

Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering

Montanuniversität Leoben



DIPLOMARBEIT

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN ÜBER UNTERSCHIEDLICHE REPARATURMETHODEN VON SCHMIEDEGESENKEN

Ediz Zafer MAZLUM

Studienrichtung Werkstoffwissenschaft

Leoben, Oktober 2013

Eidesstattliche Erklärung

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

Affidativ

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, Oktober 2013

Ediz Zafer MAZLUM

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben.

Zu Beginn möchte ich dem Vorstand des Lehrstuhles für Umformtechnik, Herrn o. Univ.- Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr, für die Betrauung mit dieser Arbeit und die Betreuung derselben, sowie der intensiven Unterstützung danken.

Ich möchte mich bei allen Angestellten des Lehrstuhles für Umformtechnik, die mir bei der Erstellung meiner Arbeit geholfen haben, bedanken.

Ich möchte ebenfalls meinen Dank an das Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung, das mir die geistigen und fachlichen Kenntnisse, die zur Erstellung dieser Arbeit nötig waren vermittelte, darlegen.

Ich bedanke mich besonders bei allen mir nahe stehenden Menschen, insbesondere meiner Familie, die mir während meines ganzen Lebens beiseite gestanden hat und mir dieses Studium ermöglichte. Ein besonderer Dank gilt meinen Großeltern die mich während meines gesamten Lebensweges stets unterstützten.

Ein spezieller Dank gilt einer besonders freundlichen, bescheidenen und vor allem hilfsbereiten Person, der ich meinem gesamten Respekt zolle und meine höchste Anerkennung entgegen bringe. Diese Person begleitete mich während meiner gesamten Arbeit und unterstützte mich wann immer ich Hilfe benötigte. Dieser besondere Dank gebührt einzig und alleine Ihnen Herr Prof. Buchmayr. Herzlichen Dank und ich hoffe, dass wir auch noch in Zukunft gemeinsam an Projekten arbeiten werden.

Kurzfassung

Schmiedegesenke aus Warmarbeitsstahl unterliegen während der Warmmassivumformung hohen thermischen, mechanischen und tribologischen Belastungen, die zu einer eher geringen Lebensdauer der Schmiedewerkzeuge führen. Neben Ermüdungsrissen und plastische Verformungen stellt mit einem 70 % Anteil der Verschleiß das größte Problem dar. Die Werkzeugkosten liegen bei der Warmmassivumformung zwischen 10 bis 20 % der Gesamtkosten. Bei diesem hohen Werkzeugkostenanteil besteht ein großes wirtschaftliches Interesse, die Standmenge der Werkzeuge und die damit verbundene Wirtschaftlichkeit der Produktion zu erhöhen. Eine Verbesserungsmöglichkeit besteht darin, die verschlissenen bzw. geschädigten Schmiedewerkzeuge durch Reparatur aufzubereiten und sie wieder zu verwenden. Dies kann in der Praxis folgendermaßen durchgeführt werden: Nachsetzen mittels High Speed Cutting (HSC), Auftragschweißen, Einsatz von Dünnschichtentechnologie (PVD oder CVD) und mit spezielle Oberflächenmodifikationen.

In dieser Arbeit wurde das Verschleißverhalten unterschiedlicher Warmarbeitsstähle (Böhler W300 und W360) und der Schweißzusatzwerkstoffe (artgleiche und Co-Basislegierungen zum Auftragschweißen) getestet und verglichen. Die Versuche wurden mit dem am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität entwickelten Rotationstribometer mit variierten Versuchsparametern durchgeführt. Die Werkzeugtemperatur wurde mit 250 °C und die Temperatur des Werkstücks mit 1200 °C festgelegt. Die Untersuchungen wurden mit den Versuchsparametern Flächenpressung (bis 45 kN), Relativgeschwindigkeit (bis 45 mm/s) und Reibweg (bis 200 mm) durchgeführt, um der Einfluss dieser variierten Parametern auf die Reibung und auch den an der Oberfläche des Werkzeuges auftretenden Verschleiß möglichst authentisch abzubilden.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass drei von fünf verwendeten Zusatzwerkstoffe (CastoWIG, Capilla734, Capilla733) für das Auftragschweißen zu einer Verbesserung der verschlissenen bzw. geschädigten Oberfläche des Werkzeuges führen.

Abstract

Forging dies of hot tool steels are subjected during the hot forming process by high thermal, mechanical and tribological loading which lead in general to a lower service life of the forging tools. Beside the fatigue cracks and plastic deformation abrasion is in 70% of the cases the main cause of failure. Wear poses a great problem, because the cost of the tools for hot forming accounts for 10 to 20% of the total costs. Due to this high costs fraction there is a high interest to improve the life time of tools and the related economy of production. One possibility to increase the service life of the forging tools and reduce the related tool and production cost is to repair the worn or damaged forging tools and to reuse them. This can be done in the following ways: Repositioning by High Speed Cutting (HSC), overlaying welding, application of thin-film technologies (PVD or CVD) and special surface modifications.

In this work the abrasion behaviour under closed-die forging condition of two hot tool steels (Böhler W300 and W360) and the use of welding cladding materials (similar material type and Co base alloy for coating) were tested and compared. The experiments were performed by rotational tribometer, which were developed by the chair of metal forming at Montan University using varying experiment parameters (contact pressure, friction velocity, friction path, temperature). The temperature of the tools was hold at 250°C and the temperature of workpiece is taken to be 1200 °C. The examinations were made with the parameters contact pressure up to 45 kN, friction velocity up to 45 mm/s and a friction path up to 200 mm in order to depict the influence of this varying parameters on the friction and also the occurring wear on the surface of the workpiece as authentic possible.

Studies have shown that three of five used additional materials (CastoWIG, Capilla 734, Capilla 733) in overlaying welding are leading to an improvement of the abraded or damaged surface of the tool.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	1
2. Gesenkschmieden – Prozessbeschreibung und Beanspruchungen der Werkzeuge.....	5
2.1 Prozessbeschreibung.....	5
2.2 Beanspruchungsbedingungen beim Gesenkschmieden	9
2.2.1 Thermische Beanspruchung.....	9
2.2.2 Mechanische Beanspruchung.....	11
2.2.3 Tribologische Beanspruchung	12
2.2.3.1 Adhäsion.....	14
2.2.3.2 Abrasion.....	15
2.2.3.3 Oberflächenzerrüttung.....	15
2.2.3.4 Tribochemische Reaktionen	16
2.2.4 Chemische Beanspruchung.....	17
2.3 Schädigungsarten und geeignete Abhilfemaßnahmen beim Gesenkschmieden	17
2.4 Einflussgrößen auf die Standmenge der Schmiedewerkzeuge	23
2.5 Übliche Werkzeugstähle für Schmiedegesenke	29
2.5.1 Anforderungen an Schmiedegesenke.....	35
2.6 Literaturüberblick und Bewertung unterschiedlicher Methoden zur Reparatur von Schmiedegesenken.....	37
3. Experimenteller Teil	56
3.1 Einleitung	56
3.2 Aufbau des Versuchs	57
3.2.1 Beschreibung des Rotationstribometers	57
3.2.2 Beschreibung des Messsystems	59
3.2.3 Geometrie und die chemische Zusammensetzung der Werkzeuge und der Werkstücke	63
3.2.4 Ermittlung der Reibzahl.....	67
3.2.4.1 Reibmodelle	68
3.3 Versuchsablauf	70
3.3.1 Einbau.....	70

3.3.2 Versuchsdurchführung.....	70
3.3.3 Nachbearbeiten	71
3.4 Planung der Versuche.....	71
3.4.1 Vorversuche.....	71
3.4.2 Detailversuche	72
3.5 Auswertung	73
3.6 Experimentelle Ergebnisse	75
3.6.1 Vorversuche.....	75
3.6.2 Detailversuche	78
4. Diskussion der Ergebnisse	88
5. Zusammenfassung	90
Abkürzungsverzeichnis	91
Literaturverzeichnis	92
Abbildungsverzeichnis.....	99
Tabellenverzeichnis.....	103

1. Einleitung und Zielsetzung

Die zunehmenden Herausforderungen durch eine steigende Komplexität der hergestellten Bauteile und der zunehmende internationale Wettbewerb fordern von der Gesenkschmiedeindustrie intensive Maßnahmen zur Senkung der Produktkosten. Die Unternehmen können diesem Kostendruck durch die Steigerung der Werkzeugleistung bei gleichzeitiger Senkung der Produktkosten entgegenwirken. Die Werkzeugkosten im Schmiedebetrieb liegen zwischen 10 bis 20 % der Gesamtkosten [ADL96, KOR89], weshalb die Standmenge der Werkzeuge im Schmiedebetrieb ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit ist.

Die Lebensdauer der Schmiedegesenke ist immer eine sehr komplizierte Größe und sie muss daher im Gesamtzusammenhang betrachtet werden. Die Einflussfaktoren auf die Standmenge eines Schmiedegesenkes sind der Gesenkwerkstoff, die Gesenkgravur, die Schmiedetemperatur und die Umformmaschine, sowie das Schmiermittel und die Toleranzen des Schmiedewerkstückes (siehe Abbildung 1.1 aus [HAF95]).

Die Lebensdauer von Schmiedewerkzeuge bei der Warmmassivumformung ist im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren z.B. Kaltmassivumformung verhältnismäßig niedrig. Die Werkzeuge für das Gesenkschmieden unterliegen während des Einsatzes einer lokal sehr komplexen mechanischen, thermischen, tribologischen und chemischen Beanspruchung, die sich teilweise überlagern. Diese kombiniert auftretenden Belastungen führen zu charakteristischen Schadensarten, den Verschleiß (ca. 70%), die mechanische (ca. 25%) und thermische (ca. 3%) Rissbildung, sowie die plastische Verformung (ca. 2%), die an verschiedenen Stellen der Gravur von Schmiedewerkzeugen gebildet werden [DOE07]. Der Verschleiß ist die häufigste Ausfallsursache. Deshalb ist die Reduzierung des Verschleißes ein wichtiges Ziel, um die Lebensdauer von Werkzeugen und damit die Wirtschaftlichkeit der Schmiedeverfahren zu verbessern.

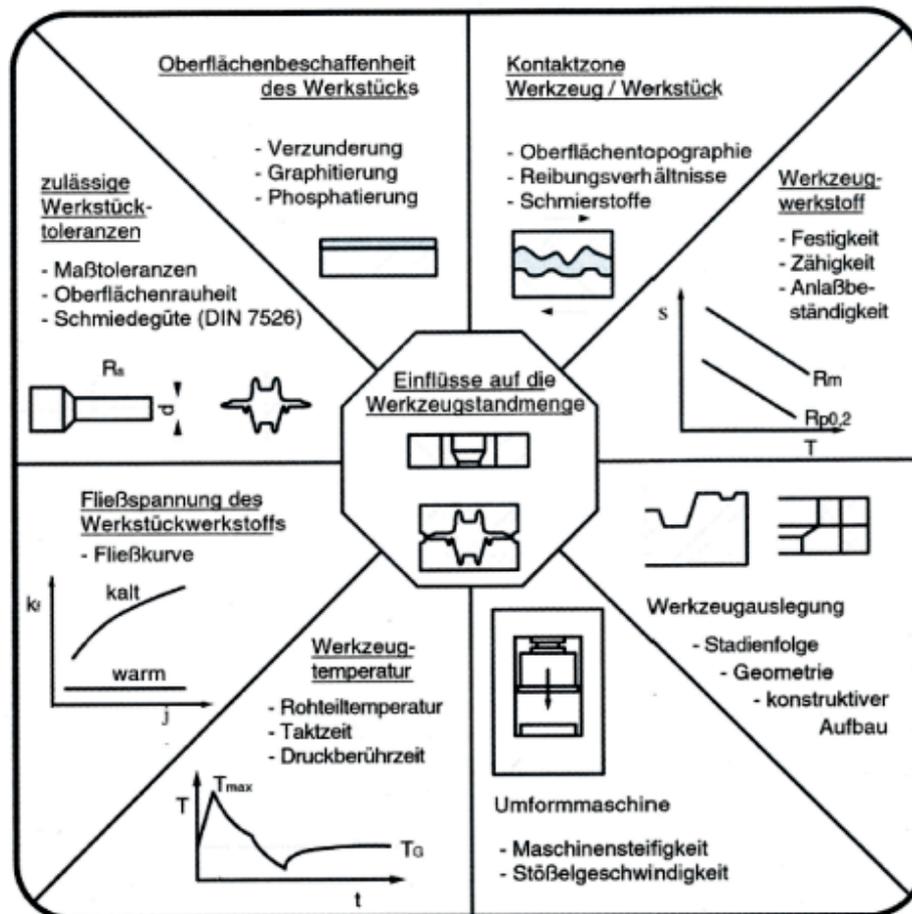


Abbildung 1-1: Einflüsse auf die Lebensdauer der Schmiedewerkzeuge [HAF95]

Die Umformwerkzeuge für das Gesenkschmieden werden meist aus legierten Werkzeugstählen gefertigt. Sie besitzen einen geringeren Kohlenstoffgehalt (0,3 - 0,5%). Die Hauptlegierungselemente sind die Karbidbildner Chrom, Molybdän, Vanadium und Wolfram, die neben der Verschleißfestigkeit auch die anderen notwendigen Anforderungen erfüllen. Bei der Warmmassivumformung liegt die homogene Schmiedetemperatur bei etwa 80 % der Schmelztemperatur, d.h. beim Schmieden von Stahl liegt die Werkstücktemperatur zwischen 900 – 1200 °C. Die Oberflächentemperatur des Werkzeuges liegt im Einsatz deutlich über 200 °C. Durch den Kontakt zwischen dem Schmiedewerkzeug und dem heißen Schmiedestück wird die Oberflächentemperatur des Werkzeuges kurzzeitig auf zirka 700 °C angehoben, diese Temperatur liegt aber deutlich über der Anlasstemperaturen der Schmiedegesenke. Durch die rasche Abkühlung der Werkzeuge tritt eine starke Thermoschockbeanspruchung im Gesenk auf, die zu Verschleiß- und Ermüdungserscheinungen führen kann (Abbildung 1.2).

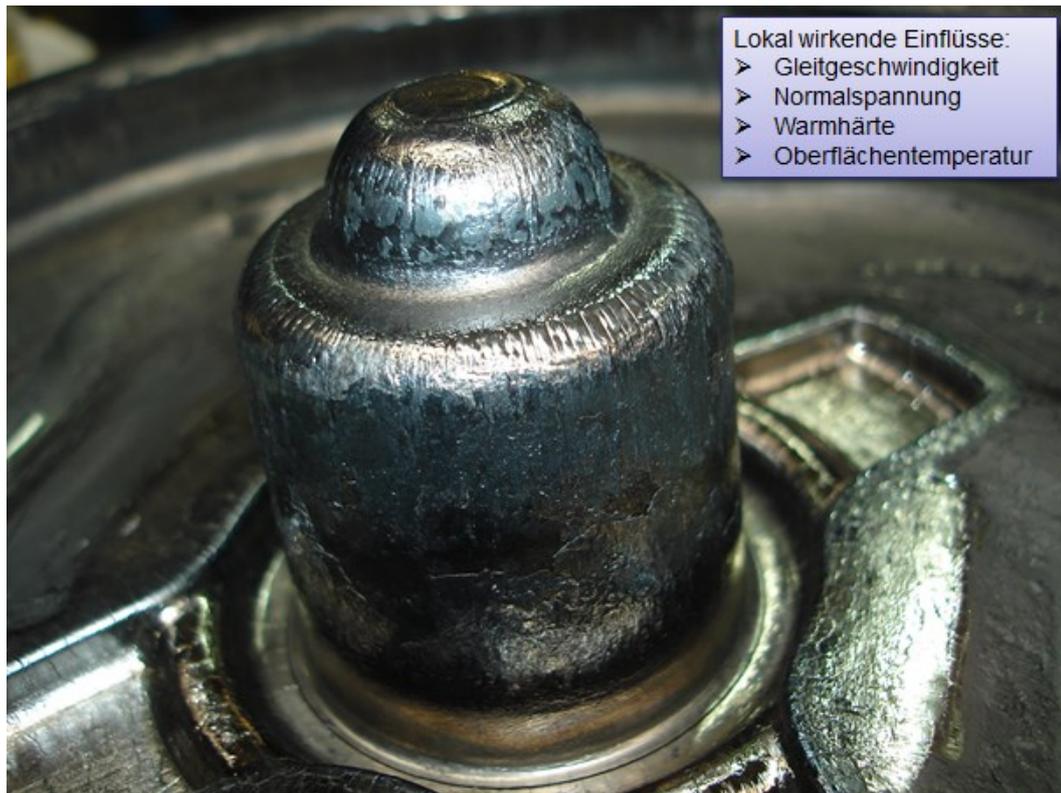


Abbildung 1-2: Verschleiß, Rissbildung und plastische Verformung an einem Schmiedewerkzeug [YIL12]

Aufgrund hoher Werkzeugkosten und damit verbundene Produktkosten ist es wirtschaftlich sinnvoll, verschlissene oder geschädigte Gesenke aufzuarbeiten und sie dann wieder im Einsatz nutzen zu können. Um die Eigenschaften des Werkzeugwerkstoffs gezielt zu verbessern, müssen die Ursachen für den Verschleiß und die Gefügeveränderungen, d.h. Schädigungsarten beim Schmiedeprozess, bekannt sein. Bei Wahl des Stahls für das Schmiedegesenk muss darauf geachtet werden, dass folgende Anforderungen eingehalten werden; hohe *Wärmeleitfähigkeit*, gute *Formbeständigkeit*, hohe *Härtetemperatur*, hohe *Anlassbeständigkeit*, hohe *Temperaturwechselbeständigkeit*, hoher *Warmverschleißwiderstand*, gute *Schweißbarkeit* und kostengünstige *Reparaturmöglichkeiten*. Genauso wie der Werkzeugstahl unterliegt auch die Oberfläche speziellen Anforderungen. Die Oberfläche des Werkzeuges muss an die Einsatzbedingungen und die Ausfallursachen angepasst werden. Eine nachträgliche Reparatur der Oberfläche soll ebenfalls möglich sein. In der Praxis kann dies durch folgende Verfahren durchgeführt werden: Nachsetzen mittels High Speed Cutting (HSC),

Auftragschweißen, Dünnschichtentechnologie (PVD und CVD) und spezielle Oberflächenmodifikationen.

In vorliegender Arbeit werden unterschiedliche Warmarbeitstähle (Böhler W300 und W360) und Schweißzusatzwerkstoffe (artgleiche und Co-Basislegierungen zum Auftragschweißen) untersucht, um die Standmenge der Schmiedewerkzeuge zu erhöhen und damit die Herstellkosten zu senken. Zu Beginn der Arbeit wurde die verfügbare Literatur über die Schädigungsarten und die Reparaturmethoden von Schmiedewerkzeuge gesammelt und ausgewertet. Mit mehreren Werkstoffpaarungen werden Versuche mit dem Rotationstribometer am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität durchgeführt. Die Ergebnisse werden ausgewertet und die Methoden hinsichtlich Eignung bewertet.

2. Gesensschmieden – Prozessbeschreibung und Beanspruchungen der Werkzeuge

2.1 Prozessbeschreibung

Das Gesensschmieden gehört zu den Verfahren der Massenproduktion von mittelgroßen Werkstücken (üblicherweise 1-10kg). Die hergestellten Seriengrößen liegen dabei zwischen einigen Stück bis zu mehreren Millionen. Das Gesensschmieden wird nach DIN 8583-4 als Druckumformverfahren definiert, bei dem das Schmiedestück ganz oder zu einem wesentlichen Teil während des Umformvorganges von dem Werkzeug, dem Gesenk umgeschlossen wird. Die Formwerkzeuge bewegen sich gegeneinander, wobei der Schmiedewerkstoff in eine bestimmte Richtung gedrängt wird und die Form der Gravur im Gesenk annimmt (Abbildung 2.1). Im Allgemeinen muss nach dem Schmiedevorgang der Grat des Werkstücks, der durch überstehendes Material entstanden ist, entfernt werden [REI03].

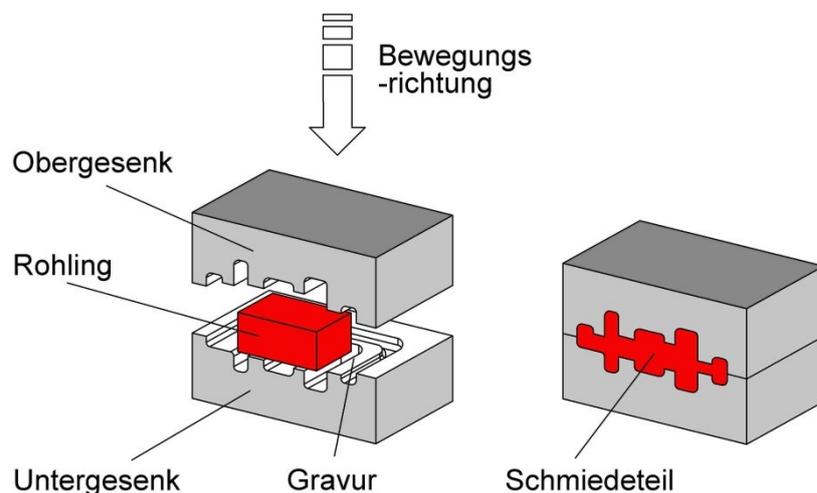


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Gesensschmiedens

Aufgrund des Druckes, der auf das Schmiedestück wirkt, erzwingt das Schmiedewerkzeug einen Werkstofffluss in gleiche Richtung (Stauhen), entgegengesetzt (Steigen) oder quer (Breiten) zur Bewegung des Schmiedewerkzeuges. Diese wesentlichen Grundvorgänge im Gesenk lassen sich in drei Stufe einteilen, die in Abbildung 2.2 dargestellt wird:

- 1) Stauhen: Höhenänderung ohne Gleitungen an Gesenkwänden.
- 2) Breiten: Stofffluss senkrecht quer zur Werkzeugrichtung.
- 3) Steigen: Stofffluss parallel zur Bewegung des Werkzeuges.

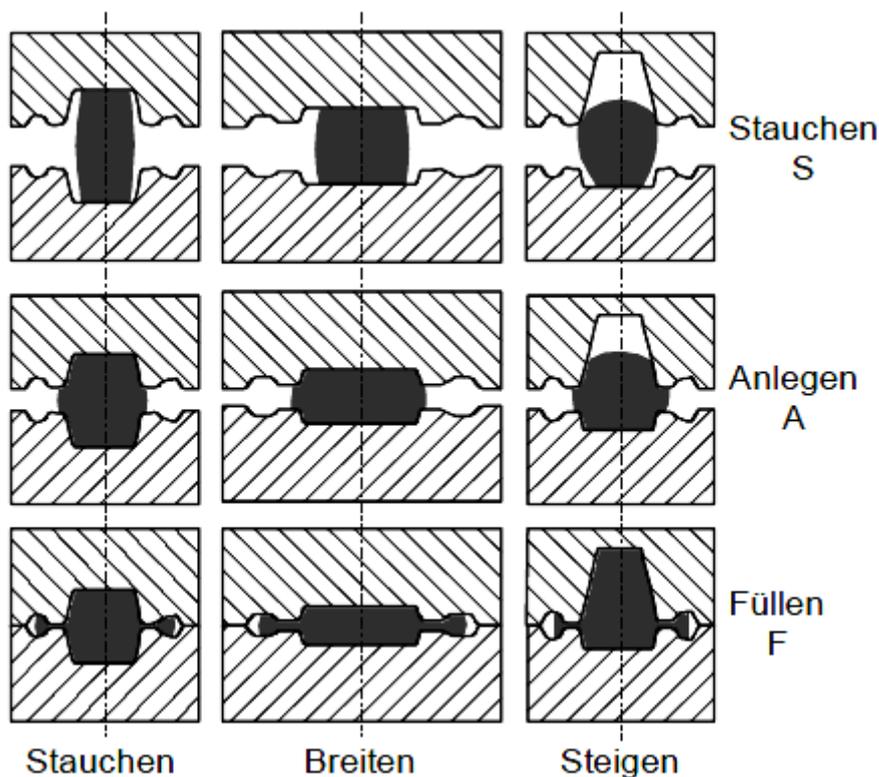


Abbildung 2-2: Wesentliche Vorgänge im Gesenk [LAN88].

Durch die Aufbringung des Druckes auf das Werkstück wird im Schmiedeprozess eine plastische Formänderung hervorgerufen, wobei das plastisch fließende Material die Gravur ausfüllt. Beim Gesenkschmieden tritt im Werkstoff eine inhomogene Formänderung auf. Daher ist die Erfassung der Formänderungsgrößen sehr kompliziert. Aufgrund der Elementaren-Plastizitätstheorie, die von einer homogenen Umformung und einer vorgegebenen Kinematik ausgeht, kann keine genaue Berechnung der Formänderung und Formänderungsgeschwindigkeit stattfinden.

Mittels einer Visioplastizitäts-Methode werden die Werkstoffbewegungen sichtbar gemacht und ausgemessen und dadurch können anschließend die Formänderung und Spannungen berechnet werden. In Abbildung 2.3 wird der Werkstofffluss einer Plastilin-Probe beim Füllen der Gravur anschaulich dargestellt. Die mechanischen Eigenschaften der Modellprobe sind denen von Stahl beim Schmieden ähnlich [AHL73]. Mittels solcher Modellversuche wird das Fließen des Schmiedewerkstoffs in der Gravur deutlich dargestellt, die Werkstoffbahnen und Formänderungsverteilungen können sehr gut ermittelt werden (Abbildung 2.4). Während sich die Oberfläche des Werkstücks beim Schmieden vergrößert wird, bleibt die Oberfläche des Werkzeuges konstant. Die Formgebung der Gravur und das Fließverhalten des verwendeten Materials wird zurzeit auch in mittels Computersimulationen animiert, dadurch können mögliche Strukturfehler in den Schmiedestücken verhindert werden. Während sich die Oberfläche des Werkstücks beim Schmieden vergrößert, bleibt die Oberfläche des Werkzeuges konstant [SPU84].

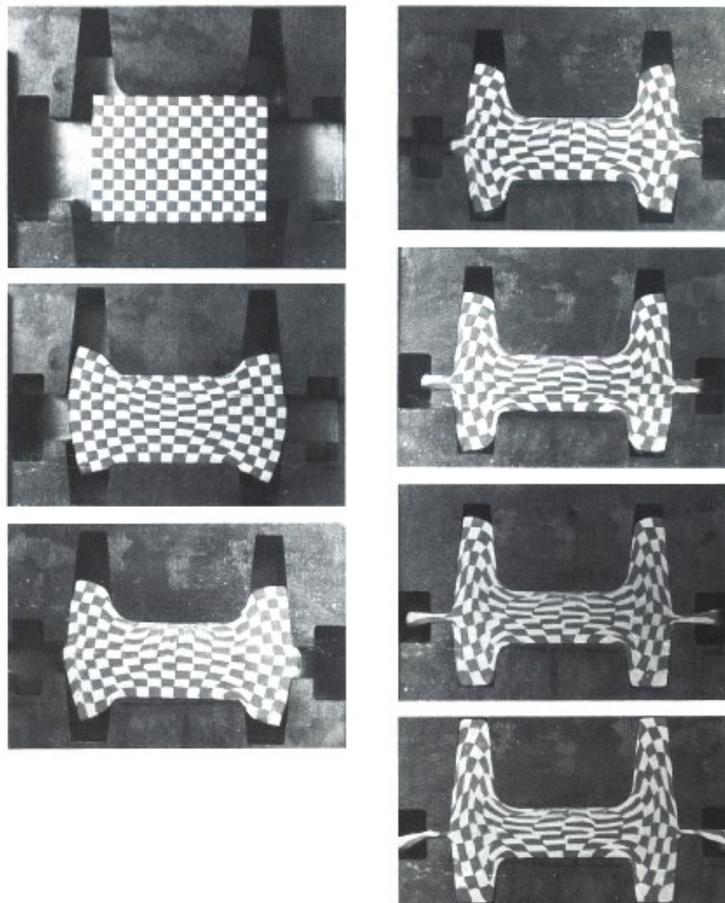


Abbildung 2-3: Modellversuch mit Plastilin-Probe zur Sichtbarmachung des Werkstoffflusses [AHL73]

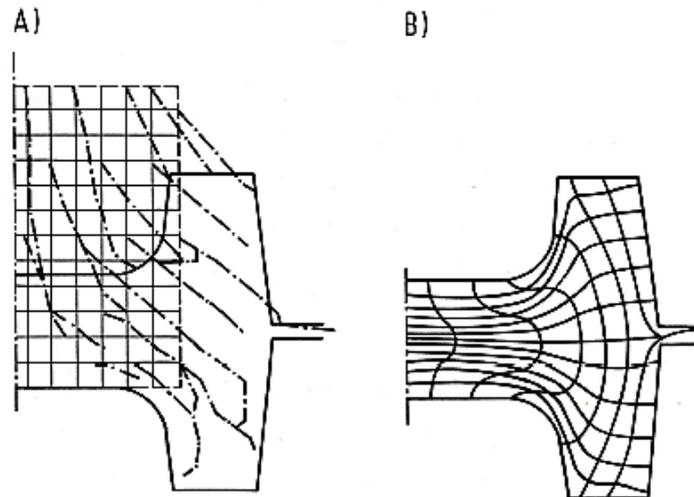


Abbildung 2-4: Ermittlung der Bahnkurven (A) und der Formänderungsverteilung (B) des Werkstoffs aus Modellversuchen [AHL73]

Dies ist ein Warmmassivumformverfahren und die Schmiedetemperatur liegt in einem Temperaturbereich von 900 – 1200 °C, wo Rekristallisationsvorgänge ablaufen können. Damit wird die Arbeitsbedarf (Kräfte und Spannungen) verringert und das Umformvermögen des Werkstoffes vergrößert wird [REI03]. Aufgrund der hohen Prozesstemperaturen von bis zu 1200 °C und den hohen Umformkräften unterliegen die Schmiedegesenke prozessbedingt hohen mechanischen, thermischen und tribologischen Beanspruchungen (Abbildung 2.5). Diese kombiniert auftretende Beanspruchungen treten im Allgemeinen überlagert auf und führen im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren zu deutlich geringeren Standmengen der Schmiedewerkzeuge. Die im Schmiedevorgang auftretenden Beanspruchungsarten werden in folgendem Kapitel 2.2 ausführlich beschrieben.

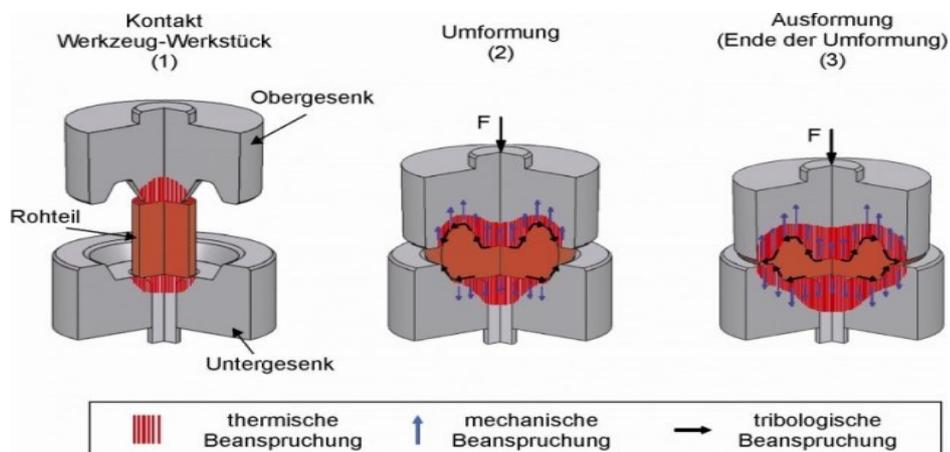


Abbildung 2-5: Beanspruchungen beim Gesenkschmieden [HUS05]

Die Maschinen zum Gesenkschmieden werden ihrer spezifischen Kenngröße nach in weg- (Kurbelpressen, Walzmaschinen), kraft- (Hydraulischen Pressen) und arbeits- bzw. energiegebundene (Hämmer, Spindelpressen) Umformmaschinen eingeteilt. Die Schmiedegesenke gliedern sich nach der Anzahl der Teilungen in eine oder mehrere Teilfugen, die es ermöglichen, Schmiedewerkstücke mit Hinterschneidung zu fertigen. Die Anzahl der in einem Gesenkblock erhaltenen Gravuren unterscheidet sich von Ein- und Mehrstufengesenken. In Vollgesenken ist die Gravur im Gesenk eingearbeitet hingegen bei Einsatzgesenke die Gravuren durch Gesenkeinsätze im Gesenkhalter befestigt [SPU84, LAN77].

Durch den Einsatz von höherwertigen Werkstoffen, einer Minimierung des Bearbeitungsaufwandes und Herstellung von Serien sowie der Verwendung von Bauteilfestigkeiten kann der Prozess positiv beeinflusst werden. Ein weiteres Merkmal des Prozess ist der durch die spanlose Herstellung resultierende geringere Verlust an teuren Werkstoffen. Außerdem wird Material gespart da nach dem Pressvorgang nur noch geringere Weiterarbeiten am Werkstück nötig sind. Dieser Prozess ermöglicht es ein enormes Spektrum an verschiedenen Werkstoffen verwenden zu können und eine fast unbegrenzte Anzahl an Formen herzustellen.

2.2 Beanspruchungsbedingungen beim Gesenkschmieden

Die Schmiedewerkzeuge unterliegen bei der Warmmassivumformung einem komplexen Beanspruchungskollektiv, das sich aus thermischen, mechanischen, tribologischen sowie auch chemischen Anteil zusammensetzt. In den folgenden Kapiteln werden diese unterschiedlichen Beanspruchungsarten, die bei dem Massivumformvorgang im Schmiedegesenke auftreten, beschrieben.

2.2.1 Thermische Beanspruchung

Beim Gesenkschmieden entsteht ein örtlich und zeitlich veränderliches Temperaturfeld im Gesenk. In Abbildung 2.6 wird den Temperaturverlauf an

Gravuroberfläche während eines Schmiedetakts dargestellt. Während der Berührung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff wird die Temperatur der Oberfläche in sehr kurzer Zeit auf einen maximalen Wert erwärmt. Die Spitzentemperatur hängt vom Ort und im Gesenk ab. Nach dem Umformvorgang erfolgt eine Abkühlung der Oberfläche des Gesenks durch Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion. Nach der Entnahme des Schmiedeteils wird anschließend durch die Kühlschmierprozess (Gesekkkühlung) eine weitere starke Abkühlung erreicht [DOE07].

Während eines Schmiedetakts mit den Randbedingungen, Werkstücktemperatur 1100-1200 °C und Werkzeugtemperatur 200-300 °C, treten kurzzeitig Temperaturen an der Oberfläche des Werkzeuges um zirka 700 °C auf. Die anschließend rasche Abkühlung der Werkzeuge führt zu einer hohen Thermoschockbeanspruchung an den Randschichten der Schmiedegesenke, die an der Oberfläche der Gesenke zur Verschleiß, Ermüdung und Rissbildung führen kann [DOE07].

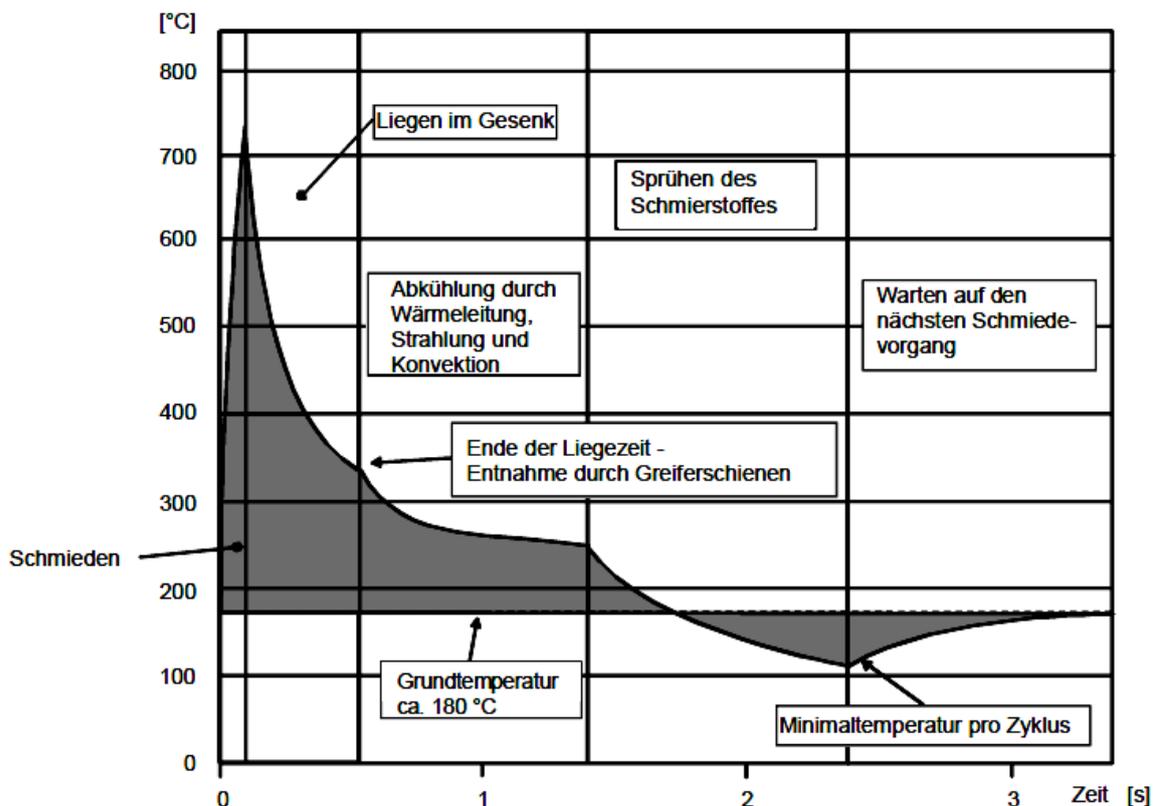


Abbildung 2-6: Temperaturverlauf an Gravuroberfläche während eines Schmiedetakts im Untergesenk nach [STU81]

Die thermischen Beanspruchungen für die Schmiedegesenke können wie folgt eingeteilt werden [SCH04]:

- Wärmedauerbelastung durch die Gesenkgrundtemperatur (200 – 300 °C)
 - ✓ Bei jedem Schmiedezyklus eingebrachte Energie
 - ✓ Zwischen zwei Schmiedezyklen durch Wärmeleitung und Kühlung abgeführte Wärmemenge
 - ✓ Stabilisierung nach einigen Zyklen

- Thermische Wechselbelastung
 - ✓ Kontakt mit dem Schmiedegut (durch kurzzeitig Temperaturspitzen während der Druckberührzeit)
 - ✓ Abkühlung (u.a. durch wiederholend aufgesprühten Schmierstoff)

Die Temperatur der oberflächennahen Bereiche (Randschicht) während des Kontaktvorgangs wird hauptsächlich von folgenden Einflussgrößen bestimmt [DOE07]:

- Werkzeuggrundtemperatur/ Werkstücktemperatur
- Kontaktnormalspannung
- Druckberührzeit/ Relativbewegung
- Werkzeugwerkstoff/ Werkstückwerkstoff
- Schmierstoff

2.2.2 Mechanische Beanspruchung

Zu Beginn des Schmiedevorganges muss die Fließspannung des Werkstückstoffes überschritten werden, um die plastische Umformung einzuleiten. Bei der Umformung des Werkstückstoffes treten die mechanische Spannungen an der Oberfläche des Werkzeuges auf, die gegen Ende hin durch den Staudruck im Gesenk stark ansteigen. Diese mechanischen Spannungen nicht nur von der Zeit, sondern auch von der Geometrie abhängig [DOE07]. Die letztlich im Werkzeug vorliegenden

Spannungen ergeben sich, wie in Abbildung 2.7 dargestellt, durch mechanische und thermische Beanspruchung. Diese Beanspruchungen hängen von der Geometrie ab.

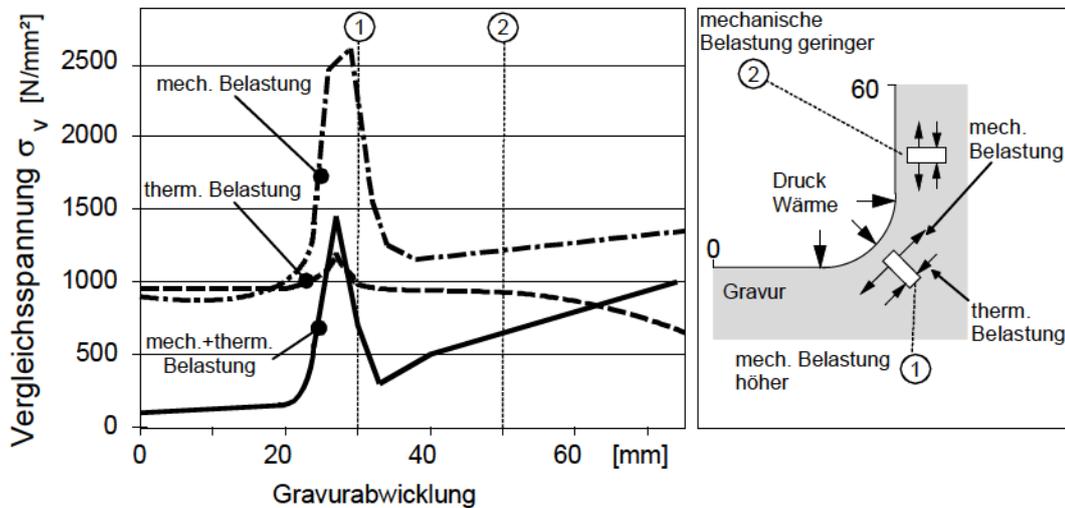


Abbildung 2-7: Mechanische und thermische Spannungen an einer Oberfläche des Gesenks [STU81]

2.2.3 Tribologische Beanspruchung

Unter der tribologischen Beanspruchung ist die Belastung der Werkzeuge durch die auftretenden Relativbewegungen zwischen dem Werkstück und der Werkzeugoberfläche zu verstehen. In der Kontaktzone wirken dabei die grundlegenden Verschleißmechanismen Abrasion, Adhäsion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen [DIN50320, LUI90]. Das Lostrennen kleiner Werkstoffteile aus der Werkzeugoberfläche führt damit zu Verschleiß (siehe Abbildung 2.8).

Die Warmformgebungsprozesse unterscheiden sich im Vergleich mit anderen Umformprozessen von besonders ungünstiger Tribosysteme. Dafür werden insbesondere die folgenden Ursachen beim Schmieden bezeichnet [DOE07, SCH04]:

- Da die Fließspannung des Werkstückes beim Schmiedevorgang überschritten werden muss, treten hohe Drücke im Gesenk auf und durch die Gesenkgeometrie ergibt sich ein zusätzlicher hydrostatischer Spannungszustand.
- Durch die Aufheizung des Werkstücks auf die übliche Schmiedetemperatur von 1000 – 1200 °C entsteht ein sehr harter und spröder Zunder an der Oberfläche, der bei einer Relativbewegung der Reibpartner zu einer abrasiven Verschleißerscheinung der Werkzeugoberfläche führt.
- Adhäsiver Verschleiß tritt in der Wirkzone zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück auf, da wegen der Temperatur von 600°C bis 900 °C der Verschleißwiderstand der Werkzeugrandzone herabgesetzt wird.
- Die thermische Belastung beim Schmiedevorgang ergibt sich zusätzlich dadurch, dass beim Umformvorgang heißes Material aus dem Werkstückinneren an die Oberfläche und somit in die Kontaktzone tritt, wo dies für die Schädigung des Werkzeuges verantwortlich ist.

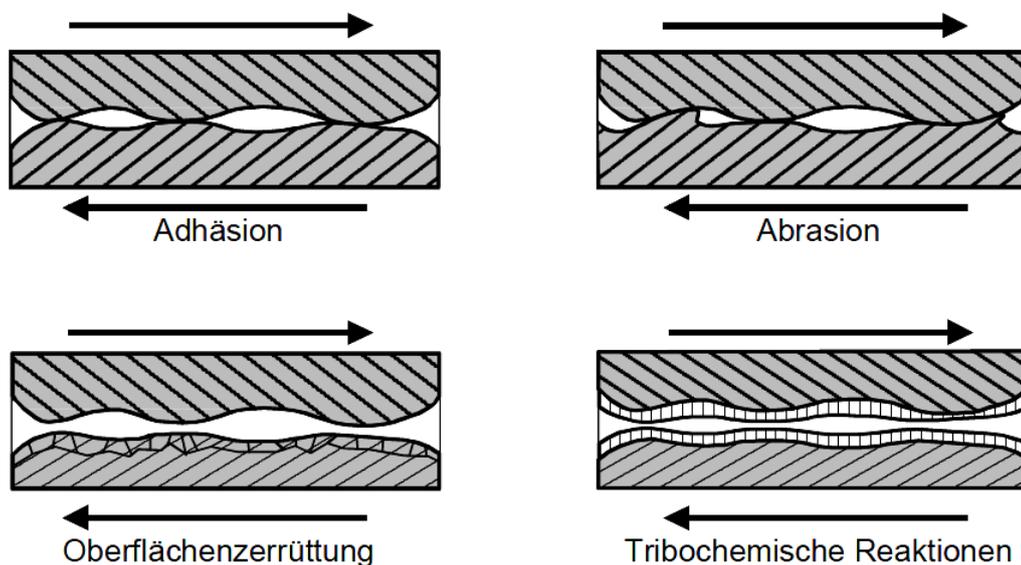


Abbildung 2-8: Verschleißmechanismen [LUI93]

2.2.3.1 Adhäsion

Adhäsion ist eine stoffliche Wechselwirkung im atomaren und molekularen Bereich. Durch chemische Bindung zwischen sich berührenden Körpern wird eine Haftschrift wirksam. Aufgrund plastischer Deformationen werden schützende Oberflächendeckschichten durchbrochen und es entstehen lokale Grenzflächenbindungen. Diese sog. „Kaltverschweißungen“ besitzen eine höhere Festigkeit als die Kontaktwerkstoffe. Bei einer Relativbewegung kann eine Trennung oder Verschiebung der berührenden Werkstoffbereiche entweder in der Grenzfläche oder in den angrenzenden Oberflächenbereichen der beiden Körper erfolgen. Damit kann es zu Materialübertrag und zur Ausbildung von Löchern kommen [CZI10, DAN84].

Die Verminderung des adhäsiven Verschleißes kann durch eine ausreichende Schmierung und sorgfältige Auswahl der Werkstoffpaarung der Reibpartner erreicht werden. Durch eine geeignete Schmierung tritt ein direkter Metall-Metall-Kontakt primär über Schmierstoff auf und damit kann der adhäsive Verschleiß vermieden werden. Dies kann auch durch unterschiedliche Werkstoffpaarungen wie z.B. Kunststoff/Metall, Keramik/Metall, Kunststoff/Kunststoff, Keramik/Keramik erreicht werden. Um die Bildung der Mikrokontakte und die Festigkeit möglicher adhäsiver Bindungen zwischen den Kontaktpartnern vermeiden zu können, ist die Auswahl der Werkstoffpaarungen sehr wichtig. Da die Gleitsysteme in den verschiedenen Kristallstrukturen für das Wachstum der wahren Kontaktfläche verantwortlich sind. Gleiche Paarungen aus kubisch-flächenzentrierte (kfz) Metallen (z.B. Al, Au, Ag, Cu, Ni) zeigen eine deutlich höhere Neigung des adhäsiven Verschleißes als kubisch-raumzentrierte (krz) Metalle (z.B. Fe, Mo, W, Ta) und hexagonalen Metallen (z.B. Mg, Co, Zn, Be). Daher sollten Werkstoffpaarungen die aus krz- und hexagonalen Metallen bestehen angestrebt werden, da diese innerhalb ihres Gitters weniger Gleitmöglichkeit als kfz-Metalle besitzen [CZI10, KLO06, SOM10].

2.2.3.2 Abrasion

Das Eindringen eines härteren Gegenkörpers in einen weicheren Grundkörper mit einer Relativbewegung führt zum Verschleißmechanismus der Abrasion. Bei einer Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper entstehen Riefen und durch eine Art Mikrozerspanungsvorgang werden Werkstoffpartikel aus der Oberfläche herausgelöst, welche dann eine weitere Abrasion bewirken können. Die Verschleißerscheinungsformen gliedern sich je nach der Art der Wechselwirkungen zwischen der abrasiven Teilchen und der verschleißenden Werkstoffoberfläche in Mikropflügen, Mikroermüden, Mikrospanen und Mikrobrechen [CZI10, DAN84].

Der Widerstand gegen die Abrasion kann durch die Erhöhung der Härte der Gesenkwerkstoffe verbessert werden. Diese Verbesserung kann mittels mechanischer, thermischer oder thermomechanischer Verfahren (Wärmebehandlung (z.B. Härte), Auftragen oder Abscheiden von Verschleißschutzschicht) vorgenommen werden. Ein heterogener Werkstoff mit harten Phasen (Karbide in zäher Matrix) ist auch zur Verminderung des abrasiven Verschleißes entscheidend [CZI10, KLO06, SOM10].

2.2.3.3 Oberflächenzerrüttung

Die Oberflächenzerrüttung äußert sich durch Rissbildung, Risswachstum und Abtrennung von Verschleißpartikeln. Durch wechselnde Beanspruchung eines Reibpartners kommt es ganz langsam zur Zerrüttung der Oberfläche, d.h. es entstehen und wachsen Mikrorisse in der Randschichtzone. Die spröden Teilchen können aus dem Werkstoff abgelöst werden und somit entstehen Grübchen [CZI10, DAN84].

Im Allgemeinen beeinflussen die Druckeigenspannungen in den Oberflächenbereichen, das homogene Gefüge der Werkstoffe. Werkstoffe, welche eine hohe Härte auch hoher Zähigkeit aufweisen, wirken sich positiv auf die Oberflächenzerrüttung aus. Auch heterogene Werkstoffe mit hoher Härte und

feinkörnigen sowie feinverteilten Phasen können der Oberflächenzerrüttung entgegenwirken [CZI10, KLO06, SOM10].

2.2.3.4 Tribochemische Reaktionen

Das Einwirken mechanischer Beanspruchung im tribologischen System führt zu chemischen Reaktionen zwischen Grund- und Gegenkörper, Zwischenstoff und angrenzendem Medium. In Abbildung 2.9 wird ein tribologisches System dargestellt. Die chemischen Reaktionen werden durch Temperaturerhöhungen am Rand sowie entstandene Gitterfehler hervorgerufen und führen zu veränderten Festigkeitseigenschaften im Oberflächenbereich. Die ausgebildeten Schichten können sich sowohl positiv als auch negativ auf die Festigkeitseigenschaften auswirken. Bei metallischen Reibpartnern bildet sich durch Oxidation meist eine spröde Korrosionsschicht, aus der Werkstoffteilchen leicht herausgetrennt werden können, wodurch sich der Verschleiß erhöht. Aber die Bildung der tribochemischen Oxidschichten, die nicht infolge Reibbeanspruchung entstanden sind, begrenzen in den meisten Fällen den Verschleiß [CZI10, DAN84].

Die tribochemischen Reaktionen können durch die Verminderung der Reaktionsfähigkeit bzw. Ausbildung von kraftschlüssigen Verbindungen sowie durch Verwendung von Kunststoffen oder keramischen Werkstoffen verringert werden [CZI10, KLO06, SOM10].

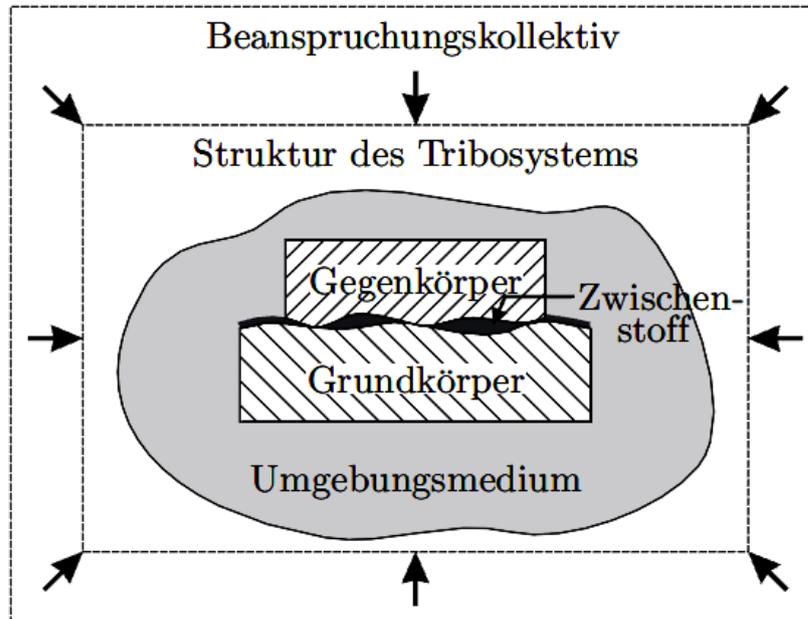


Abbildung 2-9: Darstellung eines tribologischen Systems

2.2.4 Chemische Beanspruchung

Aufgrund hoher Temperaturen beim Schmieden wird die chemische Reaktivität erhöht. Dabei tritt zusätzlich zu den bereits genannten Beanspruchungsarten eine chemische Beanspruchung an der Oberfläche von Werkzeug auf. Beispielsweise sind Oxidationsvorgänge an der Werkzeugoberfläche und chemische Reaktionen mit Zwischenschicht [LUI90].

2.3 Schädigungsarten und geeignete Abhilfemaßnahmen beim Gesensschmieden

Im Vergleich zu Werkzeugen anderer Umformverfahren ist die Lebensdauer von Schmiedegesenke ziemlich niedrig. Während des Warmmassivumformvorgangs treten die hohen mechanischen sowie thermischen, tribologischen und chemischen Belastungen an der Oberfläche von Schmiedewerkzeugen auf. Diese kombiniert auftretenden Belastungen führen zu unterschiedlichen Schädigungsarten an der Werkzeugoberfläche, die schließlich einen kritischen Wert erreichen und zum Ausfall

des Schmiedewerkzeuges führen. Der Werkzeugverschleiß ist mit einem Anteil ca. 70% der hauptsächliche Ausfallgrund, daneben kommt es zu mechanischen (ca. 25%) und thermischer (ca.3 %) Rissbildung sowie plastischer Verformung (ca. 2 %) des Werkzeugwerkstoffes (siehe Abbildung 2.10 und Abbildung 2.11 nach [DOE07]). Dieser große Anteil des Verschleißes zeigt die große Bedeutung, die dem Verschleißschutz in der Gesensschmiedeindustrie zukommt.

Der Verschleiß ist ein komplizierter und systemspezifischer Vorgang. Nach der DIN 50320 definiert den Begriff Verschleiß wie folgt: „ *Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen und gasförmigen Gegenkörpers*“ [DIN50320]. Außerdem versteht man unter Verschleiß in der Umformtechnik Materialübertrag, welcher aufgrund der Aufschweißungen zu unerwünschten Gestaltabweichungen auf die Werkzeugoberfläche bezeichnet wird. Der Verschleißverhalten wird wesentlich von den Eigenschaften der Randschichten und der Oberfläche bestimmt. Der Verschleiß bei Gesensschmieden tritt dort auf, wo große Relativbewegungen zwischen dem Schmiedestück und dem Werkzeug stattfinden, z.B. an konvexen Kanten und an der Gratbahn. Um der Verschleiß zu verhindern, ist deshalb notwendig, alle wichtigen Kenngrößen und Eigenschaften zu erfassen, deren Zusammenhänge zu erkennen und eine Aufgliederung in Grundbeanspruchungen und deren Auswirkung vorzunehmen. Eine systematische Parametervariation kann erst vorgenommen werden, wenn diese Einflussgrößen und ihre Zusammenhängen bekannt sind. Die zusammenwirkenden Einflussgrößen auf den Werkzeugverschleiß und damit auf die Standmenge des Werkzeuges beim Massivumformen werden in Abbildung 1.1 dargestellt (siehe Kapitel 1).

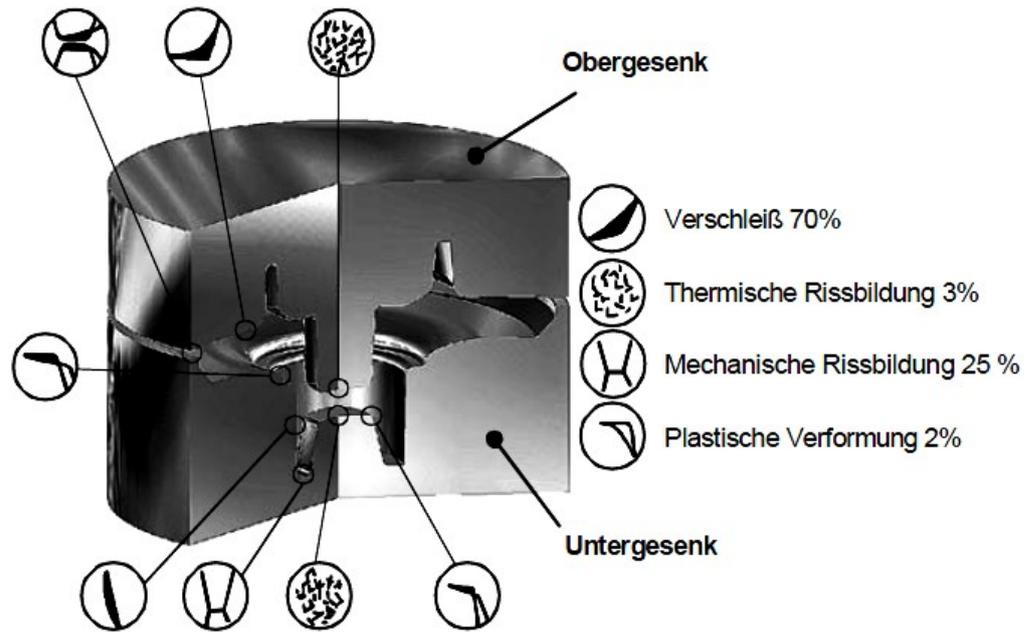


Abbildung 2-10: Darstellung der Ausfallursachen von Schmiedegesenke [HEI76]

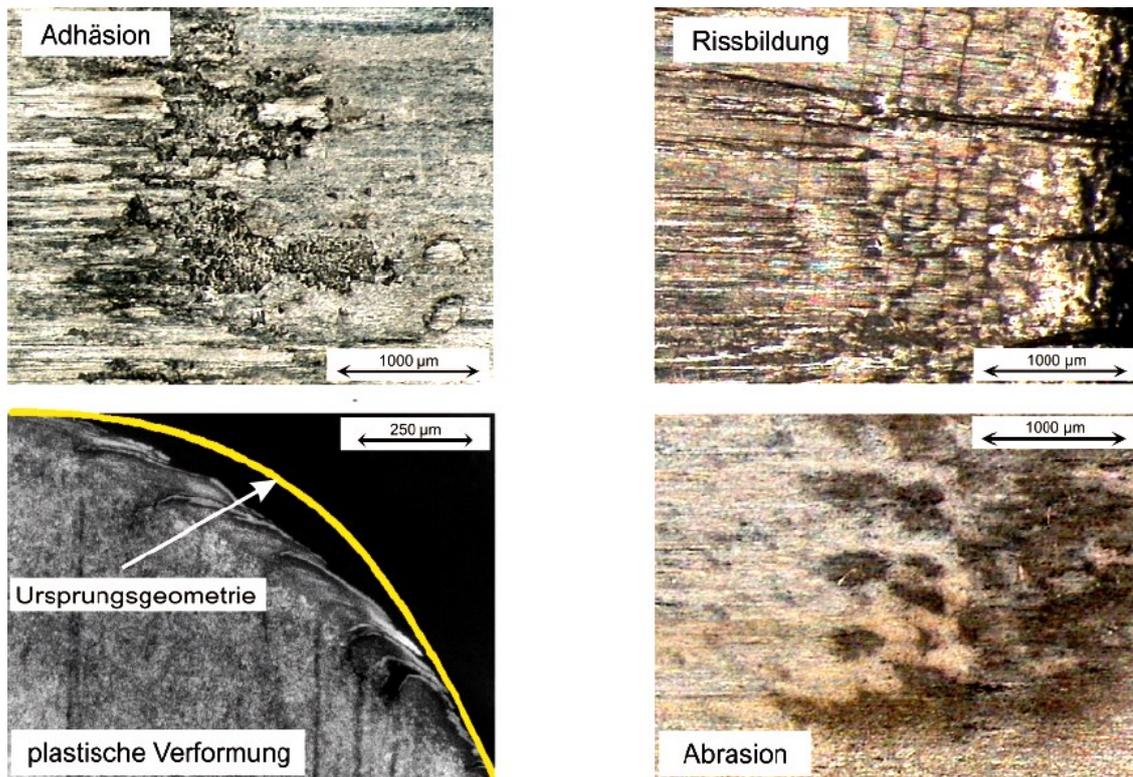


Abbildung 2-11: Verschleißmechanismen bei der Warmmassivumformung [BEH08]

Aufgrund des Festigkeitsverlusts des Werkzeugwerkstoffs in der Randschicht wird der Verschleiß des Schmiedewerkzeuges in folgenden Arten eingeteilt:

- Kantenverschleiß
- Auswaschungen (Kolkverschleiß)
- Riefen (Linienverschleiß)

In Abbildung 2.12 werden Kanten- und Linienverschleiß eines Werkzeuges dargestellt. Durch die auftretenden Temperaturspitzen in der Randschicht des Werkzeuges beim Schmiedevorgang kann die Anlasstemperatur des Werkzeugwerkstoffs überschritten werden, dabei kommt es zu einer Neuhärtung der betroffenen Bereiche sowie zu Entfestigungen der oberflächennahen Zonen des Werkzeuges.

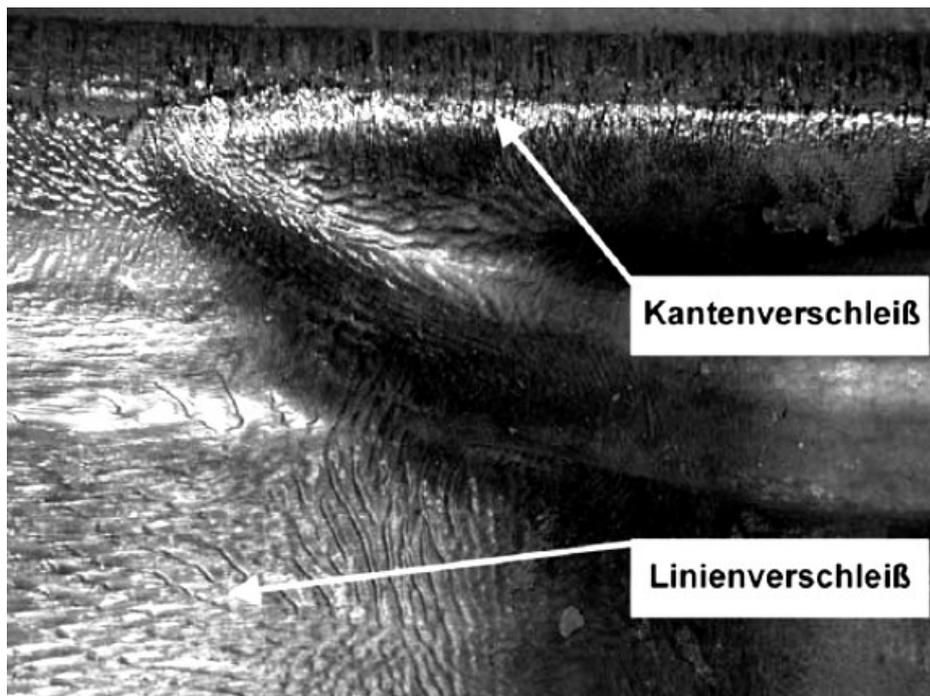


Abbildung 2-12: Kanten- und Linienverschleiß an Schmiedegesenk [DOE07]

Beim Gesenkschmieden bildet sich hauptsächlich adhäsiver und abrasiver Verschleiß. *Abrasion* tritt beim Schmieden meist aufgrund harter Zunderpartikel auf, die in der Zwischenschicht existieren oder plastisch auf die Oberfläche des Werkstücks eingebracht werden. Eine hohe Härte des Gesenkwerkstoffs, bzw. harte Schichten (z.B. durch Nitrieren), geringere Normalspannungen oder geringerer

Reibkoeffizient sind die Maßnahmen für deren Widerstand gegen abrasiven Verschleiß. Auch die lokale Relativgeschwindigkeit beeinflusst die Schädigungsart positiv.

Durch den hohen Druck und die hohen Temperaturen treten Mikroverschweißungen auf, dadurch ergibt sich bei Relativbewegungen der Reibpartner ein *Adhäsionsverschleiß*. Durch einen Schmierstoff kann Adhäsion vermieden werden, da kein direkter Metall-Metall-Kontakt vorhanden ist. Auch durch einen großen Unterschied in der Oberflächenspannung kann die Kaltverschweißung verhindert werden [CZI10].

Thermische Rissbildung treten an der Oberfläche des Werkzeuges infolge Temperaturwechsel auf. Durch den direkten Kontakt zwischen dem Werkzeug und dem heißen Werkstück ergibt sich ein großes Temperaturgefälle von der Werkzeugoberfläche zum Werkzeuginneren, das in oberflächennahen Schichten hohe örtlichen Druckspannungen verursacht, was zum plastischen Fließen der Werkzeugwerkstoffe führen kann. Anschließend bei der intensiven Abkühlung treten Zugeigenspannungen auf, die die kritische Zugspannung überschreiten können und somit zur Rissbildung führen. Durch diese ständigen Temperaturwechsel entsteht die thermische Rissbildung infolge der Ermüdungserscheinungen. Um Rissbildung zu minimieren, sollten der Temperaturgradient und damit verbundene Dehnungsamplitude gering gehalten werden. Im Niedriglastwechselermüdungs-bereich (LCF = low cycle fatigue) wird eine hohe Duktilität gewünscht. Auch das Nachpolieren des Werkzeuges nach einen hundert Zyklen, sowie Druckeigenspannungen beeinflussen die Lebensdauer positiv.

Plastische Verformungen werden durch zu hohe Belastungen oder temperaturbedingte Erweichung des Werkzeuges hervorgerufen. Werkzeugwerkstoffe mit erhöhter Anlassbeständigkeit und hoher Duktilität wirken dieser möglichen plastischen Verformung entgegen. Durch die Verbesserung des Kühlungskonzeptes und die Erhöhung der Leitfähigkeit des Werkzeugmaterials können die Grenztemperaturen niedrig gehalten und die Überhitzung vermieden werden.

Wegen der gegenläufigen Wechselwirkungen von wichtigen Werkstoffeigenschaften sind die Möglichkeiten der Verbesserung des Betriebsverfahrens bei Schmiedegesenke im Voraus leider beschränkt. Die Absenkung der ebenfalls notwendigen Zähigkeit wird durch die Steigerung der Festigkeit verursacht. Die Höhe der Dehnschwingbreite bestimmt die Optimierungsmaßnahmen bei thermo-mechanischer Belastung. Obwohl die Duktilität im Bereich kleiner Lastspielzahlen (kleiner als ca. 8000 = LCF Bereich) entsprechend ist, führt im Bereich HCF (high cycle fatigue = größer als ca. 8000 Lastspielzahlen) eine Härtesteigerung zur Verbesserung der Lebensdauer (siehe Abbildung 2.13) [BOA90].

Die mechanisch und thermisch bedingten Rissbildungen treten im Gesenkschmieden immer kombiniert auf und werden in Abhängigkeit ihrer Ursachen in fünf Kategorien eingeteilt [DOE07]:

- Fehler im Werkzeugwerkstoff
- Konstruktionsfehler
- Fehler bei der Bearbeitung der Werkzeuge
- Wärmebehandlungsfehler
- Fehler beim betrieblichen Einsatz

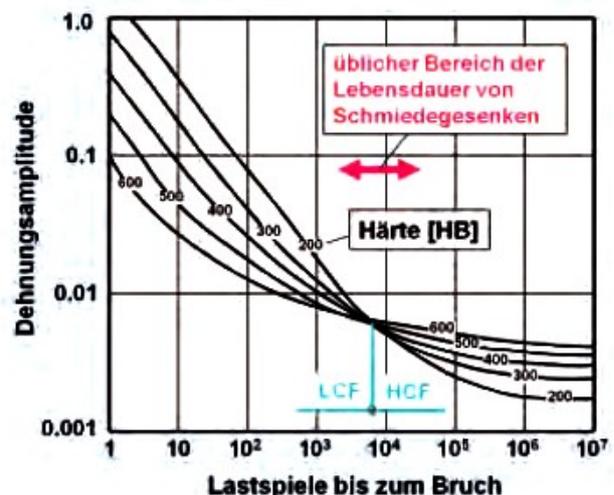
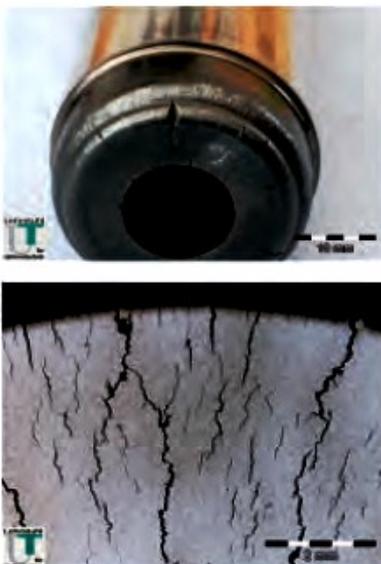


Abbildung 2-13: Interne Untersuchung an Werkzeug einer Hochleistungsmaschine; Thermische Ermüdungsrisse und Härteeinfluss auf das Ermüdungsverhalten [BOA90]

Aus Langzeiterfahrungen haben sich die sogenannten „best practice“ – Regeln entwickelt, um Rissbildung zu vermeiden und den Verschleiß zu senken. Diese lauten wie folgt [BUD06]:

- Homogene Gesenkvorwärmung auf 280 °C
- Senkung der Gesenkgrundtemperaturen unter 300 °C durch verbesserte Kühlung
- Anwendung von thermisch isolierenden Schmier-Kühlmitteln zur Senken der Oberflächentemperatur unter 650 °C
- Möglichst kurze Druckberührzeiten durch optimierte Auswerktechnik
- Vermeidung zu hoher Schmiedetemperaturen (> 1250 °C)
- Schleifen von verschleiß- und brandrissbehafteter Oberflächenbereiche des Gesenks
- Einhaltung von Gravur- Nachbearbeitungs- bzw. Reparatur- Intervalle für alle kritische Gesenke
- Festlegen von Vorwärm- (350 °C) und Entspanntemperatur (550 °C) bei allen Schweißreparaturen.

Die herstellungsbedingte Fehlerursachen resultieren aus der Werkstoffgüte, der Werkzeuggeometrie und der Werkzeugfertigung. Werkstoffbedingte Ursachen ergeben sich aus der unzureichenden Durchschmieden des Werkzeugblocks, sowie mangelnder Reinheit (Nicht-metallische Einschlüsse) oder einer falschen Wärmebehandlung. Die Gesenkgeometrie soll keine kleinen Radien und schmale Gesenkbreiten aufweisen, da diese die Lebensdauer der Schmiedewerkzeuge negativ beeinflussen.

2.4 Einflussgrößen auf die Standmenge der Schmiedewerkzeuge

Als Standmenge einer Gravur ist die Anzahl von Schmiedestücken die bis zum Ausfall der Gravur umgeformt werden zu verstehen. Die Einflussgrößen auf die Standmenge der Gravur lassen sich in folgende Bereiche gliedern (Abbildung 2.14 aus [SPU84]):

- Werkstück (Masse, Form, Werkstoff)
- Werkzeug (Werkstoff, Einbauhärtigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Temperatur)
- Umformmaschine (Druckberührzeit)
- Fertigungsverfahren (Schmiedetemperatur, Zwischenformung, Kühlung und Schmierung der Gesenke)

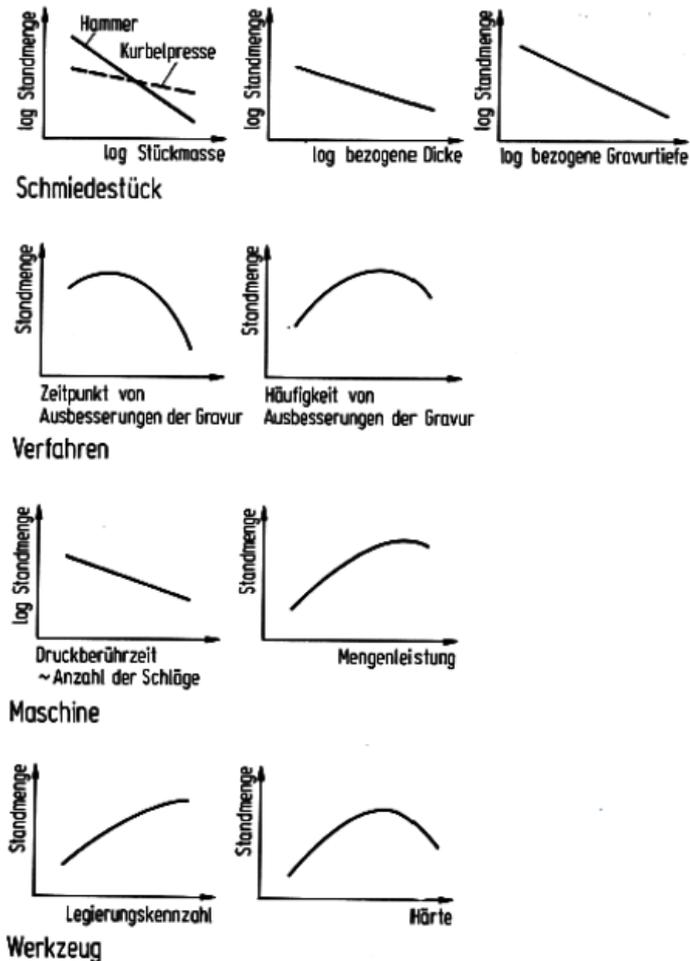


Abbildung 2-14: Schmiedestück-, verfahrens-, maschinen- und werkzeugbedingten Einflussgrößen auf die Standmenge der Gesenke [LAN77]

Die Werkstückmasse ist eine werkstückbezogene Einflussgröße auf die Standmenge der Gesenke. Mit zunehmender Werkstückmasse sinkt die Standmenge, da die Druckberührzeit zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück länger dauert und dadurch die oberflächennahe Wärmebelastung des Werkzeuges erhöht wird. Durch die steigende Oberflächentemperatur des Werkzeuges nimmt die Festigkeit ab, dies führt zu einem höheren Verschleiß des Schmiedewerkzeuges. Bei der

Hammerfertigung ist der Einfluss der Werkstückmasse auf die Standmenge größer als der bei der Pressenfertigung (Abbildung 2.15). Bei steigender Werkzeugmasse muss die Schlagzahl des Hammers erhöht werden, dadurch steigt die Druckberührzeit und somit die Wärmebelastung der Gesenke. Bei der Pressenfertigung hat die Werkzeugmasse keinen ausschlaggebenden Einfluss auf die Druckberührzeit, diese wird nur mit steigender Größe der Schmiedemaschine erhöht [SPU84, LAN77].

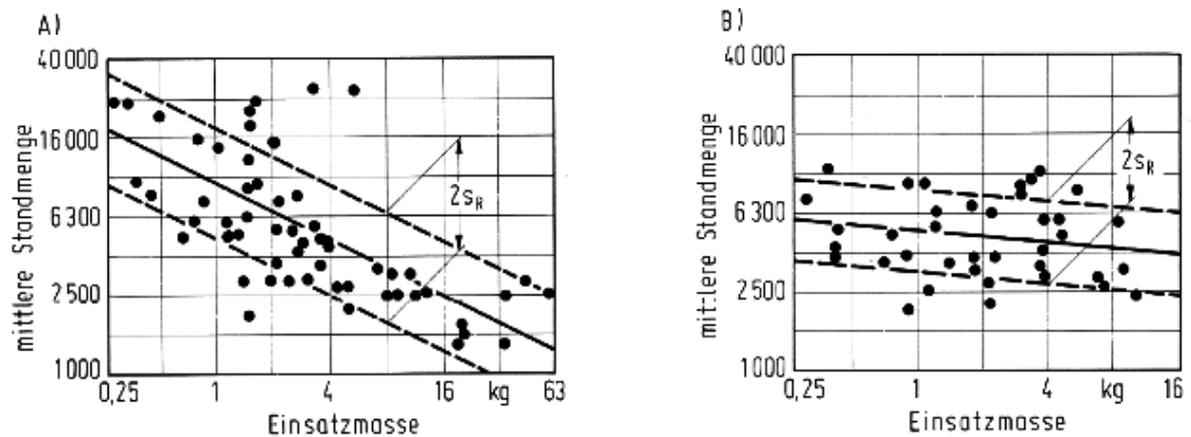


Abbildung 2-15: Einfluss der Schmiedestückmasse auf die Standmenge [HEI76]

(A) Hammerfertigung (B) Pressenfertigung

Bei der Hammerfertigung werden die Standmenge und die Gesenkschädigung des Werkzeuges durch die Geometrie beeinflusst, da diese eine wesentliche Auswirkung auf die Werkzeugbelastung hat (Abbildung 2.16). Die Abnahme der mittleren Standmenge mit steigender Gravurtiefe kann durch die im Gravurgrundradius zunehmenden Spannungen erklärt werden. Bei Pressen hat die Gravurtiefe keinen Einfluss, dies kann auf das Vorhandensein von Auswerfern erklärt werden [SPU84, LAN77].

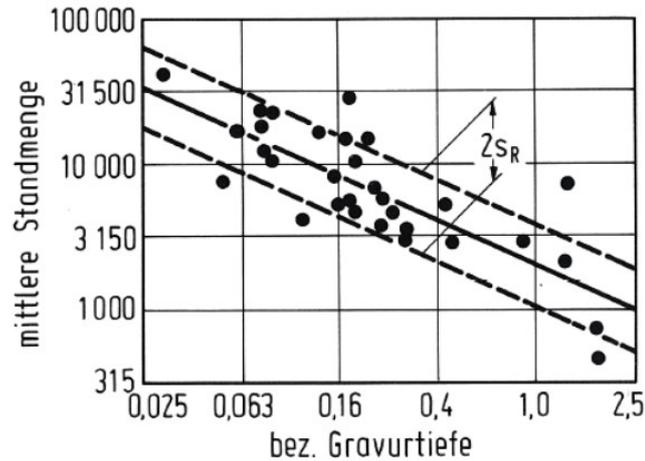


Abbildung 2-16: Zusammenhang zwischen der Gravurtiefe und der Standmenge bei Hammergesenken [HEI76]; (Schmiedestückmasse: 0,63 bis 4,0 kg, bezogene Gravurtiefe : $H/\sqrt{L \cdot B}$; H größte Gravurtiefe, L größte Gravurlänge, B größte Gravurbreite), S_R Reststandartabweichung

Auswirkung des Werkzeugwerkstoffs auf die Standmenge, soweit diese ausschließlich von Verschleiß bestimmt wird, kann durch einen Legierungskennwert (LK) aus [VOS67];

$$LK = 2[\%Cr] + 5[\%W] + 10[\%Mo] + 40 [\%V]$$

angegeben werden (Abbildung 2.17). Mit zunehmendem Legierungsgehalt an Karbidbildnern, wie Vanadium, Molybdän, Wolfram und Chrom wird die Verschleißbeständigkeit des Schmiedewerkzeuges deutlich erhöht. Diese kann dadurch erklärt werden, da das Gefüge von Gesenkwerkstoffe meist aus einem Grundwerkstoff mit ausreichender Festigkeit und harten Einlagerungen (Cr-, Mo-, V- und W-Karbide) besteht. Nicht nur die Menge, sondern auch die Form und Größe der Karbide (bei großen Karbide steigt die Bruchgefahr) spielt eine wichtige Rolle [VOS67, LAN77, SPU84].

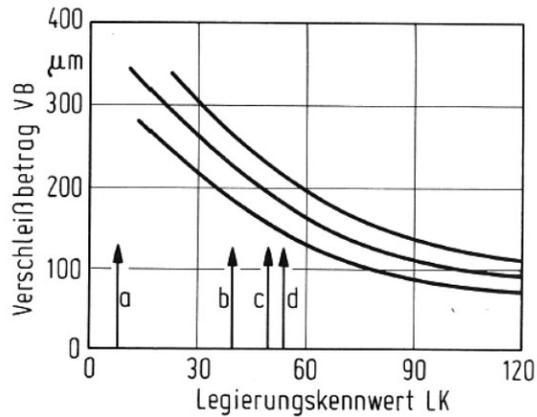


Abbildung 2-17: Abhängigkeit des Verschleißbetrags vom Legierungskennwert LK [VOS67]
 a Werkstoff-Nr. 1.2713 b Werkstoff-Nr. 1.2606 c Werkstoff-Nr. 1.2567
 d Werkstoff-Nr. 1.2365

Der Einfluss der Gravurhärte auf die Standmenge und den Verschleiß kann durch eine Kurve mit einem Maximum beschrieben werden (Abbildung 2.18). Mit zunehmender Härte steigt die Verschleißbeständigkeit der Gesenke, solange die Schmiedetemperatur des Gesenks unter der Anlasstemperatur bleibt. Aus Ausbildung 2.18 ist erkennbar, dass bei großen Härtewerten die Gefahr der Rissbildung steigt. Die optimale Härte des Werkzeuges hängt von der Geometrie ab. Je höher die Gefahr der Rissbildung ist umso kleiner sollte die Härte angenommen werden, bei kombinierten Beanspruchungen kann es sein, dass eine geringere Härte die beste Auswahl ist [SPU84, LAN77].

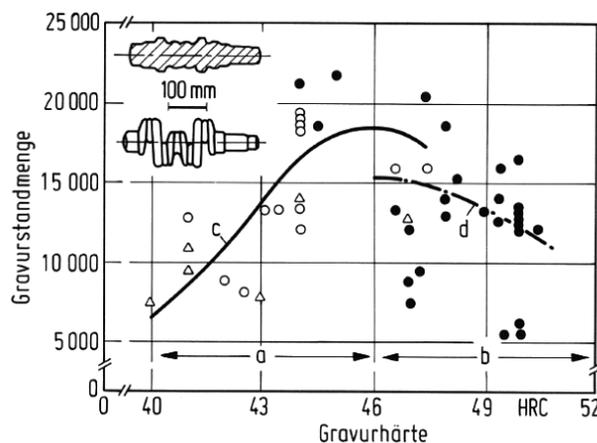


Abbildung 2-18: Einfluss der Härte auf die Standmenge beim Schmieden von Kurbelwellen in Presse [HEI76]

a Verschleiß b Rissbildung c Betrieb A d Betrieb B
 o Werkstoff-Nr. 1.2367 Δ sonstige Werkstoffe

Die Druckberührzeit ist ein maßgeblicher maschinenbezogener Einfluss auf die Standmenge der Gravur. Die entstehenden Werkzeugtemperaturen führen auf Grund der langen Berührdauer beim Schmieden zu erhöhtem Verschleiß und in weiterer Folge zu Schäden. Der Einfluss der Druckberührzeit auf die mittlere Standmenge der Gravur bei Hammer und Pressen wird in Abbildung 2.19 dargestellt. Die Abhängigkeit der Standmenge von der Druckberührzeit ist bei der Hammerfertigung deutlich größer als beim Einsatz von Pressen. Man kann die Standmenge verschiedener Maschinentypen nicht vergleichen, da zumeist unterschiedliche Belastungen im Schmiedevorgang auftreten und unterschiedliche Werkzeugwerkstoffe verwendet werden [SPU84, LAN77].

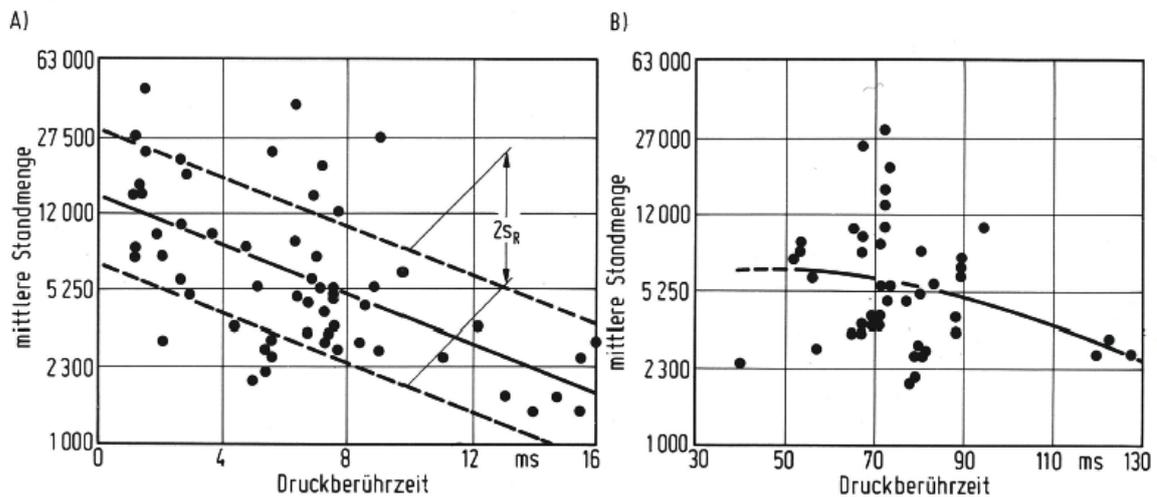


Abbildung 2-19: Einfluss der Druckberührzeit auf die Standmenge der Gravur[HEI76]

A) Hammer B) Pressen, S_R Reststandartabweichung

Durch eine gleichmäßige Erwärmung des Werkstücks kann die Standmenge des Gesenks erhöht werden. Mit der Abnahme der Schmiedetemperatur nimmt die mechanische Belastung des Werkzeuges zu, dies kann zu plastischen Verformungen und Rissbildungen führen. Starke Zunderbildung erhöht den Gravurverschleiß und kann durch eine geeignete Erwärmungsart (gas-, ölbeheizt, induktiv) und -dauer minimiert werden. Durch eine gute Entzunderung der Werkstücke vor dem Gesenkformen kann der Gesenkverschleiß vermindert werden [SPU84, LAN77].

Mit einer guten Zwischenformung des Werkstücks kann die Standmenge des Werkzeuges verlängert werden. Da die Formänderungen und damit die Gleitwege zwischen den Reibpartnern bei einer Zwischenformung kleiner werden, wird der Verschleiß vor allem in der Fertiggravur vermindert. Bei hochlegierten Stählen muss auf eine ausreichende Kühlung geachtet werden, da diese eine schlechte Wärmeleitfähigkeit besitzen und damit es bei kurzen Stückfolgezeiten zu keine Temperaturspitzen im Gesenk kommt. Damit muss auf die erhöhte Gefahr von Wärmewechselrissen geachtet werden. Bei Mehrstufenpressverfahren kommt es zu einer ständigen Kühlung der Gesenke durch Wasser. Bei einfachen Gravuren wird auf die Verwendung von Schmiermitteln verzichtet, da diese ein stärkeres Gleiten verursachen und dies zu einem höheren Verschleiß führen kann. Bei komplizierter Geometrie kann durch Schmierstoff die Kleberbildung vermindert und das Lösen aus der Gravur erleichtert werden, dadurch kann die Standmenge erhöht werden [SPU84, LAN77].

2.5 Übliche Werkzeugstähle für Schmiedegesenke

Der Gesenkblock wird direkt durch Gießen oder Walzen bzw. Schmieden eines gegossenen Blocks gefertigt. Der Gesenkblock wird durch Elektroschlack-Umschmelzen (ESU-Verfahren) oder Umschmelzen im Vakuum-Licht-Bogen-Ofen d.h. im Elektroofen, erschmolzen (siehe Abbildung 2.20). Damit ein seigerungs- und einschlussarmer sowie lunkerfreier Block mit homogenen Eigenschaften hergestellt wird, welcher sich besonders für Gesenke mit hohen Anforderungen an die Zähigkeit eignet. Die Gravur wird durch das Weiterarbeiten wie Drehen, Fräsen, Erodieren, Warmeinsenken, Kalteinsenken oder durch chemisches Abtragen hergestellt.

Herstellverfahren für BÖHLER Warmarbeitsstahl Production routes for BÖHLER hot work tool steels

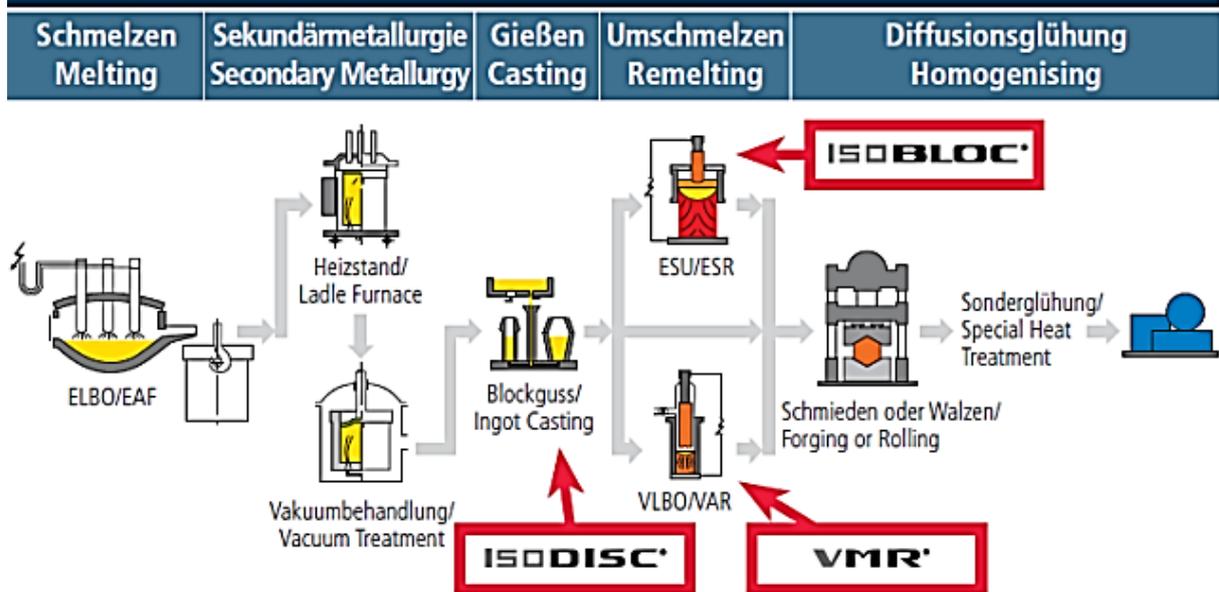


Abbildung 2-20: Schematische Darstellung der Herstellung des Werkzeugstahls von Böhler [BOH09].

Um die Beständigkeit gegen Verschleiß und plastische Verformung zu gewährleisten, sollten die Werkzeugwerkstoffe eine möglichst hohe Härte aufweisen, dies kann durch die Abschreckung des Stahls erzielt werden. Dadurch besteht das Gefüge der Werkzeugstähle aus sprödem Gefüge, Martensit, den für den Stahl üblichen Legierungskarboniden und ggf. Restaustenit. Aber die Werkzeugstähle sollten eine ebenso hohe Zähigkeit aufweisen. Deshalb werden die Werkzeugstähle üblicherweise einer Wärmebehandlung (Abbildung 2.21) unterzogen. Nach dem Härten (durch Abschreckung) werden sie üblicherweise auch einmal oder mehrmals vergütet, um genügend Zähigkeit aufzuweisen. Dies geschieht dadurch, dass während dem Anlassen eine Phasenänderung eintritt wobei der Restaustenit beseitigt und der Martensit entspannt wird. Die Veränderung des Gefüges beim Anlassen hängt von der Anlasstemperatur und der Anlasedauer ab. Die Anlasstemperatur ist eine Temperatur, auf der die Werkzeuge nach dem Härten gehalten werden. Durch steigende Anlasstemperatur sinkt die Härte. Also die Zähigkeit, die für die Werkzeuge erforderlich ist, setzt die Grenze für die maximale Härte, für die die Werkzeuge eingesetzt werden können. Nach dem Anlassen werden die Werkzeugstähle im Allgemeinen an Luft abgekühlt [OPP11].

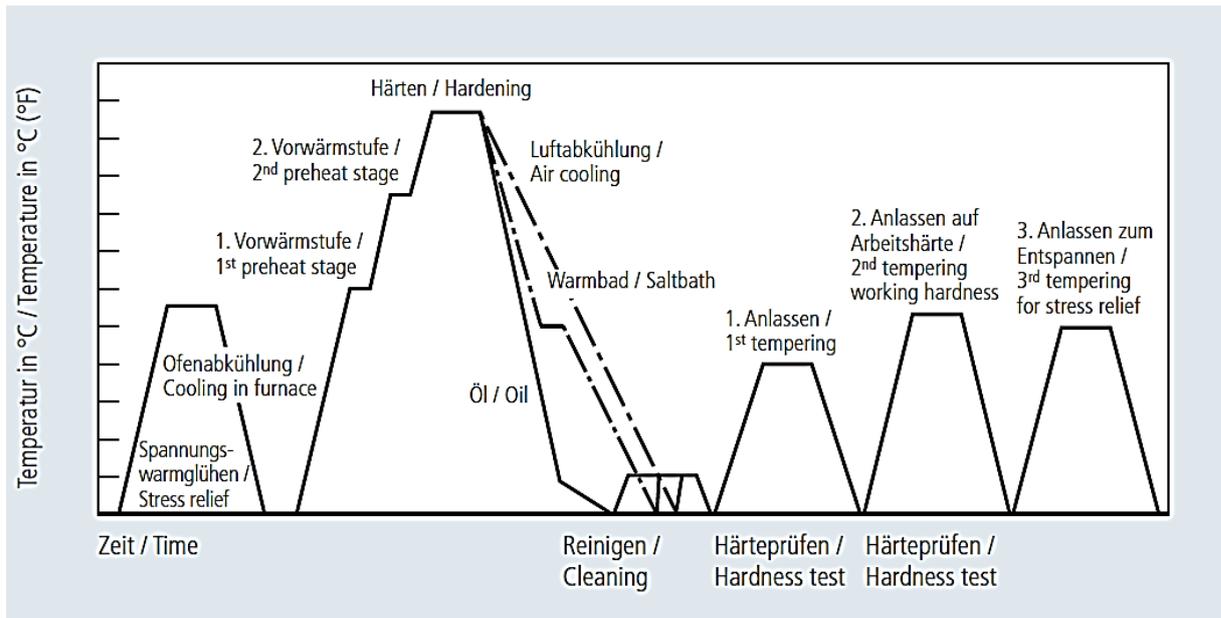


Abbildung 2-21: Wärmebehandlungszyklus von Warmarbeitsstählen [BOH11]

Die Auswahl des Werkzeugstahls für das Gesenkschmieden richtet sich in erster Linie nach der Belastung des Werkzeuges. So wie zum Beispiel hohe mechanische Belastungen beim Einsatz im Hammer oder hohe thermische Belastungen beim Schmieden in einer Presse (siehe Abbildung 2.22) auftreten. Durch diese Belastungen ergeben sich der Verschleiß oder die Rissbildung, die die Standmenge des Gesenks stark begrenzen. Weitere wichtige Faktoren für die Wahl des Gesenkwerkstoffs sind die Größe und Geometrie der Gravur, die Schmiedetemperatur, die Werkstoffkosten und die Bearbeitungsmöglichkeiten.

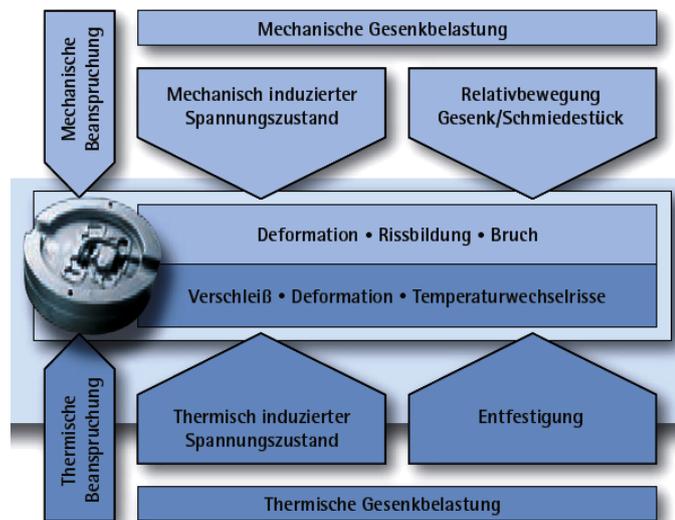


Abbildung 2-22: Beanspruchungsprofil beim Schmieden [BUD06]

Um die Standmenge von Schmiedegesenke zu verbessern, sollte möglichst verschleißbeständiger Warmarbeitsstahl ausgewählt werden, um den Verschleiß zu begrenzen. Die als Gesenkwerkstoffe eingesetzten Warmarbeitsstähle sind legierte Werkzeugstähle für Verwendungszweck, bei denen die Oberflächentemperatur im Einsatz über 200 °C liegt. Ihr Gefüge muss deshalb hinreichend stabil und anlassbeständig sein, da die Gefügeänderungen von Warmarbeitsstählen bei der Betriebstemperatur nicht auftreten dürfen. Die neben 0,3 – 0,5 % Kohlenstoffgehalt ist die Hauptlegierungselementen Chrom, Molybdän und Vanadin. Für die Einstellung spezifischer Werkstoffeigenschaften werden zusätzlich Nickel, Silizium, Wolfram und Kobalt zulegiert.

Die wichtigsten Stähle für den Gesenkwerkstoff werden in drei Gruppen eingeteilt:

- NiCrMoV-Stähle
- CrMoV-Stähle
- kobaltlegierte Stähle

In Abbildung 2.23 wird das Anlassverhalten unterschiedlicher Warmarbeitsstähle dargestellt. Die NiCrMoV-Stähle zeigen im Vergleich zu CrMoV-Stähle eine geringere Anlassbeständigkeit auf, obwohl sie bis zu 500 °C durch ihren Ni-Gehalt hohe Zähigkeit besitzen. Aufgrund der hohen Anlassbeständigkeit und der, durch höheren Karbidanteile in der Matrix, höheren Verschleißbeständigkeit sind CrMoV-Stähle für den Einsatz bei hoher Temperaturbelastung, wie sie beim Pressen auftritt, geeignet. Diese hohe Temperaturbelastung entsteht durch die relativ langen oder hochfrequenten Kontaktberührzeiten. Die NiCrMoV-Stähle weisen bis zu einer Temperatur von 500 °C eine hohe Zähigkeit auf, dadurch sind diese für die Verwendung als Hammer geeignet. Da diese Stähle hohen mechanischen Belastungen bei kurzer Kontaktzeit stand halten. Jedoch dürfen diese Stahlverbindungen nicht in Pressen verwendet werden, da sie eine geringere Anlassbeständigkeit über 500°C aufweisen. Bei kobaltlegierten Stählen tritt neben der Ausscheidung von Sekundärkarbide zusätzlich die intermetallische Phasenbildung auf. Dadurch weisen die kobaltlegierten Stähle höchste Anlassbeständigkeit im Vergleich zu anderen Werkzeugstahlgruppe auf. Aber aufgrund der geringeren

Wärmeleitfähigkeit wird der Stahl 1.2888 (X20CoCrWMo10-2) nur eingeschränkt als Werkzeugwerkstoff verwendet [SCH04].

In Tabelle 2.1 werden die chemischen Zusammensetzungen und die Anwendungsgebiete von Warmarbeitsstählen, die üblicherweise als Gesenkwerkstoffe verwendet werden, dargestellt.

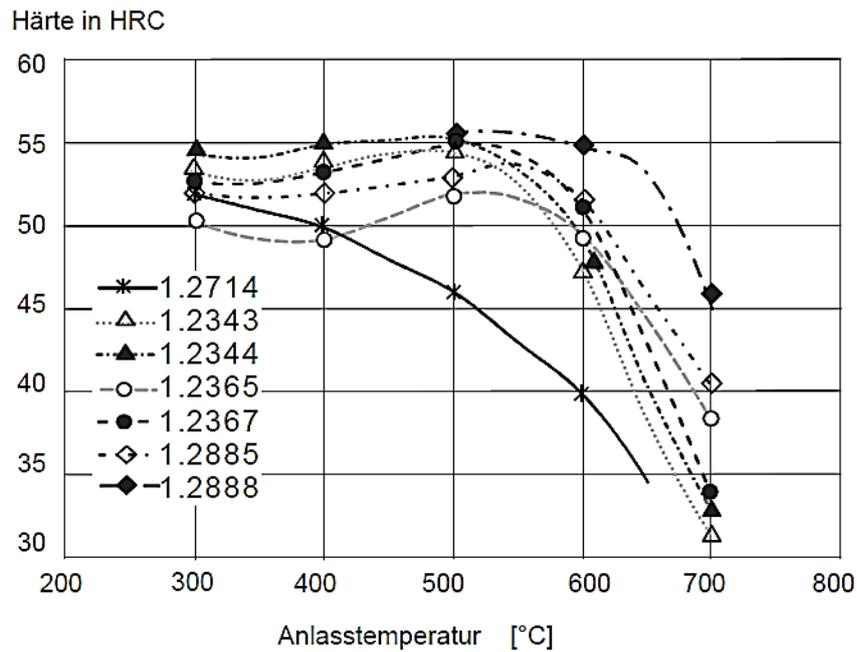


Abbildung 2-23: Anlassverhalten unterschiedlicher Werkzeugstähle für das Gesenkschmieden [STA92]

Tabelle 2-1: Übliche Warmarbeitstähle – chemische Zusammensetzung und Anwendungsgebiete

Stahlsorte	Werkst Nr.	Legierungsgehalt in Mass.-%								Anwendungsgebiete
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	
55NiCrMoV6	1.2713	0,55	0,30	0,60	0,70	0,30	0,10	-	-	Hammergesenke für mittlere und kleinere Abmessung
56NiCrMoV7	1.2714	0,55	0,30	0,70	1,00	0,50	0,10	-	-	Hammergesenke bis zu größten Abmessungen, schwierige Gravuren und Gesenkeinsätze
57NiCrMoV7 7	1.2744	0,57	0,30	0,70	1,10	0,80	0,10	-	-	Hammergesenke
X38CrMoV5-3	1.2343	0,37	0,40	0,40	5,00	3,00	0,60	-	-	Gesenke und Gesenkeinsätze, Werkzeuge für Schmiedemaschinen
X40CrMoV5-1	1.2344	0,40	1,00	0,40	5,30	1,40	1,00	-	-	Wie 1.2343, jedoch erhöhter Warmverschleißwiderstand
X32CrMoV3-3	1.2365	0,32	0,30	0,35	3,00	2,80	0,50	-	-	Gesenke und Gesenkeinsätze, Werkzeuge für Schmiedemaschinen, gute Zähigkeit bei nicht zu großen Querschnitten
X38CrMoV5-3	1.2367	0,38	0,40	0,45	5,00	2,85	0,55	-	-	Große und massive Werkzeuge wie Schmiedegesenke, Schwermetallinnenbüchsen
X30WCrV5-3	1.2567	0,30	0,20	0,30	2,40	-	0,60	4,30	-	Wie 1.2365, jedoch geringere Zähigkeit
X37CrMoW5-1	1.2606	0,36	1,10	0,50	5,20	1,35	0,20	1,25	-	Gesenke für Schmiedepressen, Gesenkeinsätze für Hämmer, Warmscherenmesse
X32CrMoCoV3 3 3	1.2885	0,31	0,35	0,40	2,95	2,80	0,55	-	2,85	Formteilpressgesenke, Gesenkeinsätze, Lochdornköpfe mit sehr hoher thermischer Belastung
X20CoCrWMo1 9	1.2888	0,20	0,30	0,50	9,30	1,90	-	5,30	9,80	Gesenkeinsätze in thermisch hoch belasteten Bereichen

In Tabelle 2.2 sind die Vor- und Nachteile der CrNiV-Stähle aufgelistet.

Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile der CrMoV-Stählen [SCH04]

Stahl	Vorteile	Nachteile
X40CrMoV5-1 (1.2344)	* Hohe Warmhärte * guter Verschleißwiderstand bei hoher Temperaturen	* heißrissfällig * bedingt wasserkühlbar
X32CrMoV3-3 (1.2365)	* Hohe Warmfestigkeit und Anlassbeständigkeit * Hohe Wärmeleitfähigkeit * Wasserkühlbar * Hervorragend bearbeitbar	* Niedriger Verschleißwiderstand bei hoher Temperaturen * Beim Härten großer Abmessungen Gefahr innerer Spannungen
X38CrMoV5-3 (1.2367)	* Hohe Warmfestigkeit und Anlassbeständigkeit * Hohe Zähigkeit * Geringeres Risiko innerer Spannungen beim Härten großer Dimensionen	* hohe Heißrissanfälligkeit

2.5.1 Anforderungen an Schmiedegesenke

Folgende allgemein wichtige Anforderungen werden an Warmarbeitstähle gestellt [DOE07, SCH04]:

- Hohe Wärmeleitfähigkeit
- Hohe Warmfestigkeit, -zähigkeit
- Hohe Härtetemperatur
- Hohe Anlassbeständigkeit
- Hohe Temperaturwechselbeständigkeit
- Hoher Warmverschleißwiderstand
- Duktilität

Durch die Berührung der Gesenke mit dem zu verarbeitenden heißen Metall entsteht ein unvermeidlicher Anlasseffekt der Gesenke, der zu einem deutlichen Härteverlust führt. Durch eine *hohe Wärmeleitfähigkeit* kann die Wärme aus dem Randschicht gut in das Innere des Gesenks abgeleitet werden, um derartige Werkzeugschwächungen zu vermeiden.

Die Schmiedegesenke müssen beim Warmmassivumformvorgang die Fließspannung des Schmiedegutes überwinden und werden dabei bei hohen Temperaturen einem Vielfachen dieser Spannung ausgesetzt. Die geeigneten Warmarbeitstähle müssen deswegen eine *hohe Warmfestigkeit* besitzen (siehe Abbildung 2.23).

Die thermische Beanspruchung modifiziert die Gefügestruktur in der Randzone von Warmarbeitstählen, die durch eine *hohe Härtetemperatur (hohe Anlassbeständigkeit)* verringert werden. Dies durch Legierungselemente, die den Martensitzerfall verzögern oder zur Bildung der Ausscheidung von Sonderkarbide führen, verbessert werden. Die Legierungselemente Chrom, Wolfram, Molybdän und Vanadium bildet diese Sonderkarbide.

Eine *hohe Temperaturwechselbeständigkeit*, d.h. ein hoher Widerstand des Warmarbeitsstahls gegen thermische Ermüdung, ist ein entscheidender Parameter der Werkstoffeigenschaften für eine geringere Schädigung der Gesenke. Dies kann durch eine höhere Vergütungsfestigkeit verbessert werden. Auch eine *hohe Warmstreckgrenze, hohe Anlassbeständigkeit, ein gutes Zähigkeitsverhalten* sowie *hohe Wärmeleitfähigkeit* sind weitere wichtige Eigenschaften, um die Temperaturwechselrissbildung zu vermeiden.

Eine weitere wichtige Materialeigenschaft für die Standmenge des Gesenkwerkstoffs ist die Duktilität. Die durch Ermüdung entstehende Rissbildung und folge Risswachstum können durch eine ausreichende Duktilität verhindert werden. Somit baut an hoch belasteten Stellen in der Gravur eine geringere plastische Verformungen ab und tritt kein Riss oder Bruch im Gesenk auf.

Kohlenstoff ist entscheidend für die Härtebarkeit der Stähle. *Chrom* bildet in Verbindung mit Kohlenstoff zusätzlich Karbide, die die Härte und den Verschleißwiderstand des Stahls erhöht. Durch Herabsetzung der für die Martensitbildung erforderlichen kritischen Abkühlgeschwindigkeit erhöht das Legierungselement Chrom die Einhärtbarkeit der Stähle. Chrom erhöht auch die Zunderbeständigkeit. Durch höheres Zulegieren von Chrom wird jedoch die Anlassbeständigkeit durch Ausscheidung von Karbiden verschlechtert und die Zähigkeit verringert [DOE07, SCH04].

Molybdän, *Wolfram* und insbesondere *Vanadium*, die als Karbidbildner bezeichnet werden, steigern den Verschleißwiderstand und sind auch für eine hohe Warmfestigkeit, eine hohe Anlassbeständigkeit und eine hohe Temperaturwechselbeständigkeit verantwortlich. Aufgrund starker Karbidbildner verringern diese Legierungselemente jedoch die Zähigkeit. *Nickel* und *Kobalt* werden in der Matrix gelöst und bilden mit Eisen Substitutionsmischkristalle. Nickel fördert die Durchhärbarkeit der Stähle und verbessert die Zähigkeit. *Kobalt* steigert die Löslichkeit des Austenits für Karbidbildner und fördert als Mischkristallbildner (Matrix) zur Erhöhung der Warmfestigkeit. *Silizium* führt zu einer höheren Zunderbeständigkeit der Stähle und indirekt zur Erhöhung der Anlassbeständigkeit. Das in der Matrix gelöste Legierungselement *Mangan* beeinflusst die Grundfestigkeit und die Härbarkeit der Stähle positiv [DOE07, SCH04].

2.6 Literaturüberblick und Bewertung unterschiedlicher Methoden zur Reparatur von Schmiedegesenken

Aufgrund des großen Produktionsvolumens und der Beeinflussung der Produktkosten in der Warmmassivumformung spielt die Lebensdauererhöhung der formgebenden Werkzeuge eine große Rolle, die zurzeit ein vielfältiges Forschungsgebiet darstellt. Die Lebensdauer der Werkzeuge in der Massivumformung ist durch die hohen mechanischen, thermischen, sowie tribologischen und chemischen Belastungen stark begrenzt. Es gibt unterschiedliche Reparaturmethoden für geschädigte Schmiedewerkzeuge, die die Standmenge der Schmiedewerkzeuge erhöhen und damit die Werkzeugkosten senken können. Die geschädigten Gesenke können in der Praxis durch Nachsetzen der Gravur mittels High Speed Cutting (HSC), Auftragschweißen mit unterschiedlichen Schweißzusatzwerkstoffe, spezielle Oberflächenmodifikationen (Härten, Beschichten) oder Dünnschichttechnologie (PVD oder CVD) aufbereitet werden (siehe Abbildung 2.24).

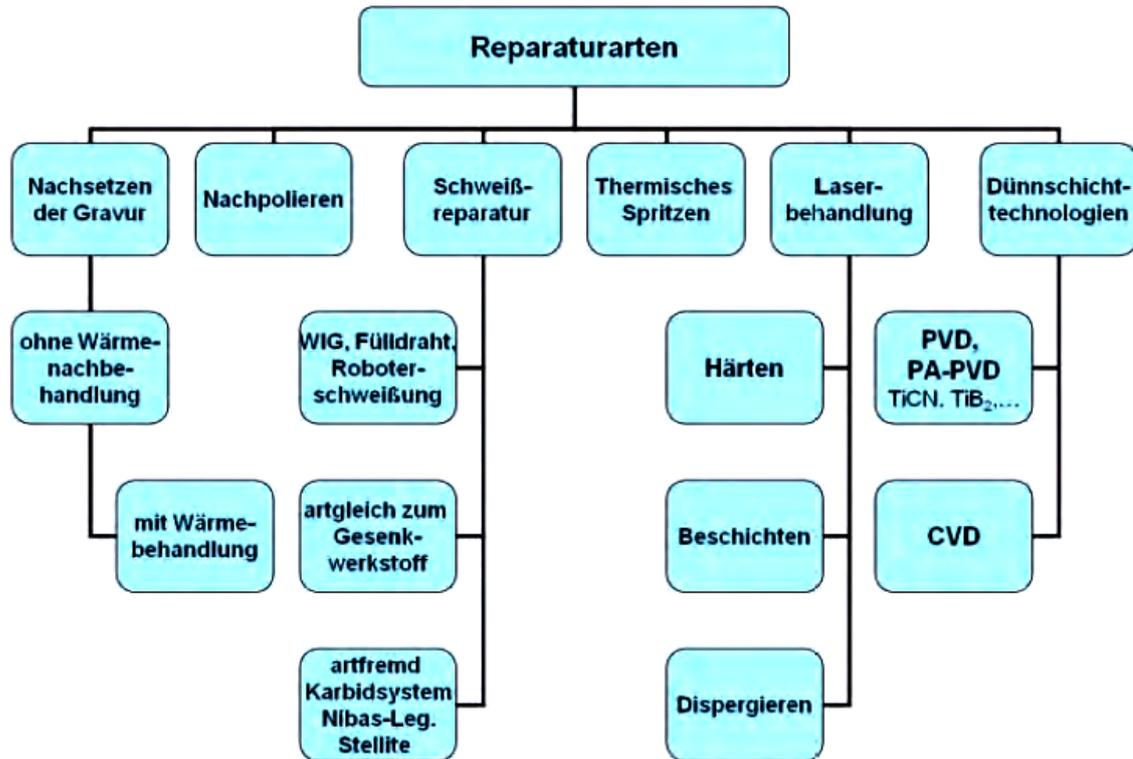


Abbildung 2-24: Möglichkeiten zur Reparatur verschlissener Schmiedegesenke [YIL12]

Unterschiedliche Forschungen und die Einführung neuer Technologien, z.B. das HSC-Fräsen von Schweißwerkstoffen und das automatisierte Auftragschweißen, haben in der Werkzeugaufarbeitung in Bezug auf die Kürzung der Prozesskette und die Erhöhung der Qualität in den letzten Jahren große Fortschritte mit sich gebracht. Für Werkzeuge, die dauerhaft während des Einsatzes sehr hohen Belastungen unterliegen und durch den Verschleiß und Werkstoffermüdung aufweisen, bietet das Auftragschweißen erfolgreiche Reparatur- und Neuanfertungsverfahren im Werkzeug- und Formenbau an, durch den neu aufgetragenen Werkstoff lässt sich die Geometrie und somit Funktion und die Formen der Werkzeuge wiederzustellen. Im Vergleich zum Preis für die Herstellung eines neuen Werkzeuges sind Reparaturen mittels Schweißen sehr attraktive und wirtschaftliche Methoden. Es gibt viele alternative Prozesse, Methoden und Materialien für das Schweißen, die einige Besonderheiten, Vorteile und Einschränkungen haben. Für die Auswahl des Schweißverfahrens bzw. Zusatzwerkstoffs sollen die Schweißbarkeit des Bauteils, metallurgische Verträglichkeit, die zu erwartende Verschleißkennwerte, die Wärmeeinführung während des Schweißvorganges sowie die Festlegung geeigneter Prozessparameter und die Möglichkeit einer mechanischer Bearbeitung beachtet

werden. Als Schweißzusatzwerkstoffe zum Auftragschweißen stehen zur Verfügung: rutil- und basisch umhüllte Stabelektroden, WIG, MIG/MAG Massivdrähte und Fülldrähte für unterschiedliche Legierungen. Die Auftragschweißlegierungen bzw. Beschichtungswerkstoffen werden artgleiche und artfremde Werkstoffe, wie Cr-Karbidsysteme, Nickelbasislegierungen und Kobaltbasislegierungen (Stellite) eingeteilt.

Der typische Anwendungsbereich des Auftragschweißens an Schmiedewerkzeuge kann wie folgenden eingeteilt werden:

- verschlissene Oberflächen
- abgestumpfte oder ausgebrochene Schnittkanten
- Rissbildung
- Bearbeitungsfehler
- Formänderungen
- partielle Verstärkungen an Verschleißzonen

Während des Schweißvorganges sollen einige Grundregeln beachtet werden:

- Die Werkzeuge sollen vor der Auftragsschweißung von Fett und anderen Verunreinigungen gereinigt werden, da sie sich negativ auf die Schweißqualität auswirken (z.B. Rauchentwicklung, Porenbildung).
- Die Werkzeuge sollen vorgewärmt und während des Schweißvorganges konstant auf dieser Temperatur gehalten werden, um das Risiko der Aufhärtung, Rissbildung und Schrumpfung zu verringern.
- Der Schweißzusatzwerkstoff sowie das entsprechende Schweißverfahren müssen an vorliegende Situation angepasst werden.
- Um die Schrumpfung der Schweißnaht während des Abkühlens zu minimieren, sollten die Schweißlagen während dieser Zeit abgehämmert werden.
- Die Rissgefahr kann durch eine langsames Abkühlen und Nachwärmen verringert werden.

Die Schweißzusatzwerkstoffe auf Eisenbasis, die mit CrMo oder CrW legiert sind, zeigen bis etwa 550 °C eine gute Anlassbeständigkeit und eine gute Warmverschleißfestigkeit. Durch eine Wärmebehandlung kann die Eigenschaft des Schweißgutes positiv beeinflusst werden. Das Anwendungsgebiet für hochlegierte Schweißzusätze auf Eisenbasis sind z.B. das Regenerieren von Gesenkgravuren, Dornen, Abgratwerkzeugen, Kalibrierrollen und für Stauchplatten sowie deren Verwendung bei Maraging-Stählen.

Im Vergleich zu Schweißzusatzwerkstoffen auf Eisenbasis weisen die Schweißzusätze auf Nickel- oder Kobaltbasis einen besseren Widerstand gegen Verschleiß auf. Bei Anwendungsbereichen in denen eine höhere Leistungsfähigkeit der Schweißzusätze bzw. der Gebrauchseigenschaften des Werkzeuges gefordert wird, sollten die Schweißzusätze auf Nickel- oder Kobaltbasis verwendet werden.

Nickelbasislegierungen weisen die folgenden Eigenschaften im Einsatzbereich auf:

- kaltverfestigend durch Druck und Schlag
- warmaushärtend > 720 °C
- hochwarmfest
- hochzunderbeständig
- hochkorrosionsbeständig

Nickelbasislegierungen werden für folgende Werkzeuge verwendet, für das ganzflächige und partielle Panzern von thermisch höchstbelasteten Arbeitsflächen, insbesondere bei Kühlmiteleinsetz wie Warmmesser (Abbildung 2.25), Locker, Fließpresstempel, Gesenkgravuren und Schmiedesättel.



Abbildung 2-25: Warmschermesser mit Nickelbasis aufgeschweißt [VIL11]

Die typischen Eigenschaften der Schweißzusätze auf Kobaltbasis sind hohe Warmhärte bis zu Temperaturen von 500 bis 900 °C, gute Gleiteigenschaften zwischen Metall/Metall, hohe Korrosionsbeständigkeit und Beständigkeit bei Mehrfachbeanspruchungen. In Abbildung 2.26 wird die Warmhärte unterschiedlichen Stelliten bzw. kobaltlegierte Schweißzusätzen dargestellt. Bei Kobaltbasislegierungen können die Gebrauchseigenschaften durch eine Wärmebehandlung nicht verändert werden. Obwohl Kobaltbasislegierungen auch in ganzflächigen und partiellen Panzern von thermisch höchstbelasteten Arbeitsflächen eingesetzt werden können, sollten die Thermoschockwirkung durch Kühlschmiermittel verringert werden. Der Anwendungsbereich von Kobaltbasislegierungen ist z.B. Gesenkgravuren, Walzdorne, Lochdorne, Schnittringe und Warmabgratwerkzeugen (Abbildung 2.27).

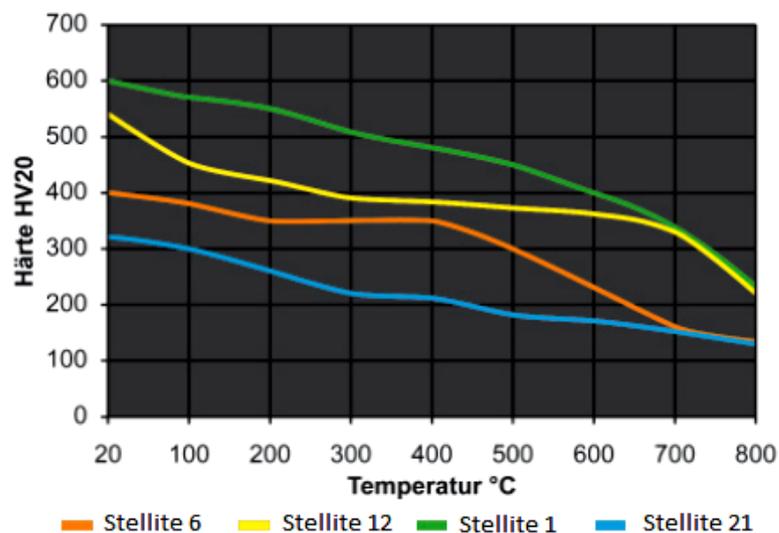


Abbildung 2-26: Warmhärte der verschiedenen Stellite-Legierungen

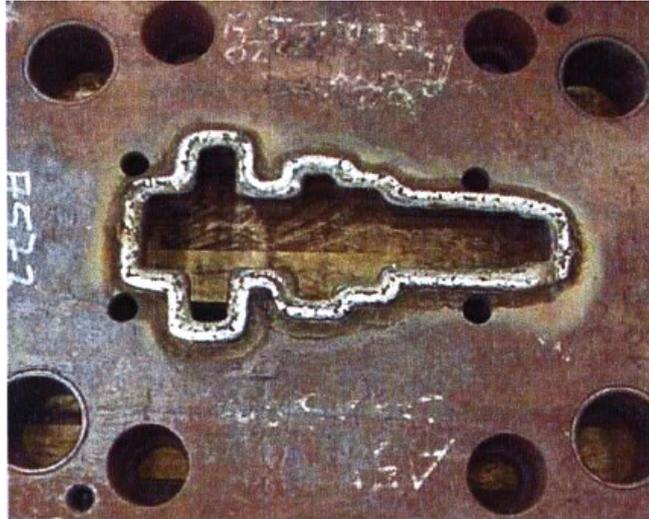


Abbildung 2-27: Warmabgratwerkzeug mit Kobaltbasis aufgeschweißt [VIL11]

In der Arbeit von [KAS07] wurde das Verschleißverhalten drei unterschiedlicher Zusatzwerkstoffe zum Auftragschweißen bei Raum- und Hochtemperatur untersucht. Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkzeugstähle und Schweißzusatzwerkstoffe sind in Tabelle 2.3 aufgelistet. Die Zusatzwerkstoffe Stellite weisen eine optimale Warmhärte bis zirka 700 °C auf. Stellite 6 zeigt eine höhere Härte im Vergleich zu Stellite 21 (siehe Abbildung 2.26 und Abbildung 28). Beim Schmiedevorgang mit einem Hammer treten durch die kurze Kontaktzeit von Schmiedestück und Werkzeug hohe mechanische Beanspruchungen und geringere Erwärmung des Werkzeuges auf, daher soll für diesen Prozess ein Werkstoff mit höherer Zähigkeit eingesetzt werden. Im Gegensatz zum Schmiedehammer unterliegt die Schmiedepresse einer höheren Temperaturbelastung und einer kleineren mechanischen Beanspruchung. Daher ist Stellite 6 für Schmiedepresse geeignet, während Stellite 21 aufgrund hoher Zähigkeit primär für Schmiedehämmer eingesetzt werden soll. In Abbildung 2.29 wird die lichtmikroskopische Aufnahme des geätzten Schweißnahtquerschnitts von Stellite 6 und 21 dargestellt. Das Gefüge besteht aus primären Dendriten (weiße Phase) und einer interdendritischen eutektischen Region (schwarze Phase). Die eutektische Region besteht aus Karbiden und α -Phasen.

Tabelle 2-3: Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe [KAS07]

Werkstoff	Legierungsgehalt in Mass.-%										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	Ni	Nb	Fe
1.2343 (H11)	0,38	-	-	5	1,5	0,5	-	-	-		Rest
Stellite 6	1,2	1	1	28	-	-	5	Rest	2,5	-	2,5
Stellite 21	0,25	1	1	27	5,5	-	-	Rest	2,5	-	2,5
Inconel625	0,05	-	-	21	9	-	-	-	Rest	4	1

Testergebnisse zeigten, dass Inconel625 den geringsten Verschleiß zwischen den drei Schweißzusatzwerkstoffen bei hohen Temperaturen hat, obwohl der Verschleiß bei Raumtemperatur sehr hoch war (siehe Abbildung 2.30). Zur besseren thermischen Ermüdungsfestigkeit des Schweißnahtübergangs ist es erwünscht, um den Unterschied der thermischen Ausdehnung zwischen dem Schweißzusatz und dem Grundmaterial zu reduzieren und damit die im Werkstück verbleibenden Spannungen induzieren zu können. Durch Spannungsarmglühen können die im Werkstück inneren Spannungen abgebaut werden [SCI06].

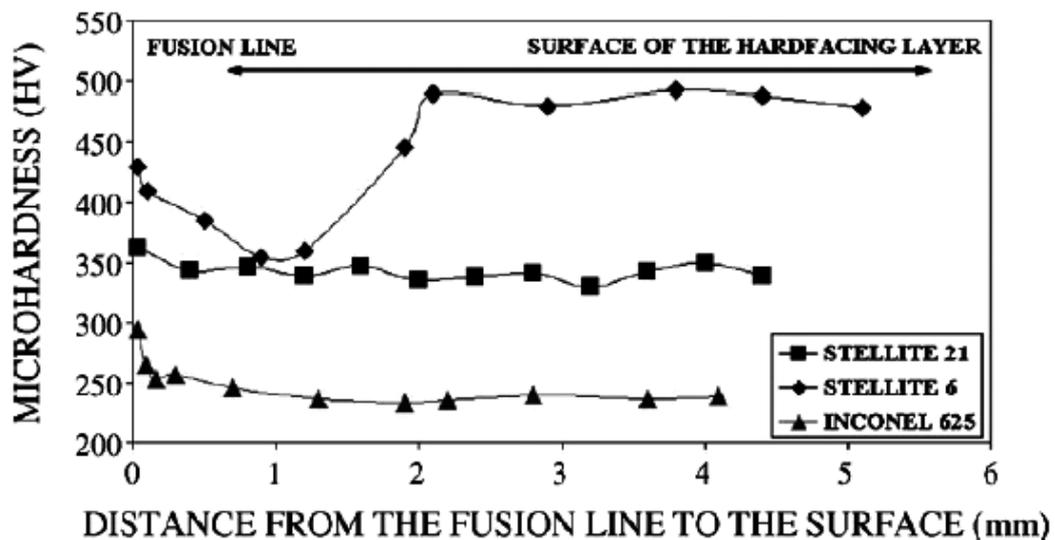


Abbildung 2-28: Die Mikrohärtigkeit als Funktion des Abstandes von der Schmelzlinie [KAS07]

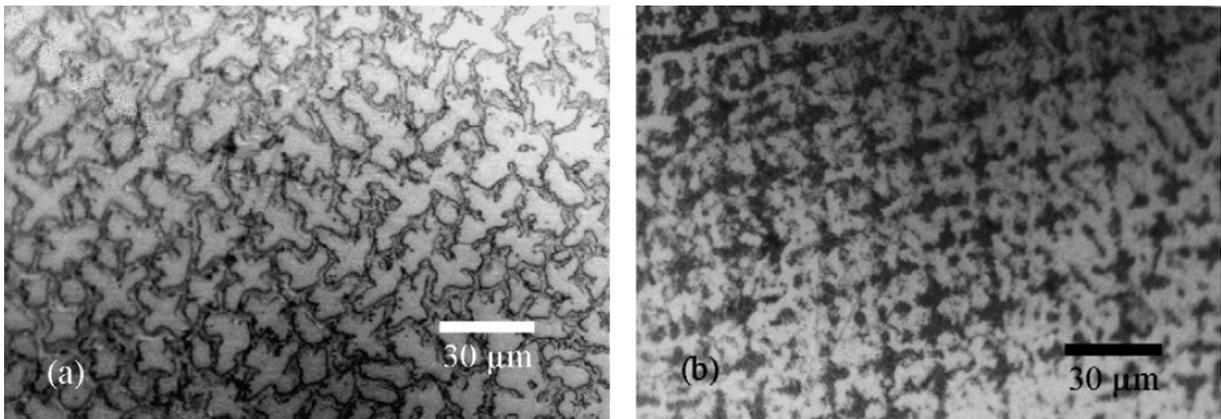


Abbildung 2-29: Mikrostrukturaufnahmen von Stellite 6 (a) und Stellite 21(b) [KAS07]

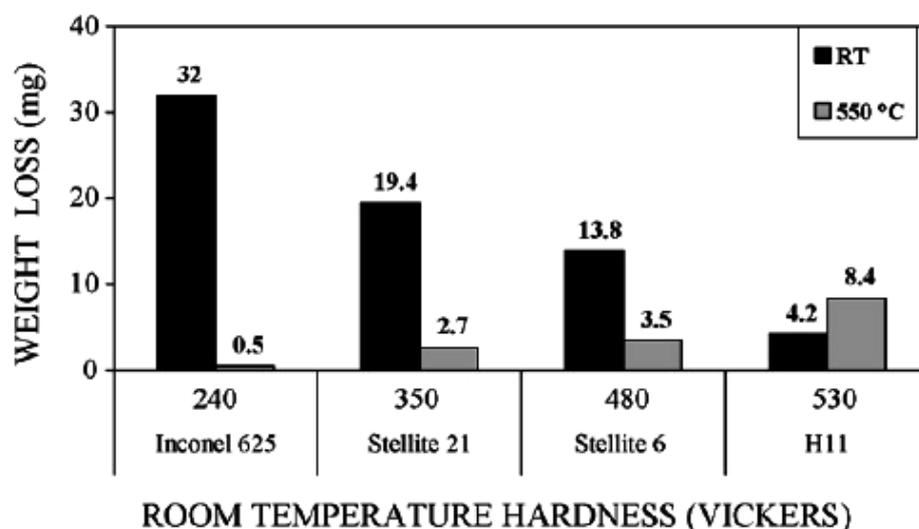


Abbildung 2-30: Gewichtverlust der Proben mit der Methode des „ring-on-disc“-Versuchs bei Raumtemperatur und 550 °C [KAS07]; (Normaldruck: 48 N, Gleitgeschwindigkeit: 0,4 m/s, Reibweg: 1000 m)

Andere Versuche aus [DOE99], bei der ein NbC- haltiger Föhdraht (Bezeichnung AS541, chemische Zusammensetzung in Tabelle 2.4) als Schweißzusatz auf die hochbelasteten Werkzeugoberfläche aufgebracht wurde (Abbildung 2.31), haben gezeigt, dass der Zusatzwerkstoff AS541 nach 1000 Schmiedezyklen beim Schmieden eine Verschleißverbesserung um zirka 20 % im Vergleich zum konventionellen Werkzeugwerkstoff des Gesenks (32CrMoV12-28) ergeben hat (siehe Abbildung 2.32). Durch die ausreichend vorhandene Matrixeigenschaft Temperaturwechselbeständigkeit kommt es zu keiner netzwerkartigen Rissbildung auf der Gravuroberfläche (= Brandrisse).

Tabelle 2-4: Chemische Zusammensetzung des Fülldrahts A541

Legierungselemente	C	Cr	Mo	V	W	Nb	Ni	Al	Mn	Si	Ti	Fe
Schweißgut (% - Gehalt)	0,37	5,96	2,62	0,92	1,14	2,34	2,49	0,04	0,66	0,59	0,04	Rest

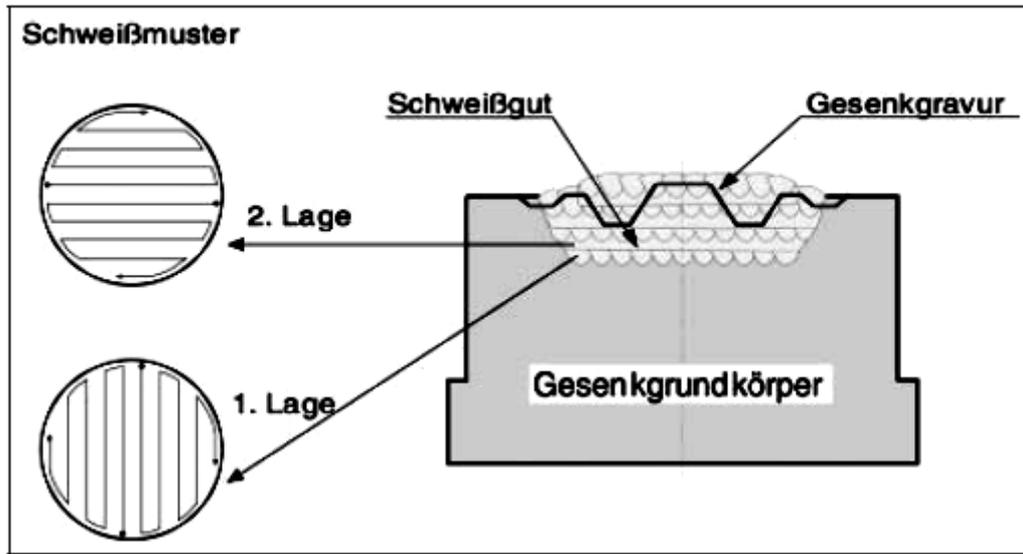


Abbildung 2-31: Verwendete Schweißprozess und aufgeschweißtes Gesenk [HAF99]

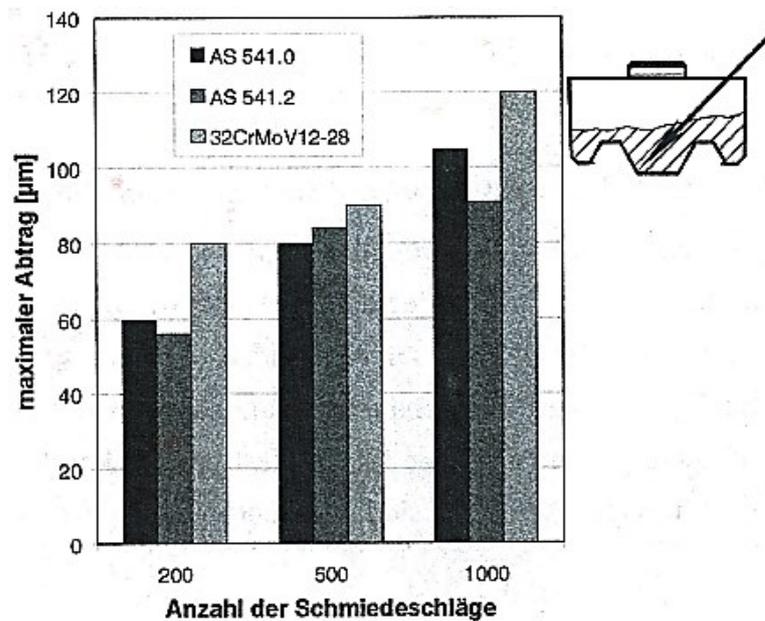


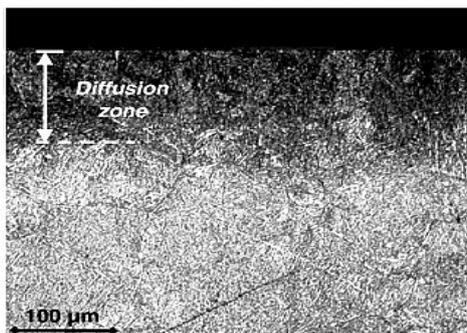
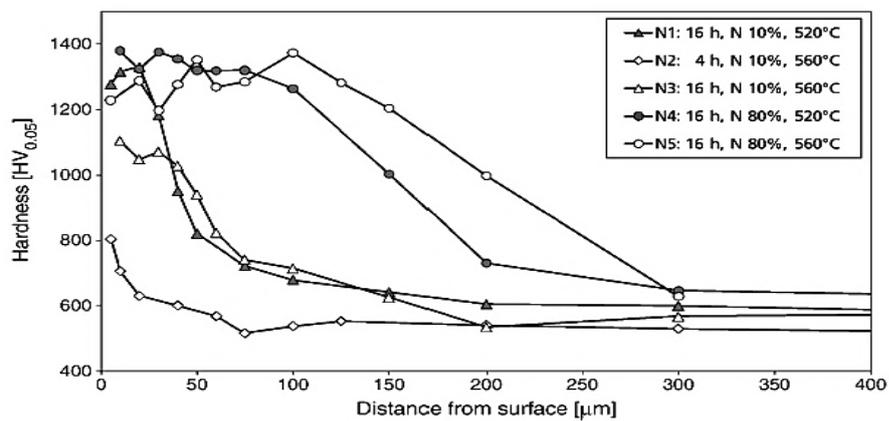
Abbildung 2-32: Verschleißverhalten der NbC- haltigen Auftragschweißlegierung [DOE99]

Die äußere Randzone des Gesenkwerkzeuges unterliegt bei der Warmmassivumformung den hohen thermischen, sowie abrasiven und adhäsiven Beanspruchungen. Um die Randzonen einen besseren Verschleißwiderstand, eine höhere Härte und Korrosionsbeständigkeit von Werkzeugen zu verschaffen, werden deshalb häufig Oberflächenschichten verwendet. Die Oberfläche des Werkzeuges kann positiv durch eine Randschichtmodifikation beeinflusst werden. Oft werden Verfahren wie Gasnitrieren, Badnitrocarburieren und Borieren benutzt.

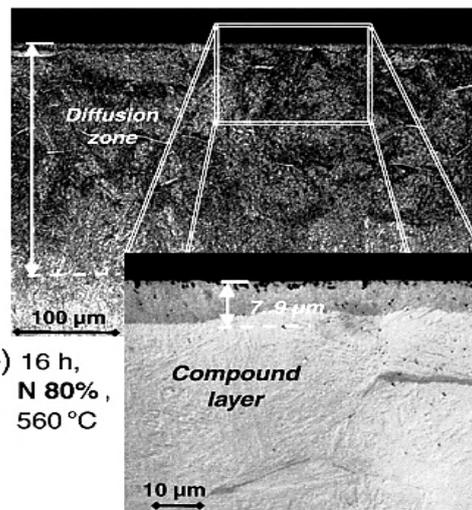
Bei Versuchen aus [PAS10] wurden die Oberflächenbereiche der Werkzeugwerkstoff 1.2367 (X38CrMoV5) durch Plasmanitrieren mit unterschiedlichen Prozessparametern (wie Nitrierzeit, Konzentration der Stickstoff, Prozesstemperatur) modifiziert, um den Randzonen des Werkzeuges einen besseren Verschleißwiderstand, eine höhere Härte zu verleihen und der Einfluss der Prozessparameter zu untersuchen. Die Prozessparameter sind in Tabelle 2.5 aufgelistet. Es kann nachgewiesen werden, dass die Wahl der Nitrierparameter einen Einfluss auf die Härteverlauf im oberflächennahen Bereich hat. In Abbildung 2.33 wird der Härteverlauf im oberflächennahen Bereich der Proben dargestellt. Die maximale Härte weist in der Nähe der Oberfläche auf. Während der Modifizierung der oberflächennahen Bereiche des Werkzeuges mittels des Nitrierverfahrens tritt durch diesen hohen Stickstoffgehalt tritt eine Verbindungsschicht auf. Diese spröde Schicht besteht aus einer γ^I -(Fe₄N), ϵ -Phase (Fe₂₍₃₎N) oder einem Phasengemisch. Durch angepasste Nitrierparameter oder durch ein nachträgliches mechanisches Verfahren kann diese spröde Verbindungsschicht entfernt werden. Die Struktur des unteren Bereichs der Verbindungsschicht besteht aus Ausscheidungen von Eisennitriden (α^{II} - und γ^I -Phasen) und Sondernitriden (Al-, Cr-, V- und Mo-Nitride) (siehe Abbildung 2.34 aus [HE06]). Die besten Ergebnisse erzielt man durch Nitrieren ohne weiße Verbindungsschicht der Gesenkoberfläche [PAS10, CAS07]. Die Einflussfaktoren der Randschichtmodifikationen sind die spröde Verbindungsschicht (Abbildung 2.35), die Dicke der Diffusionsschicht, die Prozessparameter sowie das angewandte Nitrierverfahren.

Tabelle 2-5: Prozessparametern unterschiedlicher Nitrierbehandlungen und dadurch aufweisende Härte- und Eindringtiefwerte [PAS10]; ^a Restatmosphäre Wasserstoff

Versuche	Nitrierzeit [h]	Konzentration des Stickstoffs [%] ^a	Prozesstemperaturen [°C]	Härte der Oberfläche [HV _{0,05}]	Eindringtiefe der Härte [µm]
N1	16	10	520	1330	150
N2	4	10	560	800	60
N3	16	10	560	1100	150
N4	16	80	520	1380	260
N5	16	80	560	1370	290



a) 16 h,
N 10%,
560 °C



b) 16 h,
N 80%,
560 °C

Abbildung 2-33: Qualitativ unterschiedliche Nitrierbehandlungen, die sich durch Variation von Temperatur, Stickstoffgehalt im Gasgemisch und Plasmaintensität (Testverhältnis) ergeben [PAS10].

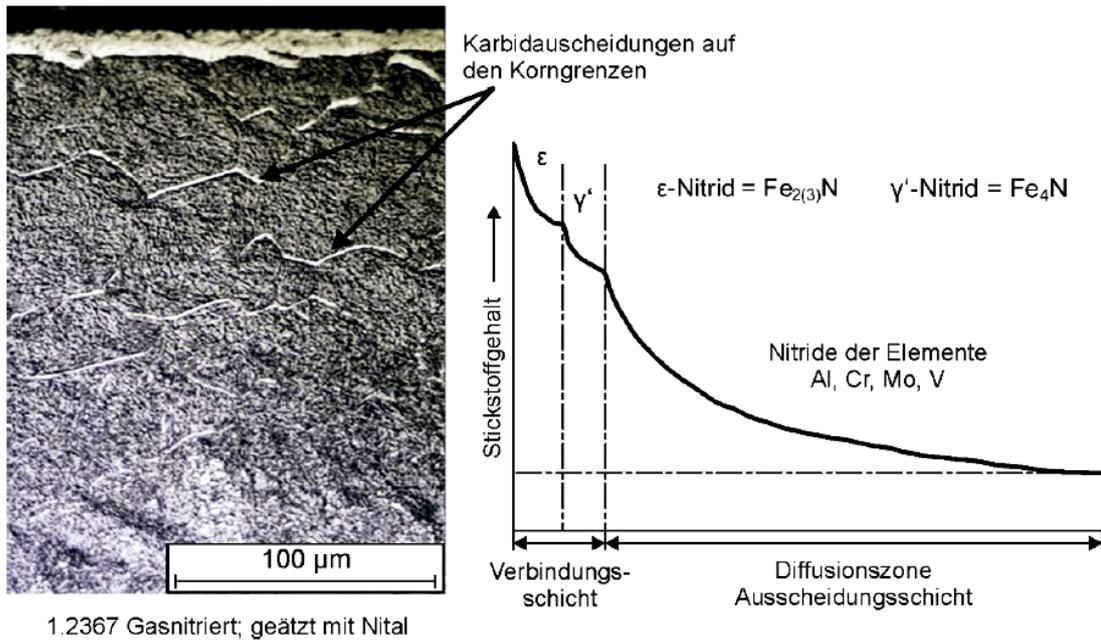


Abbildung 2-34: Aufbau der Nitrierschicht [HE06]

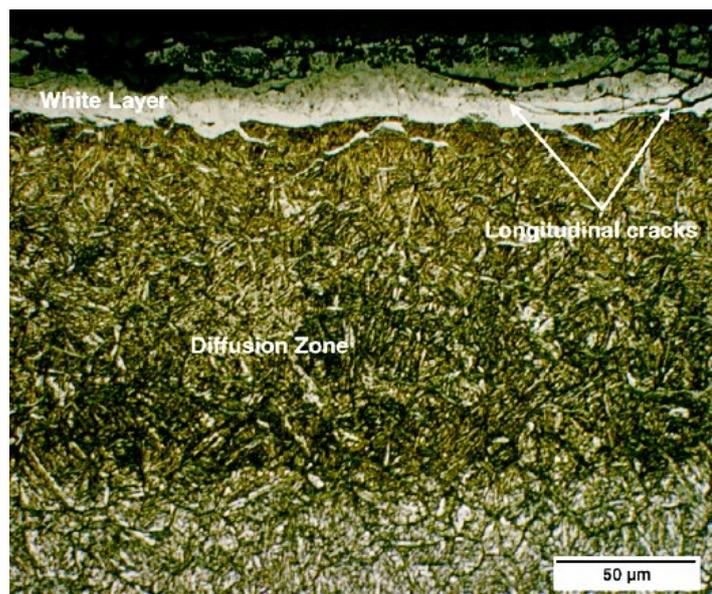


Abbildung 2-35: Rissbildung in der weissen Verbindungsschicht [CAS07]

Bei anderen Versuchen von [HE176], die am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) an Flachstauchbahnen (Abbildung 2.36) durchgeführt wurden, wurden die Oberflächen der üblich verwendeten Werkzeugstähle 1.2365 (X32CrMoV3-3) und 1.2714 (56NiCrMoV7) für Pressen- und Hammergesenke durch drei thermomechanische Oberflächenbehandlungen modifiziert, um das Verschleißverhalten zu untersuchen. In Abbildung 2.37 werden die gemessenen Verschleißbeträge dargestellt. Aufgrund seiner geringeren Anlassbeständigkeit wies 1.2714

einen deutlich höheren Verschleiß im Vergleich zu 1.2365 auf. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verschleiß durch die Beschichtungsverfahren verringert werden kann. In Abbildung 2.37 (rechts) ist ersichtlich, dass die Materialaufträge mit zunehmender Temperatur des Schmiedewerkzeuges steigen. Die mittels nitrieren oder badnitrocarbunieren behandelten Werkzeugoberflächen neigen stark dazu Ablagerungen des Werkstückes an der Kontaktfläche anzusetzen. Bei boriierten Werkzeugen treten nur sehr dünne bis gar keine Ablagerungen auf. Die Neigung zur Bildung von Auftragsschichten bei Werkzeugen ohne eine derartige Oberflächenbehandlung liegt im Bereich zwischen den nitrierten und boriierten Oberflächen.

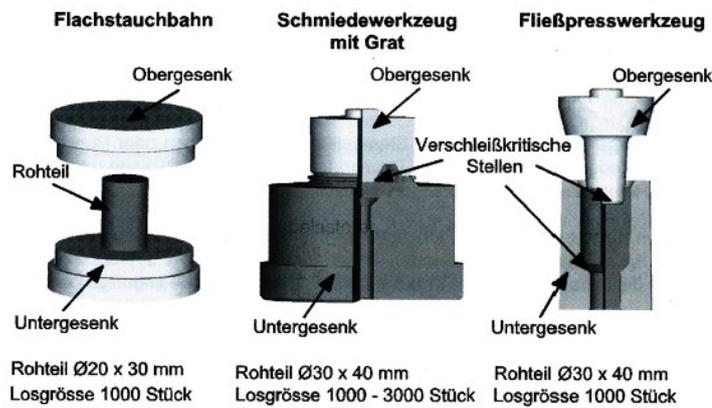


Abbildung 2-36: Unterschiedliche Versuchswerkzeuge für Verschleißuntersuchungen [BAR04]

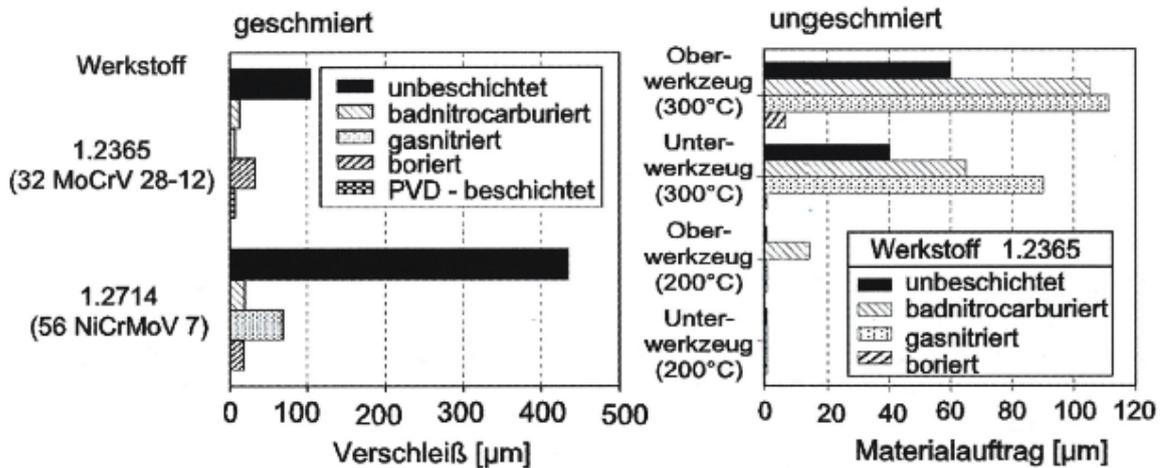


Abbildung 2-37: Einfluss der Randschichtbehandlungen auf Verschleiß an Flachstauchbahnen nach 1000 Schmiedezyklen sowie Einfluss der Werkzeugtemperatur auf den Materialauftrag [BAR04]

Derzeit werden verschiedene Möglichkeiten von keramischen Beschichtungen und Hartstoffschichten, die als Dünnschichttechnologien bezeichnet werden, untersucht. Am Beginn der Forschungsarbeiten wurde wegen der häufigen Anwendung mit Titanitridschichten erprobt [DOE96]. Im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten wurden andere Monolagensystemen mit CrN, CrC und TiAlN, die mittels PVD, CVD oder PACVD auf die Werkzeugoberfläche aufgebracht werden können, betrachtet [BEH08]. Die Monolagensysteme stellen eine Verbesserung des Verschleißwiderstandes im Vergleich zu den nur nitrierten Gesenken dar. Bei Monolagensystemen wird die Werkzeugoberfläche zuerst nitriert. Damit ein stetiger Härteverlauf zwischen den Hartstoffschichten und dem Grundwerkstoff gewährleistet werden kann. Ein Nachteil bei Monolagenschichtsystemen ist die direkte Ausbreitung von oberflächlichen Rissen ins Grundmaterial. Aufgrund der Abplatzungen und der Rissbildungen in verschleißkritischen Bereichen, die häufig bei den Monolagenschichten auftreten, wurden Mehrlagenschichtsysteme (TiN-TiCN-TiC) untersucht [ARA90, NAV01, LES09, HUS02]. Aus Abbildung 2.38 erkennt man die Unterschiede zwischen den Mehrlagenschichtsystemen und den Monolagenschichtsystemen sowie den möglichen Schichtaufbau [HUS05]. Die Vorteile der Mehrlagenschichten ergeben sich aus der Kombination der Einzelschichten, diese müssen so gewählt werden, dass eine Rissablenkung und eine Verschleißverzögerung auftreten. Ein mögliches Beispiel dafür ist ein gradierter Aufbau der Beschichtung von TiN→TiCN (Abbildung 2.38 rechts). Die unterste Beschichtung von TiN weist einer guten Haftung zum Substrat während der oberste Beschichtung von TiCN eine gute Verschleißbeständigkeit auf [HUS05].

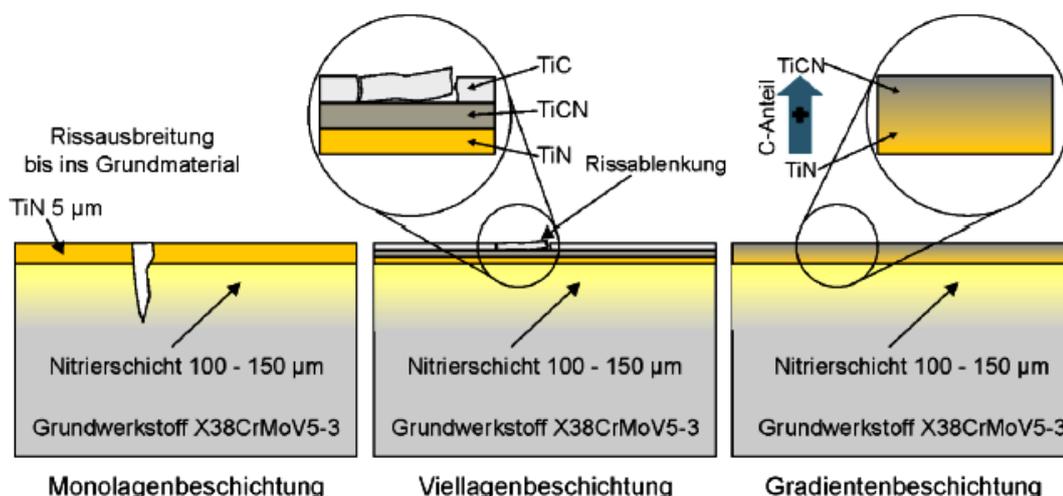


Abbildung 2-38: Möglichkeiten der Schichtaufbau von Hartstoffdünnschichten [HUS05].

Viellagenschichten können aus unterschiedlicher Variationen der Lagen (3, 9, 18, 27) und der Dicke ($1,7\mu\text{m}$ / $2,4\mu\text{m}$ / $3,4\mu\text{m}$ / $5,4\mu\text{m}$) aufgebaut werden. Diese weisen im Vergleich zu den nitrierten Werkzeugen einen um über 50 % geringeren Verschleiß auf (Abbildung 2.39 und Abbildung 2.40). Aus diesem Experiment wurden noch zwei weitere Beschichtungssystemen untersucht. Die Oberflächenbeschichtung wurde aus als Grundlage eine TiN-TiCN-TiC-Viellagenbeschichtung und darauf einem borhaltigen verstärkten Deckschicht aus TiB_xN_y bzw. TiB_2 aufgebaut, um der Widerstand der Beschichtung gegen Verschleiß zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigten, dass es zu keiner ausschlaggebenden Verbesserung im Vergleich zu TiN-TiCN-TiC-Mehrlagenbeschichtung gekommen ist (siehe Abbildung 2.41 aus [BEH08]). Aufgrund der verstärkten Deckschicht zeigten nur in ersten 1000 Schmiedezyklen eine Verringerung des Verschleißes und danach wird der Verschleißfortschritt von der Mehrlagenschichtsystem von TiN-TiCN-TiC bestimmt.

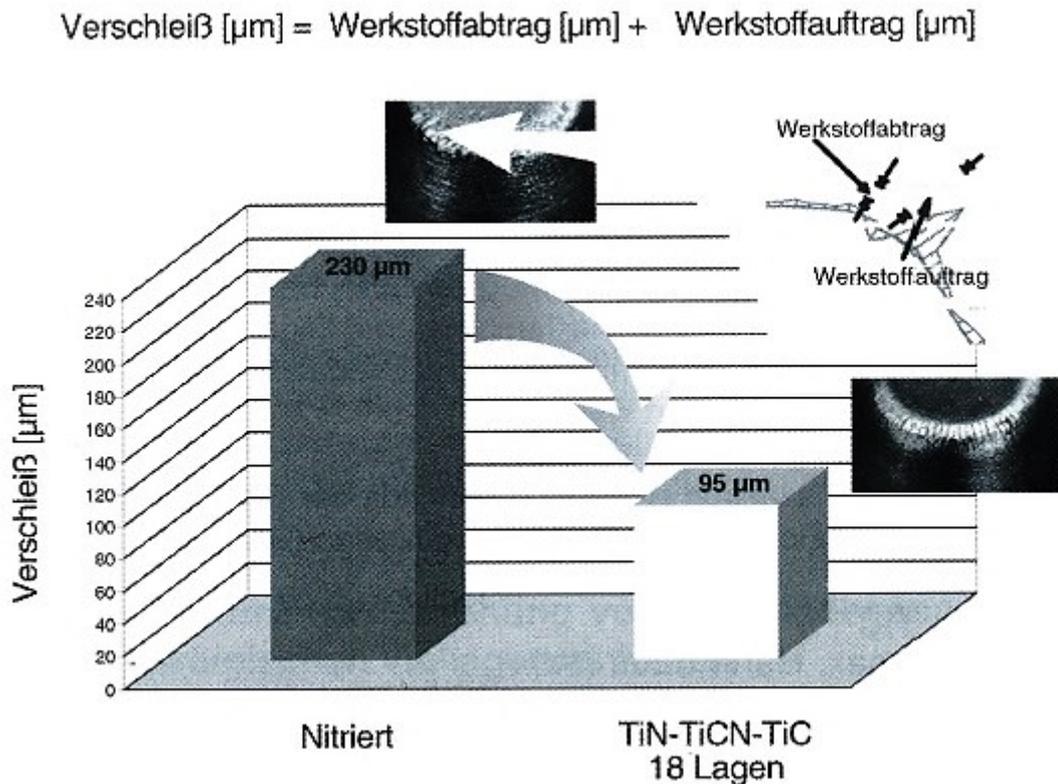


Abbildung 2-39: Verschleißverringern durch Mehrlagenbeschichtung beim Schmieden mit Grat (Schmiedetemperatur $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, nach 3000 Schmiedezyklen) [BAR04]

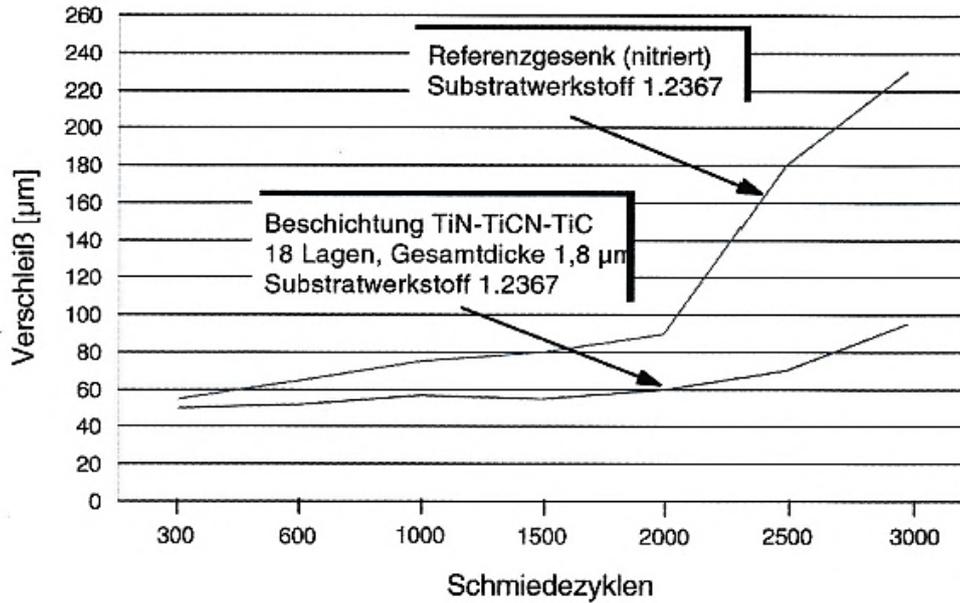


Abbildung 2-40: Vergleich des Verschleißverhaltens zwischen dem nitrierten Referenzgesenk und dem beschichteten Gesenk [BAR04]

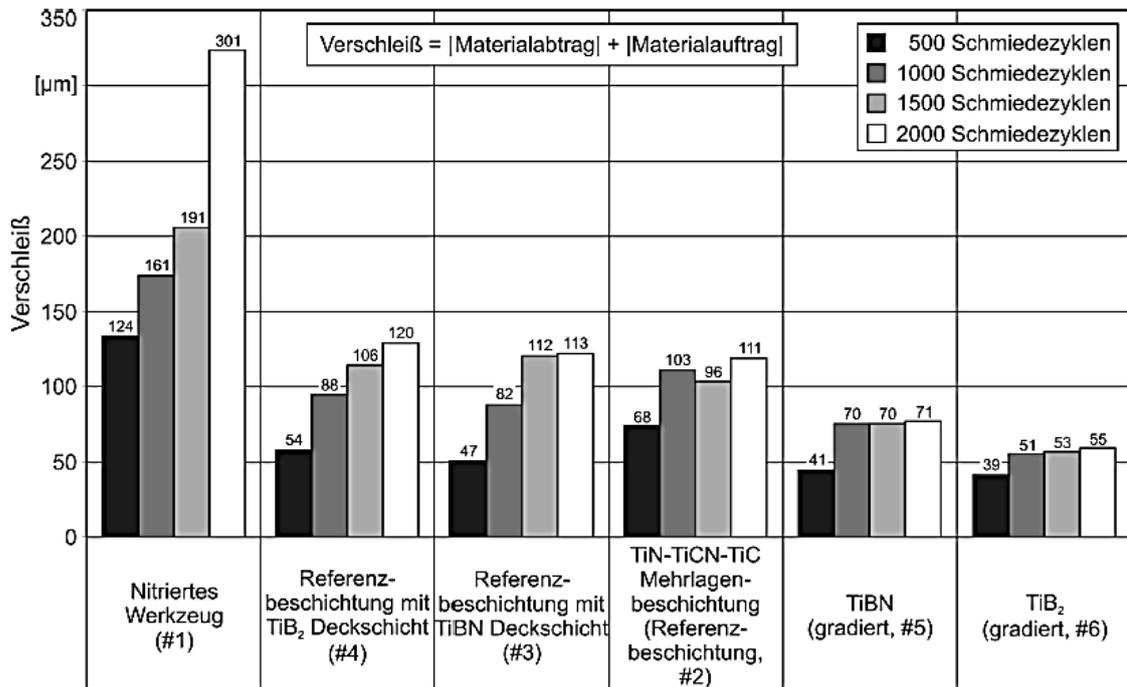


Abbildung 2-41: Verschleißverhalten der mittels PACVD aufgebauten Beschichtungen nach 2000 geschmiedeten Teilen [BEH08]

In Abbildung 2.42 werden die Oberflächenaufnahmen des hochbelasteten Dornes nach 1000 Schmiedezyklen dargestellt. Die Oberflächen des verwendeten Dornes werden nitriert und unterschiedlich beschichtet. Das nitrierte Werkzeug zeigte deutliche Veränderung am Dornradius, während beim beschichteten Gesenke nur eine Riefenbildung auftritt. Obwohl der Verschleiß am Dornradius durch Mehrlagenbeschichtung deutlich verringert werden konnte, konnte die Ausbildung von Rissen an diesen Stellen nicht vermieden werden [HUS02].

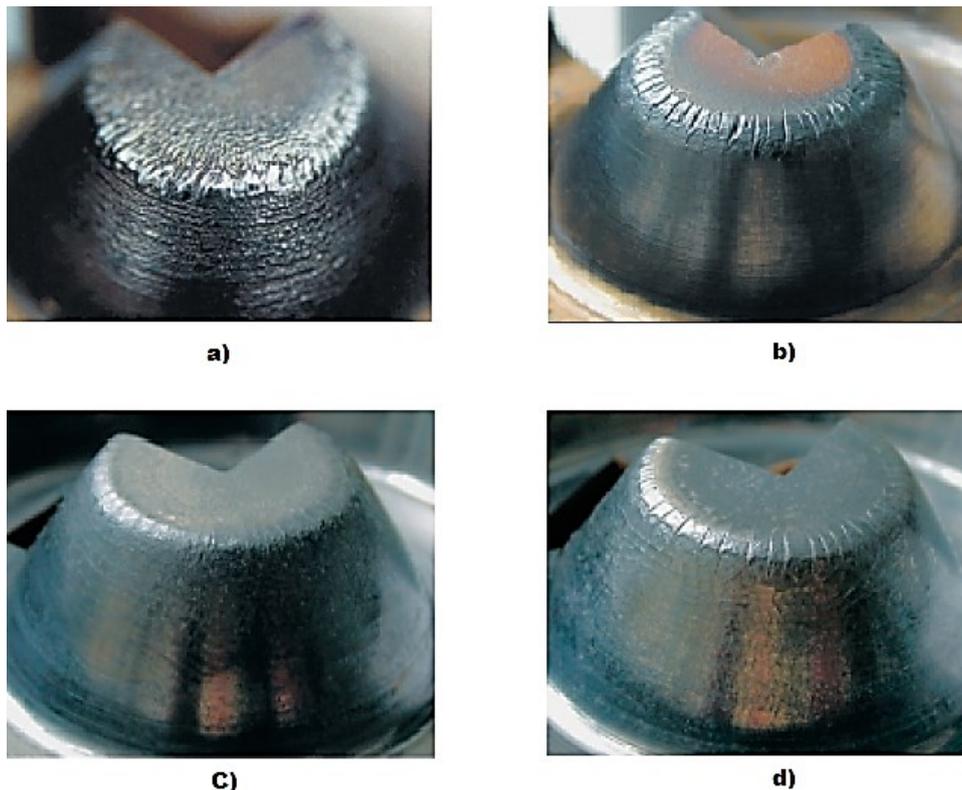


Abbildung 2-42: Oberflächenaufnahmen des hochbeanspruchten Dornes nach 1000 Schmiedezyklen; a) nitrierte Gesenke b) mit TiN beschichteten Gesenke c) mit TiN-TiCN-TiC (9 Lagen, Gesamtschichtdicke 5,4 µm) d) mit TiN-TiCN-TiC (9 Lagen, Gesamtdicke 2,6µm) [HUS02]

Aufgrund ihrer hohen Härte und des verbesserten Widerstandes gegen Verschleiß nehmen Keramiken und Hartmetalle eine Schlüsselposition ein. Bei verschleißkritische bzw. standmengenbestimmenden Bereichen von Schmiedegesenken werden Keramiken und Hartmetalle eingesetzt, um die Standmenge der Schmiedegesenke zu erhöhen.

Aufgrund der hohen Härte und die damit verbundene Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß wurde Al_2O_3 als Gesenkwerkstoff untersucht [ROM98]. Das Ergebnis zeigte, dass das Schmiedewerkzeug aus Al_2O_3 wegen der mangelnden Thermoschockbeständigkeit nach etwa 150 Schmiedezyklen zerstört wurde.

Siliziumnitrid, Sialon und Siliziumkarbid sind einige mögliche keramische Materialien, die bei der Warmumformung als Gesenkwerkstoffe angewendet werden können. Siliziumnitrid weisen eine extrem hohe Härte, eine hohe Zähigkeit und gute Verschleißbeständigkeit auf. Aufgrund der ausreichenden Temperaturwechselbeständigkeit, Warmhärte und Oxidationsbeständigkeit kann Siliziumnitrid bei Warmformgebung als Gesenkwerkstoff verwendet werden. Silizium-Aluminiumoxid-Nitrid (Sialon) besitzt neben die ähnlichen Eigenschaften wie Siliziumnitrid, auch eine bessere Beständigkeit gegen Oxidation bei hohen Temperaturen [ALT07]. Aus Abbildung 2.43 kann erkannt werden, dass mit der zunehmende Schmiedetemperatur das Materialabtrag am Dornradius steigt, wo die höchste Belastung im Schmiedevorgang auftritt. Siliziumnitrid zeigte im Vergleich zu Gesenken aus Werkzeugstahl (1.2365) deutlich geringerer Verschleiß. Der Verschleiß an Schmiedegesenke aus Keramik resultiert aus einer Kombination von chemischem und mechanischem Abtrag. Die Einsatzmöglichkeit von keramischen Werkstoffen bei Schmiedewerkzeuge wird von ihrer niedrigen Zugfestigkeit beschränkt.

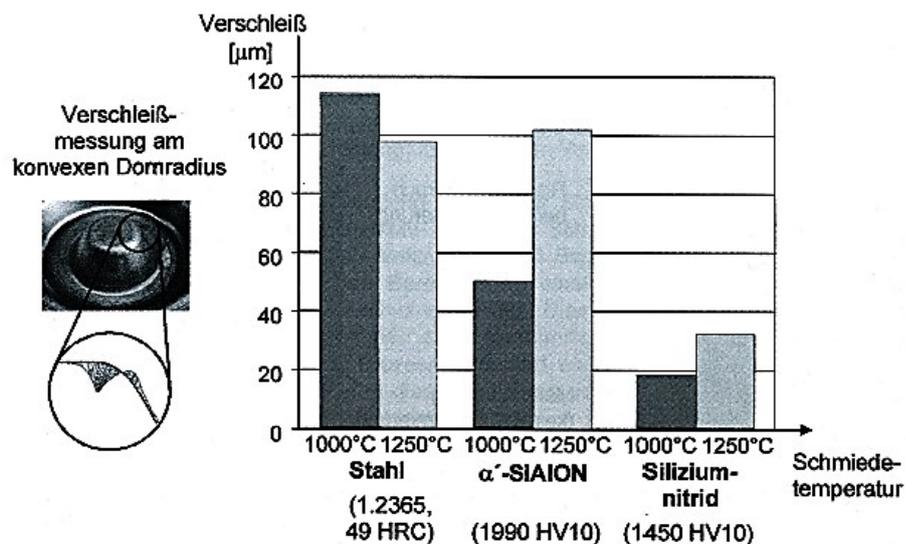


Abbildung 2-43: Verschleißfortschritt am Modellwerkzeug (nach 500 Schmiedezyklen, Kühlschmierung Delta F31) [BAR04]

Hartstoffe weisen eine hohe Härte, hohe Festigkeit und Zähigkeit, sowie bei hohen Temperaturen gute Thermoschock-, Oxidations- und Reaktionsstabilität auf. Die Einsatzbereich von Hartstoffen im Schmiedegesenke ist durch die Rissempfindlichkeit im konvexen Dornbereich begrenzt. Bei der Versuchsreihe [BAR01] mit der Kühlschmierung wurden bereits nach 218 Zyklen Rissbildungen und in Folge dessen Brüche beobachtet. Mögliche Ursachen für diese Risserscheinungen sind mangelnde Wärmewechselbeständigkeit oder unzureichende Ermüdungsfestigkeit. Zur Verringerung der Thermoschockbelastung wurden weitere Versuche ohne Schmierung durchgeführt. Bei diesen Versuchen ohne Kühlschmierung trat nach 500 Zyklen keine Rissbildung, sondern adhäsiver Verschleiß im Dornbereich auf (Abbildung 2.44).



Abbildung 2-44: WC-Mittelkorn Hartmetall mit 12% -Co als Bildner [BAR01]; links: Vorzeitiges Versagen nach 218 Zyklen mit Kühlschmierung, rechts: ohne Kühlschmierung nach 500 Zyklen mit adhäsiver Verschleiß im Dornbereich (Schmiedetemperatur 1200 °C) [BAR01]

3. Experimenteller Teil

3.1 Einleitung

Die Ermittlung des Werkzeugverschleißes kann mit Realversuchen unter Produktionsbedingungen oder mit Modellversuche unter Laborbedingungen untersucht werden. Die Betriebsversuche weisen eine Übertragbarkeit auf. Aber bei Betriebsversuche ist eine gezielte Variation von Parametern schwierig, so dass eine systematische Untersuchung des Gesamtkomplexes Verschleiß während der laufenden Produktion aufwändig und sehr kostspielig ist. Aus diesen Gründen ist es deshalb notwendig, Verfahren der Warmmassivumformung durch Modellversuche im Labor unter fertigungsähnlichen Bedingungen zu simulieren. Vorteile von Modellversuchen sind die Durchführung des Versuchs mit sehr einfachen Probengeometrien sowie eine systematische Versuchsdurchführung. Nachteile von Modellversuche sind die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da sie bei unterschiedlichen Prüfanlagen und Prüfprinzipien durchgeführt werden können.

Am Lehrstuhl für Umformtechnik in Leoben wurde vor einigen Jahren ein Rotatiostribometer (RT) gebaut und entwickelt [MAR06], um praxisnahe Untersuchungen von Reib- und Verschleißvorgänge beim isothermen Schmieden von Stahl durchzuführen. Das Wirkprinzip der Versuchsanlage liegt darin, dass ein ringförmiges Werkstück in einem Drehteller eingebettet wird und ein ringförmiges Werkzeug mit einer bestimmten Kraft von oben aufgedrückt wird. Gleichzeitig rotiert das Werkstück und somit entsteht eine Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück. Das übertragene Moment, das durch die Reibung des Werkstücks auf das Werkzeug übertragen wird, wird gemessen und somit kann die Reibung ermittelt werden. Für die Charakterisierung von unterschiedlichen Schmiedebedingungen wurde das Verschleißverhalten von fünf unterschiedlichen Schweißzusätzen getestet, wobei die Einflussfaktoren auf die Reibung und den Verschleiß wie der Anpressdruck, die Rotationsgeschwindigkeit, der Reibweg und die Temperatur variiert wurden.

3.2 Aufbau des Versuchs

3.2.1 Beschreibung des Rotationstribometers

Durch die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) können für den jeweiligen Verwendungszweck die Prüf- und Heizprogramme rasch und einfach eingegeben werden. Ein effizientes Arbeiten wird durch eine sehr einfache Probengeometrie erreicht, außerdem ist für den zutreffenden Versuchszweck ein unkompliziertes Anpassen der Maschine möglich. Die wichtigsten Teile der Anlage und ihre Anordnung sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Der Anpressdruck des Zylinders wird nur über ein Druckbegrenzungsventil (DBV) manuell eingestellt.

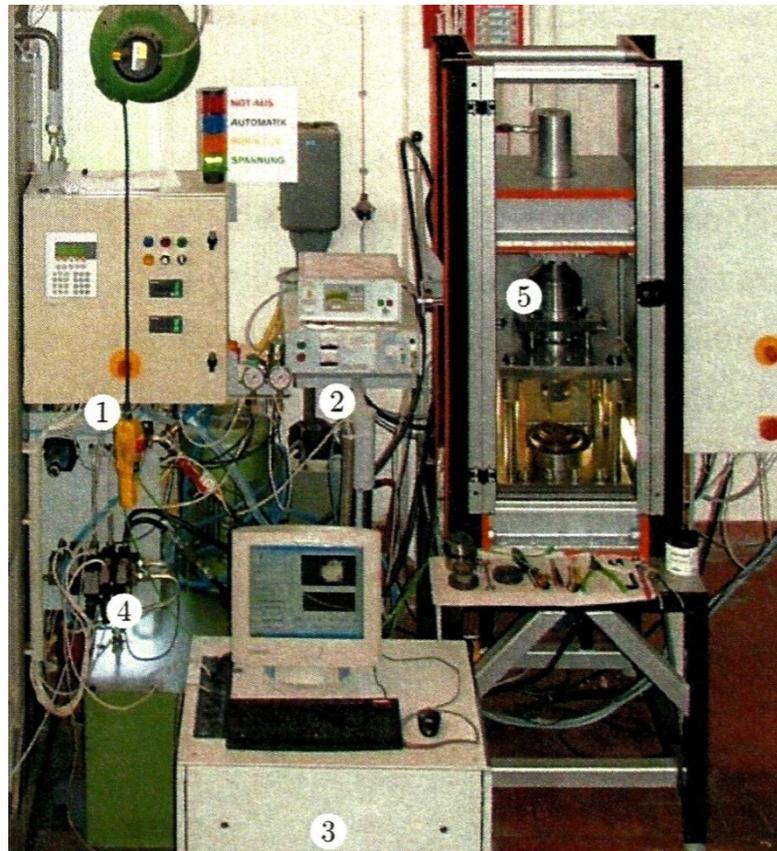


Abbildung 3-1: Wichtige Anlagenteile des Rotationstribometers 1) Schutzschrank mit speicherprogrammierbarer Steuerung 2) Hochfrequenzgenerator für Induktor 3) Messrechner (Datenerfassung) 4) Hydraulikventilblock mit Druckbegrenzungs- und Steuerventil 5) Rotationstribometer

Wie in Abbildung 3.1 dargestellt ist, besteht das Rotations-Schmiedetribometer aus mehreren Maschinenkomponenten: der Pressrahmen, der Motor und die Induktorhubvorrichtung werden vom Maschinengestell getragen.

Durch die Presse wird die Stauchkraft erzeugt, besteht aus Seitenständer, unterem und oberem Querhaupt und zwei Verstrebungen. Dazwischen befindet sich der Arbeitsraum, der durch die Schutztüre und zwei Schutzbleche abgegrenzt ist. Der Hydraulikzylinder, der vom Hydraulikaggregat versorgt wird, befindet sich am oberen Querhaupt. Die Höchstpresskraft beträgt 150 kN, der höchste Hydraulikdruck 250 bar.

Während die Stauchkraft durch einen Hydraulikzylinder von oben aufgebracht wird, wird die Drehbewegung mit einem 7,5 kW Drehmotor und einem unten angebrachten Winkelgetriebe eingebracht. Die Dreheinrichtung erzeugt das erforderliche Drehmoment. Das Winkelgetriebe, an dem der Motor befestigt ist, ist an das untere Pressquerhaupt angeflanscht.

In Abbildung 3.2 wird die Reibvorrichtung dargestellt, die sich im Arbeitsraum der Presse befindet. Zum Ausgleichen der Achsabweichungen des Hydraulikzylinders und der Reibvorrichtung wird einen Kugelkalotte benutzt.

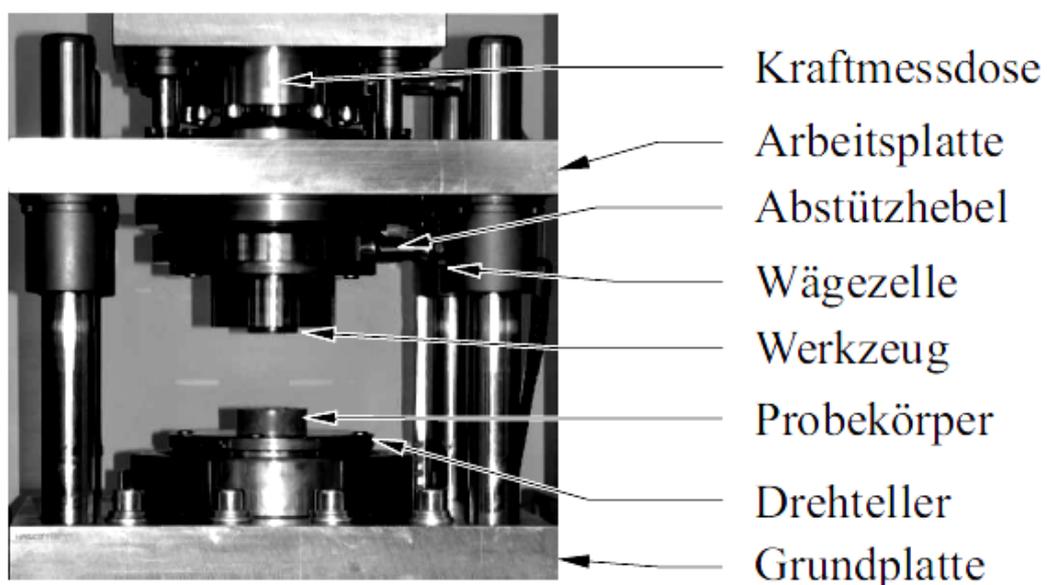


Abbildung 3-2: Reibvorrichtung des Rotationstribometers

Die Drehtellerwelle, auf die die Werkstückprobe eingespannt werden kann, befindet sich in der Grundplatte. Die Kraftmesseinrichtung liegt auf der Arbeitsplatte, die mit der Werkzeugwelle verbunden ist. Durch eine Kraftmessdose, die zwischen Arbeits- und Deckplatte montiert ist, wird die Presskraft und durch eine Wägezelle das Reibmoment festgestellt. Der Werkzeugwerkstoff kann mittels einer Heizmanschette aufgeheizt werden, die um das Werkzeug gelegt wird.

Ein gezieltes Erwärmen des Werkstücks ist durch die Induktionsanlage schnell möglich. Sie besteht aus einem Frequenzgenerator, der Erwärmungsstation und dazugehörigen Induktionsspule. Die Induktionsanlage ist in die SPS- Steuerung und die Sicherheitsschaltung eingebaut. Die Induktorhubvorrichtung besteht aus einem mit dem Maschinengestell verbundenen Hubtisch, der durch einen Hebel gesenkt und gehoben werden kann.

Die Maschinensteuerung und ein großer Teil der Maschinenelektrik befinden sich im Schaltschrank. Der Betriebszustand der Maschine wird mittels einer Leuchte signalisiert. Durch die außen befindliche Fernbedingung kann die Presse manuell bedient werden. Die Steuerung der Anlage wird durch eine im Schaltschrank eingebaute SPS- Steuerung durchgeführt.

Detaillierte Informationen zur Maschinengestaltung, Funktionsweise und Kenndaten des Rotations- Schmiedetribometers können in der Diplomarbeit von Herr MARKUT nachgelesen werden [MAR06].

3.2.2 Beschreibung des Messsystems

Zur Ermittlung der Anpresskraft (Normalkraft) bzw. Torsionskraft (Reibkraft) wird im Rotationstribometer Sensoren eingebaut. Für die Bestimmung der Normalkraft wird eine Kraftmessdose mit Zug- und Druckaufnehmer für dynamische und statische Anwendungen mit Vollbrückenausführung benutzt. Die Reibkraft bzw. Torsionskraft wird über eine Wägezelle mit hoher Querkraftstabilität in Vollbrückenausführung

gemessen. Dafür wurden jeweils eine Gelenköse an der Maschine und die andere an der Berechnung der Reibkraft dienenden Werkzeug festgestellt. Mit der Gleichung;

$$M_T = F \cdot a$$

kann dir Rückrechnung auf das Reibmoment M_T erfolgen (siehe Abbildung 3.3).

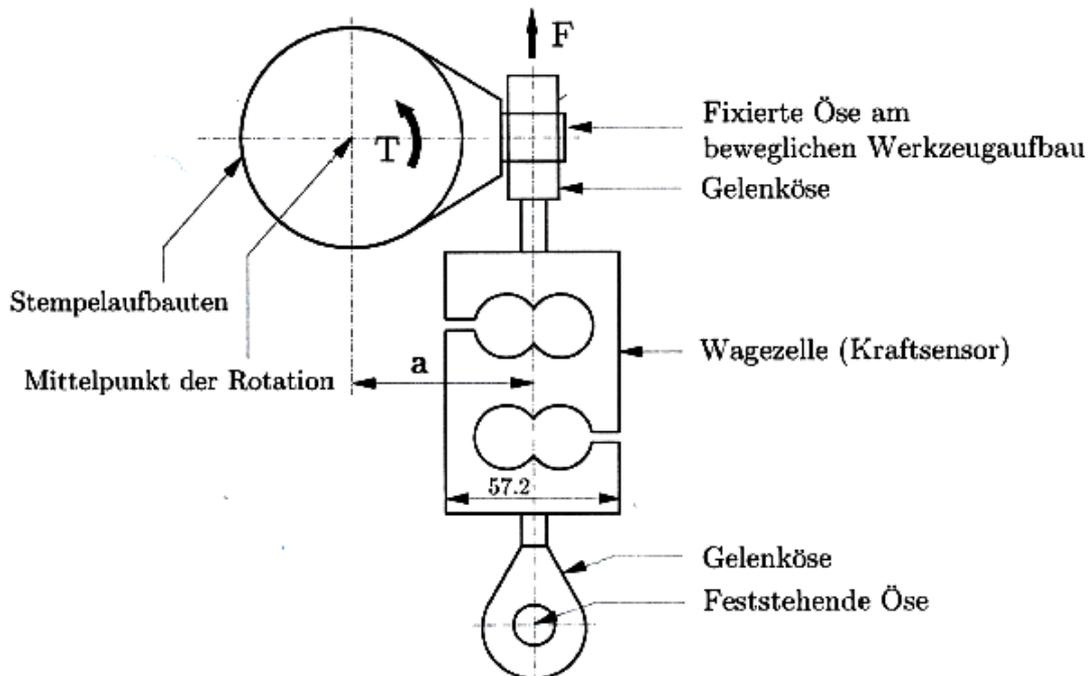


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Wägezelle im Rotationstriebometer [MAR06]

In Tabelle 3.1 werden die wichtigsten technischen Daten der verwendeten Kraftsensoren aufgelistet.

Tabelle 3-1: Technische Daten der Kraftmessdose und Wägezelle

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

Zur Aktivierung der Datenerfassung für jeden Versuch ist ein Triggerschalter vorgesehen, der sich an der Rückseite des Rotationstribometers befindet. Für die unterschiedliche Einstellung der Position ist eine Fixierschraube angebracht (hängt von der Proben- bzw. Werkzeuggeometrie ab). Vor der Stauchung des Werkstücks wird die Messung durch Auslösung des Schalters gestartet.

Zur Ermittlung der Kraft- und Geschwindigkeitsgrößen müssen die unterschiedlichen analogen Signale verwertet und umgewandelt werden. Die unterschiedlichen Signale, die von den Sensoren kommen, werden mittels Messverstärker in einem Gleichspannungsbereich von $\pm 5V$ für Messrechner umgewandelt. Die Umwandlung der analogen in digitale Signale erfolgt über eine im Rechner eingebaute PCI-Steckmesskarte, die 16 Eingänge besitzt. Eine systematische Darstellung der Messkette für die Versuchsanlage erfolgt in Abbildung 3.4. Die analogen Signale, die von den Sensoren kommen, werden zum erst verstärkt und anschließend in einen AD-Wandler Gleichspannung umgewandelt, die im Messrechner gespeichert wird.

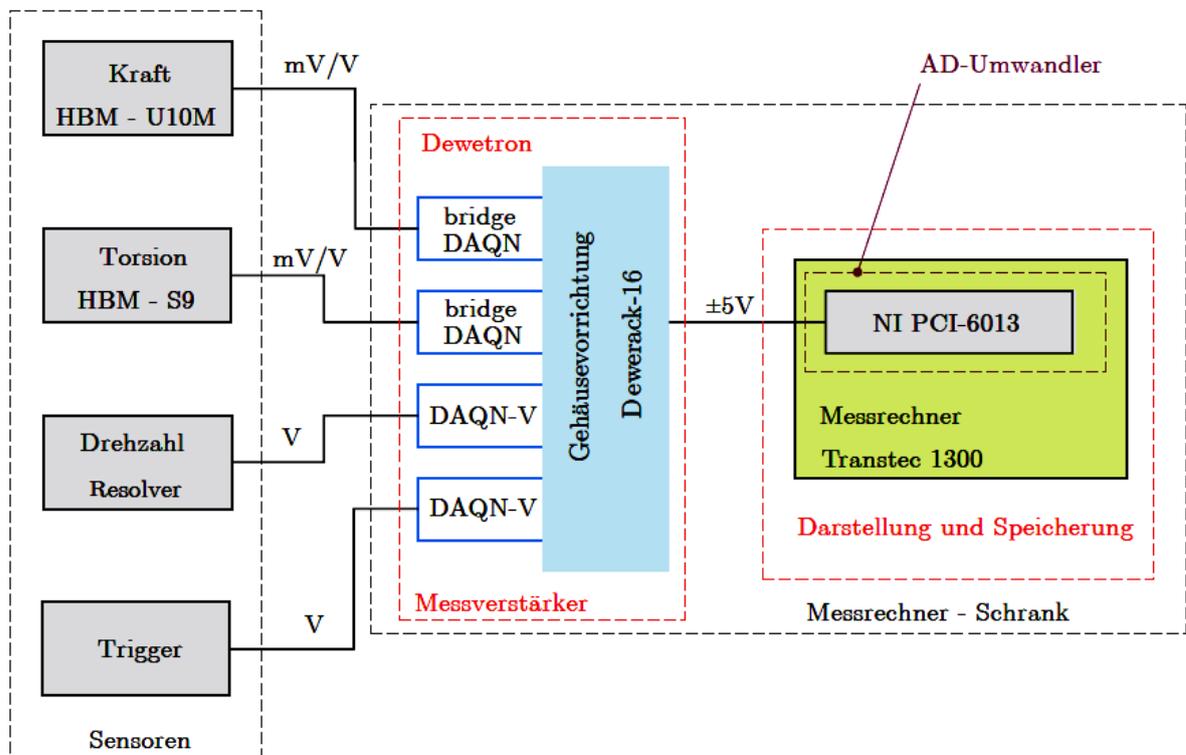


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Messkette für das Rotationstribometer.

Über einen auf Brückenbasis arbeitenden Gleichspannungsverstärker werden die Kennwerte durch die Kraftsensoren umgewandelt. Nachdem Start des Messprogrammes und Auslösung des Triggers wird vor der Messaufnahme automatisch ein Nullabgleich der Kraftsensoren durchgeführt. Dabei werden externe Einflussfaktoren ausgeschaltet und eine genaue Messung ermöglicht. Die technischen Daten für Verstärker werden in Tabelle 3.2 dargestellt. In Tabelle 3.3 sind die wichtigsten Komponenten der Messanlage aufgelistet.

Tabelle 3-2: Technische Daten der Verstärker von DEWETRON.

Technische Daten	DAQN - Brige	DAQN - V
Art	Gleichspannung und Präzissionsspannungs-Trägerfrequenzverstärker	
Sensoren	DMS Sensoren, Vollbrücke	Sensoren
Eingangsimpedanz	> 100 MW	> 10 MΩ
Messbereich	± 0,1 gestuft bis ± 5 mV/V	± 0,1 gestuft bis ± 50 V
Genauigkeit	±0,05 %	±0,05 %
Ausgangssignal	± 5 V	± 5 V

Tabelle 3-3: Kenndaten der Messanlage.

Komponente	Bezeichnung	Anmerkung
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	

Das Interface wurde unter Verwendung von *Lab View* (National Instruments, USA) programmiert. Vor Beginn der Messung müssen gewählten Prozessparameter über die Eingabefelder eingegeben werden:

Messfrequenz:

Messfrequenz bzw. die Taktrate (in [Hz]) der Datenerfassung bei der Versuchsdurchführung hängt von der Rotationsgeschwindigkeit ab. (Bei hoher Rotationsgeschwindigkeit muss eine hohe Messfrequenz gewählt werden.)

Messpunkt:

Während der Messdauer zu erfassenden Messpunktanzahl.

Timer Offset:

Eine Verzögerung der Messung, wenn der Messvorgang durch den Trigger gestartet wird.

3.2.3 Geometrie und die chemische Zusammensetzung der Werkzeuge und der Werkstücke

Zur Charakterisierung des Verschleißverhaltens werden als Werkzeugwerkstoffe zwei unterschiedliche Warmarbeitsstähle mit den Handelsnamen W300 und W360 verwendet. Die Geometrie ist zylinderförmig, mit einem Außendurchmesser $d_A = 25$ mm und einer Höhe $h = 80$ mm. Arbeitsfläche wird vor jedem Versuch mittels CNC-Maschine abgedreht und geschliffen.

Der Schmiedewerkstoff ist ein MnSi- legierter Vergütungsstahl (Material-Nr. 1.5122) von Typ 37MnSi5. Die Geometrie ist zylinderförmig, mit einem Außendurchmesser $d_A = 20$ mm und einer Höhe $h = 80$ mm. Der Schmiedewerkstoff wird vor jeder Versuchsdurchführung auf die konventionelle Schmiedetemperatur 1200 °C erhitzt und bis zum Versuchsstart homogen bei dieser Temperatur eine Haltezeit von 10 s gehalten.

Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkzeugstähle, des Schmiedewerkstückes und der an die Werkzeugoberfläche aufgebrachten Schweißzusatzlegierungen sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Tabelle 3-4: Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe.

Stahlsorte	Werkst. Nr. nach DIN8585	Legierungsgehalt in Mass.-%							
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Basis
37MnSi5	1.5122	0,37	1,25	1,25	-	-	-	-	Fe
Böhler W300	1.2343	0,38	1,10	0,40	5,00	1,30	0,40	-	Fe
Böhler W360	-	0,50	0,20	0,25	4,50	3,00	0,55	-	Fe
Capilla 734	E3-UM-40-PT	0,15	-	-	6,50	3,50	-	-	Fe
Capilla 733	E3-UM-50-T	0,30	-	-	2,20		0,60	4,20	Fe
Carbo S21	E20-UM-300-CKTZ	0,30	-	-	28,00	5,50	-	-	Co
UTP A DUR 600	W/MSG 6-GZ-60-S	0,5	3,00	0,50	9,50	-	-	-	Fe
CastoWIG 45303 W	WSG 4 – 60 -S	max 1	0,45	max 0,4	4,00	9,00	2,00	1,8	Fe

In Tabelle 3.5 sind die originalen Härtewerte der verwendeten Materialien aufgelistet.

In Abbildung 3.5 werden die Materialeigenschaften der verwendeten Böhler Stählen W300 und W360 dargestellt. Der Böhler Werkzeugstahl W360 zeigt deutlich bessere Eigenschaften bei hohen Temperaturen sowie bessere Warmfestigkeit, Warmzähigkeit, Warmverschleißbeständigkeit und Bearbeitbarkeit. Auch die bessere Anlassbeständigkeit und die im Vergleich zu üblichen Werkzeugstählen (Siehe Abbildung 3.6) sind ein wesentlicher Vorteil dieser Stahlqualität.

Tabelle 3-5: Originale Härte der verwendeten Werkzeugwerkstoffen und der Schweißzusätzen

Werkstoff	W300	W360	734	733	CarboS21	UTP A DUR 600	CastoWig 45303 W
Originale Härte (HRC)	50-55	52-57	40-43	45-48	28-30	54-60	55-63

BÖHLER Marke / Grade	Warmfestigkeit High temperature strength	Warmzähigkeit High temp. toughness	Warmverschleißwiderstand High temp. wear resistance	Bearbeitbarkeit Machinability
BÖHLER W100 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W300 ISODISC®	Red	Red	Red	Red
BÖHLER W300 ISOBLOC®	Red	Red	Red	Red
BÖHLER W302 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W302 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W303 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W303 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W320 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W321 ISODISC®	Orange	Orange	Orange	Orange
BÖHLER W360 ISOBLOC®	Orange	Orange	Orange	Orange

Abbildung 3-5: Vergleich der Eigenschaften unterschiedlicher Werkzeugstähle von Böhler [BOH05]

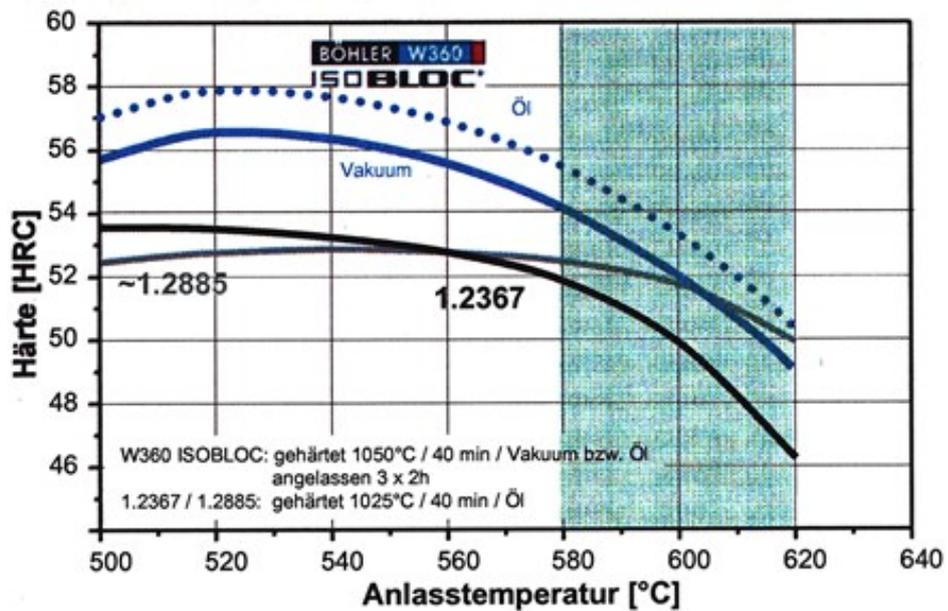


Abbildung 3-6: Vergleich der Anlasskurven üblicher Werkzeugstähle zum Böhler W360 [MAY11]

Die typischen Eigenschaften von verwendeten Schweißzusätzen können wie folgt beschrieben werden:

- **Capilla 734:** ist eine basisch umhüllte Stabelektrode, die eine hohe Zähigkeit, gute Warmfestigkeit (bis 550 °C) und einen großen Widerstand gegen Druck- und Schlagbeanspruchung auszeichnet.
- **Capilla 733:** ist eine wechselstrom verschweißbare Hochleistungselektrode mit ca. 120% Ausbringung zur Ausbesserung von artgleichen Warmarbeitswerkzeugen und zur Auftragung von Kanten oder Flächen auf Werkzeuge aus niedriglegiertem Stahl mit höherer Festigkeit.
- **CarboS21:** ist eine Kobaltbasislegierung, die eine gute Zähigkeit und Korrosionsbeständigkeit, gute Temperaturwechselbeständigkeit sowie ein warmfestes Schweißgut aufweist.
- **UTP A DUR 600:** wird an Bauteilen, die starker Schlag- und mittlerer Abrasionsbeanspruchung ausgesetzt sind, verwendet. Das Schweißgut ist, trotz hoher Härte, zäh und rissfest sowie schnitthaltig.
- **CastoWIG 45303 W:** zeigt durch martensitisches Schweißgut mit eingelagerten Karbiden und Restaustenit eine gute Warmhärte, Anlassbeständigkeit und Zähigkeit sowie eine hohe Zunderbeständigkeit auf und ist wärmebehandelbar.

Bevor die Schweißzusätze auf den Werkzeugwerkstoff aufgebracht wurden, werden die Werkzeugwerkstoffe auf 400 °C vorgewärmt, um beim Schweißen in der wärmebeeinflussten Zone (WEZ) die Bildung einer spröden und rissanfälligen Zone zu vermeiden. Die Vorwärmtemperaturen für die verwendeten Schweißzusätze werden entsprechend dem Werkstoffdatenblatt gewählt. Die empfohlenen Werte liegen zwischen 400 – 450 °C. Das Auftragschweißen wird mit einem MAG-Schweißgerät von linker Seite nach rechter Seite des Werkzeuges durchgeführt (siehe Abbildung 3.7). Nachdem Schweißen werden die Proben mittels CNC-Maschine abgedreht und geschliffen, um die Oberfläche der Probe glatt und sauber zu

gestalten. Wie in Tabelle 3.4 aufgelistet wird, werden als Schweißzusätze Capilla 734, Capilla733, CarboS21, CastoWIG 45303W und UTP A DUR600 verwendet.

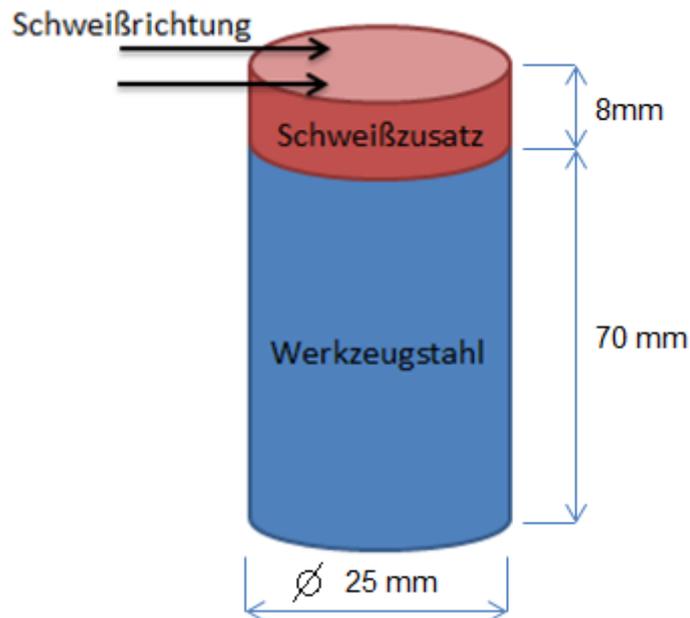


Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Schweißbereichs.

3.2.4 Ermittlung der Reibzahl

Im Allgemein unterscheidet man die Experimente für die Reibungs- und/oder Verschleißuntersuchungen. In den durchgeführten Versuchen, bei denen der Verschleiß aufgetreten ist, werden die einzelnen Verschleißarten mittels Reibungsexperimenten bestimmt. Diese werden an der institutseigenen Reibvorrichtung bestimmt. Beim Schmieden kann der Wert der Reibung durch direkte oder indirekte Methoden bestimmt werden. An Hand der direkten Methode ist es möglich, Aussagen über örtlichen Zustand der Reibung zu erlauben und indirekte Methoden bieten einen gemittelten Wert über die gesamte Umformzone [BUH72].

- **Direkte Methoden zur Bestimmung des Reibwerts:** Die Bestimmung der Kontaktnormalspannungen wird in einer kleinen Teilfläche der Wirkfuge durchgeführt, wobei die Spannungen annähernd als konstant angenommen werden und somit die lokalen Reibzahlen hervorgerufen.

- **Indirekte Methoden zur Bestimmung des Reibwerts:** Die über eine gesamte Bruchfläche ermittelte Reibzahl wird durch die Veränderung bestimmter Parameter (z.B. Reaktionskraft oder Probengeometrie) geschlossen.

3.2.4.1 Reibmodelle

In der Literatur findet man unterschiedliche Formeln, mit denen man die Reibung exakt darstellen kann. Somit ist es möglich das Maximum übertragene Schubspannung in einer Reibgrenzfläche in Relation zur Ursache festzustellen [HER93].

3.2.4.1.1 Coloumb'sche Reibung

Das Reibgesetz nach Coloumb aus dem Jahr 1781 ist wohl bekanntestes Modell. Dabei wird der Zusammenhang zwischen Normal- und Reibkraft bzw. Kontaktnormalspannung und Reibschubspannung über die Reibzahl beschrieben:

$$\tau_R = \mu \cdot \sigma_N$$

Die Reibzahl μ kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen, dabei bedeuten $\mu = 0$ reines Gleiten und $\mu = 1$ vollständige Haftung [BER98]. Bei der Massivumformung ist ersichtlich, dass eine Betrachtung über die Reibzahl μ nicht genug ist. Wenn die Normalspannung σ_N die Fließgrenze k_f erreicht oder überschreitet, sinkt die Reibzahl dennoch, trotz der Haftung. Die Schubfließgrenze wird von der Schubspannung nicht überschritten, d.h. sie bleibt konstant. Da aber die Normalspannung σ_N steigt, muss μ zur Aufrechthaltung der mathematischen Formel sinken. Weitere Experimenten haben gezeigt, dass das Coloumb'sche Modell nur dann Geltung hat, wenn die reale Kontaktfläche in Relation mit der Normalkraft proportional ansteigt [BOW59].

3.2.4.1.2 Reibfaktormodell

Die Annahme, dass die maximal übertragene Reibschubspannung τ_R nicht die kritische Schubspannung τ_{max} des weicheren Partners übersteigen kann, ist der

Ausgangspunkt für das Reibfaktormodell. Die Schubfließgrenze k wird dabei durch die Schubspannung τ_{max} dargestellt. Somit wird folgende Relation bestimmt:

$$\tau_R = m \cdot k$$

Der Reibfaktor m kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen, das bedeutet, dass bei $m = 0$ keine Reibung und $m = 1$ vollständige Haftung auftritt. Für die Bestimmung der Festkörperreibung und den Grenzfall der Haftung eignet sich diese Reibgesetz sehr gut [BER98].

3.2.4.1.3 Asymptotisches Reibmodell

Das Asymptotisches Reibmodell, das zum Ersten Mal von Finnie und Shaw [FIN56] qualitativ beschrieben wurde, zeigt die Verbindung des Coloumb'schen Modells mit dem Reibungsfaktorgesetz. In Zerspannungsvorgängen kann durch Reibungsmessungen aufgezeigt werden, dass die Reibspannung im Bereich von kleinen Kontaktnormalspannungen linear ansteigt. Die Reibspannung nähert sich asymptotisch der Scherfestigkeit des weicheren Werkstoffs, wenn die Kontaktnormalspannung zunimmt. Diese stellt ein Maximum für die Reibspannung dar. Der Grund dieses Zustands ist der Anstieg der reellen Kontaktfläche mit der ansteigenden Normalspannung [BUC06].

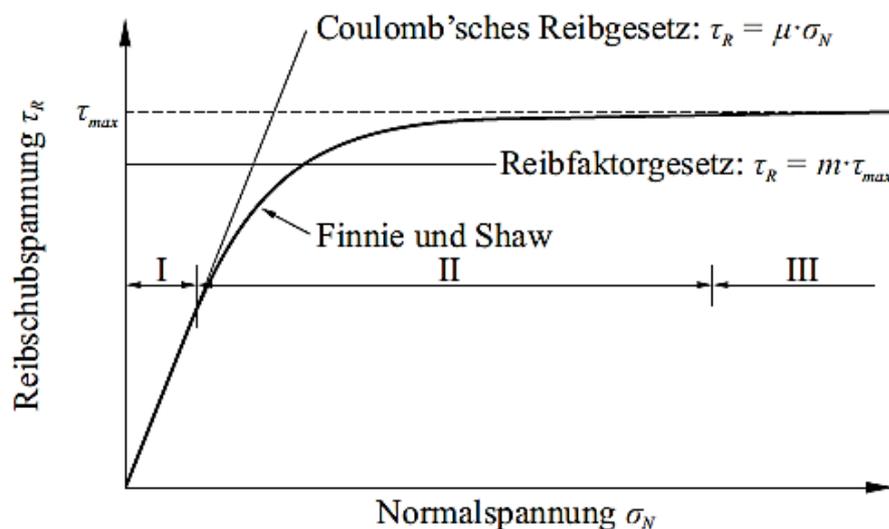


Abbildung 3-8: Reibgesetz nach Finnie und Shaw

3.3 Versuchsablauf

3.3.1 Einbau

Im oberflächennahen Bereich des Werkzeuges und Werkstoffs werden mit Hilfe eines Punkschweißgeräts zwei Thermoelemente vom Typ K eingesetzt, um die Temperatur des Werkzeuges und des Werkstücks bei der Versuchsdurchführung genau messen zu können. Das Werkzeug und der Werkstoff werden in das Rotationstribometer verschraubt und anschließend die Induktionsspule eingesetzt.

3.3.2 Versuchsdurchführung

Der gewünschte Anpressdruck wird vor der Versuchsdurchführung über ein Druckbegrenzungsventil (DBV) manuell eingestellt. Die Versuchsdurchführung wird durch das Drücken der geeigneten Taste am Messrechner gestartet. Das Werkstück wird auf die gewählte Temperatur 1200 °C aufgeheizt und während einer Haltezeit von 10 s konstant gehalten. Durch die Aufbringung der Anpresskraft beginnt die Rotation des Drehtellers mit eingegebener Rotationsgeschwindigkeit. In Abbildung 3.9 (rechts) werden die Aufnahmen von der Versuchsdurchführung dargestellt. Die Aufzeichnung der Rotationsgeschwindigkeit, der Normalkraft und der Reibkraft erfolgt durch das Messsystem. Nach dem Ende der Versuchsdurchführung mit eingegebenen Versuchsparametern (z.B. der Reibweg) wird die Arbeitsplatte anschließend in die Ausgangsposition zurückgebracht. Die eingestellten Versuchsparameter für Vor- und Detailversuchen sind in Tabelle 3.7 und 3.8 aufgelistet.

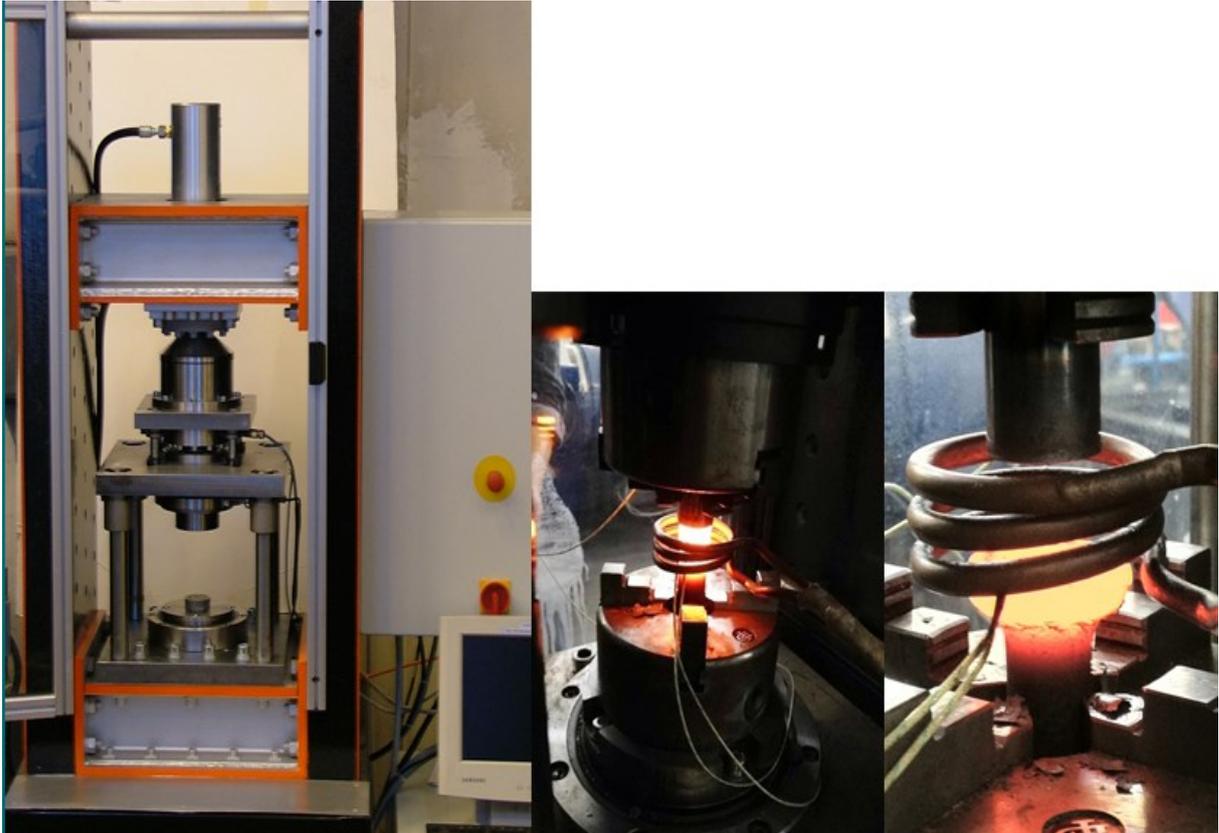


Abbildung 3-9: Überblick auf die Versuchsdurchführung.

3.3.3 Nachbearbeiten

Der erwärmte Werkstoff und das durch Berührung des Werkstoffs erhitzte Werkzeug werden ausgebaut und an Luft abgekühlt. Nach der Abkühlung der Proben werden die auf den Werkstoff und das Werkzeug eingesetzten Thermoelemente mittels einer Zange getrennt. Anschließend werden die Proben in einem etikettierten Probebehälter verwahrt.

3.4 Planung der Versuche

3.4.1 Vorversuche

Um die Versuchsparameter (z.B. Anpressdruck und Reibweg) für die Detailversuche festzustellen und um die endgültigen Ergebnisse und die Änderung bzw. die Schädigung der Werkzeugoberfläche abschätzen zu können, wurden Vorversuche durchgeführt. Bevor die Werkzeug- und Werkstoffproben in das Rotationstribometer

verschraubt wurden, wurden die Thermoelemente auf das Werkzeug und den Werkstoff aufgeschweißt, um die genaue Temperatur der Werkzeug- und der Werkstückoberfläche während des Versuchs messen zu können. Die verwendeten Versuchsparameter für die Vorversuche sind in Tabelle 3.7 aufgelistet.

Der Anpressdruck wurde erst mittels eines Druckbegrenzungsventils (DBV) auf etwa 25 kN eingestellt und bei jedem weiteren Versuch durch die Umdrehung des DBVs um jeweils 10 kN erhöht. Der Reibweg wurde für jeden Versuch durch das SPS manuell eingestellt. Nach jedem Versuch wurde die neue Werkstoffprobe für die nächste Versuchsdurchführung auf die gewählte Temperatur von 1200 °C aufgeheizt und während der Haltezeit von 10 s konstant auf dieser Temperatur gehalten.

Tabelle 3-6: Versuchsparameter für die Vorversuche.

Tribosystem	Werkzeuge	Böhler W300, W360
	Schweißzusätze	Capilla 734, Capilla 733, CarboS21
	Schmiedewerkstück	37MnSi5
Beanspruchungskollektiv	Anpressdruck (kN)	25, 35, 45
	Reibweg (mm)	30, 50, 80
	Reibgeschwindigkeit (mm/s)	45
	Temperatur (°C)	1200

3.4.2 Detailversuche

Um das Verhalten der Werkzeugoberfläche gegen den Verschleiß mit dem längeren Kontakt bzw. der Berührung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstoff zu betrachten, wurden die Detailversuche mit einem längeren Reibweg und einem höheren Anpressdruck durchgeführt. Bei den Detailversuchen wurden unterschiedliche Variationen der Reibgeschwindigkeit, des Anpressdrucks, des Reibweges und der Temperatur untersucht, um den Einfluss dieser Parameter auf das Verschleißverhalten der Werkzeugoberfläche zu betrachten. Die verwendeten Variationen der Versuchsparameter sind in Tabelle 3.8 aufgelistet.

Tabelle 3-7: Versuchsparameter für die Detailversuche

Tribosystem	Werkzeuge	Böhler W300, W360
	Schweißzusätze	UTP A DUR 600, CastoWIG 45303 W
	Schmiedestück	37MnSi5
Beanspruchungskollektiv	Anpressdruck (kN)	etwa 15, 25 ,35, 45
	Reibgeschwindigkeit (mm/s)	10, 20, 30, 45
	Reibweg (mm)	50, 100, 150, 200
	Temperatur (°C)	1200, 1000

3.5 Auswertung

Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben werden während der Versuchsdurchführung die Reibkraft, die Normalkraft und die Rotationsgeschwindigkeit ermittelt. Aus diesen Kennwerten wird im Folgenden die mittlere Reibspannung ($\bar{\tau}$), die mittlere Normalspannung ($\bar{\sigma}$) und der Reibweg ermittelt und somit kann daraufhin auf der mittleren Reibzahl zurückgerechnet werden. Durch diese am Messrechner aufgezeichneten Messkurven werden die mittlere Normalspannung und die mittlere Reibspannung bestimmt. Aufgrund der Verzögerungen und Schwankungen beim Anlaufen des Motors soll die Auswertung der Ergebnisse in einem stationären Bereich, der der Bereich innerhalb 90% der Nenngeschwindigkeit V_{soll} angenommen wird, begrenzt werden (siehe Abbildung 3.10). t_a und t_e zeigen diesen Anfang und Ende des stationären Bereichs und f ist Abtastrate der Datenerfassung.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\left(\frac{t_e - t_a}{f}\right)} \sum_{i=t_a}^{t_e} \sigma_i$$

$$\bar{\tau} = \frac{1}{\left(\frac{t_e - t_a}{f}\right)} \sum_{i=t_a}^{t_e} \tau_i$$

$$\bar{\mu} = \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}}$$

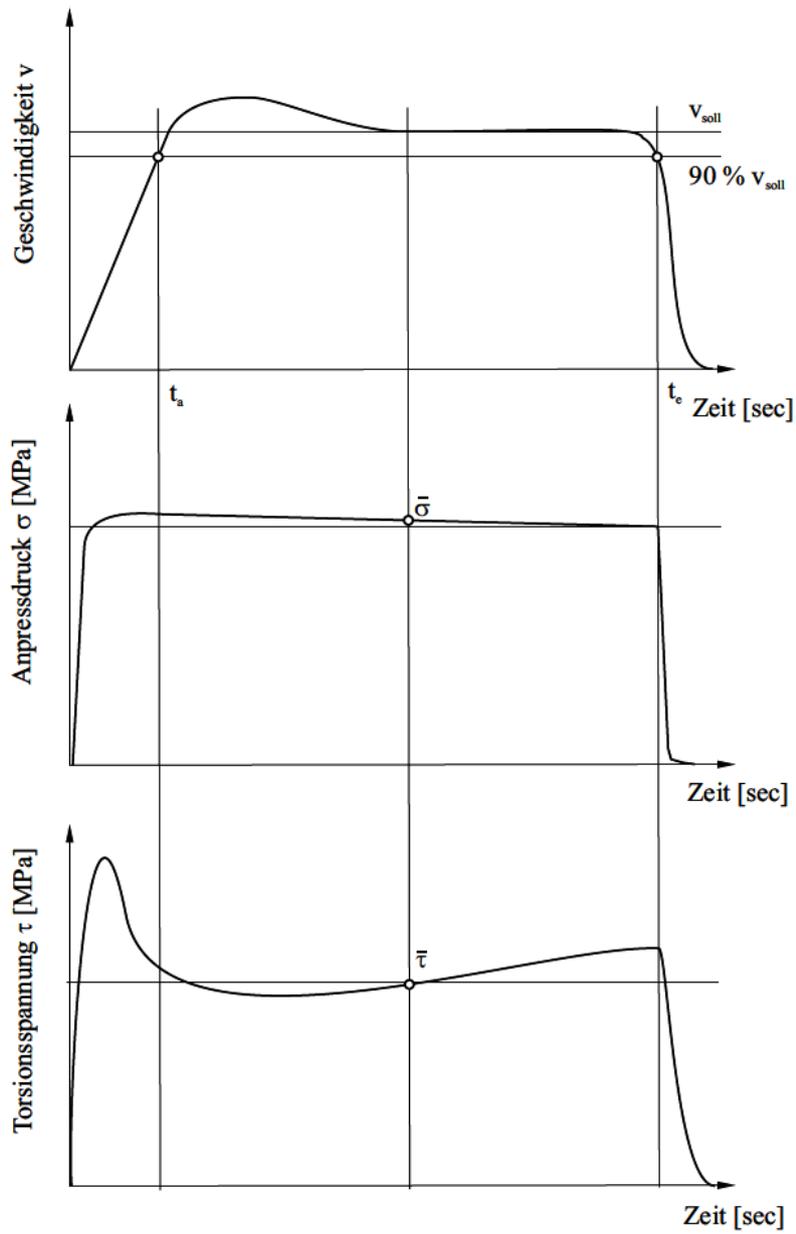


Abbildung 3-10: Schematische Aufzeichnung der Auswertung der Messkurven [WEB07]

3.6 Experimentelle Ergebnisse

3.6.1 Vorversuche

Um die verwendeten Werkzeugstähle und Schweißzusätze vergleichen zu können, wird jeder Versuch mit denselben Versuchsparameter durchgeführt: der Anpressdruck: 25 kN, die Reibgeschwindigkeit: 45 mm/s, der Reibweg: 50mm (etwa zwei Umdrehung), die Schmiedetemperatur: 1200 °C. Zur Ermittlung des Reibwerts wurden die jede Versuch dreimal durchgeführt und die Ergebnisse verglichen.

In Abbildung 3.11 werden die mittlere Reibzahl der Werkzeugstähle Böhler W300, W360 und die Schweißzusätze Capilla 734, Capilla733, CarboS21 dargestellt. Der höchste Reibzahlwert wird bei CarboS21 erreicht und wird dann über die W300, Capilla 733, Capilla734 bis W360 geringer.

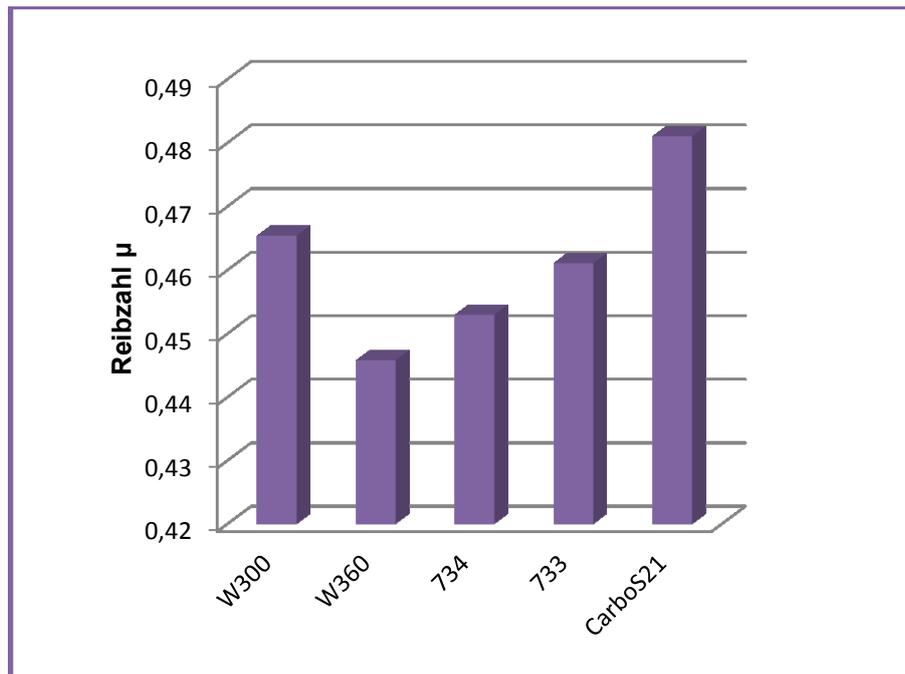


Abbildung 3-11: Die mittlere Reibzahl der verwendeten Materialien.

In Abbildung 3.12 werden die Aufnahmen der untersuchten Oberfläche der Materialien nach der Versuchsdurchführung dargestellt. An der Oberfläche des Schweißzusatz CarboS21 ist eine deutliche Schädigung, die durch intensive Abrasion hervorgerufen wurde, ersichtlich. An der Oberfläche des Werkzeugstahls W300 kann ein deutlicher adhäsiver Verschleiß erkannt werden. Im Vergleich zu

Schweißzusätzen weisen die Warmarbeitstähle geringeren adhäsiven Verschleiß an der Oberfläche auf. Die beste Verschleißbeständigkeit weist der Werkzeugstahl Böhler W360 auf. Der Werkzeugverschleiß kann durch die Gewichtsänderung der Probe gemessen werden. Dafür muss jede Probe vor und nach der Versuchsdurchführung gewogen werden. Aufgrund des geringeren Verschleißes der Werkzeugoberfläche, der sich durch die hohen Versuchstemperatur, den kurzen Reibweg und/oder niedrigen Anpressdruck ergeben kann, konnte der Verschleiß nicht durch die Gewichtsänderung der Probe bestimmt und mit anderen Proben verglichen werden.

In Tabelle 3.9 sind die originale Härte und die nach der Versuchsdurchführung an der Oberfläche gemessene Härte aufgelistet. Die höchste Härte des Oberflächenbereiches weist der Werkzeugstahl Böhler W360. Der Schweißzusatz CastoS21 zeigte die geringste Härte an der Oberfläche. Der größten Härteverlust im Oberflächenbereich zwischen vor und nach der Versuchsdurchführung weist der Böhler W300 auf.

Tabelle 3-8: Die Messung der Härtewerte vor und nach der Versuchsdurchführung.

Werkstoff	W300	W360	734	733	CarboS21
Originale Härte (HV1)	586	650	472	487	353
Härte nach dem Versuch (HV1)	476	545	412	422	311
Relative Abnahme der Härte ΔHV (%)	18,77	16,15	12,71	15,60	11,89

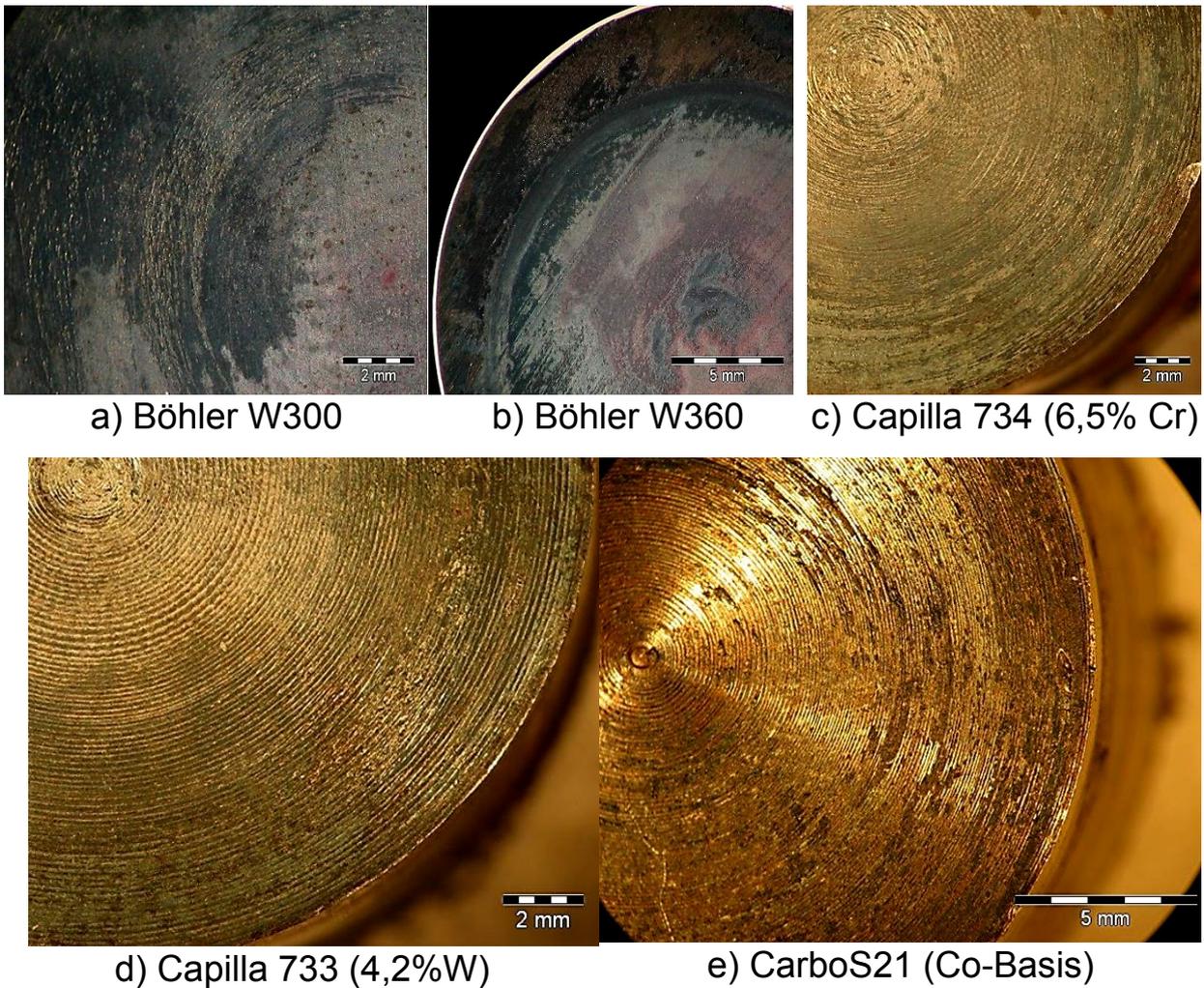


Abbildung 3-12: Oberflächenzustände nach Versuchsende für die unterschiedliche Werkzeugmaterialien; Versuchsbedingungen: Anpressdruck: 25 kN, relativ Geschwindigkeit: 45 mm/s, Reibweg: 50mm (etwa. zwei Umdrehung), Temperatur: 1200 °C

In Abbildung 3.13 wird das Gefüge der verwendeten Materialien dargestellt. Aufgrund der geringeren Reibwege zwischen Reibpartnern und/oder der niedrigen Kontaktzeit zwischen den Reibpartnern tritt im oberflächennahen Bereich der Materialien keine deutliche Gefügeänderung auf.

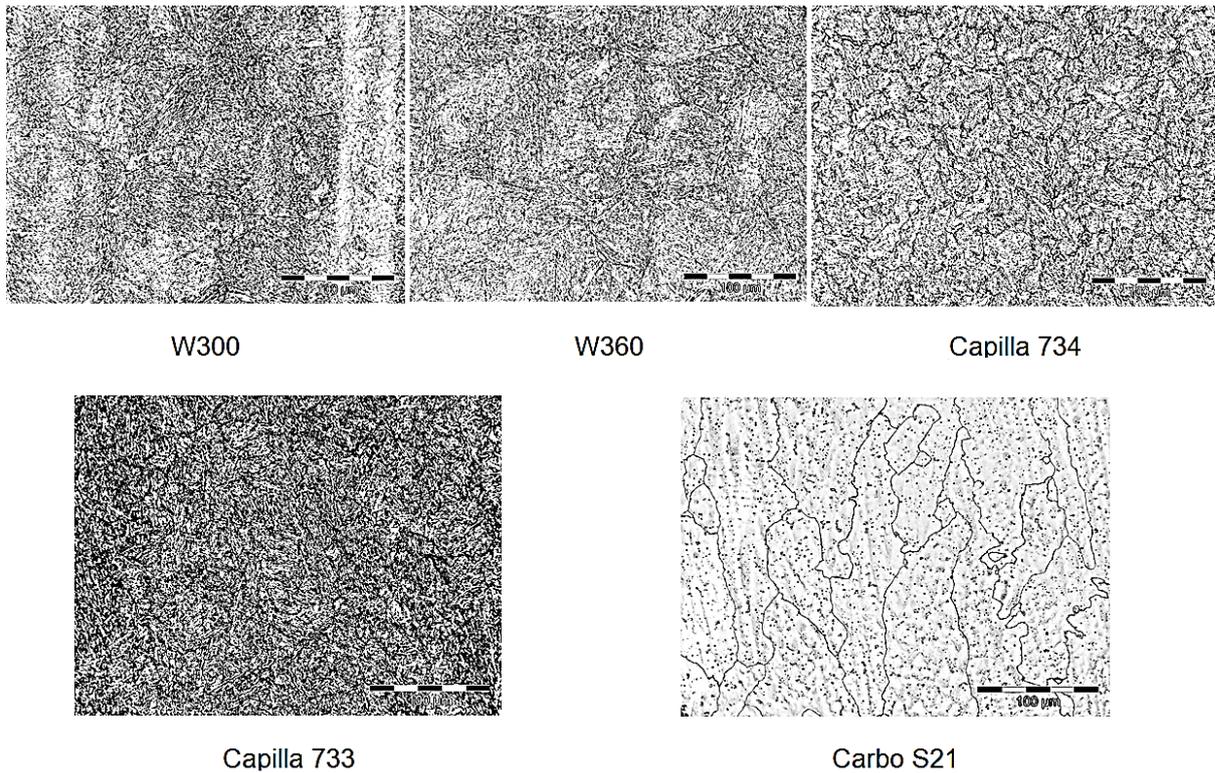


Abbildung 3-13: Mikrostrukturaufnahmen der verwendeten Werkzeugmaterialien

3.6.2 Detailversuche

Um die verwendeten Werkzeugstähle und Schweißzusätze vergleichen zu können, wird jeder Versuch mit denselben Versuchsparameter durchgeführt: der Anpressdruck; 35 kN (80 bar), die Reibgeschwindigkeit: 45 mm/s, der Reibweg: 200 mm (etwa 8 Umdrehung), die Schmiedetemperatur: 1200 °C.

Wie in Abbildung 3.14 dargestellt kann der Verlauf der Normalspannung auf den ersten 50 mm des Reibweges als steigend und dann bis zum Ende der Versuchsdurchführung als konstant angesehen werden. Die höchste Normalspannung zeigt die Schweißzusatzwerkstoffe DUR600.

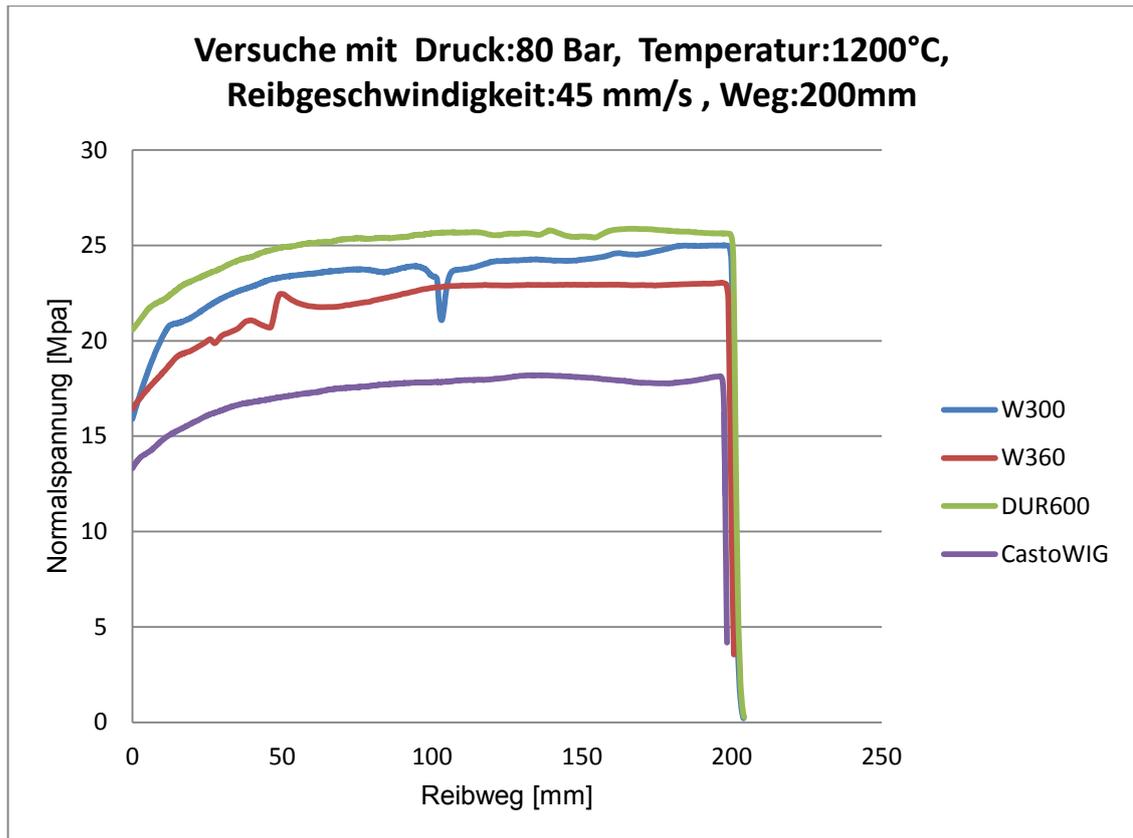


Abbildung 3-14: Verlauf der Normalspannung über den Reibweg der verwendeten Materialien

Die Reibspannung kann als steigend angesehen werden. Aufgrund der zunehmenden Temperatur der Werkzeugoberfläche, die durch den Kontakt zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück entsteht, steigt die Reibung an (Abbildung 3.15), während die Normalspannung in diesem Bereich als konstant angesehen werden kann. Am Verlauf der Reibspannungen erkennt man zu Beginn eine ausgeprägte Kurvenkrümmung und im weiteren Verlauf einen konstanten Anstieg der Kurve, dies kann auf Grund der steigenden Flächenpressung und der steigenden Relativgeschwindigkeit erklärt werden.

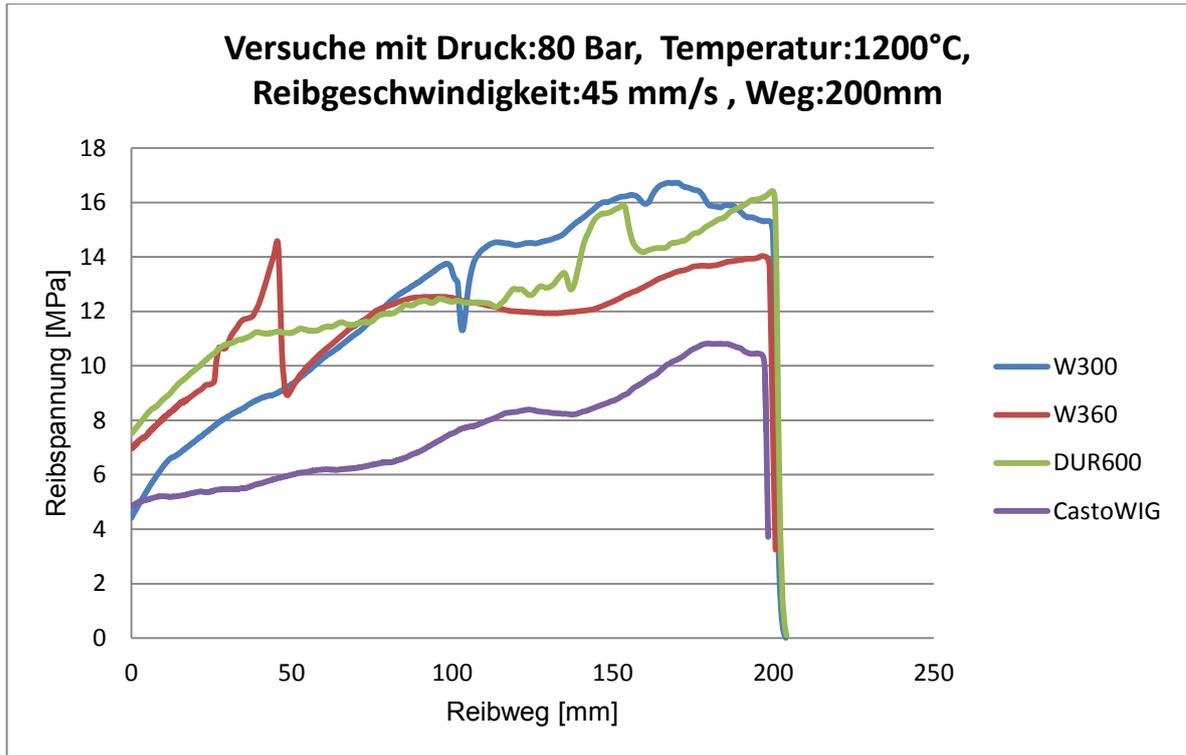


Abbildung 3-15: Verlauf der Reibspannung über den Reibweg.

Der Schweißzusatz DUR600 zeigte die höchste und CastoWIG die niedrigste Reibzahl der vier Proben auf. Die Werte der beiden Werkzeugstähle W300 und W360 liegen im oberen Drittel zwischen beiden Schweißzusätzen (Abbildung 3.16).

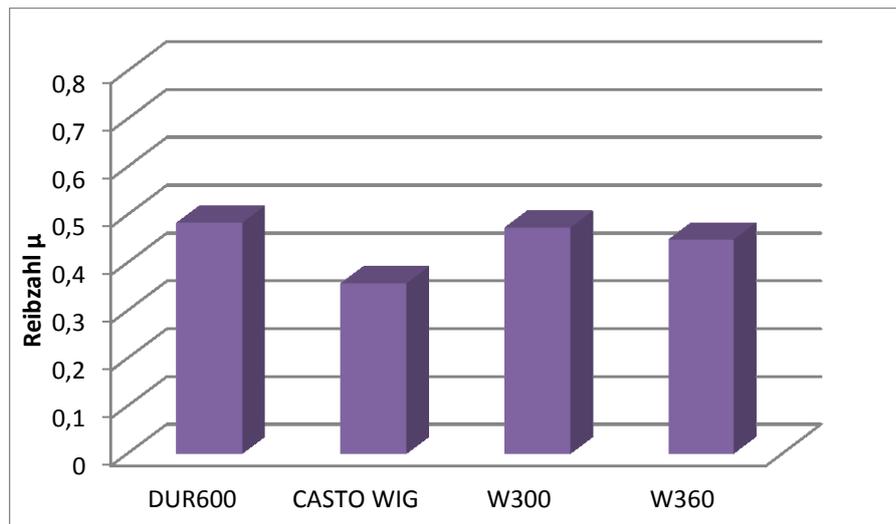


Abbildung 3-16: Auswertung der mittleren Reibzahlen der verwendeten Materialien.

Der Härteverlauf des oberflächennahen Bereichs in das Werkstoffinnere wird in Abbildung 3.17 dargestellt. Zusatzwerkstoffe CastoWIG weist die höchste Härte auf, DUR600 erreicht den niedrigsten Wert. Die Werte der beiden Werkzeugstähle W300 und W360 liegen zwischen denen der Zusatzwerkstoffe, wobei W360 die höhere Härte aufweist. Alle Proben haben im oberflächennahen Bereich ihre Härte bzw. Festigkeit gegenüber dem Zentrum verloren, weisen dort ein feinkörniges Gefüge auf. Die Härte aller Proben steigt mit zunehmender Messtiefe in das Werkstoffinnere an. Die Härte des Grundgefüges wird in einem Abstand von zirka 400µm von der Oberfläche erreicht.

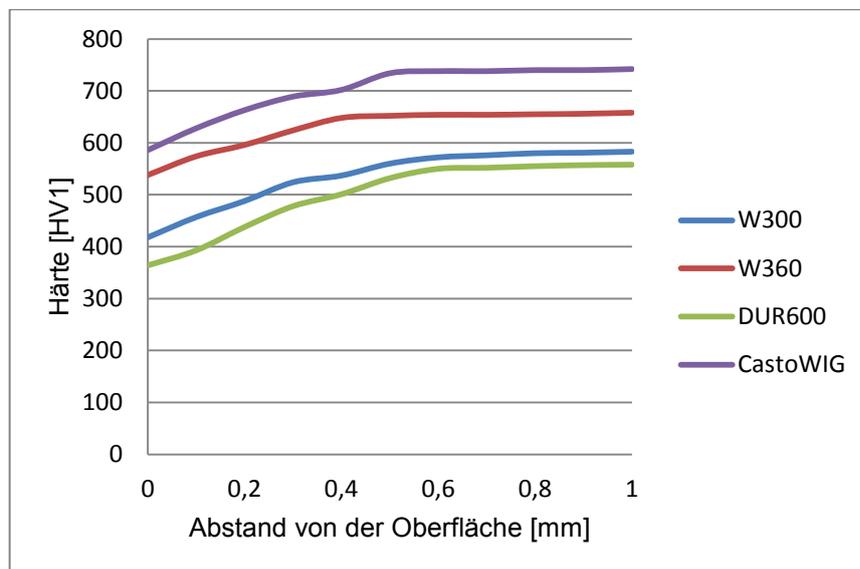


Abbildung 3-17: Härteverlauf von oberflächennahem Bereich in das Werkstoffinnere der benutzten Materialien.

Bei den Aufnahmen der Oberflächen (siehe Abbildung 3.18), die mittels eines Stereomikroskops der Firma Zeiss fotografiert wurden, erkennt man deutlich, dass der Schweißzusatzwerkstoff CastoWIG und Werkzeugwerkstoff W360 kaum einen Verschleiß aufweist. Beim Werkzeugwerkstoff W300 ist ein deutlicher Verschleiß durch adhäsive und abrasive Beanspruchung auf der ganzen Oberfläche zu erkennen. Der Zusatzwerkstoff DUR600 weist die am stärksten beanspruchte Oberfläche nach der Versuchsdurchführung auf. Eine starke adhäsive Beanspruchung ist auf der gesamten Oberfläche ersichtliche.

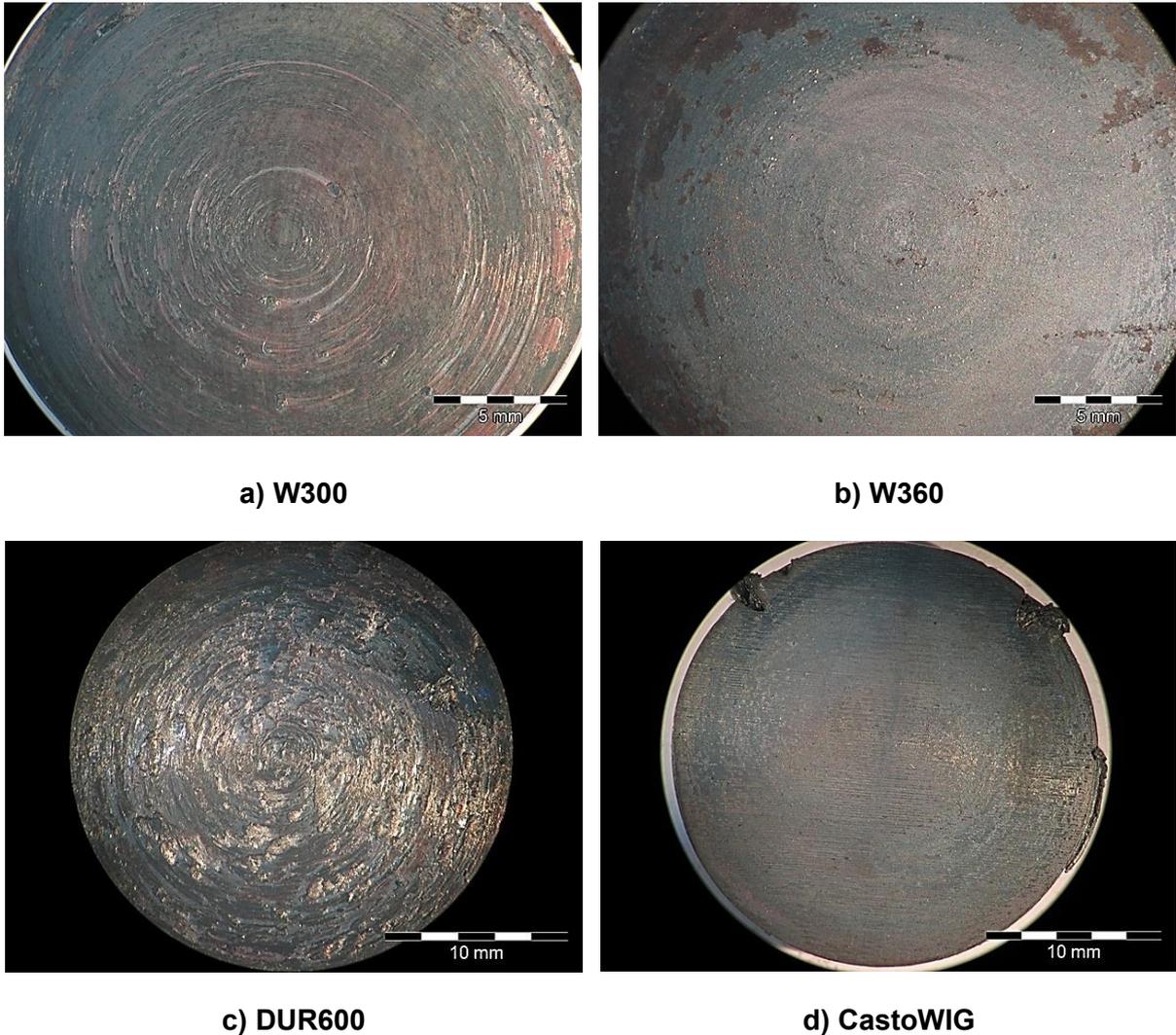


Abbildung 3-18: Oberflächenaufnahmen nach der Versuchsdurchführung.

Mittels eines invertierten metallographischen Lichtmikroskops der Firma OLYMPUS wurde die Mikrostruktur des oberflächennahen Bereiches der verwendeten Materialien aufgenommen (Abbildung 3.19). Die hellen Bereiche bei den Werkzeugstählen weisen eine geschädigte Struktur der Oberfläche auf. Durch die auftretenden Temperaturspitzen in der Randschicht wird die Anlasstemperatur des Werkzeugwerkstoffs überschritten, dabei kommt es zu einer Entfestigung der oberflächennahen Zonen des Werkzeuges. Durch das nicht mehr vorhandene feinkörnige Gefüge in diesem Bereich geht die Festigkeit als auch die Härte des Materials verloren. Beim Schweißzusatz CastoWIG ist kaum eine Änderung des Gefüges im oberflächennahen Bereich ersichtlich. Bei DUR600 hingegen ist eine deutliche Änderung des Gefüges erkennbar. Nahe der Oberfläche ist das Material besonders feinkörnig, dies weist auf eine geringere Härte und Festigkeit hin.

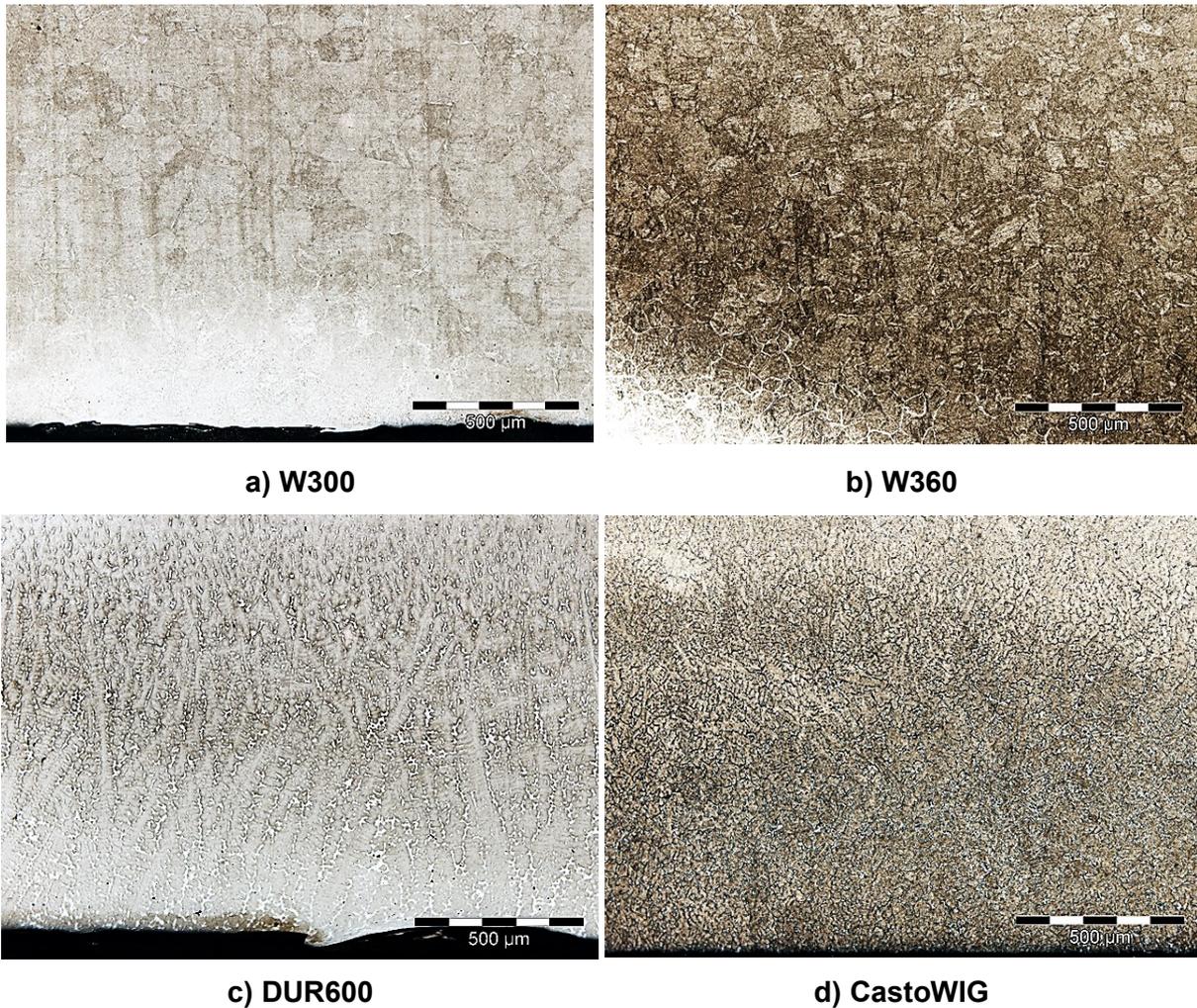


Abbildung 3-19: Mikrostrukturaufnahmen von oberflächennahem Bereich der benutzten Materialien; Ätzmittel : (3%) Nital

Mittels des Konfokalmikroskops Alicona Infinite Focus 4G (Abbildung 3.20) wurden 3D-Modelle der Oberflächenrauigkeit aller vier Werkstoffe gemessen und aufgenommen (Abbildung 3.21). Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils einen Ausschnitt vom Mittelpunkt bis zum Rand der jeweiligen Oberfläche. In Tabelle 3.10 sind die Rauigkeitswerte jeweils für den Rand- und Mittenbereich der Probe aufgelistet. Die höchsten Werte treten beim DUR600 auf, das beste Ergebnis erzielt der Werkzeugstahl W360. Normalerweise sollte jedoch CastoWIG die geringste Rauigkeit aufweisen, jedoch sind bei diesem Schweißzusatz auf der ganzen Oberfläche konzentrische Rillen erkennbar. Der Grund dafür ist eine schlecht gefräste Oberfläche. Der Werkzeugstahl W300 weist im Gegensatz zum W360 einen deutlichen höheren Rauigkeitswert auf. Bei allen Proben ist eine Zunahme der Rauigkeit im Randbereich der Proben erkennbar.



Abbildung 3-20: Alicona Infinite Focus 4G: Messgerät für die 3D-Oberflächenrauigkeit

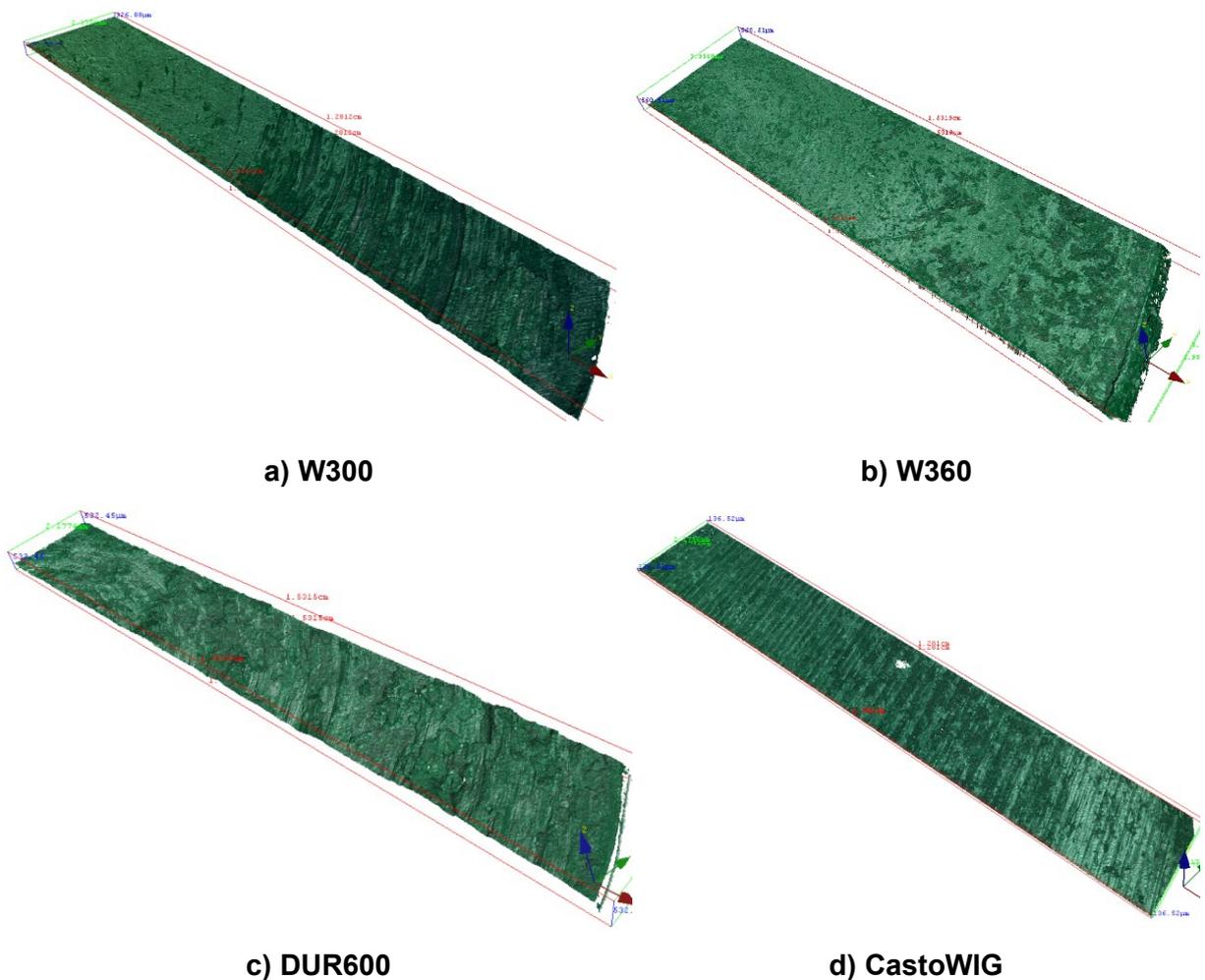


Abbildung 3-21: 3D-Modelle Rauigkeitsaufnahme der Oberflächen aller vier Materialien ermittelt mittels Konfokalmikroskops der Firma Alicona

Tabelle 3-9: Rauigkeitswerte aller vier Proben.

Materialien	W300	W360	CastoWIG	DUR600
mittlere Rauheit Ra in der Mitte [μm]	16	10	14	46
mittlere Rauheit Ra im Randbereich [μm]	36	13	18	64

Abbildung 3.22 zeigt, dass der Reibweg geringeren Einfluss auf die Größe der Reibzahl hat. Aber man kann erkennen, dass die Reibzahl mit zunehmendem Reibweg ansteigt.

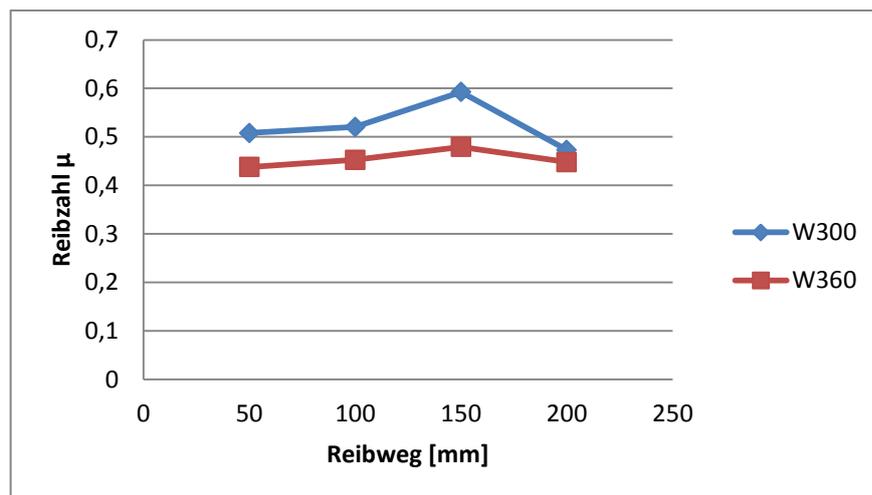


Abbildung 3-22: Verlauf der Reibzahl auf den Reibweg.

Mit zunehmender Reibgeschwindigkeit steigt die Reibzahl beim Werkzeugwerkstoff W300 an. Dies steht in Zusammenhang mit dem hohen Materialabtrag durch die hohe Relativgeschwindigkeit. Bei W360 ist jedoch kaum eine Änderung erkennbar (Abbildung 3.23), wobei aber bei erhöhter Reibgeschwindigkeit die Reibzahl absinkt. Andere Versuche haben ergeben, dass die Reibzahl beim [JAI68] Warmstauchen von Ringproben, mit zunehmender Reibgeschwindigkeit abnimmt. Die für diese Arbeit durchgeführten Versuche, haben ergeben, dass bei einer Reibgeschwindigkeit von 30mm/s die Reibzahl, bei beiden Stahlsorten, ihren höchsten Wert erreicht.

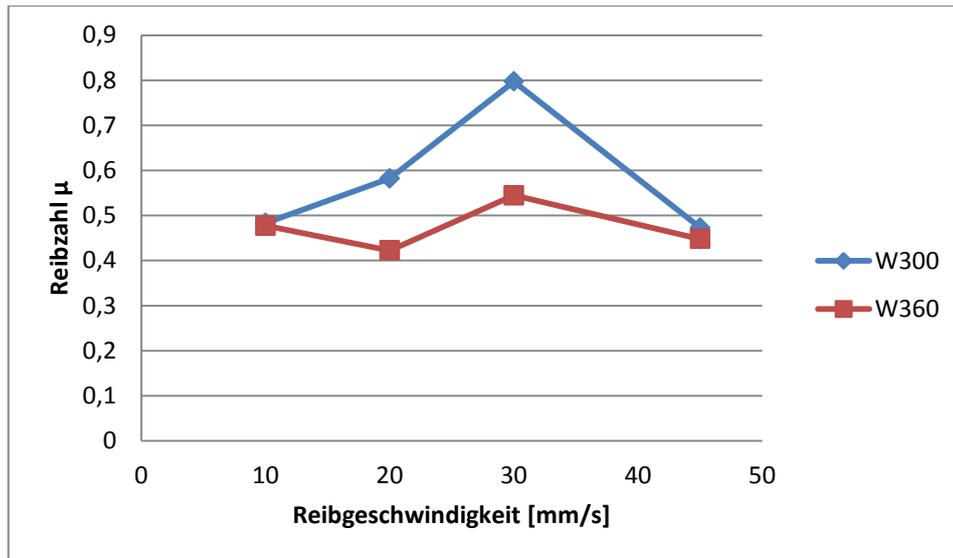


Abbildung 3-23: Verlauf der Reibzahl über der Reibgeschwindigkeit.

In Abbildung 3.24 erkennt man dass die Reibzahl mit zunehmendem Anpressdruck nach einer Steigung abnimmt. Aufgrund einer Erhöhung der Flächenpressung nimmt die wahre Kontaktfläche zwischen Reibpartner zu. Dabei kann festgelegt werden, dass es mit einer Vergrößerung der wahren Kontaktflächen zu einer Reduzierung der Reibzahl kommt. Untersuchungen des Napffließpressens aus [SCH68] haben ergeben, dass mit größerer Flächenpressung eine kleinere Reibzahl ermittelt wird.

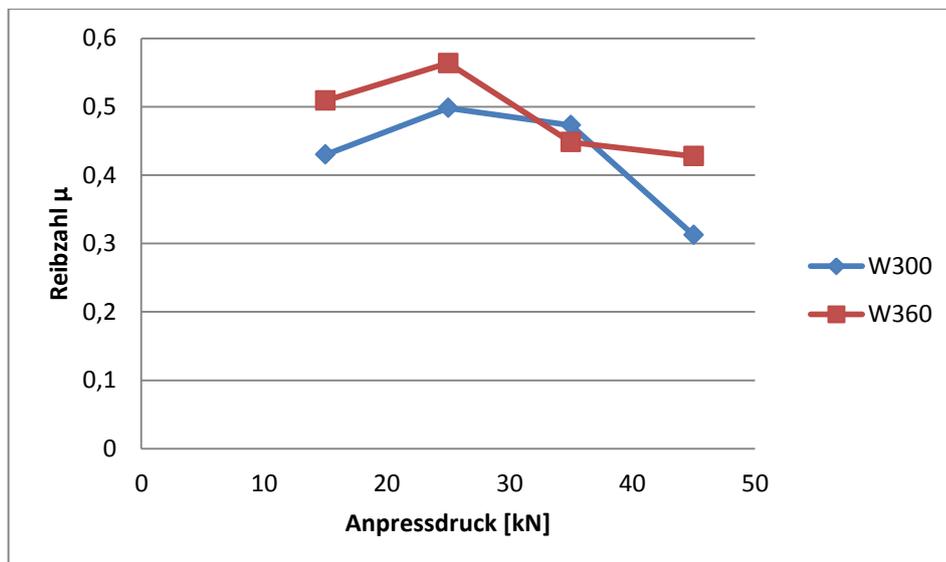


Abbildung 3-24: Verlauf der Reibzahl auf den Anpressdruck.

In Abbildung 3.25 wird der Einfluss der Temperatur auf die Reibzahl dargestellt. Mit steigender Prozesstemperatur nimmt die Reibzahl ab.

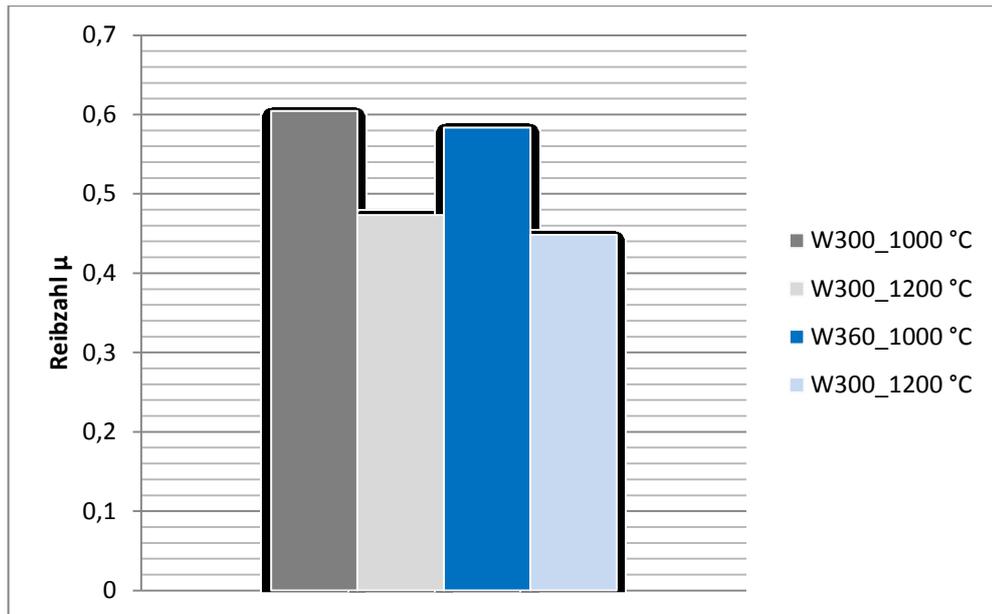


Abbildung 3-25: Abhängigkeit der Reibzahl von der Temperatur

4. Diskussion der Ergebnisse

Um die Ergebnisse und das Verhalten der Oberflächen der Werkzeuge und der Zusatzwerkstoffe vergleichen zu können, wurden die Vor- und Detailversuche mit denselben Versuchsparameter durchgeführt. Die verwendeten Versuchsparameter sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Vor- und Detailversuchsparameter

	Anpressdruck [kN]	Rotationsgeschwindigkeit [mm/s]	Reibweg [mm]	Temperatur [°C]
Vorversuche	25	45	50	1200
Detailversuche	35	45	200	1200

Die Vorversuche zeigten, dass der Schweißzusatzwerkstoff CarboS21 durch eine intensive Abrasion eine deutliche Schädigung an der Oberfläche aufweist. Der Grund dafür ist die geringere Ausgangshärte des Grundwerkstoffs. Aufgrund der hohen Härte des Grundwerkstoffs zeigten die Schweißzusatzwerkstoffe Capilla 734 und Capilla 733 im Vergleich zu CarboS21 einen besseren Verschleißwiderstand. Capilla 734 hat gegen Capilla 733 eine bessere Verschleißbeständigkeit gezeigt, obwohl Capilla 733 eine höhere Härte besitzt. Das beste Ergebnis wurde bei dem Werkzeugstahl W360 erreicht. Im Vergleich zu W360 trat bei W300 eine höhere Schädigung an der Oberfläche auf. Schweißzusatzwerkstoffe Capilla 734 und Capilla 733 können zur Reparatur des verschlissenen bzw. geschädigten Schmiedewerkzeuges verwendet werden.

Die Detailversuche zeigen, dass auf den Oberflächen, auf denen der Schweißzusatzwerkstoff DUR600 aufgeschweißt wurde, ein sehr intensiver adhäsiver Verschleiß auftritt. Im Vergleich zu DUR600 zeigte CastoWIG kaum eine Schädigung an der Oberfläche. Das beste Ergebnis wurde beim Schweißzusatzwerkstoff CastoWIG aufgezeigt. Bei längerem Reibweg und höherem Anpressdruck, zeigt der Werkzeugstahl W360 bessere Ergebnisse, als W300. An der

gesamten Oberfläche des Werkzeugstahls W300 kam es zu einem sehr intensiven adhäsiven und abrasiven Verschleiß. Der Schweißzusatzwerkstoff CastoWIG kann zur Reparatur des Werkzeugstahls benutzt werden. DUR600 ist nicht für die Reparatur des Werkzeuges geeignet.

5. Zusammenfassung

Im Vergleich zu Werkzeugen für Umformprozesse ist die Standmenge des Schmiedewerkzeugs verhältnismäßig niedrig. Die Schmiedegesenke bei der Warmmassivformgebung sind hohen thermischen und mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Diese kombiniert auftretenden Beanspruchungen führen zu unterschiedlichen Schädigungsarten, die die Standmengen des Schmiedewerkzeugs stark begrenzt. Neben der thermischen und mechanischen Rissbildung, sowie der plastischen Verformung ist der Hauptausschlagursache Verschleiß. Aus diesem Grund müssen die komplizierten Schädigungsarten erkannt werden und die Bearbeitung und der betrieblichen Einsatz unter der Bedingung der Verzögerung des Schädigungsfortschritts ausgewählt werden.

In dieser Arbeit hat sich bei beiden Versuchen gezeigt, dass der Werkzeugstahl W360 eindeutig die besseren Ergebnisse als der Werkzeugstahl W300 erzielt und daher W360 als Werkzeugwerkstoff zu bevorzugen ist. Bei den Schweißzusatzwerkstoffen hat sich in den Vorversuchen herausgestellt, dass CarboS21 die schlechtesten Werte erzielt, gefolgt von Capilla 733, das beste Ergebnis lieferte der Schweißzusatz Capilla 734. Bei den Detailversuchen, welche mit einem längerem Reibweg und einem höheren Anpressdruck durchgeführt wurden, zeigte sich, dass der Zusatzwerkstoff DUR600 das schlechteste Ergebnis aller Zusatzwerkstoffe aufweist und das beste Resultat bei CastoWIG erreicht wird.

Wenn es zu Reparaturarbeiten an einem Gesenk kommt, ist CastoWIG im Vergleich zu anderen verwendeten Schweißzusätze eindeutig die beste Wahl, weil bei diesem Zusatzwerkstoff der höchste Verschleißwiderstand gegeben ist.

Man muss in Zusammenfassung darauf hinweisen, dass Abhilfemaßnahmen immer von den vorgegebenen Einflussgrößen, wie Temperatur an der Grenzschicht, lokale Geschwindigkeit, Formkomplexität, Kontaktzeit, Hammer oder Presse usw. abhängig sind, weshalb es für alle Einsatzfälle keine optimale Reparaturmethode und keinen optimalen Beschichtungswerkstoff gibt.

Abkürzungsverzeichnis

HSC	High Speed Cutting
PVD	Physical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
LCF	Low Cycle Fatigue
HCF	High Cycle Fatigue
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen
MAG	Metallaktivgasschweißen
MIG	Metallinertgasschweißen
PACVD	Plasma-Assisted Chemical Vapour Deposition
RT	Rotationstribometer
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
DVB	Druckbegrenzungsventil
LK	Legierungskennwerte
HV	Härte Vickers [N/mm ²]
R_a	mittlere Rauigkeit
M_T	Reibmoment
$\bar{\sigma}$	mittlere Normalspannung
$\bar{\tau}$	mittlere Reibspannung
$\bar{\mu}$	mittlere Reibzahl
V_{soll}	Nenngeschwindigkeit
σ	Torsionskraft
τ	Anpressdruck
V	Geschwindigkeit
t	Zeit
m	Reibfaktor
k	Schubfließgrenze
σ_N	Normalspannung
k_f	Fließgrenze

Literaturverzeichnis

- /ADL96/ Adlof, W.: Schmiedeteile – Gestaltung, Anwendung, Beispiele, Informationsstelle Schmiedestückverwendung, Hagen, 1996.
- /AHL73/ Ahlers-Hestermann, G.: Formänderung und Fließvorgänge beim Formpressen mit Grat, Dissertation, TU Hannover, 1973
- /ARA90/ Arai, T.; Sugimoto, Y.: Present situation of application of hard coatings onto toolings in Japan, Proc. of the Japan Intern. Tribology Conference, Nagoya, 1990.
- /BAR01/ Barnert, L.; Schober, R.; Schäperkötter, M.: Verschleißminderung durch Gesenkeinsätze aus Keramik und Hartmetall, AIF-Projekt 12087 B, Hagen, 2001
- /BAR04/ Barnert, L.: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung : Grundlagen des Gesenkschmiedens unter tribologischen Gesichtspunkten, Bd. 13, Expert Verlag, Renningen – Malmsheim, Deutschland, 2004.
- /BEH08/ Behrens, B-A. ; Bach, F-W. ; Bräuer, G. ;Möhwald, K. ; Deißer, T.A. ; Paschke, H. ; Weber, M. ; Biströn, M. : Steigerung des Verschleißwiderstandes von Schmiedewerkzeugen – Verschleißreduzierung an Präzisionsschmiedegesenke durch borhaltige PACVD- Beschichtungen, Werkstattstechnik Online, ISSN 1436 – 4980, Springer VDI Verlag, Oktober, 2008, S. 805 – 812.
- /BER98/ Bernhardt, R.: Ein Beitrag zur experimentellen und numerischen Analyse lokaler Kontaktspannungen und Kontakttemperaturen in der Wirkfuge von Gesenkgravuren unter besonderer Betrachtung des Randschleifproblems, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, Deutschland, 1998

- /BOA90/ Boardman, B.: Fatigue Resistance of Steels, In: ASM Handbook Vol.1, 1990, S.679.
- /BOH05/ <http://www.bohler.at/deutsch/files/downloads/W300DE.pdf>, 2005
- /BOH09/ <http://www.bohlercelik.com.tr/assets/Uploads/download-pdf/Tool-SteelsHot-Work-Steels/BW015DE.pdf>, 2009
- /BOH11/ <http://www.bohler-edelstahl.com/files/W360DE.pdf>, 2011
- /BOW59/ Bowden, F.; Tabor, D.: Reibung und Schmierung fester Körper, Springer Verlag, Berlin, 1959
- /BUC06/ Buchner, B.; Markut, K.; Buchmayr, B.: Bestimmung der Reibzahl unter Schmiedebedingungen mithilfe des Rotationsreibversuches, XXV. Verformungskundliches Kolloquium, Plannersalm/Donnersbach, Österreich, 2006, S. 101-117
- /BUC72/ Bühler, H.; Löwen, J.: Verfahren zum Messen des Reibungswiderstandes für die instationären Umformverfahren, Stahl und Eisen 92, 1972, S. 698-704
- /BUD06/ http://www.buderus-steel.com/images/Bud_GesStahl_2006_de.pdf, 2006
- /CAS07/ Castro, g.; Fernandez-Vicente, A.; Cid, J.: Influence of nitriding time on the wear behaviour of an ASIS H13 steel during a crankshaft forging process, Wear, Vol.263, 2007, S.1375-1385
- /CZI10/ Czichos, H. ; Habig, K-H. : Tribologie – Handbuch : Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, Vieweg + Teubner Verlag, 3. Auflage, 2010.

- /DAN84/ Dannenmann, E. ;Geiger, R. ;Gräbener, Th.: Tribologische Grundlagen: Oberflächenwandlung in: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft, (Lange, K. ,Hg.), Band 1, Springer Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1984.
- /DIN50320/ DIN50320: Verschleiß; Begriffe; Systemanalyse von Verschleißvorgängen; Gliederung des Verschleißgebietes, Beuth Verlag, 1979.
- /DOE96/ Doege, E.; Westkämper, E.; Andreis, G.: Combined Surface Treatment of Forging Tools by Plasma Nitriding and PACVD, Proc. of the 4th Int. Con. On Toolings Ruhr, Universität Bochum, September 11 – 13, 1996, S.373 – 383.
- /DOE99/ Doege, E. ; Andreis, G. ; Dohmann, J. ; Walter, S. : Neueste Erkenntnisse über Verschleißursachen und Ansätze zur Standmengen-erhöhung von Schmiedegesenken, Tagungsband „Neue Entwicklungen in der Massivumformung“ ,Fellbach, 1999, S. 65 – 88.
- /DOE07/ Doege, E. ; Behrens, B-A. : Handbuch Umformtechnik, Grundlagen, Technologien, Maschinen, Springer Verlag, 2007.
- /FIN56/ Finnie, I.; Shaw, M.: The Friction Process in Metal Cutting, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers 78, 1956, S. 1649-1657
- /HAF95/ Haferkamp, H. ; Bach, Fr-W. ; Baar, C. ; Doege, E. ; Romanowski, C. : Reibung und Verschleiß beim Schmieden, In : Fortschritte in der Werkzeugtechnik, Berichtsband des DFG – SFB 300, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1995, S. 43 – 45.
- /HEI76/ Heinemeyer, D. : Untersuchungen zur Frage der Haltbarkeit von Schmiedegesenken, Dissertation, Universität Hannover, 1976.

- /HER83/ Herbertz, R.; Cho, M.-L.: Reibungsmechanismen in der Grenzfläche Werkstück/Werkzeug bei Umformverfahren und daraus resultierende Probleme für theoretische Berechnungen, Archiv für das Eisenhüttenwesen 54, 1983, S. 499-502
- /HE06/ He, Y.; Apachitei, I.; Zhou, J.; Walstock, T.; Duszczyk, J.: Effect of prior plasma nitriding applied to a hot-work-steel on the scratch-resistant properties of PACVD TiBN and TiCN coatings, Surface and Coatings Technology 201, 2006, S. 2534-2539
- /HUS02/ Huskic, A.; Eckel, M.; Berg, S.: Verschleißminderung an Schmiedegesenken mittels Kombinationsbehandlungen bestehend aus einer Plasmanitrierung und PACVD-Viellagenbeschichtung, Galvanotechnik 93, Nr.1, 2002, S. 214-222
- /HUS05/ Huskic, A.: Verschleißreduzierung an Schmiedegesenke durch Mehrlagenbeschichtungen und keramischen Einsätze, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2005
- /JAI68/ Jain, S. C.; Bramley, A. N.: Speed and Frictional Effects in Hot Forging, Proc. Institute Mechanical Engineering 182, 1968
- /KAS07/ Kashani, H.; Amadeh, A.; Ghasemi, H. M. : Room and High Temperatur Wear Behaviours of Nickel and Cobalt on Hot Forging Dies, Wear 262, 2007, S. 800 – 806.
- /KLO06/ Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 4: Umformen, 5. Aufl., Berlin Heidelberg, Springer Verlag, 2006
- /KOR89/ Korte, H. : Einflussmöglichkeiten auf die Kosten von Schmiedeteilen, VDI Berichte Nr. 773, VDI Verlag, Düsseldorf, 1989.
- /LAN77/ Lange, K.; Meyer-Nolkemper, H.: Gesenkschmieden, 2. Aufl., Berlin Heidelberg New York, Springer Verlag, 1977

- /LAN88/ Lange, K. : Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Bd.2, Massivumformung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York,, London, Paris, Tokyo, 1988.
- /LES09/ Leskovsek, V.; Podgprnik, B.; Jenko, M.: A PAVCD duplex coating for hotforging applications, Wear 266, 2009, S.453-460
- /LUI90/ Luig, H. ; Bobke, Th. : Beanspruchung und Schadensarten an Schmiedegesenken, Tribologie und Schmierungstechnik 37(2), 1990, S.76 – 81.
- /LUI93/ Luig, H. : Einfluss von Verschleißschutzschichten und Rohteilverzunderung auf den Verschleiß beim Schmieden, Dissertation, Universität Hannover, Fortschritt Berichte VDI, Reihe5, Nr. 315, 1993.
- /MAR06/ Markut, K. :Gestaltung und Bau eines Rotationstribometers für Schmiedevorgänge, Diplomarbeit, Institut für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, 2006.
- /MAY11/ Mayerhofer, J.; Zinner, S.: Innovative Stähle für Schmiedewerkzeuge : Vom Anforderungsprofil zur erfolgreichen Anwendung, Schmiedewerkzeuge: Technologien-Entwicklung-Analysen, Salzburg, 2011, S.117-133
- /NAV01/ Navinsek, B.; Panjan, P.; Urankar, I.; Cvahte, P.; Gorenjak, F.: Improvement of hot-working processes with PVD coatings and duplex treatment, Surface & Coating Technology 142-144, 2001, S. 1148-1154
- /OPP11/ Oppenkowski, A. : Cryobehandlung von Werkzeugstahl, Dissertation, Ruhr-Universität, Bochum, 2011

- /PAS10/ Paschke, H. ; Kaestner, P. ; Brauer, G. : Influence of Different Plasma Nitriding Treatments on the Wear and Crack Behaviour of Forging Tools Evaluated by Rockwell Indentation and Scratch Tests, Surface & Coating Technology 205, 2010, S. 1465 – 1469.
- /REI03/ Reichel, M. : Gesenkschmieden von Stahl, Studienarbeit, 1. Auflage, Grin Verlag, München, 2003.
- /ROM98/ Romanowski, C.: Verschleißminderung an Schmiedegesenken mittels keramischer Werkstoffe, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 487, 1998
- /SCH04/ Schruff, I. : Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung : Der Einfluss des Werkzeugstahles auf den Werkzeugverschleiß beim Gesenkschmieden, Bd. 13, Expert Verlag, Renningen – Malmsheim, Deutschland, 2004.
- /SCH68/ Schmitt, G.: Untersuchungen über das Napf-Rückwärts Fließpressen von Stahl bei Raumtemperatur, Berichte aus der Umformtechnik (7), 1968
- /SHI06/ Shirgoakar, M.; Altan, T.: Advanced die materials and lubrication systems to reduce die wear in hot and warm forging, Center for precision Forming, 2006
- /SOM10/ Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J. : Verschleiß metallischer Werkstoffe, Berlin Heidelberg, Vieweg+Teubner Verlag, 2010
- /SPU84/ Spur, G.; Schmoeckel, D.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 2/2: Umformen, München Wien, Carl Hanser Verlag, 1984

- /STA92/ Stahleinsatzliste 201: Werkstoffe für Werkzeuge in Rohr- und Strangpressen für die Verarbeitung von Kupfer und Kupferlegierungen, Stahleinsatzlisten des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, Stahleisen Verlag, Düsseldorf, 1992
- /STU81/ Stute-Schlamme, W. : Konstruktion und thermomechanisches Verhalten rorationssymmetrischer Schmiedegesenke, Dissertation, Universität Hannover, 1981.
- /VIL11/ Villinger, E.: Auftragschweißen an Warmumformwerkzeugen, Workshop Schmiedewerkzeuge: Technologien-Entwicklung-Analysen, Salzburg, 2011, S.89-95
- /VOS67/ Voss, H.; Wetter, E.; Nettelhöfel, F.: Verschleißverhalten von vergütbaren Gesenkstählen, Arch. Eisenhüttewes. 38, 1967, S. 379-386
- /WEB07/ Weber, A.: Charakterisierung des Einflusses des Beanspruchungskollektivs auf die Reibung beim Schmieden der Aluminiumlegierung AA6082, Bakkalaureatsarbeit, Institut für Umformtechnik, Montanuniversität 2007
- /YIL12/ Yilkaran, T. ; Behrens, B.-A. ; Buchmayr, B. : Maßnahmen zur Reparatur und Lebensdauererhöhung von Schmiedewerkzeugen, Schmiedejournal, Deutsche Massivumformung, Hagen, 2012, S.52 – 57.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Einflüsse auf die Lebensdauer der Schmiedewerkzeuge	2
Abbildung 1-2: Verschleiß, Rissbildung und plastische Verformung an einem Schmiedewerkzeug	3
Abbildung 2-1: Schematische Darstellung des Gesenkschmiedens.....	5
Abbildung 2-2: Wesentliche Vorgänge im Gesenk	6
Abbildung 2-3: Modellversuch mit Plastilin-Probe zur Sichtbarmachung.....	7
Abbildung 2-4: Ermittlung der Bahnkurven (A) und der Formänderungsverteilung (B) des Werkstoffs aus Modellversuchen	8
Abbildung 2-5: Beanspruchungen beim Gesenkschmieden	8
Abbildung 2-6: Temperaturverlauf an Gravuroberfläche während eines Schmiedetakts im Untergesenk nach [STU81]	10
Abbildung 2-7: Mechanische und thermische Spannungen an einer Oberfläche des Gesenks	12
Abbildung 2-8: Verschleißmechanismen	13
Abbildung 2-9: Darstellung eines tribologischen Systems.....	17
Abbildung 2-10: Darstellung der Ausfallursachen von Schmiedegesenke	19
Abbildung 2-11: Verschleißmechanismen bei der Warmmassivumformung	19
Abbildung 2-12: Kanten- und Linienverschleiß an Schmiedegesenk.....	20
Abbildung 2-13: Interne Untersuchung an Werkzeug einer Hochleistungsmaschine; Thermische Ermüdungsrisse und Härteeinfluss auf das Ermüdungsverhalten	22
Abbildung 2-14: Schmiedestück-, verfahrens-, maschinen- und werkzeugbedingten Einflussgrößen auf die Standmenge der Gesenke	24
Abbildung 2-15: Einfluss der Schmiedestückmasse auf die Standmenge.....	25
Abbildung 2-16: Zusammenhang zwischen der Gravurtiefe und der Standmenge bei Hammergesenken; (Schmiedestückmasse: 0,63 bis 4,0 kg, bezogene Gravurtiefe : $HL \cdot B$; H größte Gravurtiefe, L größte Gravurlänge, B größte Gravurbreite),	26
Abbildung 2-17: Abhängigkeit des Verschleißbetrags vom Legierungskennwert LK.....	27
Abbildung 2-18: Einfluss der Härte auf die Standmenge beim Schmieden von Kurbelwellen in Presse	27
Abbildung 2-19: Einfluss der Druckberührzeit auf die Standmenge der Gravur	28

Abbildung 2-20: Schematische Darstellung der Herstellung des Werkzeugstahls von Böhler	30
Abbildung 2-21: Wärmebehandlungszyklus von Warmarbeitstählen.....	31
Abbildung 2-22: Beanspruchungsprofil beim Schmieden	31
Abbildung 2-23: Anlassverhalten unterschiedlicher Werkzeugstähle für das Gesenkschmieden.....	33
Abbildung 2-24: Möglichkeiten zur Reparatur verschlissener Schmiedegesenke	38
Abbildung 2-25: Warmmesser mit Nickelbasis aufgeschweißt	41
Abbildung 2-26: Warmhärte der verschiedenen Stellite-Legierungen	41
Abbildung 2-27: Warmabgratwerkzeug mit Kobaltbasis aufgeschweißt	42
Abbildung 2-28: Die Mikrohärte als Funktion des Abstandes von der Schmelzlinie ..	43
Abbildung 2-29: Mikrostrukturaufnahmen von Stellite 6 (a) und Stellite 21(b).....	44
Abbildung 2-30: Gewichtverlust der Proben mit der Methode des „ring-on-disc“-Versuchs bei Raumtemperatur und 550 °C; (Normaldruck: 48 N, Gleitgeschwindigkeit: 0,4 m/s, Reibweg: 1000 m)	44
Abbildung 2-31: Verwendete Schweißprozess und aufgeschweißtes Gesenk.....	45
Abbildung 2-32: Verschleißverhalten der NbC- haltigen Auftragschweißlegierung ...	45
Abbildung 2-33: Qualitativ unterschiedliche Nitrierbehandlungen, die sich durch Variation von Temperatur, Stickstoffgehalt im Gasmisch und Plasmapotential (Testverhältnis) ergeben.	47
Abbildung 2-34: Aufbau der Nitrierschicht	48
Abbildung 2-35: Rissbildung in der weissen Verbindungsschicht.....	48
Abbildung 2-36: Unterschiedliche Versuchswerkzeuge für Verschleißuntersuchungen	49
Abbildung 2-37: Einfluss der Randschichtbehandlungen auf Verschleiß an Flachstauchbahnen nach 1000 Schmiedezyklen sowie Einfluss der Werkzeugtemperatur auf den Materialauftrag	49
Abbildung 2-38: Möglichkeiten der Schichtaufbau von Hartstoffdünnschichten	50
Abbildung 2-39: Verschleißverringerung durch Mehrlagenbeschichtung beim Schmieden mit Grat (Schmiedetemperatur 1100 °C, nach 3000 Schmiedezyklen) ..	51
Abbildung 2-40: Vergleich des Verschleißverhaltens zwischen dem nitrierten Referenzgesenk und dem beschichteten Gesenk	52
Abbildung 2-41: Verschleißverhalten der mittels PACVD aufgebauten Beschichtungen nach 2000 geschmiedeten Teilen	52

Abbildung 2-42: Oberflächenaufnahmen des hochbeanspruchten Dornes nach 1000 Schmiedezyklen; a) nitrierte Gesenke b) mit TiN beschichteten Gesenke c) mit TiN-TiCN-TiC (9 Lagen, Gesamtschichtdicke 5,4 μm) d) mit TiN-TiCN-TiC (9 Lagen, Gesamtdicke 2,6 μm)	53
Abbildung 2-43: Verschleißfortschritt am Modellwerkzeug (nach 500 Schmiedezyklen, Kühlschmierung Delta F31)	54
Abbildung 2-44: WC-Mittelkorn Hartmetall mit 12% -Co als Bildner; links: Vorzeitiges Versagen nach 218 Zyklen mit Kühlschmierung, rechts: ohne Kühlschmierung nach 500 Zyklen mit adhäsiver Verschleiß im Dornbereich (Schmiedetemperatur 1200 °C)	55
Abbildung 3-1: Wichtige Anlageteile des Rotationstribometers 1) Schutzschrank mit speicherprogrammierbarer Steuerung 2) Hochfrequenzgenerator für Induktor 3) Messrechner (Datenerfassung) 4) Hydraulikventilblock mit Druckbegrenzungs- und Steuerventil 5) Rotationstribometer	57
Abbildung 3-2: Reibvorrichtung des Rotationstribometers	58
Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Wägezelle im Rotationstribometer	60
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Messkette für das Rotationstribometer.	61
Abbildung 3-5: Vergleich der Eigenschaften unterschiedlicher Werkzeugstählen von Böhler	65
Abbildung 3-6: Vergleich der Anlasskurven üblicher Werkzeugstähle zum Böhler W360	65
Abbildung 3-7: Schematische Darstellung des Schweißbereichs.....	67
Abbildung 3-8: Reibgesetz nach Finnie und Shaw	69
Abbildung 3-9: Überblick auf die Versuchsdurchführung.....	71
Abbildung 3-10: Schematische Aufzeichnung der Auswertung der Messkurven.....	74
Abbildung 3-11: Die mittlere Reibzahl der verwendeten Materialien.	75
Abbildung 3-12: Oberflächenzustände nach Versuchsende für die unterschiedliche Werkzeugmaterialien; Versuchsbedingungen: Anpressdruck: 25 kN, relativ Geschwindigkeit: 45 mm/s, Reibweg: 50mm (etwa. zwei Umdrehung), Temperatur: 1200 °C	77
Abbildung 3-13: Mikrostrukturaufnahmen der verwendeten Werkzeugmaterialien....	78
Abbildung 3-14: Verlauf der Normalspannung über den Reibweg der verwendeten Materialien.....	79

Abbildung 3-15: Verlauf der Reibspannung über den Reibweg.....	80
Abbildung 3-16: Auswertung der mittleren Reibzahlen der verwendeten Materialien.	80
Abbildung 3-17: Härteverlauf von oberflächennahem Bereich in das Werkstoffinnere der benutzten Materialien.....	81
Abbildung 3-18: Oberflächenaufnahmen nach der Versuchsdurchführung.....	82
Abbildung 3-19: Mikrostrukturaufnahmen von oberflächennahem Bereich der benutzten Materialien; Ätzmittel : (3%) Nital.....	83
Abbildung 3-20: Alicona Infinite Focus 4G: Messgerät für die 3D- Oberflächenrauigkeit	84
Abbildung 3-21: 3D-Modelle Rauigkeitsaufnahme der Oberflächen aller vier Materialien ermittelt mittels Konfokalmikroskops der Firma Alicona	84
Abbildung 3-22: Verlauf der Reibzahl auf den Reibweg.....	85
Abbildung 3-23: Verlauf der Reibzahl über der Reibgeschwindigkeit.....	86
Abbildung 3-24: Verlauf der Reibzahl auf den Anpressdruck.....	86
Abbildung 3-25: Abhängigkeit der Reibzahl von der Temperatur	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Übliche Warmarbeitsstähle – chemische Zusammensetzung und Anwendungsgebiete	34
Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile der CrMoV-Stählen [SCH04].....	35
Tabelle 2-3: Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffen	43
Tabelle 2-4: Chemische Zusammensetzung des Fülldrahts A541	45
Tabelle 2-5: Prozessparametern unterschiedlicher Nitrierbehandlungen und dadurch aufweisende Härte- und Eindringtiefwerte; ^a Restatmosphäre Wasserstoff	47
Tabelle 3-1: Technische Daten der Kraftmessdose und Wägezelle	60
Tabelle 3-2: Technische Daten der Verstärker von DEWETRON.	62
Tabelle 3-3: Kenndaten der Messanlage.....	62
Tabelle 3-4: Die chemische Zusammensetzung der verwendeten Werkstoffe.	64
Tabelle 3-5: Originale Härte der verwendeten Werkzeugwerkstoffen und der Schweißzusätzen	64
Tabelle 3-6: Versuchsparameter für die Vorversuche.	72
Tabelle 3-7: Versuchsparameter für die Detailversuche.....	73
Tabelle 3-8: Die Messung der Härtewerte vor und nach der Versuchsdurchführung	76
Tabelle 3-9: Rauigkeitswerte aller vier Proben.	85
Tabelle 4-1: Vor- und Detailversuchsparameter	88