anzahl der Versuche	74
3.18 Beschreibung der wichtigsten Rauheitsparameter	77
3.19 Kriterien zur Beurteilung der Schmierstoffe während der Versuchsdurchführung .	78
3.20 Kriterien zur Beurteilung der Schmierstoffe anhand der Probenoberfläche	79
3.21 Kriterien zur Beurteilung der Schmierstoffe hinsichtlich der Hantierbarkeit	81
4.1 Farbschema zur qualitativen Erfassung der Ergebnisse	92
4.2 Ergebnistabelle der Auswahlversuche für $T_{WZG} = 250^{\circ}\text{C}$ für 80 mm Reibweg . .	93
4.3 Ergebnistabelle der Auswahlversuche für $T_{WZG} = 450^{\circ}\text{C}$ für 80 mm Reibweg . .	102
4.4 Kriterien zur Bewertung der Schmierstoffe während der Prozessführung.	122
4.5 Kriterien während der Prozessführung	123
4.6 Kriterien zur Hantierbarkeit der Schmierstoffe	124

Literaturverzeichnis

- [1] H. Bühler und J. Löwen: “Verfahren zum Messen des Reibungswiderstandes für die instationären Umformverfahren”, *Stahl und Eisen* **92**(14):698–704, 1972. Printed in German and Spain.
- [2] M. Kunogi: “On Plastic Deformation of Hollow Cylinder under Axial Compression”, *Reports of the Scientific Research Institute (Kagaku Kenkyujo Hokoku)* **30**(2):63–92, 1954. OCLC: 7256618; printed in Japanese.
- [3] M. Kunogi: “A New Method of Cold Extrusion”, *Journal of the Scientific Research Institute* **50**(1437):215–246, 1956.
- [4] A. T. Male und M. G. Cockcroft: “A Method for Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation”, *Journal of the Institute of Metals* **93**:38–46, 1965.
- [5] R. Ebrahimi und A. Najafzadeh: “A new method for evaluation of friction in bulk metal forming”, *Journal of Materials Processing Technology* **152**:136–143, 2004.
- [6] H. Sofuoglu und H. Gedikli: “Determination of friction coefficient encountered in large deformation processes”, *Tribology International* **35**:27–34, 2002.
- [7] H. Kim, S. Padwad und T. Altan: “Evaluation of New Lubricants for Cold Forging Without Zinc Phosphate Coating”, in: “37th Plenary Meeting of the International Cold Forging Group (ICFG)”, Istanbul (Turkey), 2004. Paper No. 525-1.
- [8] P. Groche und B. Kappes: “Tribologie der Massivumformung – Modellprüfstände der Tribologie”, in: “Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung”, (W. J. Bartz, Hg.), Bd. 13, S. 1–14, expert verlag, Renningen-Malmsheim (Germany), 2004. Printed in German.
- [9] D. Hemyari: “Methode zur Ermittlung von Konstitutivmodellen für Reibvorgängen der Massivumformung bei erhöhten Temperaturen”, *Shaker Verlag* **43**(1):43, 1999.
- [10] E. Doege, M. Alasti und R. Schmidt-Jürgensen: “Ein innovatives Verfahren zur Charakterisierung der Reibung und des Wärmeübergangs beim Präzisionsschmieden”, *UTF science* **IV**:4–8, 2002. Printed in German.
- [11] B. G. Hansen und N. Bay: “Two new methods for testing lubricants for cold forging”, *Journal of Mechanical Working Technology* **13**(2):189–204, 1986.
- [12] DIN50323-1: *Tribologie; Begriffe*, Beuth Verlag, 1988.
- [13] DIN50320: *Verschleiß; Begriffe; Systemanalyse von Verschleißvorgängen; Gliederung des Verschleißgebietes*, Beuth Verlag, 1979.

- [14] H. Czichos und K.-H. Habig: *Tribologie - Handbuch: Reibung und Verschleiß*, Friedr. Vieweg und Sohn Verlag / GVW Fachverlag GmbH, Wiesbaden (Germany), 2. Aufl., 2003. Printed in German.
- [15] K. Markut: "Gestaltung und Bau eines Rotationstrbometer für Schmiervorgänge", *Institut für Umformtechnik* **1**(1):110, 2006.
- [16] F. P. Bowden und D. Tabor: *Reibung und Schmierung fester Körper*, Springer-Verlag, Berlin (Germany), 1959. Printed in German.
- [17] I. Ming-Feng: "Metal Transfer and Wear", *Journal of Applied Physics* **23**(9):1011–1019, 1952.
- [18] R. Herbertz und M.-L. Cho: "Reibungsmechanismen in der Grenzfläche Werkstück/Werkzeug bei Umformverfahren und daraus resultierende Probleme für theoretische Berechnungen", *Archiv für das Eisenhüttenwesen* **54**(12):499–502, 1983. Printed in German.
- [19] E. Dannenmann, R. Geiger und T. Gräbener: "Tribologische Grundlagen; Oberflächenwandlung", in: "Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft", (K. Lange, Hg.), Bd. Band 1, Springer-Verlag, Berlin, 2. Aufl., 1984. Printed in German.
- [20] C. Messner, E. A. Werner und H. Grass: *Reibung und Wärmeübergang beim Schmieden*, Bd. 604 von *Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Fertigungstechnik*, VDI Verlag, Düsseldorf (Germany), 2002. Printed in German.
- [21] M. C. Shaw, A. Ber und P. A. Mamin: "Friction Characteristics of Sliding Surfaces Undergoing Subsurface Plastic Flow", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers: Series D - Journal of Basic Engineering* **82**:342–346, 1960.
- [22] V. Levanov, A.N und Kolmogorov: "Contact Friction in Metal Forming", *Journal of Materials Processing Technology, Moskau(Russland)* 1976.
- [23] D. Stephenson: "Friction in cold strip rolling", *Wear* **92**:293–311, 1983.
- [24] T. Wanheim, N. Bay und A. S. Petersen: "A theoretically determined model for friction in metal working processes", *Wear* **28**(2):251–258, 1974.
- [25] E. Doege, R. Seidel und H. Luig: "Reibungs- und Verschleißvorgänge beim Schmieden", *Stahl* (4):57–60, 1993. Printed in German.
- [26] E. Nehl: "Tribologische Aspekte in der Umformtechnik - Teil 1", in: "Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik", (W. J. Bartz, Hg.), S. 71–112, expert verlag, Sindelfingen (Germany), 1987. Printed in German.
- [27] Y. Yu: "Entwicklung eines Reibgesetzes für die Blechumformung", *Diss., Technische I lochschule Darmstadt* S. 163, 1994.

- [28] K. Lange: “Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Bd. 1: Grundlagen der Umformtechnik”, *Berlin* 1974.
- [29] R. Kopp und F.-D. Philipp: “Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming processes”, *Steel Research International* **63**(9):392–398, 1992.
- [30] C. Horster: “Bedeutung der Reibung für die Breitng beim Warmwalzen von Stahl”, *Diss., Technische Hochschule Aachen* 1990.
- [31] J. Löwen: “Beitrag zur Bestimmung des Reibzustandes beim Gesenkschmieden”, *Diss., Technische Hochschule Hannover* S. 185, 1971.
- [32] J. A. Schey und A. H. Lonni: “Durability of Graphite Films in Plastic Deformation”, *Journal of Lubrication Technology* S. 289–295, 1975.
- [33] S. u. A. N. B. Jain: “peed and frictional effects in hot forging”, *roc. Inst. Mech. lng.* **182**, 1968.
- [34] H. Metzler: “Über den Einfluß der Werkzeuggeschwindigkeit auf den Werkstofffluß beim Stauchen”, *Industrie-Anzeiger* **92**(57):1372–1378, 1970. Printed in German.
- [35] G. Schmitt: “Untersuchungen über das Napf-Rückwärts Fließpressen von Stahl bei Raumtemperatur.”, *Berichte aus der Umformtechnik* (7), 1968.
- [36] R. Geiger: “Reibung und Schmierung beim Kaltfließpressen von Stahl”, in: “Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik”, (W. J. Bartz, Hg.), S. 283–318, expert verlag, Sindelfingen (Germany), 1987. Printed in German.
- [37] H. Meyer-Nolkemper: “Gesenkschmieden”, *Springer Verlag Berlin., ISBM 0-387-08298-0* **1**(2. Auflage):411, 1977.
- [38] H. Haferkamp, F.-W. Bach, C. Baar, E. Doege und C. Romanowski: “Reibung und Verschleiß beim Schmieden”, in: “Fortschritte in der Werkzeugtechnik”, (E. Doege, D. Besdo, H. Haferkamp, H. K. Tönshoff und H.-P. Wiendahl, Hg.), S. 43–81, Verlag Meisenbach, Bamberg (Germany), 1995. Printed in German.
- [39] I. Schruff: “Der Einfluss des Werkzeugstahles auf den Werkzeugverschleiß beim Gesenkschmieden”, in: “Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung”, (W. J. Bartz, Hg.), Bd. 13, S. 121–139, expert verlag, Renningen-Malmsheim (Germany), 2004. Printed in German.
- [40] H. Luig und T. Bobke: “Beanspruchung und Schadensarten an Schmiedegesenken”, *Tribologie + Schmierungstechnik* **37**(2):76–81, 1990. Printed in German.
- [41] U. Schliephake und R. Seidel: “Verschleißphänomene an Gesenkschmiedewerkzeugen”, in: “DGM-Symposium Reibung und Verschleiß“, S. 333–340, 1992. Printed in German.

- [42] H. Luig, T. Bobke und P. Groche: “Reibung und ihre Bedeutung in der Umformtechnik - Funktion gegen Verlust und Verschleiß”, *Technische Rundschau* **82**(24):42–50, 1990. Printed in German.
- [43] C. Kammer: “Aluminium Taschenbuch 1”, *Aluminium Verlag - Marketing & Kommunikation GmbH, ISBN 3-87017-274-6* **1**(16. Auflage):767, 2002.
- [44] W. J. Bartz: “Reibung – Maß aller Dinge?”, *Tribologie + Schmierungstechnik* **38**(4):192–201, 1991. Printed in German.
- [45] H. W. Seidel: “Gesensschmierstoffe in der Halbwarm- und Warmumformung”, *Sommer-schule Schmiedetechnik* **1**(1):171–185, 2005.
- [46] A. C. F. Fischer: “Festschmierstoffe, insbesondere für die Warmumformung”, *Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik* (220):564–598, 1987.
- [47] E. Pfitzner: “Richtige Gesensschmierung - ein Wettbewerbsvorteil”, *Fachbeiträge* **1**:2, 2001.
- [48] E. Doege, A. Huskic, L. Barnert, M. Gulde und C. Hornhardt: “Verschleißreduzierung an Schmiedegesenken durch Einsatz neuer Technologien”, in: “Neuere Entwicklungen in der Massivumformung”, (K. Siegert, Hg.), S. 331–346, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Fellbach, Germany, 2001. Printed in German.
- [49] R. Melching: “Verschleiss, Reibung und Schmierung beim Gesensschmieden”, *Institut für Umformtechnik* **1**(1):75, 1980.
- [50] O. Pawelski: “Ein neues Gerät zum Messen des Reibungsbeiwertes bei plastischen Formänderungen”, *Stahl und Eisen* **84**:1233–1243, 1964.
- [51] B. Buchner, K. Markut und B. Buchmeyer: “Bestimmung der Reibzahl unter Schmiedebedingungen mit Hilfe des Rotationsreibversuchs”, *Institut für Umformtechnik* (220):7, 2005.
- [52] W. die freie Enzyklopädie: “Konfokalmikroskop”, *www.wikipedia.com* **1**(1):2, 2006.
- [53] H.-W. Wagener: “Reibzahl und Stofffluß beim Traktrix-Zapfpresen”, *Umformtechnik* (2):54–3000, 1998.
- [54] R. Melching: *Verschleiß, Reibung und Schmierung beim Gesensschmieden*, Phd-thesis, Universität Hannover, 1980. Printed in German.