

BEITRÄGE DER HOCHSCHULE PFORZHEIM

Norbert Jost (Hrsg.)

**Innovative Werkstoffaspekte und
Laserbehandlungstechnologien
für Werkzeuge der Umformtechnik**

Nr. 118

Herausgeber: Prof. Dr. Ansgar Häfner, Prof. Dr. Norbert Jost,
Prof. Dr. Karl-Heinz Rau, Prof. Dr. Roland Scherr,
Prof. Dr. Christa Wehner, Prof. Dr. Rainer Maurer
(geschäftsführend; maurer@fh-pforzheim.de)

Sekretariat: Frau Alice Dobrinski
Hochschule Pforzheim
Tiefenbronner Str. 65
75175 Pforzheim
alice.dobrinski@fh-pforzheim.de
Telefon: 07231/28-6201
Telefax: 07231/28-6666

Ausgabe: Mai 2005

Vorwort des Herausgebers

Das erfolgreiche Konzept des Technik-Forums an der Hochschule Pforzheim kann mit der diesjährigen 5. Ausgabe, zu der hier der Tagungsband vorliegt, das erste kleine Jubiläum feiern. Auf den seit dem Jahr 2000 jährlich stattfindenden Technik-Foren werden die von der Max- und Erni-Bühler-Stiftung geförderten und finanzierten aktuellen Forschungsaktivitäten der Hochschule Pforzheim vorgestellt. Seit dem Beginn der Zusammenarbeit im Jahre 1999 erfolgen sie in enger interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen dem Labor für Werkstoffentwicklung und -prüfung sowie dem Labor für Laser- und Fertigungstechnik.

Die folgende kurze Auflistung soll einige wenige Eckdaten der bisherigen Tagungsreihe zusammenfassen:

- **23 Fachbeiträge** zu einem bewusst recht breit gefassten Themenspektrum rund um die Kaltverformung von Metallen
- **5 eingeladene Festvorträge** zu jeweils hochaktuellen Themen aus Industrie und Wirtschaft. Hier durften wir so bekannte wie herausragende Persönlichkeiten wie Prof. Dr.-Ing. Peter Kern (IAO Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation, Stuttgart); Prof. Dr. Helmut Wienert (Hochschule Pforzheim); Prof. Dr. Ing. E. h. Berthold Leibinger (Geschäftsführender Gesellschafter der TRUMPF GmbH + Co. KG); Dr. Hans-Eberhard Koch (Geschäftsführender Gesellschafter der WITZENMANN GmbH) und bei dem diesjährigen Forum Dr.-Ing. E. h. Heinz Dürr (u.a. ehem. Vorstandsvorsitzender der AEG und der Deutsche Bahn AG) begrüßen.
- **16 Publikationen** in Fachmedien sowie Beiträge zu nationalen und internationalen Fachtagungen.
- **Mehr als 500 Teilnehmer** aus dem In- und Ausland an den Fachbeiträgen und **mehr als 1.500 Teilnehmer** zu den Festvorträgen.

Bewährt hat sich die Aufteilung in einen fachlichen Teil (Workshop) inklusive einer Firmenpräsentation mit Maschinenvorfürungen aus dem aktuellen Ferti-

gungsprogramm der Bühler Walzmaschinen GmbH, Pforzheim, sowie einem Festvortrag im Rahmen des Studium-Generale der Hochschule.

Alles in allem können die Organisatoren und Veranstalter damit eine sehr positive Zwischenbilanz ziehen und mit den zukünftigen Technik-Foren auf dem bisherigen Erfolg aufbauen.

Auch das diesjährige Technik-Forum vereinte wieder weit über 100 auf dem Gebiet der Kaltverformung von Metallen tätige Fachleute aus dem In- und Ausland zu intensiven fachlichen Diskussionen.

Eröffnet wurde der fachliche Teil von mir selbst als dem diesjährigen Tagungsleiter mit einem Grundlagenvortrag über „Reibung und Verschleiß von Werkstoffen“. Dieser Beitrag war der dritte einer kleinen aufeinander aufbauenden Reihe über die Zusammenhänge zwischen dem inneren Gefügebau und den äußeren Eigenschaften von Werkstoffen, insbesondere im Hinblick auf Festigkeit und Verschleiß.

Den Anschluss bildete der Beitrag meines Kollegen **Roland Wahl**, der in seinem höchst anschaulichen Übersichtsvortrag die heutigen Möglichkeiten und „Aufgaben des Lasers im Werkzeugbau“ darstellte. Dieses noch recht junge Gebiet eröffnet sehr reizvolle Potenziale, wenn es z.B. um Werkzeugreparaturen oder auch um eine lokale Panzerung von Werkzeugen geht. Von besonderem Interesse sind dabei Werkzeuge, die Hohlräume oder Hinterschneidungen aufweisen.

Der Aspekt von Werkzeugreparaturen mittels Lasereinsatz ist derzeit auch das Schwerpunktthema der eigenen experimentellen Arbeiten an der Hochschule Pforzheim. Hierzu gibt es in der Literatur bisher keine sehr brauchbaren Ergebnisse aus systematischen Untersuchungen in Bezug auf Variation der Laserparameter und ihrer Auswirkung auf das Werkstoffgefüge in und um die Laserspur. Dieses offensichtliche Defizit zu beseitigen haben sich Herr **Dipl.-Ing. Andreas Baum** und **Frau Ursula Christian** zum Ziel gesetzt. Erste sehr aufschlussreiche und vor allem vielversprechende Ergebnisse präsentierten sie in ihrem Vortrag „Auswirkungen des Lasereinsatzes bei der Reparatur von Werk-

zeugen“. Ausgehend von den Verschleißmechanismen, die bei Werkzeugen, insbesondere der Kaltumformung, wirken, zeigen die beiden Referenten die theoretischen Möglichkeiten des Laserumschmelzens, anhand einer Eingliederung der für den Reparaturfall in Betracht zu ziehenden Laserverfahren, erstmals und gut durchstrukturiert auf.

Die industrielle Praxis wurde mit dem Beitrag „Betrachtung zur Breitung beim Kaltwalzen von Kupfer-Flach-Draht aus Runddraht mit und ohne Zwischenglühlung“ von **Dr. Rainer Menge und Horst Bürkle** vertreten. Die beiden Referenten zeigten in bemerkenswerter klarer und auch für Laien nachvollziehbarer Form, wie die speziellen Probleme hinsichtlich der Abstimmung des Einlauf- und Endquerschnitts, der erreichbaren Kantenqualität und der erreichbaren Breitentoleranz in Abhängigkeit von verschiedenen Stichfolgen auf einer innovativen Walzanlage ohne und mit Zwischenglühlung gelöst werden können.

Eine ganz besondere Bereicherung des Tagungsprogramms und gleichzeitig den würdigen Abschluss des Technik-Forums 2004 stellte der Festvortrag von **Dr.-Ing. E.h. Heinz Dürr**, ehemaliger Vorstandsvorsitzender der Deutsche Bahn AG, dar. In seinen Ausführungen über seine drei Unternehmerleben (Eigentümer, Sanierer bei der AEG, Vorstand der Deutschen Bahn) betonte er in einem sehr lebendigen Vortrag die Verantwortung des Unternehmers für die Gesellschaft und die Verpflichtung, diese Verantwortung auch zu übernehmen. Herauszustellen ist seine die Zuhörer regelrecht mitreißende und begeisternde Vortragsart, für die er am Ende des Vortrags auch mit einem brandenden Beifall belohnt wurde.

Auch wenn sich die Organisatoren einer Tagung wie dem Technik-Forum noch so sehr bemühen; der Erfolg einer solchen Veranstaltung wird letztendlich immer ganz wesentlich durch die Teilnehmer und die Vortragenden bestimmt. Allen sei hiermit nochmals herzlich gedankt. Ebenso natürlich den vielen Helfern hinter den Kulissen, die an der Vorbereitung und Durchführung des Technik-Forums mitgewirkt haben. Stellvertretend sollen hier **Frau Dipl.-Verw.-Wiss. Gisela de Vries** und Herr **Dipl.-Ing. Manfred Graudejus** genannt werden, die

wieder einmal Hervorragendes geleistet haben, um diese Veranstaltung zu dem gewohnten Erfolg zu führen.

Dieser Tagungsband möge dem werten Leser hoffentlich wieder als wertvoller fachlicher Beitrag zu den in den Vorträgen behandelten Gebieten dienen. Zusammen mit den bereits erschienenen Tagungsbänden stehen damit aktuellste Informationen auf dem Gebiet der Kaltverformung von Metallen zur Verfügung. Mögen sie erfolgreich genutzt werden.

Pforzheim im Mai 2005

Norbert Jost

Kurzbiografien der Vortragenden beim Technik Forum 2004

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost ist seit 1996 Professor an der Hochschule Pforzheim. Er vertritt die Lehrgebiete Werkstoffkunde und Festigkeitslehre.

Von 1984 bis 1991 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Oberingenieur am Institut für Werkstoffe der Ruhr-Universität Bochum tätig. Danach folgte die Tätigkeit als Abteilungsleiter bei der DEKRA AG, Stuttgart und Leiter der Materialprüfanstalt der DEKRA-ETS GmbH, Saarbrücken sowie stellv. Geschäftsführer der DEKRA-ETS ebenfalls in Saarbrücken.

Neben der Tätigkeit als Professor an der Hochschule ist er Mitglied im DIN-Arbeitsausschuss "Implantatwerkstoffe" und Gutachter beim Bundesförderprogramm FH3.

Prof. Dr.-Ing. Roland Wahl

Prof. Dr.-Ing. Roland Wahl ist seit 1996 Professor für Fertigungstechnik und Betriebsmittel an der Hochschule Pforzheim.

Nach dem Studium des Maschinenbaus war er von 1987 bis 1993 am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart als Forschungs- und Entwicklungsingenieur tätig. Danach war er 1993 bis 1996 bei der INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH in Berlin als Projektleiter mehrerer Projekte der Entwicklung und Implementierung von Laserprozessen in der Karosserie-, Motor- und Aggregatproduktion aktiv.

Im DIN und DVS bringt er in deren gemeinsamen Normungsausschüssen seine Erfahrungen auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung ein.

Dipl.-Ing. (FH) Andreas Baum

Seit Sommer 2003 arbeitet Herr Baum für das gemeinsame Forschungsprojekt mit der Max- und Erni-Bühler Stiftung an der Hochschule in Pforzheim.

Nach dem Abitur und Wehrdienst in Ulm begann er sein Maschinenbau Studium an der Hochschule Pforzheim. Daneben sammelte er in verschiedenen Funktionen bei der Witzenmann GmbH vor allem im Bereich der Entwicklung von Fahrzeugteilen praktische Erfahrungen. In Zusammenarbeit mit der TU

Dresden arbeitet Herr Baum momentan an seiner Dr.-Arbeit zum Themengebiet Laserumschmelzen und Laserauftragsschweißen.

Ursula Christian

Frau Ursula Christian ist seit 2001 Mitarbeiterin der Hochschule Pforzheim im Forschungsprojekt mit der Max- und Erni-Bühler-Stiftung.

Ihre Ausbildung zur Metallografin absolvierte sie bei der Firma Kabel-Metall in Nürnberg, wo sie auch danach beschäftigt war. Von 1973 bis 1995 war sie als Gruppenleiterin bei der Firma Diehl in Rötenbach/Nürnberg tätig.

Horst Bürkle

Horst Bürkle absolvierte eine Lehre als Maschinenschlosser bei der Fa. Bühler in Pforzheim. Danach war er in Stuttgart und Esslingen zur beruflichen Weiterbildung tätig. 1961 kehrte er als Konstrukteur zur Maschinenfabrik nach Pforzheim zurück. Parallel dazu machte er die Ausbildung zum Techniker. Seit 1979 ist er Gesellschafter im Hause Bühler. 1993 wurde er Geschäftsführer der Bühler und Co. GmbH.

Im Gemeinschaftsunternehmen NBM Niehoff-Bühler-GmbH vertritt er als Geschäftsführer die Interessen der Bühler und Co. GmbH

Dr.-Ing. Rainer Menge

Dr.-Ing. Rainer Menge ist seit Oktober 2002 Geschäftsführer des Gemeinschaftsunternehmens NBM (Niehoff-Bühler GmbH), welches sich mit dem Bau und Vertrieb von induktiven Glühanlagen und Komplettssystemen zum Walzen-Ziehen-Glühen beschäftigt.

Seit 1997 betreibt er das Herborner Drahtbüro als Beratungsunternehmen für die Draht- und Kabel- sowie NE-Halbzeugindustrie. Er ist Mitglied der DGM und arbeitet aktiv im Fachausschuss Ziehen. Er ist Autor einer Reihe von Veröffentlichungen und Gastdozent an der Bergakademie Freiberg sowie der Hochschule Pforzheim.

Heinz Dürr

Als Leiter des Familienunternehmens Dürr AG wurde Heinz Dürr von 1980 bis 1990 zum Vorstandsvorsitzenden des AEG-Konzerns berufen. 1991 übernahm er dann den Vorstandsvorsitz der Deutschen Bundesbahn und der Deutschen Reichsbahn, die beide unter seiner Führung zur Deutschen Bahn AG verschmolzen.

Heinz Dürr wurde 1994 mit dem Verdienstkreuz 1. Klasse des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland ausgezeichnet.

Inhalt des Tagungsbandes

Prof. Dr.-Ing. Norbert Jost	
Werkstoffkundliche Grundlagen von Reibung und Verschleiß	9
Prof. Dr.-Ing. Roland Wahl	
Aufgaben des Lasers im Werkzeugbau	34
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Baum, Ursula Christian	
Auswirkungen des Lasereinsatzes bei der Reparatur von Werkzeugen	52
Horst Bürkle, Dr.-Ing. Rainer Menge	
Betrachtung zur Breitung beim Kaltwalzen von Kupfer-Flachdraht aus Runddraht mit und ohne Zwischenglühung	87
Dr.-Ing. E.h. Heinz Dürr	
Drei Unternehmerleben: Eigentümer, Sanierer bei der AEG, Vorstand bei der Deutschen Bahn AG	99

Norbert Jost

**Werkstoffkundliche Grundlagen
von
Reibung und Verschleiß**

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung**
- 2 Reibung und Verschleiß**
 - 2.1 Grundlegendes und Definitionen**
 - 2.2 Reibungsarten und -mechanismen**
 - 2.3 Tribosysteme**
 - 2.4 Verschleißmechanismen und ihre Erscheinungsformen**
- 3 Optimierung des Verschleißwiderstandes**
 - 3.1 Härte und Verschleiß**
 - 3.2 Modifikation der Oberfläche**

Zusammenfassung

Reibung und Verschleiß sind sowohl werkstoffkundlich als auch anwendungstechnisch sehr eng miteinander verbunden. Die wirtschaftlichen Verluste sind enorm. Das Ziel sind daher verbesserte Werkstoffe bzw. für Verschleißbeanspruchungen optimierte Werkstoffoberflächen. Der hier vorliegende Beitrag gibt aufbauend auf den entsprechenden werkstoffkundlichen Grundlagen einen kurzen Überblick über Tribosysteme und deren Verschleißmechanismen bzw. –erscheinungsformen. Darüber hinaus werden einige Oberflächenmodifikationen und deren Auswirkungen auf das Verschleißverhalten erläutert.

Summary

Friction and wear are connected both from the view of the material science as well as from the view of the technical application with each other very narrowly. The economic losses are enormous. Therefore the aim must be to improve the materials or to optimize the material surfaces for wear uses. Based on material sciences this contribution gives a short summary of tribosystems and its wear mechanisms and wear manifestations. Furthermore some surface modifications and their effects on the wear behaviour are explained.

1 Einleitung

Tribologische Fragen haben die Ingenieure seit Jahrhunderten beschäftigt. Unbestritten ist die Rolle der Reibung bei Energieverlusten und der Verschleiß für die Lebensdauer von Maschinen und Werkzeugen. Der Umfang der Forschung auf diesem Gebiet war und ist groß. Auch wenn daraus manche nützliche Ergebnisse hervorgegangen sind, so entsprach doch der Fortschritt des grundsätzlichen Verständnisses von Reibung und Verschleiß nicht dem Umfang dieser Bemühungen. Dies ist jedoch nicht der Unfähigkeit der Forscher zuzuschreiben, sondern dem höchst komplexen Systemcharakter der Tribologie als solcher.

Reibung wird verursacht durch eine Vielzahl energiedissipierender Prozesse. Dabei wird grundsätzlich zwischen „innerer“ und „äußerer“ Reibung unterschieden. Erstere führt zu Dämpfung von Schwingungen unter Entwicklung von Wärme oder zu Ermüdung durch Bildung und Akkumulation von Strukturdefekten. Die äußere Reibung entsteht durch die tangential Bewegung zweier Oberflächen von Festkörpern oder auch durch an einer festen Oberfläche vorbeiströmende Fluide. Insbesondere die äußere Reibung führt zu Verschleiß, also den Verlust von Material aus den beteiligten Festkörpern.

Die so durch Reibung und Verschleiß anfallende Wertminderung von Gütern und industriellen Anlagen ist von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Nach regelmäßigen Erhebungen werden in den führenden Industrienationen die jährlichen Schäden auf ca. 3 % des Bruttosozialproduktes beziffert. Vor dem aktuellen Hintergrund vielfältiger Energie- und Rohstoffprobleme bekommen die Fragen der Gewährleistung und damit der Bauteilhaltbarkeit wieder eine zunehmende Bedeutung.

Im Folgenden wird daher der werkstoffkundliche Hintergrund von Reibung und Verschleiß näher betrachtet. Insbesondere wird dabei auf die Wechselwirkungen innerhalb eines Tribosystems eingegangen und darauf aufbauend Werkstoffkonzepte zur Optimierung von entsprechend beanspruchten Maschinenkomponenten vorgestellt.

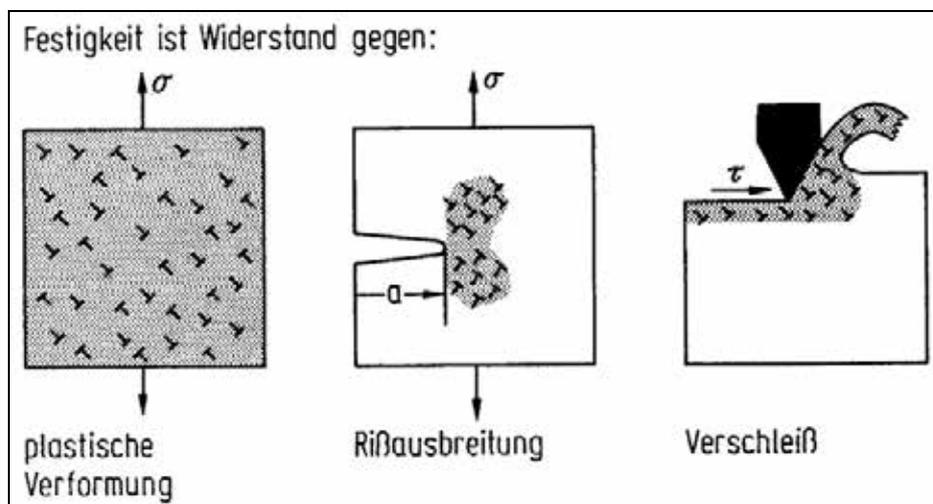
2 Reibung und Verschleiß

2.1 Grundlegendes und Definitionen

Die Festigkeitsbegriff ist werkstoffkundlich gesehen ein recht komplexer Aspekt, da er doch durch die Gesamtheit verschiedener Widerstände beschrieben wird, die der Werkstoff den äußeren (oder inneren) Belastungen entgensetzt. Neben den Widerständen gegen eine plastische Verformung oder gegen Rissinitiation und -wachstum, ist auch der Widerstand gegen Verschleiß hier eingeschlossen und stellt eine ganz wesentliche Größe zur Optimierung von Werkstoffen dar (Abbildung 1).

Abbildung 1

Verschleißwiderstand als wichtige Komponente der Festigkeit



Da Verschleiß i.d.R. immer durch eine beliebig geartete Relativbewegung zweier Medien bzw. im engeren Sinne zweier Körper verbunden ist, sollen zunächst diese Begriffe per Definition beschrieben werden:

„**Reibung** ist der Verlust an mechanischer Energie beim Ablaufen, Beginnen oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche.“

*„**Verschleiß** ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers (Grundkörper), hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt- und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.“*

Das Fachgebiet, das sich mit Reibung und Verschleiß befasst, wird Tribologie genannt.

Um die Gesamtzusammenhänge der Tribologie besser verstehen zu können, ist es lohnenswert, sich in den nächsten Abschnitten etwas intensiver mit Reibung und Verschleiß, ihren Mechanismen sowie ihren Erscheinungsformen zu beschäftigen.

2.2 Reibungsarten und Mechanismen

Der Vollständigkeit halber muss bei der Reibung zunächst zwischen der sogenannten inneren und der äußeren Reibung unterschieden werden.

Dabei ist die innere Reibung ein Energieverzehr bei Bewegung der Atome bzw. Moleküle eines Stoffes gegeneinander (z.B. bei Strömungen innerhalb eines Öles). Es können äußere Kräfte (z. B. Schwerkraft auf jedes Flüssigkeitsteilchen) wirken und Druckdifferenzen können Beschleunigungen hervorrufen. Zu beachten ist die innere Reibung insbesondere bei:

- Flüssigkeiten,
- Gasen und
- Festkörpern

Aus werkstoffkundlicher Sicht sind die inneren Vorgänge in Gasen und Flüssigkeiten eher von untergeordneter Bedeutung. In Festkörpern gewinnt die innere Reibung jedoch ganz wesentliche Bedeutung bei der Dämpfung von Schwingungen und der Ermüdung durch strukturelle Defekte im atomaren Aufbau bzw. dem submikroskopischen Gefüge von Werkstoffen.

Äußere Reibung tritt immer dann auf, wenn zwei verschiedene Stoffe oder Wirkflächen sich in Kontakt befinden und eine Relativbewegung erzeugt wird bzw. werden soll. Die äußere Reibung ist die primäre Ursache für den Verschleiß, der weiter unten noch ausführlich betrachtet werden soll. Je nach dem, ob die Relativbewegung der beiden Reibpartner gerade beginnt oder im Gange ist, wird unterschieden zwischen Haft- und Gleitreibung.

Die Haftreibung (auch Ruhereibung), mathematisch beschrieben durch die Haftreibungskraft F_H , ist abhängig von der auf den Körper wirkenden Normalkraft F_N und der Haftreibungszahl (auch Reibungskoeffizient) μ_H , dagegen unabhängig von der Größe der Berührungsfläche. Die Haftreibungszahl μ_H wird bestimmt durch die Rauigkeit und die Stoffarten der reibenden Flächen.

$$F_H = \mu_H \cdot F_N$$

Bei der Haftreibung tritt keine Relativbewegung zwischen den Reibpartnern auf. Diese Bewegung entsteht erst nach der Überwindung des sogenannten Losbrechmoments.

Die Gleitreibung (auch Bewegungsreibung) bzw. die daraus resultierende Kraft ist stets kleiner als F_H . Sie ist abhängig von der Größe der Normalkraft und der Gleitreibungszahl (Reibungskoeffizient).

$$F_{GL} = \mu_{GL} \cdot F_N$$

Der Gleitreibungskoeffizient μ_H hängt dabei wiederum von der Relativgeschwindigkeit der sich reibenden Flächen ab. Darüber hinaus wird die Gleitreibung wesentlich von der Rauigkeit und dem Material der Wirkflächen sowie vom Vorhandensein einer Zwischen- oder Schmierschicht bestimmt.

Vor diesem so gelegten Hintergrund können nun für die werkstoffkundliche Betrachtung unterschiedliche Reibungsarten unterschieden werden.

Festkörperreibung

Bei der Festkörperreibung berühren sich die aufeinandergleitenden Flächen. Dabei werden Oberflächenerhöhungen eingeebnet. Der dabei meistens (aber nicht immer!) auftretende Materialverlust bzw. Abrieb ist ein Maß für den Verschleiß. Bei ungünstiger Werkstoffpaarung (insbesondere gleiche Gitterstruktur) und großer Flächenpressung können die Oberflächen sogar miteinander verschweißen. Festkörperreibung tritt beispielsweise auf, wenn kein Schmierstoff verwendet wird oder die Schmierung versagt.

Flüssigkeitsreibung

Die Flüssigkeitsreibung tritt dann auf, wenn sich zwischen den Gleitflächen ein permanenter Schmierfilm bildet. Die Gleitflächen sind vollständig voneinander getrennt. Die entstehende geringe Reibung beruht darauf, dass die Schmierstoffmoleküle aufeinander gleiten. Flüssigkeitsreibung ist der gewünschte Zustand in Lagern und Führungen.

Gasreibung

Bei der Gasreibung handelt es sich beispielsweise um den Luftwiderstand eines Fahrzeuges. Gasreibung wird in einigen Fällen speziell genutzt:

- Fallschirme, damit aus dem freien Fall ein kontrolliertes Sinken wird
- Landeklappen am Flugzeug, um den Abriss der Strömung zu erzwingen
- Drosseln in Gasleitungen zur Begrenzung der Durchflussmenge
- Erzeugen von Verdichtungswärme, z.B. zur Selbstzündung in Dieselmotoren und Turbinen.

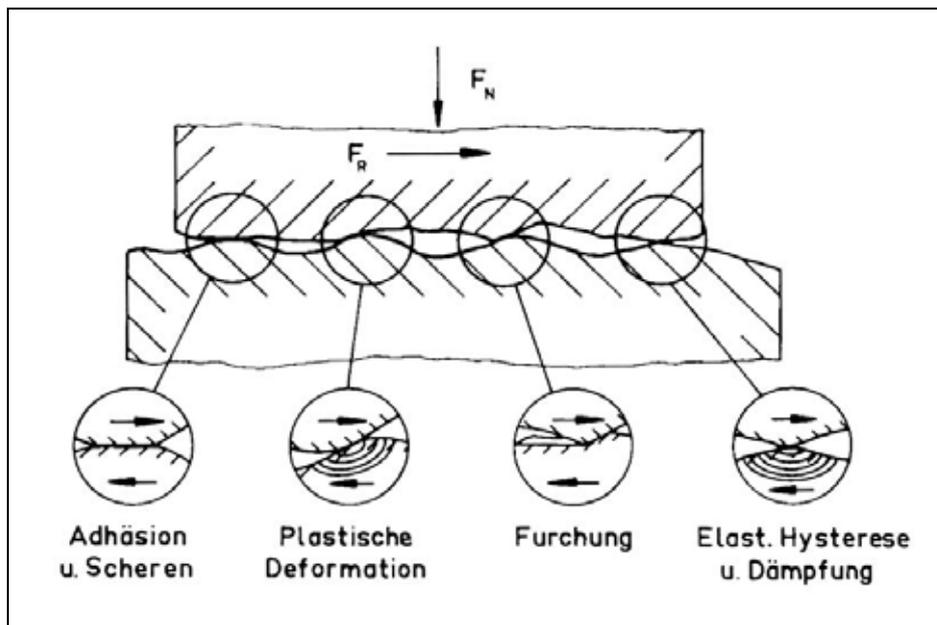
Die Gasreibung ist proportional zum Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit v^2 des Gases.

Mischreibung

Die Mischreibung kann bei unzureichender Schmierung oder zu Beginn der Bewegung zweier Reibpartner mit Schmierung auftreten, also das Nebeneinander von Festkörper- und Flüssigkeit- bzw. Gasreibung. Dabei berühren sich die Gleitflächen punktuell. Reibungskraft (und Verschleiß) sind geringer als bei der Festkörperreibung.

Die mit diesen Reibungsarten, (allerdings hier nur interessierend) zwischen Festkörpern verbundenen Reibungsmechanismen werden in Abbildung 2 dargestellt:

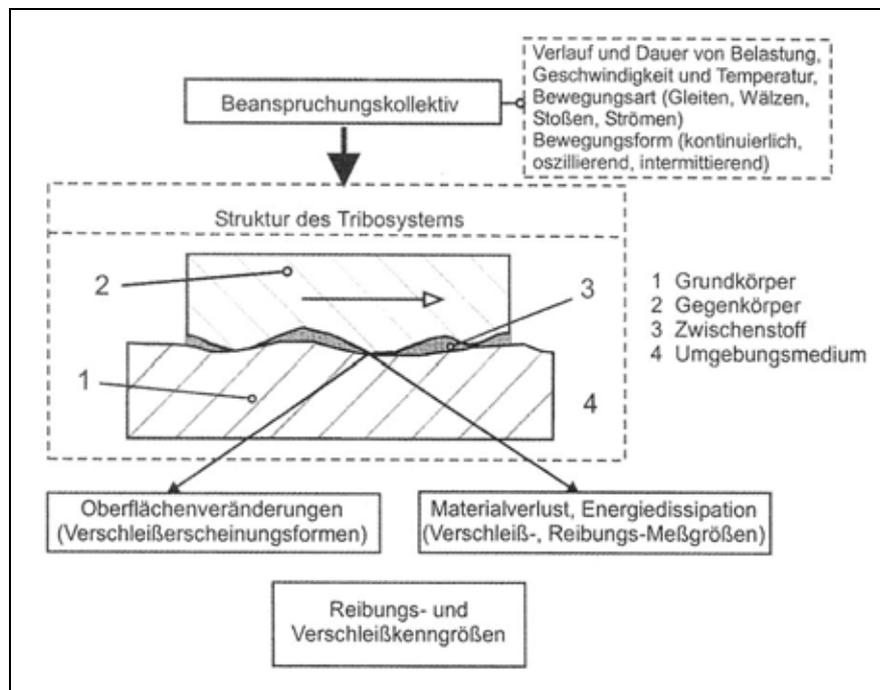
Abbildung 2
Reibungsmechanismen



2.3 Tribosysteme

Reibung und Verschleiß sind sogenannte Systemeigenschaften. D.h., dass bei entsprechenden experimentellen Untersuchungen und ihrer Auswertung nicht nur die beiden Reibpartner sondern auch und insbesondere das Umgebungsmedium und der Zwischenstoff betrachtet werden müssen, (Abbildung 3).

Abbildung 3
Tribotechnisches System und wichtige Parameter, schematisch



Das heißt aber auch, dass die daraus ermittelten Messwerte keine typischen Werkstoffkennwerte im engeren Sinne, sondern reine systembedingte Werkstoffeigenschaften darstellen.

Die folgende Auflistung gibt eine etwas umfassendere Übersicht möglicher Tribosysteme sowie jeweils entsprechende Beispiele aus der Technik mit ihren Hauptmerkmalen, (Tabelle 1).

Ein Aspekt, der bei der Betrachtung von Tribosystemen häufig nur wenig Beachtung findet, ist die Einwirkung von sogenannten Blitztemperaturen. Diese kommen durch die im Vergleich zur „scheinbaren“ sehr viel kleineren „wahren“ Berührungsfläche zweier Reibpartner zustande, (Abbildung 4).

Blitztemperaturen können abhängig vom Werkstoff der Reibpartner, ihres Reibungskoeffizienten und der Belastung Werte von weit über 2.000 °C erreichen. Diese sind jedoch nur punktuell in den Spitzen der sich berührenden Flächenanteile wirksam, (Tabelle 2 und Abbildung 5).

Tabelle 1
Mögliche Tribosysteme und Beispiele aus der Technik

(a) Energiedeterminierte tribotechnische Systeme der

- Bewegungsübertragung ⇔ Führungen, Lager
- Bewegungshemmung ⇔ Bremsen, Stoßdämpfer
- Kraftübertragung ⇔ Kupplungen
- Energieübertragung ⇔ Getriebe

(b) Stoffdeterminierte tribotechnische Systeme

- Urformen ⇔ Gieß-, Press-, Extrudierwerkzeuge
- Umformen ⇔ Biege-, Walz-, Schmiede-, Ziehwerkzeuge
- Trennen ⇔ Bohren-, Dreh-, Fräs-, Schleifwerkzeuge
- Fügen ⇔ Passungen, Reibschweißen
- Beschichten ⇔ Spritzdüsen
- Stoffeigenschaftsändern ⇔ Oberflächentechnologien
- Stofftransport ⇔ Förderband, Pipeline
- Stoffabdichtung ⇔ Ventile, Kolben/Zylinder

(c) Informationsdeterminierte tribotechnische Systeme

- Signalspeicherung ⇔ Plattenspeicher, Floppy-Disc
- Signalübertragung ⇔ Nocken/Stößel, Schaltrelais
- Signalausgabe ⇔ Audio-Video-Abtast/Leseköpfe

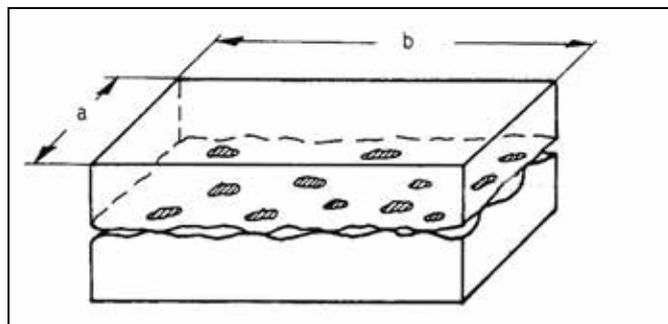
Abbildung 4**Wahre (schraffiert) und scheinbare (Produkt aus a und b) Kontaktfläche**

Tabelle 2
Beispiel für Blitztemperaturen in einem Tribosystem

Meßgröße	Temperaturen in °C				
	v = 0,305 m/s		v = 1,53 m/s		
	F _N = 4,45 N	F _N = 8,90 N	F _N = 4,45 N	F _N = 8,90 N	
Umgebungstemperatur	25	25	25	25	
Volumentemperatur (Stift)	30	36	56	77	
Blitztemperatur	Mittel	105	117	396	1080
	Max.	148	200	2353	2703
	Min.	94	98	102	116
Reibungszahl (bei F _N = 11,1 N)	f = 0,57 ... 0,85		f = 0,50 ... 0,53		

Materialdaten von Si₃N₄-Stift (1) und Saphir-Scheibe (2):

Dichte ρ (kg/m ³):	ρ (1) = 3190;	ρ (2) = 3980
E-Modul (GPa):	E (1) = 310;	E (2) = 365
Wärmeleitfähigkeit k (W/m · K):	k (1) = 24;	k (2) = 27
Spez. Wärme c (J/kg · K):	c (1) = 1078;	c (2) = 418

In entsprechenden Tribosystemen kann es durch eine solche punktuelle Temperaturerhöhung zu deutlichen Gefügeveränderungen kommen. Insbesondere in Verbindung mit der bei bestimmten Anwendungsfällen extrem schnellen Selbstabschreckung kann diese Wärmebehandlung zu unerwünschten Eigenschaftsänderungen der Oberflächen führen. Das Tückische am Auftreten von Blitztemperaturen ist, das in den meisten Fällen diese Möglichkeit der Werkstoffbeeinflussung nicht oder zu spät bedacht wird.

2.4 Verschleißmechanismen und ihre Erscheinungsformen

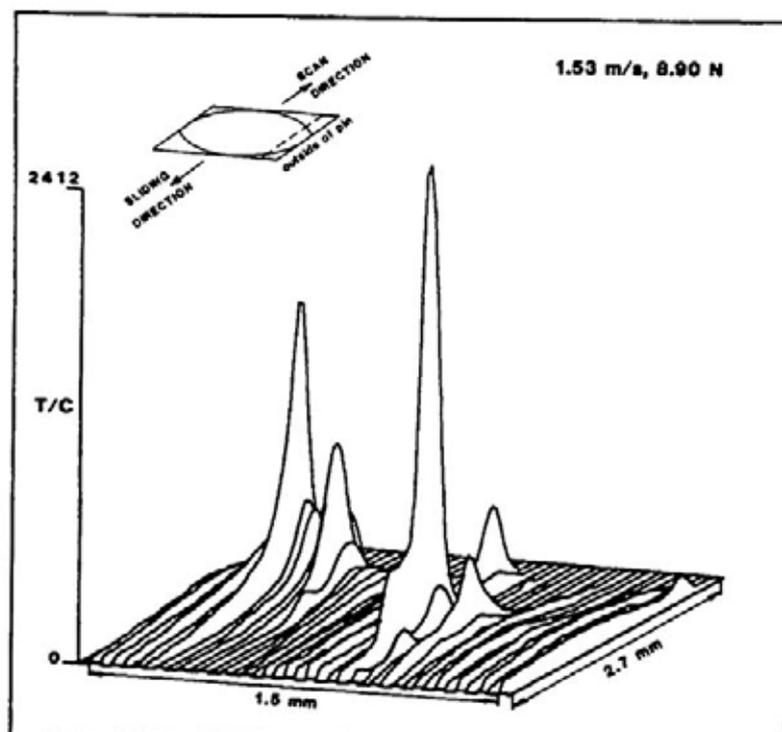
Wie schon im Kapitel vorher erläutert, stellt der Verschleiß von Werkstoffen eine Systemeigenschaft und keine Eigenschaft irgendeiner der beteiligten Komponenten dar. Die Einflussgrößen auf Verschleißvorgänge können vor diesem Hintergrund wie folgt aufgelistet werden:

- Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Zwischenstoff (Art, Teilchengröße u.a.)

- Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche)
- Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf)
- Art der Bewegung (Gleiten, Rollen, Stoßen u.a.)
- Umgebende Atmosphäre (z.B. Luft, Schutzgas, Vakuum)
- Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf)

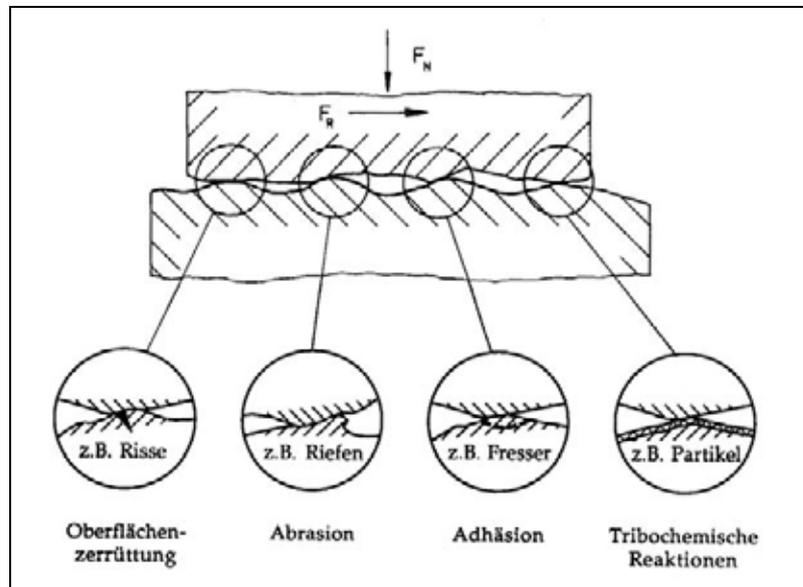
Abbildung 5

Beispiel für ein Temperaturfeld innerhalb einer Kontaktfläche



Verschleiß wird hauptsächlich durch vier unterschiedliche Verschleißmechanismen bestimmt (Abbildung 6), die im Folgenden kurz beschrieben werden sollen.

Abbildung 6
Grundlegende Verschleißmechanismen aufgrund der Relativbewegung
zweier Reibpartner



Oberflächenzerrüttung

Wenn ein Bauteil ständig durch Stöße auf seine Oberfläche oder durch häufig wiederkehrende Hertzsche Pressung beansprucht wird, tritt eine Zerrüttung der Randschicht auf. Durch diese dynamischen Beanspruchungen entstehen in der Randschicht bzw. in oberflächennahen Bereichen zunächst Mikrorisse, die beim Zusammenwachsen zu dem gefürchteten grübchen- bis hin zum flächenhaften Ausbrechen von Verschleißpartikeln aus der Oberfläche führen. Oberflächenzerrüttung tritt zum Beispiel in Wälzlagern durch das ständige Überrollen auf. Diese spezielle Form der Oberflächenzerrüttung wird auch häufig als Wälzverschleiß bezeichnet.

Die folgende Abbildung 7 zeigt den mikrostrukturellen Mechanismus, der zu den Mikrorissen führt.

Dabei werden als Vorstufe in den belasteten Oberflächenbereichen Gleitbänder erzeugt. Während der weiteren Beanspruchung findet an den Stellen, an denen die Gleitbänder die Oberfläche erreichen, eine bleibende Verformung mit entsprechenden Materialverdrängungen im mikroskopischen Bereich statt. Diese Phase stellt dann die Rissinitiierung der ersten Mikrorisse dar. Das typische Erscheinungsbild einer Oberflächenzerrüttung ist mit den richtigen mikroskopi-

schen Hilfsmitteln und ein wenig Erfahrung relativ einfach zu erkennen. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel, bei dem der Ausbruch aus der Oberfläche bereits einen größeren Bereich umfasst.

Abbildung 7

Mechanismus der Rissinitiierung durch Gleitbänder

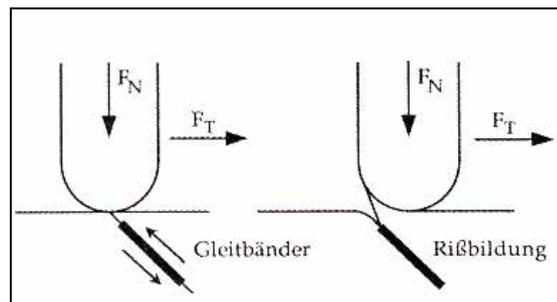
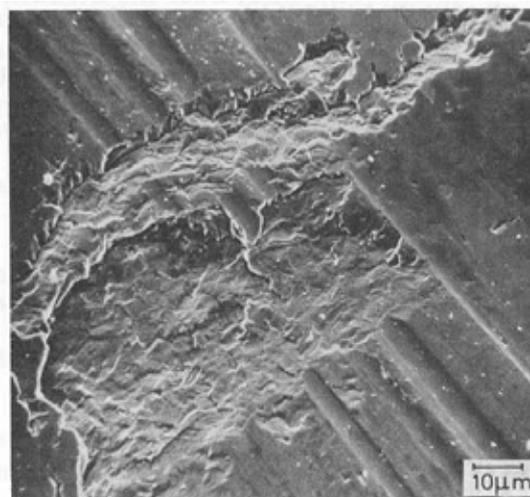


Abbildung 8

Typische Erscheinungsform der Oberflächenzerrüttung (REM)

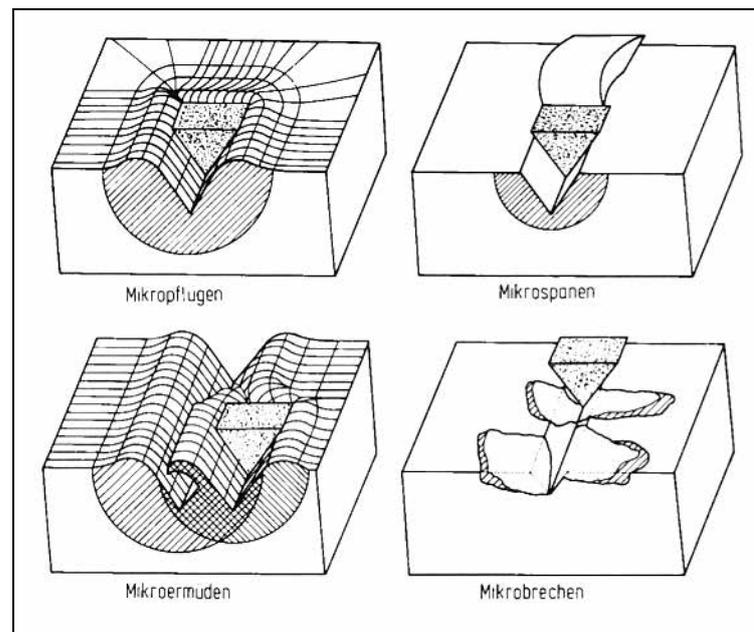


Abrasion

Abrasionsverschleiß (häufig auch Furchungverschleiß genannt) tritt auf, wenn der Gegenkörper beträchtlich härter und rauer ist als der Grundkörper oder wenn harte Partikel (dies wird z.B. beim Fertigungsprozess des Schleifens gewollt ausgenutzt) in den tribologisch beanspruchten Grundkörper eingedrückt

werden. Wenn solche harten Teilchen oder Spitzen eines der Reibungspartner in die Randschicht eindringen, so entstehen Furchen, Kratzer und Mulden. Dies zeigt auch Abbildung 9 recht deutlich, in der die Detailvorgänge schematisch dargestellt werden.

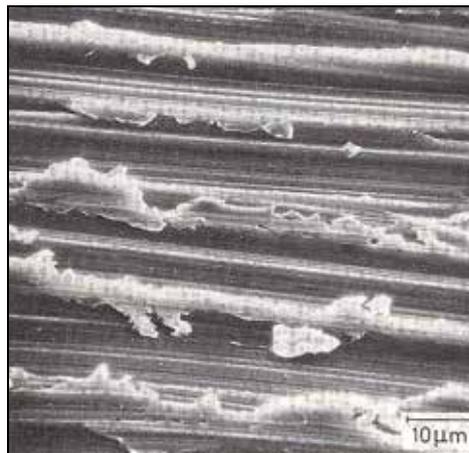
Abbildung 9
Detailvorgänge bei abrasiver Beanspruchung einer Oberfläche



Es wird danach unterschieden in Mikropflügen, Mikrospanen, Mikroermüden und Mikrobrechen. Welcher dieser Mechanismen auftritt, hängt ganz entscheidend von der Härte und vom Gefüge des beanspruchten Werkstoffes bzw. seiner Oberfläche ab. Dabei begünstigen weiche Oberflächen das Mikropflügen und das Mikroermüden, da hierzu der Werkstoff bleibend plastisch verformt, jedoch noch nicht endgültig aus der Oberfläche herausgetrennt wird. Das Mikrospanen und noch mehr das Mikrobrechen sind deutliche Hinweise auf eine eher harte Oberfläche. Doch auch das Werkstoffgefüge der Oberfläche spielt eine wesentliche Rolle. Bei gleicher gemessener Makrohärte wird sich eine abrasiv beanspruchte Oberfläche, die z.B. durch eine durchgehende vollflächige Beschichtung gehärtet wurde, vollkommen anders verhalten als eine durch feinverteilte Ausscheidungsteilchen gehärtete Oberfläche.

Die Erscheinungsformen des Abrasivverschleißes sind aufgrund der oben geschilderten und dargestellten Detailvorgänge nicht immer leicht zu unterscheiden. Ein typisches rasterelektronenmikroskopisches Bild zeigt die Abbildung 10.

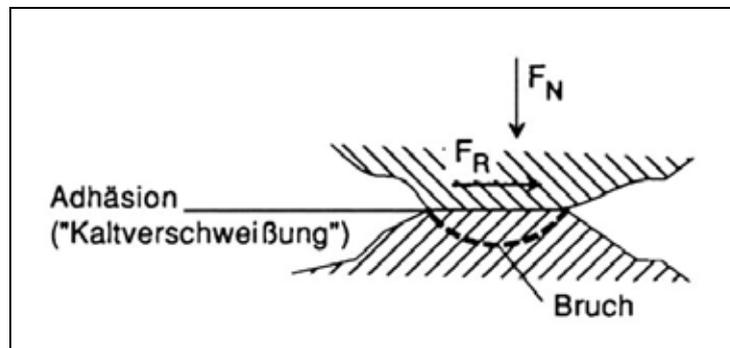
Abbildung 10
Typische Erscheinungsform der Abrasion,
hier mit deutlichen Anteilen des Mikropflügens (REM)



Adhäsion

Liegen sich berührende Bauteile fest aufeinander, so haften die Berührungsflächen infolge Adhäsion aneinander. Beim Gleiten werden dann Teilchen abgeschert. Es entstehen so Löcher und schuppenartige Materialteilchen, die oft an der Gleitfläche des härteren Partners haften bleiben. Adhäsionsverschleiß wird daher auch häufig als Haftverschleiß bezeichnet. Adhäsiver Verschleiß entsteht, wenn Bauteile ohne Zwischenstoff gegeneinander bewegt werden oder der Zwischenstoff durch hohe Flächenpressung verdrängt wird (also i.d.R. bei mangelnder Schmierung). Abbildung 11 zeigt den grundlegenden Mechanismus in einer schematischen Darstellung.

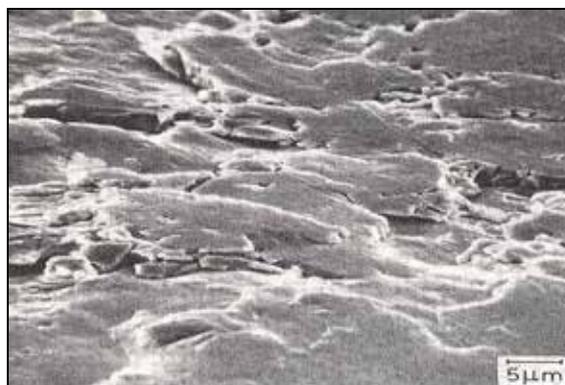
Abbildung 11
Modellvorstellung des adhäsiven Verschleißes



Bei adhäsivem Verschleiß findet also zunächst eine Kaltverschweißung zwischen den Reibpartnern statt. Die dadurch aktivierten Bindungen sind so stark, dass, meist aus dem weicheren Reibpartner, Randschichtteilchen abgeschert und herausgerissen werden.

Eine reale Aufnahme aus einem Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigt auch hier wieder die typische Erscheinungsform mit den fladenförmigen Auftragungen auf die Oberfläche des Reibpartners, (Abbildung 12). Je nach Probennahme und Betrachtung können natürlich sowohl die Ab- als auch die Auftragungen gefunden werden.

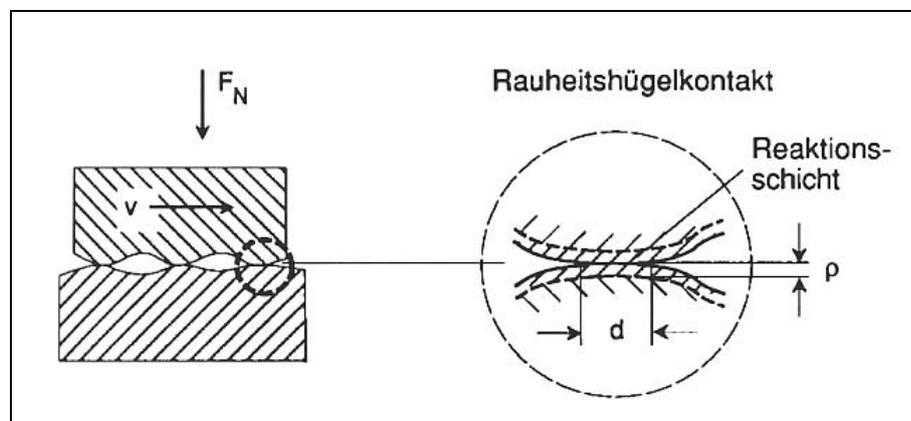
Abbildung 12
Typische Erscheinungsform der Adhäsion (REM)



Tribochemische Reaktionen

Die Bildung von Zwischenschichten, z.B. Oxidschichten, infolge chemischer Reaktion und ihre Zerstörung durch Bewegung der Bauteile nennt man Reaktionsschichtverschleiß. Er tritt fast immer zusammen mit adhäsivem Verschleiß auf. Diesen Verschleißmechanismus, der infolge einer Kombination aus einer chemischen Reaktion und mechanischer Zerstörung der Reaktionsschicht entsteht, nennt man recht treffend „tribochemische Reaktion“. Abbildung 13 zeigt, dass diese Reaktion in den sich berührenden, hoch beanspruchten Rauigkeitshügeln der beiden Reibpartner abläuft, (siehe linke Seite der Abbildung 13). An diesen Stellen bildet sich reibungsinitiiert eine dünne Reaktionsschicht (rechte Seite, Abbildung 13), die dann durch die weitere Relativbewegung zerstört und abgetragen wird.

Abbildung 13
Schematische Darstellung der Vorgänge
beim tribochemischen Verschleiß



Die Reaktionen und damit die Reaktionsprodukte auf der beanspruchten Werkstoffoberfläche können recht komplex sein. So kann z.B. das Umgebungsmedium oder der Zwischenstoff jeweils mit einem oder beiden Verschleißpartnern chemisch reagieren. Dabei können auch Reaktionen ablaufen, die thermodynamisch zunächst nicht zu erwarten waren. Sind die dabei entstehenden Reaktionsprodukte noch wesentlich härter als der Grundwerkstoff, so können sie nach dem Abtrag aus der Oberfläche als „neue“ Verschleißpartikel z.B. zu dem gefürchteten Sekundärverschleiß führen.

Für das Erkennen dieses Verschleißmechanismus´ ist aufgrund seiner doch recht hohen Komplexität sehr viel Erfahrung notwendig. Abbildung 14 zeigt auch hierzu wieder ein typisches REM-Bild.

Abbildung 14

Erscheinungsform des Verschleißes aufgrund tribochemischer Reaktion



Abschließend zu diesem Kapitel gibt die Tabelle 3 eine praxistaugliche Übersicht aller möglichen tribologischen Beanspruchungsarten sowie dem dabei möglichen Verschleißmechanismus. In fast allen Fällen ist nicht nur ein Mechanismus sondern in der Spitze alle 4 der oben dargestellten Verschleißmechanismen vorzufinden.

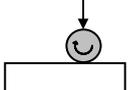
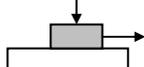
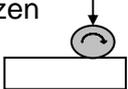
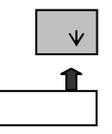
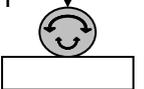
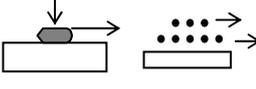
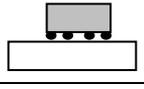
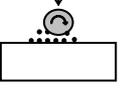
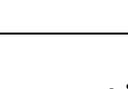
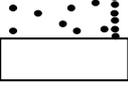
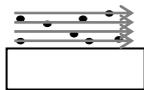
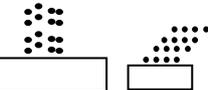
3. Optimierung des Verschleißwiderstandes

3.1 Härte und Verschleiß

Hohe Härte = Niedriger Verschleiß ?

Abbildung 15 stellt diese beiden Größen in einem recht aufschlussreichen Diagramm gegenüber und es sind wichtige Zusammenhänge zu erkennen.

Tabelle3
Übersicht Beanspruchungsarten und Verschleißmechanismen

Elemente der Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung (Symbole)	Verschleißart	4 Wirksame Mechanismen			
			4.1 Adhäsion	Abrasion	Oberfl. zerr.	Tribochem.
Festkörper (1) Zwischenst. (3) Festkörper (2)	Gleiten, Rollen, Wälzen, Prallen, Stoßen 	—			X	X
Festkörper (1) Festkörper (2)	Gleiten 	Gleit-V.	X	X	X	X
	Rollen, Wälzen 	Roll-V. Wälz-V.	X	X	X	X
	Prallen, Stoßen 	Prall-V. Stoß-V.	X	X	X	X
	Oszillieren 	Schwingungs-V.	X	X	X	X
Festkörper (1) Festkörperpartikel (2)	Gleiten 	Furchungs-V. Erosions-V.		X		X
	Gleiten 	Kornleit-V. 3-Körper-V.		X	X	X
Festkörper (1) Festkörper (2) Festkörperpartikel (3)	Wälzen 	Kornwälz-V.		X	X	X
	Mahlen 	Mahl-V.		X	X	X
Festkörper (1) Flüssigkeit mit Partikeln (2)	Strömen 	Spül-V. (Erosions-V.)		X	X	X
Festkörper (1) Gas mit Partikeln (2)	Strömen 	Gleitstrahl-V. (Erosions-V.)		X	X	X
	Prallen 	Prallstrahl-V. Schrägstrahl-V.		X	X	X

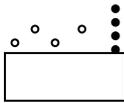
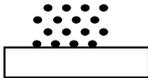
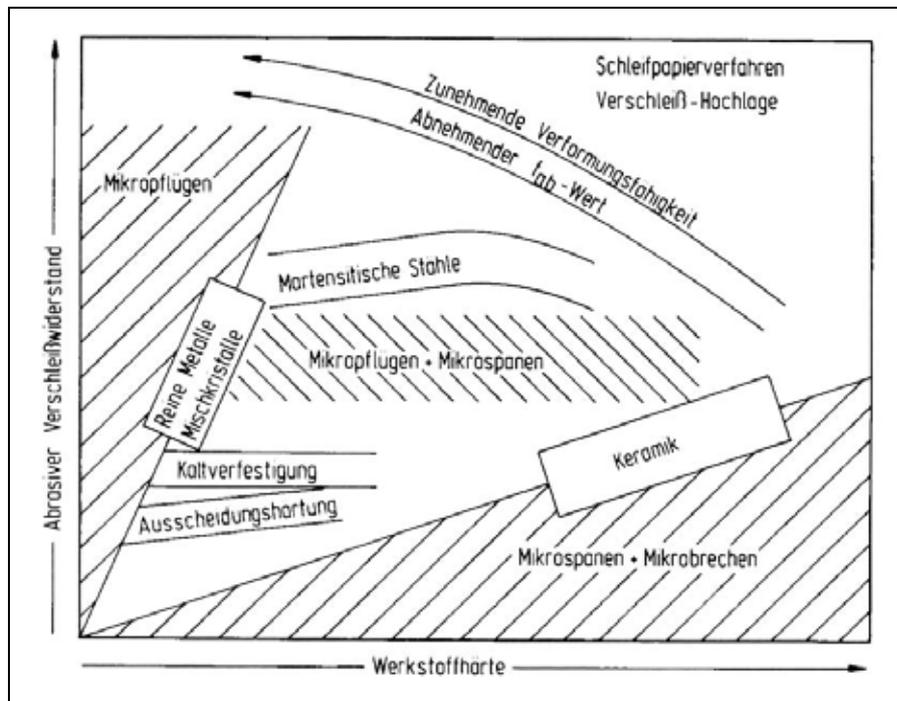
Festkörper (1) Flüssigkeit oder Gas (2)	Strömen, Schwingen 	Werkstoffkavitation Kavitationserosion			X	X
	Stoßen 	Tropfenschlag			X	X

Abbildung 15

**Abrasiver Verschleißwiderstand in Abhängigkeit der Werkstoffhärte
(rein qualitativ), nach: zum Gahr**



Eingezeichnet sind in diesem rein qualitativen Diagramm die Ergebnisse aus Versuchen zum Abrasivverschleiß bei Keramiken und Metallen. In beiden Fällen zeigt sich deutlich, dass eine höhere Härte offensichtlich zunächst auch einen höheren Verschleißwiderstand zur Folge hat. Es zeigt sich auch, wie oben bereits erläutert (Kap. 2.4 – Abrasion), dass bei weicheren, verformungsfähigeren Werkstoffen das Mikropflügen überwiegt. Je härter die Oberfläche ist, umso mehr werden jedoch Mikrospanen und Mikrobrechen beobachtet. In einem Zwischenbereich wird eine Kombination aus beiden Mechanismen gefunden. Eingezeichnet sind auch die in Metallen und Legierungen i.d.R. erreichbaren Här-

ten. In Abhängigkeit vom Härtungsmechanismus (Mischkristallhärtung, Kaltverfestigung, Ausscheidungshärtung) sind unterschiedlich hohe erreichbare Niveaus des Verschleißwiderstandes zu erkennen. Besonders erwähnenswert ist hierbei die Tatsache, dass ausscheidungsgehärtete Stähle (Anmerkung: Die Ausscheidungshärtung gilt i.A. als der effektivste Härtungsmechanismus mit den höchsten erreichbaren Festigkeitszunahmen!) deutlich schlechter abschneiden als z.B. lediglich kaltverfestigte Stähle. Dies kann mit der besonderen Mikrostruktur erklärt werden: Die bei der Ausscheidungshärtung entstehenden harten aber sehr kleinen Teilchen können bei Abrasivbeanspruchung leicht mit der ansonsten vergleichsweise weichen Matrix weggepflügt werden. Ganz anders wäre die Situation jedoch bei Gleitbeanspruchung. Hier hätte bei gleichen Werkstoffen und Härtungsmechanismen eine Ausscheidungshärtung meistens die besten Ergebnisse zur Folge.

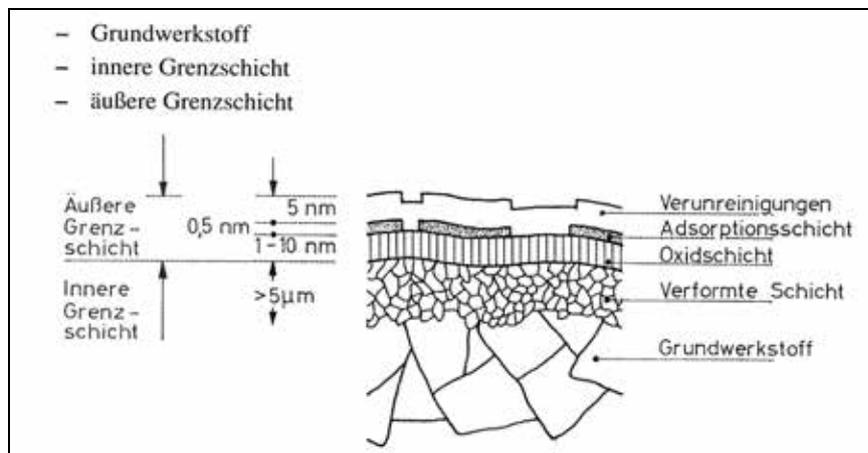
Ganz so trivial stellt sich der Sachverhalt damit nicht da. Die Werkstoffeigenschaften und das Gefüge müssen in diesem Zusammenhang immer gemeinsam betrachtet werden.

3.2 Modifikation der Oberfläche

Ohne Zweifel spielt die Werkstoffoberfläche bei dem Verschleißverhalten eine ganz zentrale Rolle. Ihre gezielte Beeinflussung und Optimierung entsprechend dem jeweils anliegenden Beanspruchungsprofil ist heute mit innovativen Fertigungstechniken sehr gut realisierbar. Die folgende Abbildung 16 zeigt schematisch den typischen Aufbau einer technischen Werkstoffoberfläche.

Mit einer umfassenden mikroskopischen Analyse kann sehr gut unterschieden werden zwischen dem Grundwerkstoff und den so genannten inneren und äußeren Grenzschichten. Letztere haben meistens Dicken von wenigen nm, d.h. dass eine genaue Analyse hier schnell an ihre technischen Grenzen stößt und häufig nur mit großem Aufwand mit hochauflösender Durchstrahlungselektronenmikroskopie möglich ist. Dagegen ist die innere Grenzschicht bereits sehr gut mit normaler Lichtmikroskopie erkennbar.

Abbildung 16
Typischer Aufbau einer Werkstoffoberfläche, schematisch



Wird nun auf einen Werkstoff eine Beschichtung aufgebracht sieht der schematische Aufbau in etwa wie in der Abbildung 17 gezeigt aus. Kennzeichnend ist eine direkt unter der eigentlichen Beschichtung liegende Zwischenschicht, die abhängig von Beschichtungswerkstoff, Grundwerkstoff und angewendeten Beschichtungsverfahren in einem Dickenbereich zwischen wenigen nm bis hin zu cm liegen kann. Dagegen sind als typische Schichtdicken der aufgetragenen Funktionsschicht (ebenfalls in Abhängigkeit von Beschichtungswerkstoff, Grundwerkstoff und angewendeten Beschichtungsverfahren) Werte zwischen ca. 0,1 µm und 1 cm möglich.

Neben den Schichtdicken sind für die spätere praktische Anwendung, wie oben ausführlich geschildert, auch die mit den unterschiedlichen Schichten erreichbaren Härten von besonderem Interesse. In Abbildung 18 sind daher unterschiedliche Schichtarten bzw. Beschichtungsverfahren mit ihren jeweiligen Härten und Schichtdicken gegenübergestellt.

Abbildung 17

Typischer Aufbau einer beschichteten Werkstoffoberfläche, schematisch

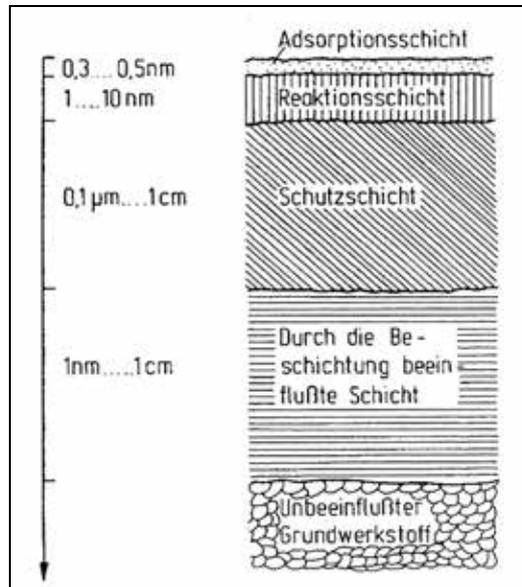
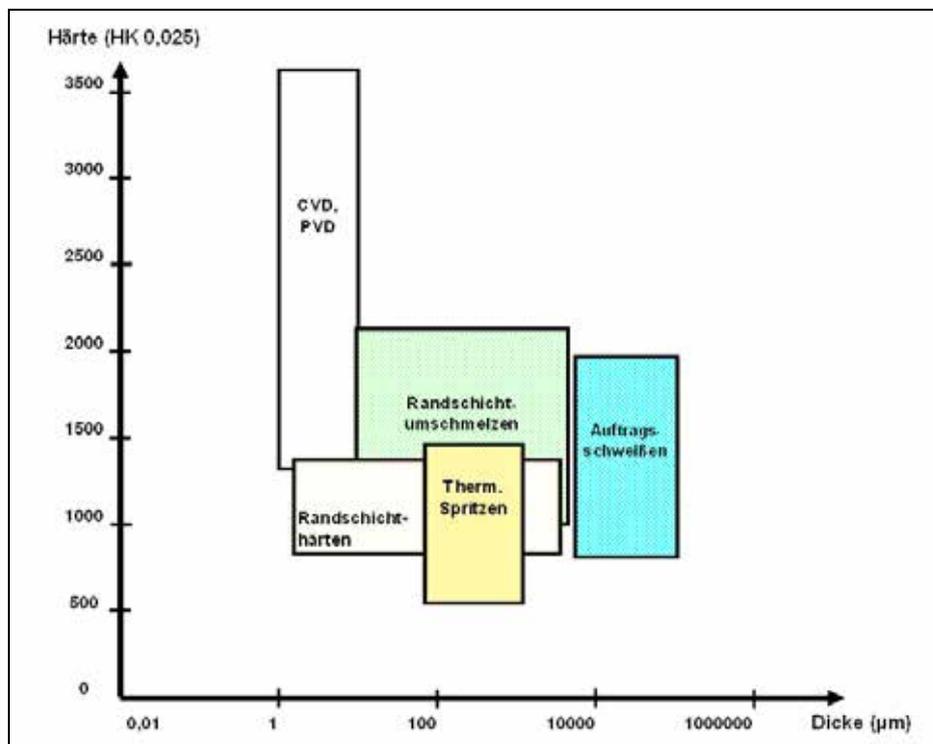


Abbildung 18

Beschichtungen mit ihren Schichtdicken und Oberflächenhärten



Deutlich ist zu erkennen, dass Beschichtungsverfahren wie CVD (chemical vapour deposition) und PVD (physical vapour deposition) bisher unerreicht in den maximal möglichen Oberflächenhärten sind (> 3.500 HV). Dies liegt daran, dass mit diesen Verfahren auch komplexe Hartstoffe in vorzüglicher Qualität auf das Substrat aufgebracht werden können. Allerdings sind die möglichen Schichtdicken mit max. ca. $50 \mu\text{m}$ nach oben hin gegenüber anderen Verfahren deutlich eingeschränkt. Das Maximum hierbei kann mit dem Auftragsschweißen erzielt werden. Neuere Verfahren in Kombination mit Hochleistungslasern geben dem Auftragsschweißen für die Zukunft weiteres sehr positives Potential (siehe auch den Beitrag von R. Wahl in diesem Berichtsband). Als überaus viel versprechend erweist sich beispielsweise dieses Verfahren bei der Oberflächenmodifikation von Werkzeugen (z.B. Stanzwerkzeuge oder auch Werkzeuge für die Walzumformung). Hier wird auf einen vergleichsweise preiswerten und einfachen Grundwerkstoff die entsprechend geforderte Oberflächenschicht durch das Einlegieren bzw. Auftragsschweißen von definierten Hartstoffteilchen erzeugt. Die Funktion, die für den späteren Stanz- oder Walzprozess benötigt wird, eben primär eine hohe Härte, wird nun allein durch die ausreichend dicke und tragfähige Schicht realisiert; wohingegen der Grundwerkstoff eher eine abstützende Funktion übernimmt.

Solche Systeme sind gegenwärtig von zentraler Bedeutung in den aktuellen Entwicklungsarbeiten des Kooperationsprojektes zwischen der Max und Erni Bühler-Stiftung und dem Bereich Maschinenbau (vertreten durch die Institute Fertigungstechnik und Werkstoffkunde). Hierzu sei insbesondere auf den Beitrag von U. Christian und A. Baum, ebenfalls in diesem Berichtsband, hingewiesen. Über die weiteren Ergebnisse wird in den zukünftigen Technik-Foren und schriftlich in den Hochschulberichten immer aktuell informiert.

Roland Wahl

Aufgaben des Lasers im Werkzeugbau

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

Die Lasertechnologie hat sich im Werkzeugbau durch ihre Merkmale und ihre erzielbaren Ergebnisse zahlreiche Aufgaben erschlossen. Neben wenigen seit längerer Zeit etablierten Anwendungen, sind die meisten dieser erschlossenen Aufgaben und Anwendungsgebiete relativ neu. Das ist einerseits auf Weiterentwicklungen in den Leistungsfähigkeiten der Laser zurückzuführen, insbesondere aber auf Weiterentwicklungen der Verfahrenstechniken beim Lasereinsatz an den Werkzeugen. Zusammenfassend sind die Potenziale des Lasers im Werkzeugbau insbesondere bei folgenden Aufgaben zu finden:

- bei der lokalen Panzerung von Werkzeugen während der Erstfertigung oder bei Nachbesserungen
- bei Werkzeugreparaturen
- bei der Herstellung von Werkzeugen mit Hohlräumen oder Hinterschneidungen
- im Formenbau mit Präzisionsgravuren.

Summary

Due to their features and its obtainable results the Laser technology has developed numerous tasks in tool engineering. Besides few applications established for quite a long time, most of these developed tasks and application areas are relatively new. This is on the one hand in the efficiencies of the Lasers itself, but particularly on further developments on the process engineering at laser use at the tools, however. The following tasks may summarize the benefits of the Laser-technology in tool engineering:

- at the local armour-plating of tools during the first production or at improvements
- at tool repairs
- at the production of tools with cavities or behind undercuts
- in the form tooling with precision engravings

1 Einführung

Die Weiterentwicklung der Lasertechnologie hin zu neuen Lasern mit verbesserten Eigenschaften, insbesondere aber auch die Weiterentwicklungen in den Verfahrenstechnologien bei der Materialbearbeitung mit Lasern, haben in der jüngeren Vergangenheit der Lasertechnik einige sehr interessante neue Möglichkeiten geschaffen, sinnvoll und gewinnbringend im Werkzeugbau genutzt zu werden. Diese neuen Aufgaben des Lasers im Werkzeugbau stehen im Mittelpunkt dieses Beitrags.

2 Etablierte Laseranwendungen im Werkzeugbau

Vor der Beschreibung neuer Aufgaben des Lasers im Werkzeugbau im nächsten Kapitel, sei hier zunächst aufgezeigt, dass sich in einigen Anwendungen bereits heutzutage Lasertechnologie im Werkzeugbau etabliert hat. Dies insbesondere bei zwei Anwendungen, die nachfolgend beschrieben sind.

So werden schon heute für kleinere Reparaturen an Werkzeugen der Umformtechnik, der Kunststoffverarbeitung, aber auch des Stanzens oder Gießens, handgeführte mobile Lasergeräte eingesetzt. Mit deren Hilfe werden an verschlissenen und abgetragenen Zonen der Werkzeuge punktuelle Laserauftragsschweißungen durchgeführt. Die Durchführung eines solchen handgeführten Reparaturvorgangs ist in Abbildung 1 dargestellt.

Das aufzutragende Zusatzmaterial muss für eine zweckmäßige Verarbeitung in Drahtform zur Verfügung stehen. Das schränkt den Umfang der in Frage kommenden, mit diesem Verfahren aufzutragenden Werkstoffe natürlich stark ein. Es sind jedoch am Markt zahlreiche Werkzeugstähle in geeigneter Drahtform verfügbar. Die punktuelle Arbeitsweise ermöglicht die Verwendung kleiner, gepulster Festkörperlaser, was gut ist für die Investitionskosten einer solchen Anlage. Jedoch sind durch die Handführung und den nur punktuellen Materialauftrag die Auftragsraten sehr gering, was die Beschränkung der Anwendung auf kleine Reparaturen an den Werkzeugen erklärt.

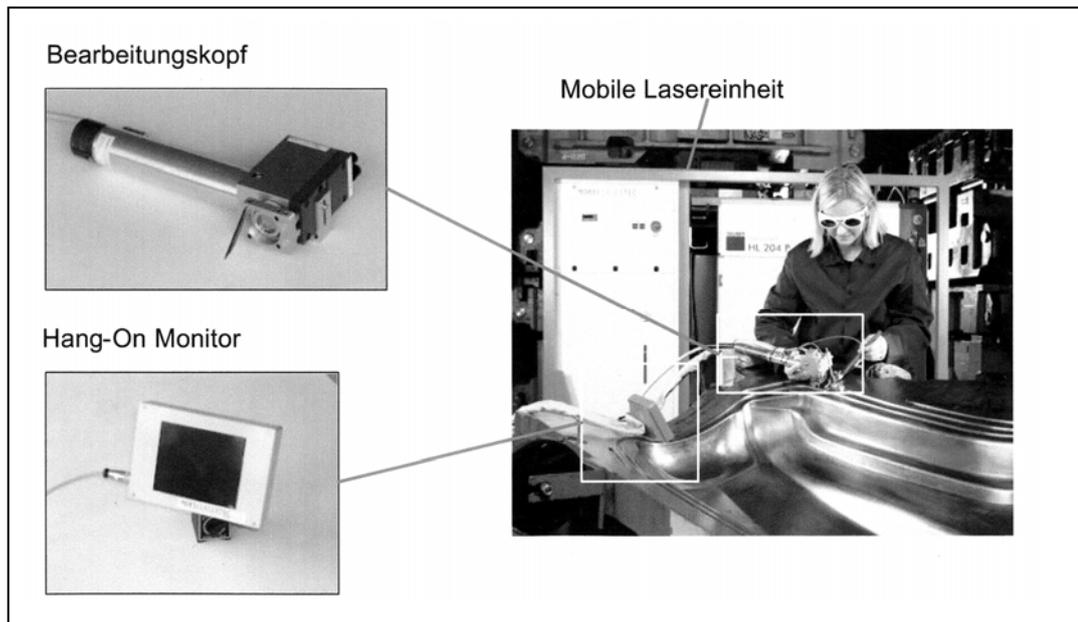
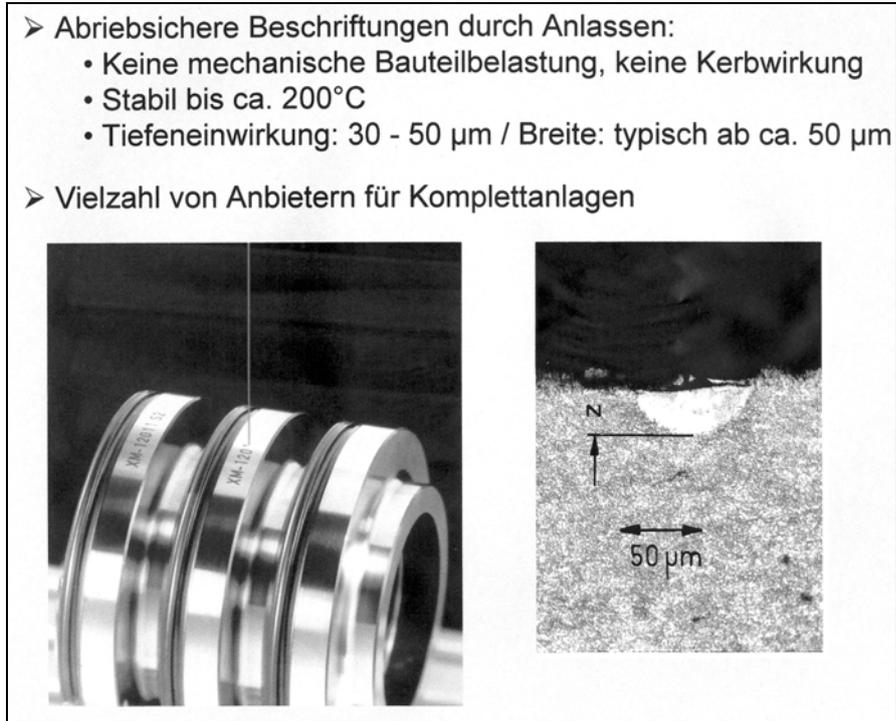
Abbildung 1**Manuelles punktuelles Laserauftragschweißen für kleine Reparaturen**

Bild: Mobil-Laser-Tec, Wolfsburg

Eine weitere etablierte Anwendung von Lasertechnologie in der Technik insgesamt, und somit auch im Werkzeugbau, ist das Beschriften mittels Laser. Abbildung 2 zeigt ein durch Anlassen laserbeschriftetes Werkzeug. Speziell diese Verfahrensvariante, durch Anlassen zu Beschriften, birgt Vorteile gegenüber Verfahrensalternativen. So wird gegenüber Beschriftungen mittels Tintenstrahldruckern generell durch Laserbeschriften der Vorteil einer Abriebsicherheit erzielt. Gegenüber Verfahren, die durch eine Gravur beschriften, bietet eine Laserbeschriftung mittels Anlassen eine höhere mechanische Festigkeit der Bauteile, da keine Kerben erzeugt werden.

Abbildung 2

Beschriften von Werkzeugen mittels Laser



Bilder: TRUMPF, Schramberg

3 Neue Laseranwendungen im Werkzeugbau

3.1 Laser-Tiefgravieren im Formenbau

Ein neues Potenzial speziell für den Formenbau schafft das Tiefgravieren mittels Laser. Hierzu wird durch eine Folge energiereicher Laserpulse ein Abtrag in einer Oberfläche erzeugt. Durch die Anzahl der Laserpulse, die auf die gleiche Oberflächenstelle gerichtet werden, sowie durch deren Energie, kann die Tiefe der erzeugten Gravur gezielt gesteuert werden. Durch das seitliche Verfahren von Laserstrahl und Werkstück zueinander wird die Form der abgetragenen Kontur gesteuert.

Wie die Abbildungen 3 und 4 zeigen, kann das Laser-Tiefgravieren auf verschiedene Arten nutzbringend in den Ablauf einer Formherstellung integriert werden. So ist es zum einen möglich, mittels der Laser-Tiefgravur direkt die gewünschte Form in ein Werkzeug einzubringen. Zum anderen kann aber auch, wenn die Herstellung der beabsichtigten Werkzeugform mittels Funkenerosion

favorisiert wird, das Potenzial des Laser-Tiefgravierens bei der Herstellung der Erodierwerkzeuge genutzt werden. Hier besteht durch den Laser eine elegante, weil nicht-mechanische, Möglichkeit, die gewünschten Konturen der Erodierwerkzeuge aus Kupfer oder aus Graphit herzustellen.

Abbildung 3

Direktes Laser-Tiefgravieren einer Form in ein Werkzeug



Bilder: LBC, Kornwestheim

Abbildung 3

Laser-Tiefgravieren eines Erodierwerkzeuges zur Werkzeugherstellung



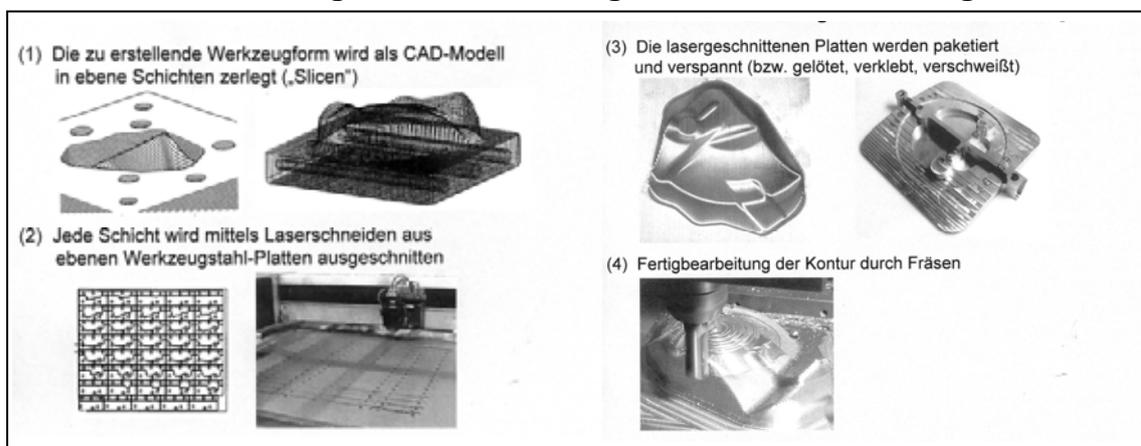
Bild: LBC, Kornwestheim

3.2 Laminierte lasergeschnittene Werkzeuge

Eine weitere, noch in der Pilotphase befindliche neue Laseranwendung im Werkzeugbau, besteht in einer neuen Technologie zur Werkzeugherstellung: Dem Laserschneiden von Werkzeugstahlplatten im Rahmen der Herstellung laminierter lasergeschnittener Werkzeuge. Das Laserschneiden, auch von Werkzeugstahlplatten, ist eine etablierte und keineswegs neue Technologie. Der Neuigkeitswert liegt hier im Gesamtablauf der Werkzeugherstellung, weshalb diese in Abbildung 5 dargestellt ist. (/1/, /2/, /3/, /4/)

Abbildung 5

Herstellung laminierter lasergeschnittener Werkzeuge



Bilder: FhG-IWS, Dresden

Insgesamt liegen die angestrebten Vorteile durch dieses neue Werkzeugherstellungsverfahren darin, dass der Aufwand zur Herstellung des räumlichen Werkzeugrohnteiles, z.B. Herstellung eines Gusskörpers, wegfällt und durch das im Aufwand demgegenüber sehr einfache Laserschneiden ebenen Plattenmaterials ersetzt wird. Eine Finish-Bearbeitung des Werkzeugs fällt beim klassischen Weg einer Werkzeugherstellung, wie auch bei diesem beschriebenen neuen Weg in jedem Fall an, z.B. durch Fräsen und anschließendes Schleifen.

Ein neues Potenzial eröffnet die Werkzeugherstellung mittels laminierter lasergeschnittener Werkzeuge dadurch, dass es hier ohne Zusatzaufwand möglich ist, hohle Werkzeugformen herzustellen. Das kann beispielsweise dazu genutzt werden, im Inneren der Werkzeugform Kühlkanäle mit einem komplexen Verlauf zu generieren, siehe Abbildung 6. Die hinterschnittenen oder hohlen Werkzeugformen entstehen auf einfachem Weg dadurch, dass in die später gesta-

pelten Werkzeugstahlplatten zuvor mittels Laserschnitt die Aussparung, also der zukünftige Hohlraum, in jede Platte hineingeschnitten wird.

Abbildung 6
Hohlkonturen (Kühlkanäle) in einem laminierten
lasergeschnittenen Werkzeug



Bilder: FhG-IWS, Dresden

Diese Technologie befindet sich derzeit noch in einer Pilot-Einsatzphase bei einigen mit Forschungs- und Entwicklungsinstituten kooperierenden Unternehmen. Hierbei müssen noch z.B. eine hinreichende Stabilität sowie Mediendichtigkeit der Werkzeuge geprüft und sichergestellt werden. Insbesondere bei der Herstellung hohler und hinterschnittener Werkzeugkonturen kann bei Erfolg ein deutliches Potenzial dieser Technologie erwartet werden. (/1/)

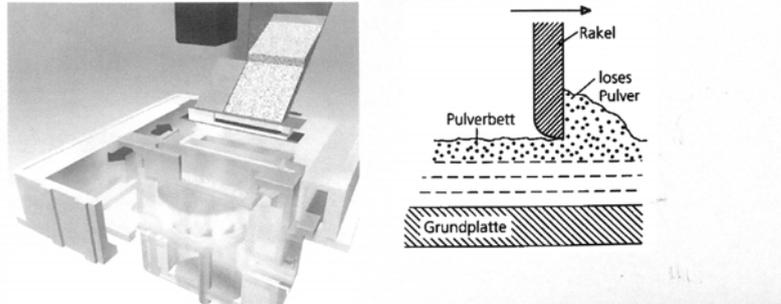
3.3 Rapid-Tooling mittels Laser-Sintern

Die hier beschriebene Technologie des Laser-Sinterns wird auch häufig als Laser-Generieren bezeichnet. Letzterer Begriff beschreibt auch anschaulich, wozu in diesem Fall die Lasertechnologie im Werkzeugbau verwendet wird: Zur Generierung kompletter Werkzeuge mittels Urformen aus einem Pulverbett. (/5/, /6/)

Abbildung 7

Ablauf des Rapid-Tooling mittels Laser-Sintern

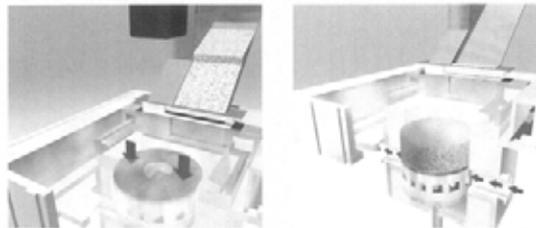
- (1) Auf die Grundplatte wird eine Schicht des Pulvers aufgetragen, aus dem das Bauteil entstehen soll. Mit einem Raker wird es glattgezogen. Typische Schichtdicken: 50 – 150 μm .



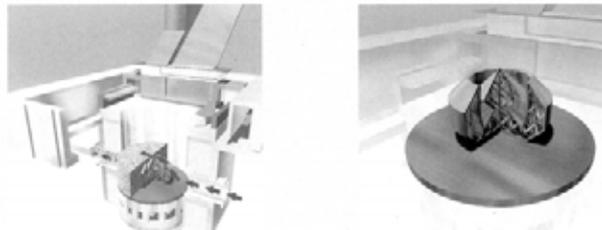
- (2) Der Laserstrahl wird gezielt nur über die Stellen des Pulverbetts geleitet, die zur neuen Schicht des geplanten Bauteils gehören.



- (3) Die Plattform wird abgesenkt. Die Schritte (1) und (2) werden wiederholt, bis schichtweise das gesamte Bauteil im Inneren des Pulverbetts entstanden ist.



- (4) Nach der Abkühlung kann das Bauteil aus dem Pulverbett entnommen werden.



Bilder: TRUMPF, Ditzingen / FhG-IWS, Dresden

Der Ablauf einer Werkzeugherstellung mittels Laser-Sintern ist in Abbildung 7 dargestellt. Das herzustellende Werkzeug wird Schicht für Schicht hergestellt. Hierzu verfügt die Anlage, auf der das Verfahren durchgeführt wird, über einen in der Höhe verstellbaren Tisch. Der Tisch befindet sich zunächst ganz oben

und es wird eine erste definiert dünne Pulverschicht aufgetragen. Der Laserstrahl wird anschließend nur über die Stellen des Pulverbetts geführt, an denen das Pulver zu einem zusammenhängenden festen Körper geschmolzen werden soll. So entsteht zunächst die unterste dünne Schicht des geplanten Werkzeugs.

Abbildung 8

Beispiele mit Laser-Sintern hergestellter hohler Werkzeugformen



Bilder: TRUMPF, Ditzingen

Das Pulverbett wird danach abgesenkt, die nächste dünne Pulverschicht aufgetragen und wieder an den gewünschten Stellen zusammenschmolzen. Der Ablauf wird im Weiteren vielfach wiederholt, bis Schicht für Schicht das gesamte gewünschte neue Werkzeug aus dem Pulverbett entstanden ist.

Auch hier ist es wieder ohne nennenswerte Zusatzaufwände oder –kosten möglich, auch hohle und hinterschnittene Werkzeugkonturen herzustellen. Die Bilder der Abbildung 8 zeigen dies anhand augenfälliger Beispiele.

Zu dieser Technologie sind einsatzbereite Anlagen am Markt verfügbar, bzw. bestehen Dienstleistungsunternehmen, die dies im Auftrag ausführen. Die Toleranzen der generierten Werkstücke sollen typischerweise im Bereich von 0,1 bis 0,2 mm liegen, was deutlich unter den ohnehin notwendigen Erodieraufmaßen von typischerweise 0,3 bis 0,6 mm liegt. Eine vollständige Porenfreiheit dieser aus Pulver hergestellten Werkzeuge wird berichtet, wenn Pulver mit Korndurchmessern von höchstens 50 µm verwendet werden. Solche Pulver sind auch aus vielen Werkzeugstählen verfügbar, wenn auch mit bis zu € 1.000,- je kg recht teuer.

Die verfahrenstechnische Einfachheit der Herstellung auch komplexer Werkzeugkonturen macht dieses Verfahren für viele Anwendungen dennoch wirtschaftlich. Und die Arbeit mit einem Werkzeug, das z.B. aufgrund zuvor nicht für vorstellbar gehaltener Kühlkanalverläufe schnellere Taktzeiten z.B. beim Spritzgießen ermöglicht, ergibt einen permanenten Kostenvorteil beim Einsatz eines solchen Werkzeugs.

3.4 Maschinelles Laserauftragschweißen mit Hochleistungslasern

3.4.1 Laserauftragschweißen zur Werkzeugreparatur

Wie schon bei der im Kapitel 2 geschilderten etablierten Technologie des handgeführten Laserauftragschweißens zu Reparaturzwecken, so ist eine Durchführung dieses Verfahrens auch mittels höheren Laserleistungen möglich. Dann ist jedoch eine handgeführte Durchführung nicht mehr angemessen, sondern der Prozess ist maschinell durchzuführen. Als Nachteile einer maschinellen Durchführung mit Hochleistungslasern können einzig höhere Investitionskosten sowie ein höherer Programmieraufwand identifiziert werden. (/7/)

Wesentlich sind die Vorteile eines maschinellen Laserauftragschweißens mit höherer Laserleistung gegenüber dem handgeführten punktuellen Arbeiten:

- höhere Auftragsraten: Mehr Auftragsvolumen in kürzerer Zeit
- bessere Gleichmäßigkeit
- bessere Reproduzierbarkeit

Abbildung 9

Prozessschritte beim Laserauftragschweißen zur Werkzeugreparatur

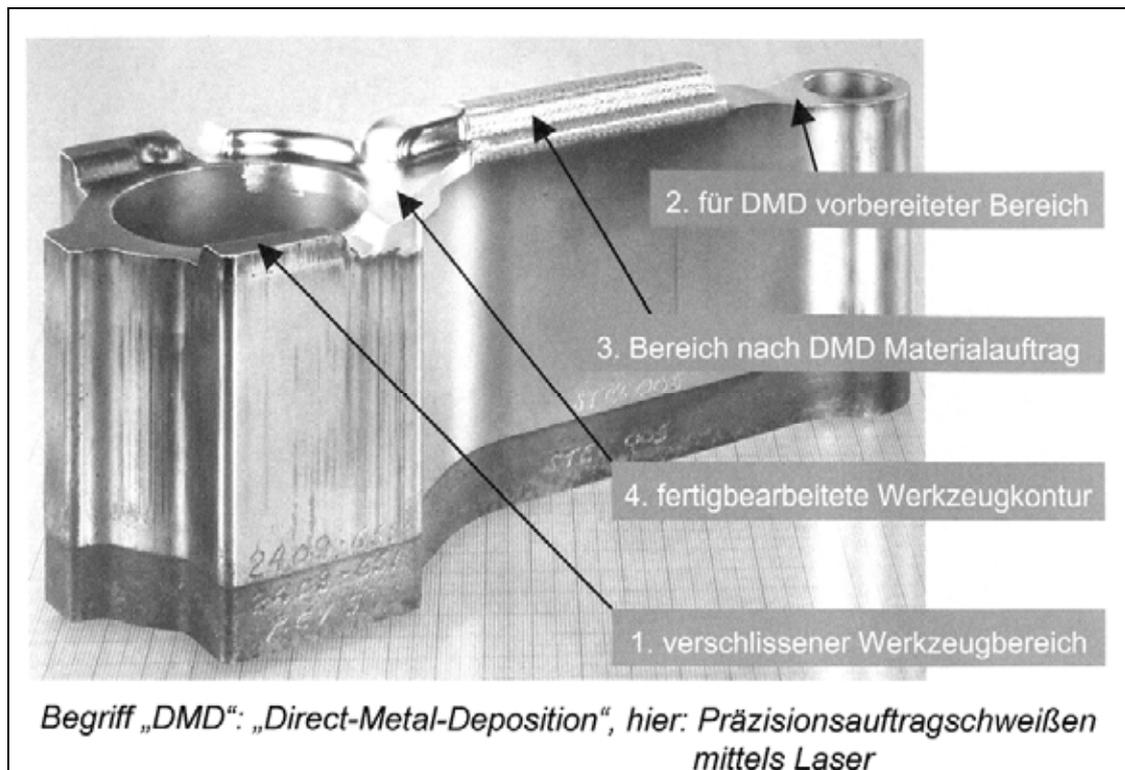


Bild: TRUMPF, Ditzingen

Abbildung 9 zeigt ein Beispiel zum maschinellen Laserauftragschweißen mit Laserleistungen im Kilowatt-Bereich. Schadhafte Stellen dieses Schmiedewerkzeugs für ein Pleuel werden entweder direkt laserauftragsgeschweißt oder - besser - es wird spanend eine saubere, gut anbindende Fläche für die Auftragschweißung geschaffen. Der Laserauftrag ist großvolumig, weswegen die Arbeit mit erhöhter Laserleistung wirtschaftlich ist. Die Auftragschweißung muss spanend auf Endkonturgüte gebracht werden, wobei sich auszahlt, dass mittels Laser eine gegenüber allen anderen Auftragschweißverfahren bestmögliche Endkonturnähe erreicht wird.

3.4.2 Laserauftragschweißen zur Werkzeugmodifikation

Auch bei einer Werkzeugmodifikation, beispielsweise erforderlich in einer Serienanlaufphase oder beim Facelift eines Produktes nach einiger Produktionszeit, hat man es mit auf die Werkzeugkontur aufzutragenden Volumina zu tun, die eine Laserleistung im Kilowatt-Bereich sowie eine maschinelle Durchführung sinnvoll machen. Dazu ist in Abbildung 10 ein Beispiel aufgezeigt. (/7/)

Abbildung 10
Werkzeugmodifikation bei Designänderung
mittels Materialauftrag durch Laserauftragschweißen

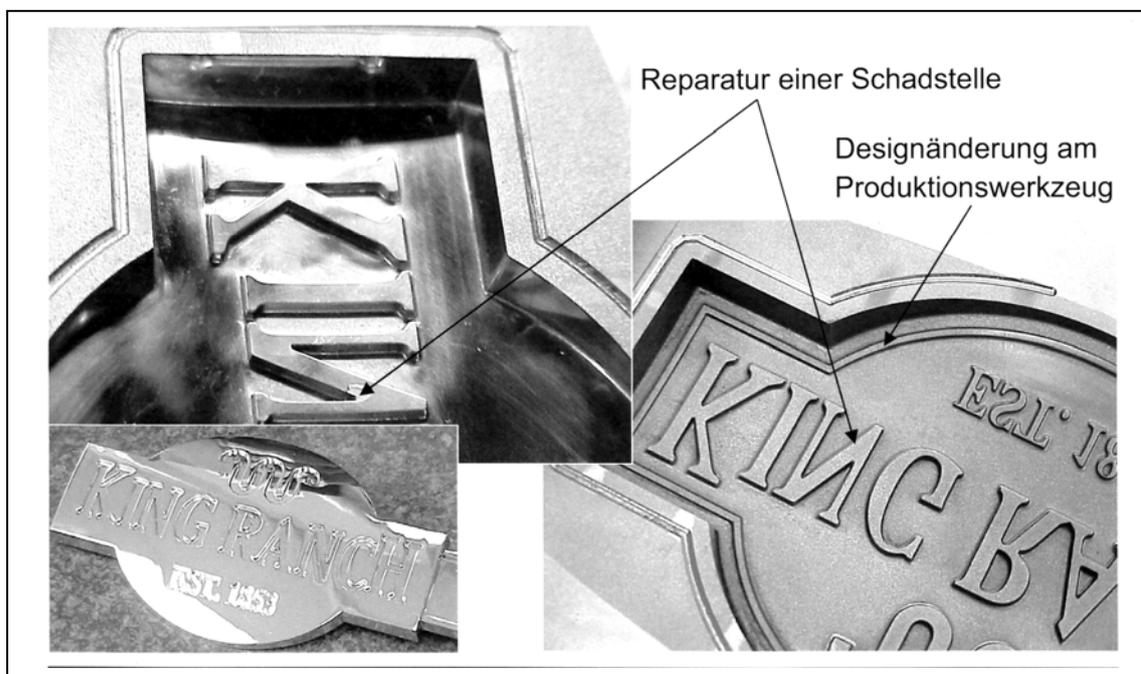


Bild: TRUMPF, Ditzingen

3.4.3 Laserauftragschweißen zur Herstellung lokal gepanzerter Werkzeuge

Ist ein Auftragen größerer Volumina auf ein Werkzeug möglich, da man das Verfahren mit Laserleistung im Kilowatt-Bereich maschinell durchführt, dann liegt der Gedanke nahe, nicht mit dem gleichen Werkstoff wie dem Grundwerkstoff des Werkstoffs aufzutragen, sondern gezielt mit einem anderen Werkstoff mit gewünschten Oberflächeneigenschaften. Dies führte zur Technologie, Werkzeuge in besonders belasteten Zonen gezielt mit beanspruchungsgerechten aufgetragenen Werkstoffen lokal zu panzern. (/7/, /8/)

Der Grundkörper eines lokal zu panzernden Werkzeugs kann dabei oft aus einem erheblich preisgünstigeren Werkstoff gefertigt sein, der die gegebenen Anforderungen an den Grundkörper - meistens keine ausgeprägten Härten, sondern auch Zähigkeitseigenschaften - schon erfüllt. Nur lokal werden dann, wo erforderlich, teurere Werkstoffe mit angepassten höheren Verschleißeigenschaften aufgetragen.

Abbildung 11

Herstellung eines lokal gepanzerten Umformwerkzeugs



Bilder: INPRO, Berlin

Abbildung 11 zeigt die Vorgehensweise beim gezielten Panzern eines Werkzeugs. Sie ist einer sachgerecht durchgeführten Werkzeugreparatur, wie sie in Bild 9 dargestellt war, naturgemäß relativ ähnlich. Nur wird hier kein artgleicher Werkstoff aufgetragen, was eine darauf abgestimmte Parametereinstellung des Laserauftragprozesses erfordert.

In Abbildung 12 sind weitere, in Firmenpräsentationen dokumentierte Anwendungsbeispiele des lokalen Panzerns von Werkzeugen dargestellt. Sie stammen aus den Bereichen Schmiedewerkzeugtechnik und Stanzwerkzeugtechnik.

Abbildung 12

Anwendungsbeispiele des lokalen Panzerns von Werkzeugen



Bilder: TRUMPF, Ditzingen

3.5 Laserhärten zur lokalen Panzerung

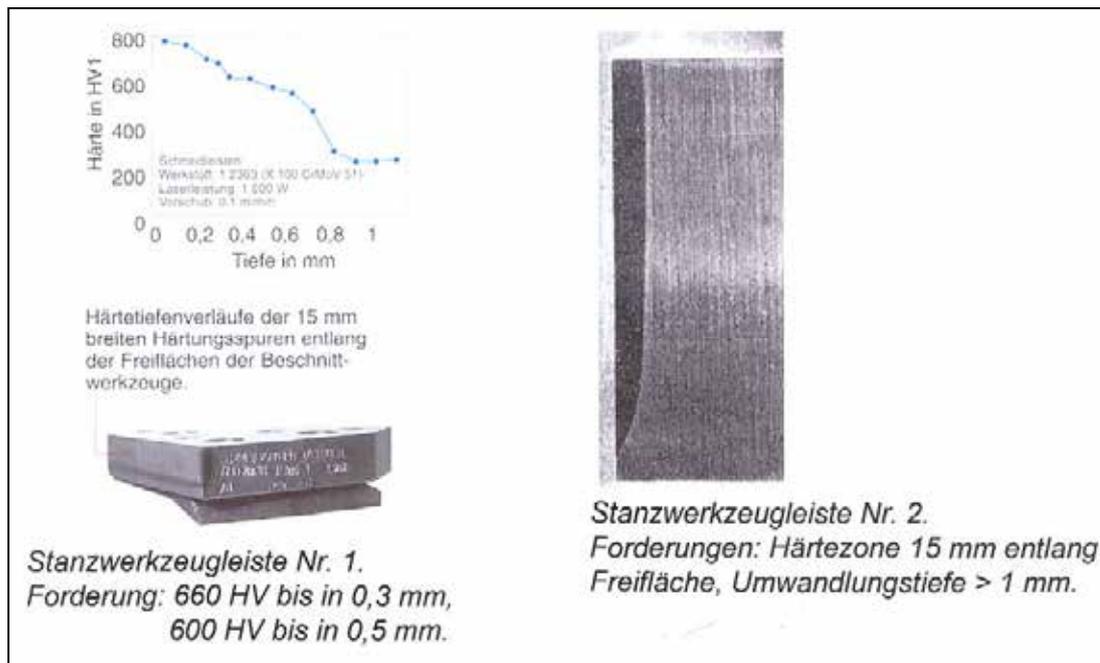
Auch mittels Laserhärten können Werkzeuge lokal gepanzert werden. Es handelt sich um den klassischen Umwandlungshärtungsvorgang. Jedoch kann beim Laserhärten die Erwärmungszone und damit das Ausmaß des Härteverzugs am Werkzeug klein gegenüber allen anderen Arten des Umwandlungshärtens gehalten werden.

Ein Bereich für einen wirtschaftlich sinnvollen Einsatzbereich des Laserhärtens von Werkzeugen tut sich insbesondere auf, wenn nur kleine Härtingsquer-

schnitte und Einhärtetiefen gefordert sind. Dies kann der Laser leisten auf eine Art, die kleinstmöglichen Verzug und damit geringst mögliche Nacharbeit nach sich zieht. Wären große Einhärtetiefen im Bereich mehrerer Millimeter erforderlich, ist eine Wirtschaftlichkeit des Lasereinsatzes vorher unbedingt zu überprüfen.

Abbildung 13

Laserhärten zur lokalen Panzerung an Schneidleisten



Bilder: INPRO, Berlin

Abbildung 13 zeigt dokumentierte Beispiele des Laserhärtens an Schneidleisten großformatiger Stanzwerkzeuge für Karosseriebleche. Der minimale Verzug beim Härten führte hier zu einer Wirtschaftlichkeitsverbesserung wegen signifikanter Reduzierung der spanenden Nacharbeit an den gehärteten Werkzeugen. (/8/)

3.6 Laserumschmelzen zur lokalen Reparatur

Das Laserumschmelzen ist ein bekanntes, industriell genutztes Verfahren insbesondere zur ledeburitischen Härtung von Gussteilen. So sind Einsätze bei-

spielsweise zur Umschmelzhärtung der Laufflächen von Nockenwellen bekannt.
(/8/)

Ein Potenzial des Laserumschmelzens im Werkzeugbau ist auch darin zu sehen, im Reparaturfall gezielt mittels Laserumschmelzen Gefüge zu beeinflussen und beispielsweise mittels Umschmelzen Risse im Gefüge zu beheben. In jedem Fall ist, wegen der Möglichkeit auch tief reichender Risse, eine Durchführung mit erhöhter Laserleistung im Kilowatt-Bereich zu favorisieren.

Im Beitrag der Autoren Andreas Baum und Ursula Christian in diesem Band wird genau zu mit diesem Verfahren erzielten Ergebnissen berichtet. Es wird an dieser Stelle daher dorthin verwiesen.

4 Literatur

- /1/ Abschlussbericht des BMBF-Projektes „Neue Rapid Technologien auf dem Weg in die Produktion – Erfahrungsberichte und Entwicklungstrends“. FhG-IWS Dresden, November 2004.
- /2/ Jahresbericht 2003 des Fraunhofer Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik (FhG-IWS). Dresden: FhG-IWS, 2004.
- /3/ Jahresbericht 2002 des Fraunhofer Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik (FhG-IWS). Dresden: FhG-IWS, 2003.
- /4/ Jahresbericht 2001 des Fraunhofer Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik (FhG-IWS). Dresden: FhG-IWS, 2002.
- /5/ Abschlussbericht des BMBF-Projektes „D2P-SLM: Herstellen von Funktionsprototypen und Werkzeugen mit seriennahen Eigenschaften durch Selective Laser Melting“. FhG-IWS Dresden, November 2004.
- /6/ Hutfless, J.: „Schmelzen heißt die Devise“. In: „FORM + Werkzeug“, Ausgabe 1/2004. München: Carl Hanser Verlag.
- /7/ Ganter, R.: „Generative Verfahren zur Optimierung von Werkzeugen“. In: Konferenzband „Lasertechnologien im Automobilbau. Wolfsburg: Wolfsburg AG, Oktober 2004.
- /8/ Bloehs, W.; Marx, U.; Wahl, R.; Wesselmann, L.: „Oberflächenbearbei-

tung metallischer Bauteile mit dem Festkörperlaser“. INPRO-Zusammenfassungsvericht, Januar 2000. Berlin: INPRO Innovationsgesellschaft für fortgeschrittene Produktionssysteme in der Fahrzeugindustrie mbH.

Andreas Baum und Ursula Christian

**Auswirkungen des Lasereinsatzes
bei der Reparatur von Werkzeugen**

Inhaltsverzeichnis

- 1 Übersicht typischer Werkzeugfehler**
- 2 Untersuchungen zum Laserumschmelzen**
- 3 Metallographische Betrachtung der Untersuchungen**
- 4 Fazit und Ausblick**

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird der aktuelle Stand der Untersuchungen zu Reparatur von Werkzeugen mittels Laserumschmelzen vorgestellt. Ausgehend von den Verschleißmechanismen, die bei Werkzeugen, insbesondere der Kaltumformung, wirken, werden die theoretischen Möglichkeiten des Laserumschmelzens, anhand einer Eingliederung der für den Reparaturfall in Betracht zu ziehenden Laserverfahren, aufgezeigt. Die Ergebnisse der folgenden Grundlagenuntersuchungen zeigen, dass durchaus Potential besteht das Laserumschmelzen zur Reparatur von Werkzeugen einzusetzen. Dies zeigen auch die darauf folgenden Versuche, in welchen beispielhafte Risse durch Laserumschmelzen fehlerfrei verschlossen werden. Die anschließende Untersuchung beleuchtet die Auswirkung der Behandlung auf Gefüge und Härte. Dieser Beitrag stellt einen ersten Schritt zur Entwicklung eines solchen Reparaturverfahrens dar, so dass bis zum prozesssicheren Einsatz in der Industrie noch Entwicklungsbedarf besteht.

Summary

In this contribution the current stand of the examinations is introduced with focus on the repair of tools by means of Laser-remelting. Starting out from the wear mechanisms which work at tools, particularly in the cold working, the theoretical possibilities of the Laser-remelting are shown with an incorporation of the special Laser methods for repairing tools. The following examination shows the effect of the treatment on structures and hardness. For example it could be shown that cracks can be completely closed by Laser-remelting. Thereby this contribution represents a first step for the development of such a seminal repair method.

1 Übersicht typischer Werkzeugfehler

1.1 Einführung

In Zeiten einer zunehmenden Automatisierung ist es besonders wichtig hohe Anlagenverfügbarkeiten zu realisieren. Einen wesentlichen Beitrag hierzu hat das sich in der jeweiligen Anlage im Einsatz befindliche Werkzeug. Je höher die Standzeit des Werkzeugs ist, desto geringer sind Werkzeugkosten sowie der Anteil der Rüstzeiten. Letztendlich liegt in einem ausgereiften, langlebigen Werkzeug ein großes Potential zur Kostenersparnis. Daher werden seit langer Zeit große Anstrengungen unternommen, um Werkzeuge vor Verschleiß zu schützen. Insbesondere bei großen, aufwändig herzustellenden oder aus speziellen Metallen bestehenden Werkzeugen sind die Bestrebungen zur möglichst langen Erhaltung dieser sehr ausgeprägt. Bei solchen Werkzeugen sind dann auch Instandsetzungsmaßnahmen bei zunehmendem Verschleiß durchaus interessant und Erfolg versprechend.

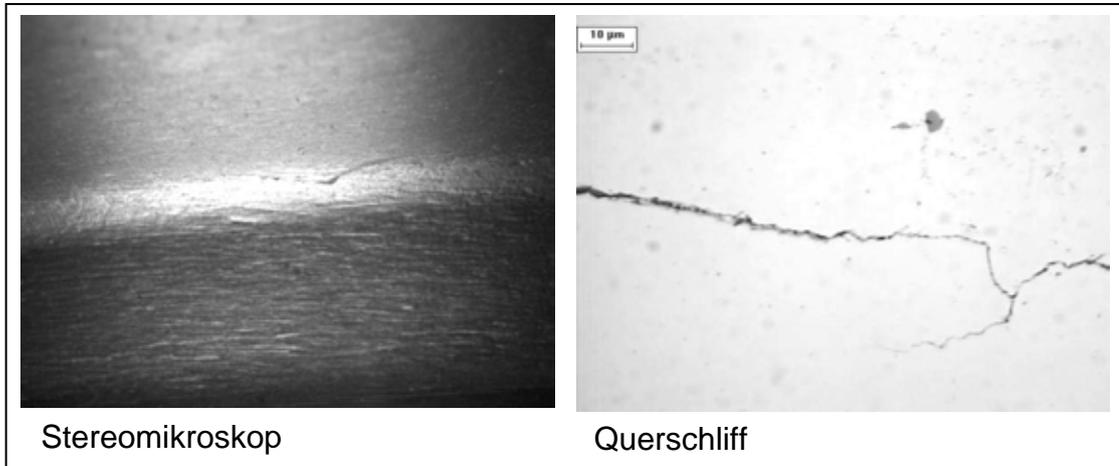
In den meisten Fällen verschleißt das Werkzeug, abgesehen vom Werkzeugbruch, der meist Folge eines lokalen Verschleißes ist, nicht im Ganzen. Betroffen sind primär hochbeanspruchte Bereiche des Werkzeugs, wie z.B. Schneidkanten bei Stanz- oder Schneidwerkzeugen sowie Reiboberflächen. Werden diese kritischen Werkzeugbereiche instandgehalten, kann das Werkzeug vor dem endgültigen Versagen durch Bruch oder Verschleiß bewahrt und so die Standzeit verlängert werden. Dies wirkt sich sowohl auf die Anlagenverfügbarkeit, als auch auf die Kosten positiv aus. Doch welche Fehler sind für ein Werkzeugversagen überhaupt kritisch?

1.2 Klassifizierung der Fehlerursachen

1.2.1 Spannungsrisse

Grosse Drücke in Kanten, Bearbeitungsriefen und schroffe Übergänge führen zu Spannungsspitzen und somit in Folge zu feinen Anrissen, die dann Dauerbrüche verursachen. Dabei beginnt der Riss im Bereich der größten Spannung und verläuft in der Regel senkrecht ins Material. Die Rissausbreitung folgt dann entsprechend den Spannungsverhältnissen im Bauteil während des Einsatzes.

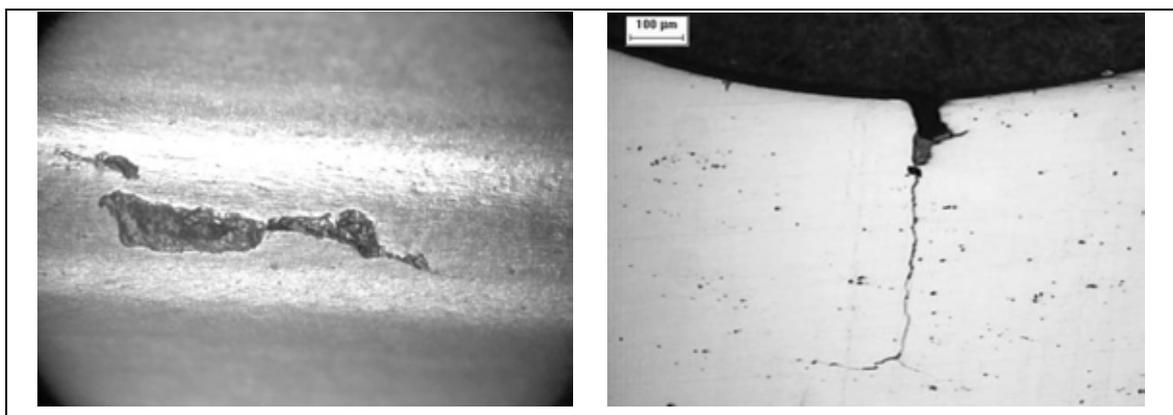
Abbildung 1
Spannungsrisse



1.2.2 Adhäsionsverschleiß

Bei der Bearbeitung entsteht zwischen der Werkstoffpaarung Werkzeug-Werkstück Reibung. Je nach Reibungsverhältnissen (Umformgrad und Schmiermittel spielen dabei eine entscheidende Rolle), Werkstoffkombination und Verarbeitungstemperatur, entstehen durch Diffusionsvorgänge Reibschweißungen. Dabei kommt es zu einer Oxidation, und somit Reibkorrosion. Die Folge davon sind Ausbrüche. Diese stellen sich als Kerben dar und führen dann bei der Beanspruchung im Einsatz zu Spannungsrissen im Kerbgrund.

Abbildung 2
Adhäsionsverschleiß



Stereomikroskop

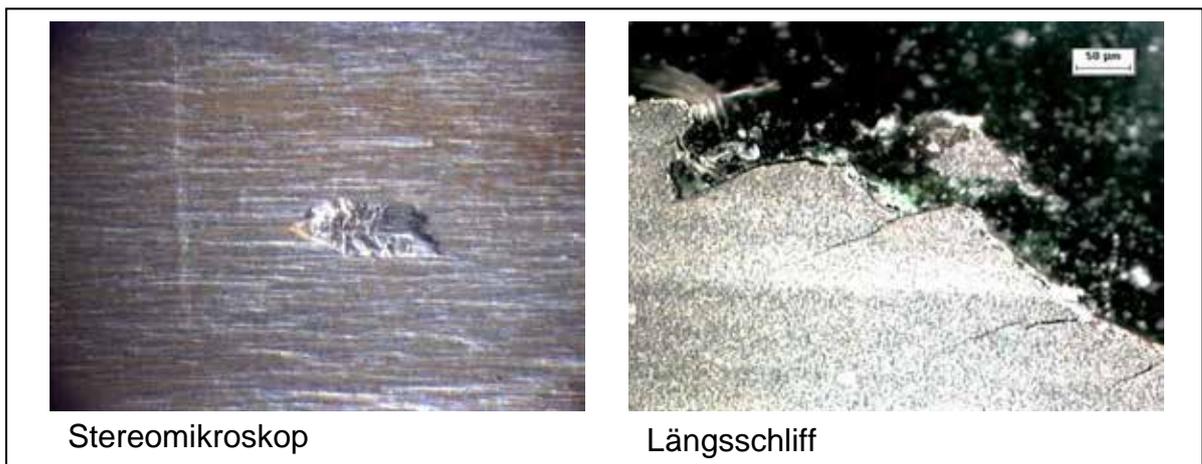
Querschliff

1.2.3 Ausbrüche durch Überbeanspruchung

Durch eine ständige Beanspruchung des Materials an seiner Kriechgrenze kommt es zu einem Abgleiten der Gitterebenen unterhalb der Oberfläche, was zu einer Kaltverfestigung und schließlich zu feinen Anrissen führt, die in ihrer Entstehung in der Regel parallel zur Oberfläche verlaufen. Bei fortdauernder Belastung kommt es zu einer Rissausbreitung in 45° zur Oberfläche und somit zu schalenförmigen Ausbrüchen.

Abbildung 3

Ausbrüche infolge von Überbeanspruchung

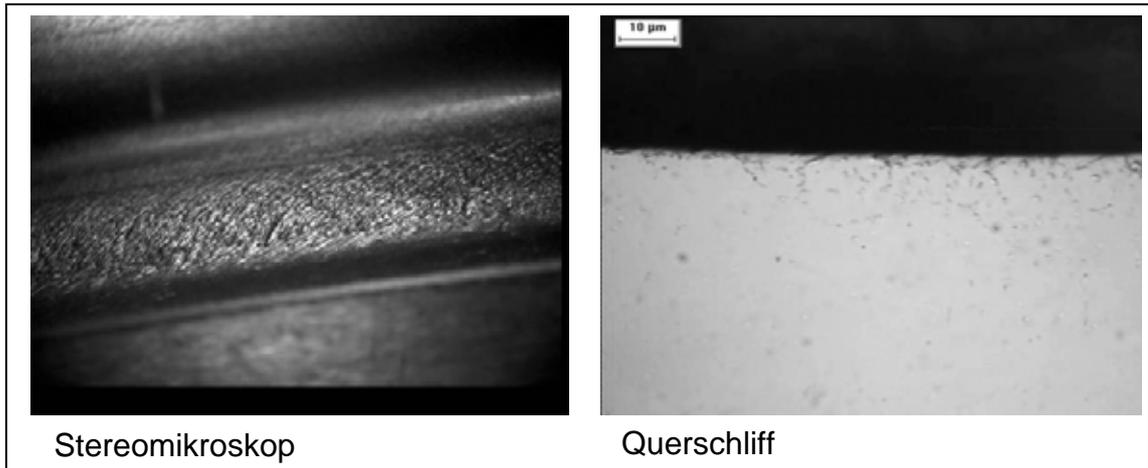


1.2.4 Reibverschleiß

Ist die Oberflächenrauigkeit des Werkzeuges zu hoch oder besitzt das zu verarbeitende Material harte, spröde Bestandteile, die das Werkzeug aufrauen, so kommt es zu einem Anstieg der Flächenreibung (Erhöhung der Reibkraft) und somit zu einem Materialabtrag an der Oberfläche des Werkzeugs.

Abbildung 4

Reibverschleiß



1.2.5 Reibkorrosion

Die Reibung der Werkstoffpaarung führt zu einer Verformung direkt an der Oberfläche. Das Material wird unedel und es kommt, in Verbindung mit der Schmier- oder Kühlflüssigkeit, zu einer partiellen Oxidation der Oberfläche und letztendlich zu örtlichen Ausbrüchen.

1.2.6 Ausfälle bedingt durch Werkstofffehler

Gefügefehler wie Poren, Lunker oder spröde Korngrenzenbeläge, sowie Fehler bei der Wärmebehandlung, wie zum Beispiel Härterisse, hohe Anteile von Restaustenit oder Ferrit, sowie Grobkornbildung können die Plastizität sowie die Festigkeit des Werkzeugs herabsetzen. Bei diesen Rissen ist eine Reparatur des Werkzeugs nicht sinnvoll, da die Ursache für den Riss im Material zu suchen ist.

Abbildung 5
Reibkorrosion

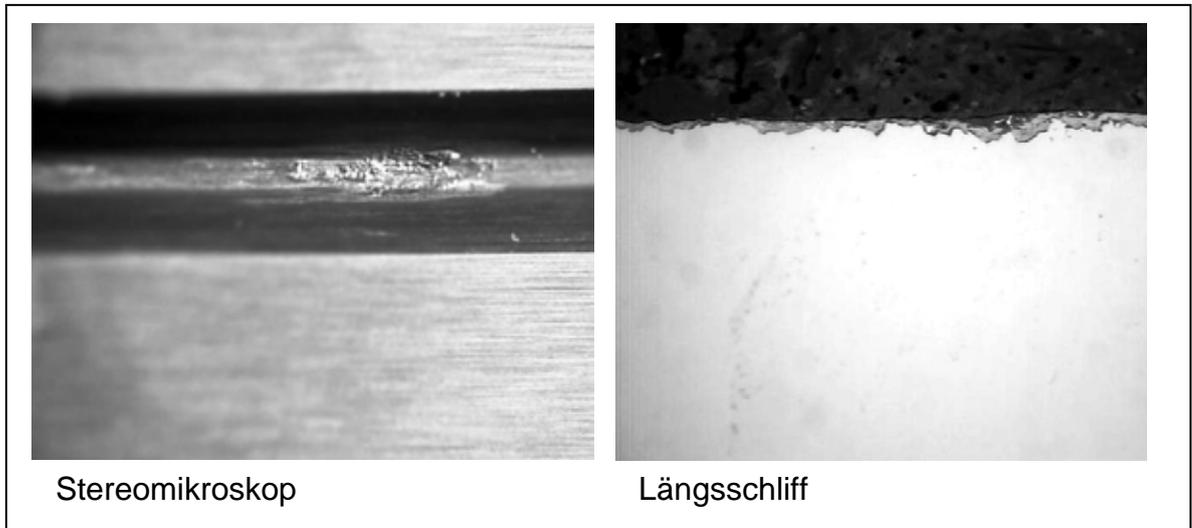
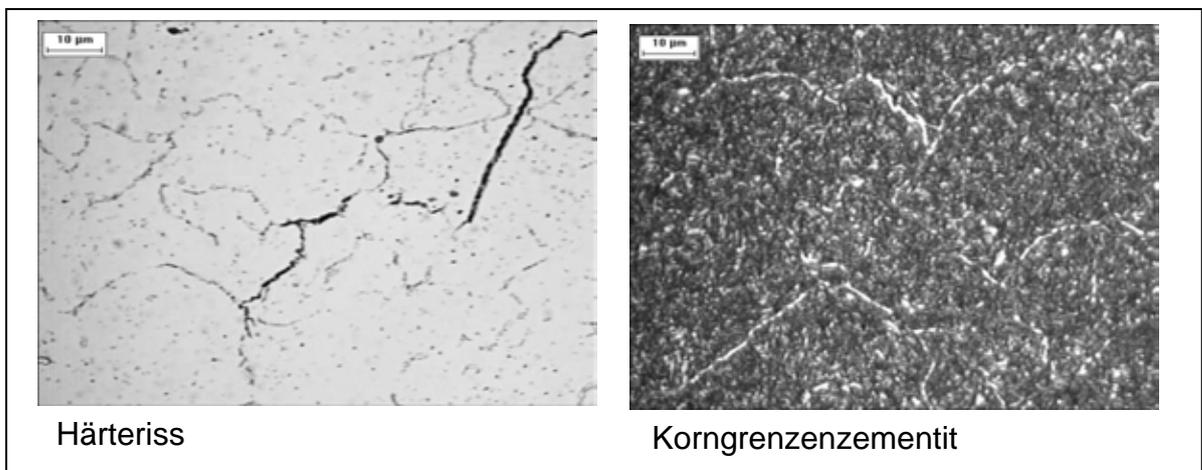


Abbildung 6
Fehler durch Wärmebehandlung und Gefügeinhomogenitäten



1.3 Einsatzmöglichkeiten des Lasers zur Werkzeugreparatur

Voraussetzung für eine erfolgreiche Reparatur ist die frühzeitige Erkennung von kritischen Verschleißerscheinungen in Lage, Form und Größe. Abhängig von der Werkzeugbeschaffenheit bieten dies die Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung heute in einer großen Vielfalt.

Mit diesem Ansatz gilt es nun zunächst zu definieren, welche Verfahren sich für solche Instandsetzungsmaßnahmen in welchem Umfang eignen. Da es um lokale, eng begrenzte Reparaturen geht, liegt der Einsatz der Lasertechnik nahe. Laserverfahren zeichnen sich unter anderem durch die gezielte Wärmeeinbringung und damit punktgenaue Bearbeitungsmöglichkeiten aus und entsprechen damit dem Anforderungsprofil an die Verfahren zur lokalen Instandsetzung.

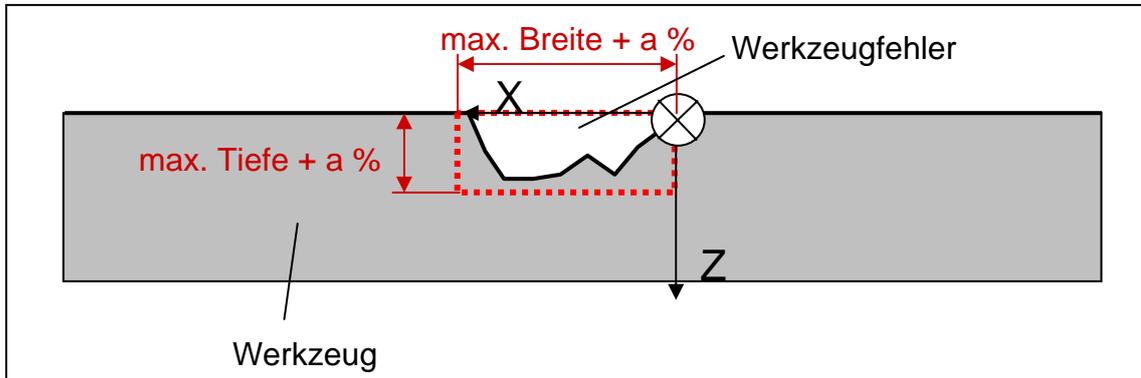
Insbesondere drei Laserverfahren sollen hierbei näher betrachtet werden:

- Laserumschmelzen
- Laserlegieren
- Laserauftragschweißen

Doch wie lassen sich die Möglichkeiten und Grenzen dieser Verfahren beschreiben? Und. Bei welcher Verschleißart soll welches Verfahren zum Einsatz kommen? Hierzu ist es notwendig diese Verfahren sinnvoll zu gliedern. Eine Möglichkeit der Einordnung dieser Verfahren ist in Zusammenhang mit Abbildung 8 dargestellt.

Die Vorgehensweise zur durchgeführten Einordnung der Verfahren beruht auf folgenden Überlegungen. Nach der volumetrischen Bestimmung des Werkzeugfehlers wird aus den gewonnenen Ergebnissen eine sogenannte Einwirkzone, zunächst zweidimensional, festgelegt. Dies geschieht anhand der maximal ermittelten Fehlerbreite und der max. ermittelten Fehlertiefe und ist in Abbildung 7 anhand eines beispielhaften Fehlers dargestellt. Als Sicherheit wird ein Sicherheitsfaktor (α) zugegeben.

Abbildung 7
Festlegen der „Einwirkzone“



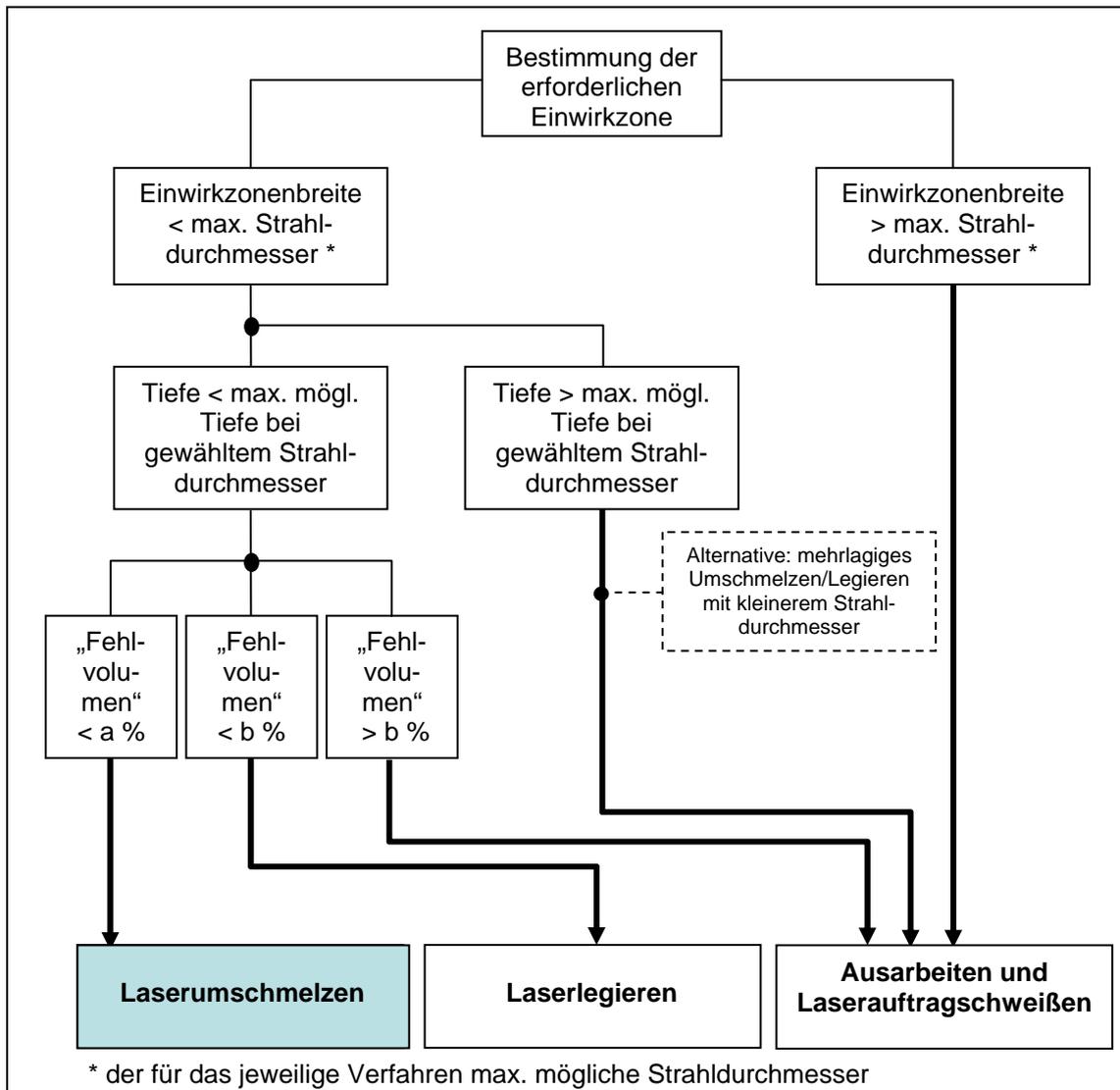
Mit Hilfe der definierten Einwirkzone und Abbildung 8 kann dann die Auswahl eines geeigneten Laserverfahrens erfolgen.

Nach der Bestimmung der Einwirkzone muss zunächst abgeprüft werden, ob sich die Reparatur mit einem einstufigen Prozess bewältigen lässt oder, ob die Einwirkzone so groß ist, dass sie nur mit mehrmaliger Spurlegung durchführbar ist. Dies geschieht im ersten Zweig, in dem abgefragt wird, ob die Einwirkzonenbreite größer oder kleiner dem maximal möglichen Strahldurchmesser für das jeweilige Verfahren ist. Hier stellt sich natürlich die Frage, was als Fehlerbreite und was als Fehlerlänge definiert ist. Sinnvoll ist es die Raumrichtung in einer X-Y-Ebene mit der geringsten Fehlerausdehnung als Breite zu definieren.

Im nächsten Abzweig wird abgefragt, ob die Fehlertiefe größer oder kleiner der max. möglichen Bearbeitungstiefe des jeweiligen Verfahrens ist. Anschließend werden die Fehlervolumen eingeteilt. Bei einem sehr geringen Fehlervolumen von $< a \%$ wird zunächst davon ausgegangen, dass durch reines Laserumschmelzen bis zu einem gewissen Fehlervolumen Reparaturen vorgenommen werden können. Überschreitet die Fehlergröße ein gewisses Volumen ist eine Reparatur nur unter Zuhilfenahme von Zusatzmaterial möglich. Innerhalb bestimmter Grenzen reicht es hier jedoch aus geringe Mengen an Zusatzmaterial mit in die Schmelze einzubringen, so dass es sich hierbei um eine Form des Laserlegierens handelt. Übersteigt die Fehlergröße eine weitere Grenzmarke ($b \%$), so kann das fehlende Volumen nur noch durch Auftragschweißen ersetzt

werden. Auf diese Weise erfolgt in jedem Abzweig eine weitere Einschränkung bis schließlich das anzuwendende Verfahren als Ergebnis erreicht wird.

Abbildung 8
Gliederung der Laserverfahren



In einem weiteren Schritt ist es vorstellbar, dieses Verfahren mit einer Datenbank so zu automatisieren, dass mit einer Eingabe der Fehlerabmessungen Verfahren inklusive der einzustellenden Parameter ausgegeben werden.

Die in Abbildung 8 dargestellte Einteilung der Verfahren ist sicherlich nur eine von vielen möglichen Varianten. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, so dass jederzeit Erweiterungsmöglichkeiten (wie z.B. im perforierten Kasten

gezeigt) bestehen. Dabei kann das beschriebene Vorgehen zur Auswahl des Laserverfahrens durchaus iterativ durchlaufen werden.

In den folgenden Ausführungen soll nun ausschließlich das Laserumschmelzen näher betrachtet werden.

2 Untersuchungen zum Laserumschmelzen

In den durchgeführten Untersuchungen zum Laserumschmelzen wurde primär das Ziel verfolgt, die in Abbildung 8 definierten Grenzen mit konkreten Werten zu füllen, mit anderen Worten Möglichkeiten und Grenzen des Laserumschmelzens zu definieren, sowie Kenntnisse über die Auswirkung der Verfahrensparameter zu erlangen.

Die Untersuchungen wurden an einem definierten Werkstoff durchgeführt. Dabei handelt es sich um den Kaltarbeitsstahl 1.2379, der vor allem bei Stanz-, Abgrat-, Schneid- und Tiefziehwerkzeugen zum Einsatz kommt.

Der Werkstoff wurde in folgenden Zuständen untersucht:

- normalgeglüht, bearbeitet ohne Vorwärmung
- normalgeglüht, bearbeitet ohne Vorwärmung nachträglich vergütet
- vergütet, bearbeitet ohne Vorwärmung
- vergütet, bearbeitet mit Vorwärmung bei 450°C
- vergütet, bearbeitet mit Vorwärmung bei 650°C
- vergütet, bearbeitet mit Vorwärmung bei 850°C

Die wichtigsten Verfahrensparameter beim Laserumschmelzen sind die Laserleistung und die Vorschubgeschwindigkeit. Stellt man diese beiden Größen ins Verhältnis zueinander so erhält man die Streckenenergie [J/mm], eine wichtige Größe um Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Parametersets zu herzustellen.

In den folgenden Abschnitten werden auszugsweise die Untersuchungsergebnisse bei den jeweiligen Werkstoffzuständen anhand bestimmter Parametersets aufgezeigt.

2.1 Laserumschmelzen im normalgeglühten Zustand mit und ohne nachträgliche Vergütung

Wie bereits erwähnt, bestand besonderes Interesse in der Findung von Extremwerten, d.h. bis in welche Tiefe ist ein Umschmelzen maximal möglich. Aus diesem Grund wurde der kleinste verfügbare Strahldurchmesser von 0,3 mm für die Versuche gewählt, da dort die Strahlintensität maximal ist.

Im normalgeglühten Zustand konnten durchweg fehlerfreie Umschmelzspuren erzeugt werden. Die maximale Umschmelztiefe im untersuchten Parameterbereich beträgt 4,44 mm, die maximale Umschmelzbreite 2,04 mm (bei niederen Vorschubgeschwindigkeiten).

Die Härten im umgeschmolzenen Bereich nehmen gegenüber dem Ausgangszustand deutlich zu. Während die Härte im normalgeglühten Zustand 252 HV beträgt, entstehen nach der Umschmelzung Härtewerte zwischen 400 und 500 HV. Dies ist vor allem durch die relativ schnelle Abkühlung (Selbstabschreckung) nach der Bearbeitung zu erklären. Durch eine gezielte Wärmebehandlung nach der Bearbeitung zeigt sich sogar eine Aufhärtung der Umschmelzspur auf Werte zwischen 700 und 800 HV (Abbildung 10).

Bei den Versuchen zeigt sich ein weiterer interessanter Effekt. Mit einer zunehmenden Streckenenergie bildet sich auf der Oberfläche des Substrats eine deutliche Raupenform, die gegenüber dem Substrat erhaben ist, aus, d.h. durch bestimmte metallurgische Vorgänge entsteht eine Volumenzunahme.

Diese Volumenzunahme korreliert mit der in Abbildung 8 getroffenen Annahme, dass ein bestimmter Anteil an fehlendem Volumen durch die in Abbildung 11 nachgewiesene Volumenzunahme ausgeglichen werden kann.

Abbildung 9
Darstellung der Umschmelzbreite und Umschmelztiefe

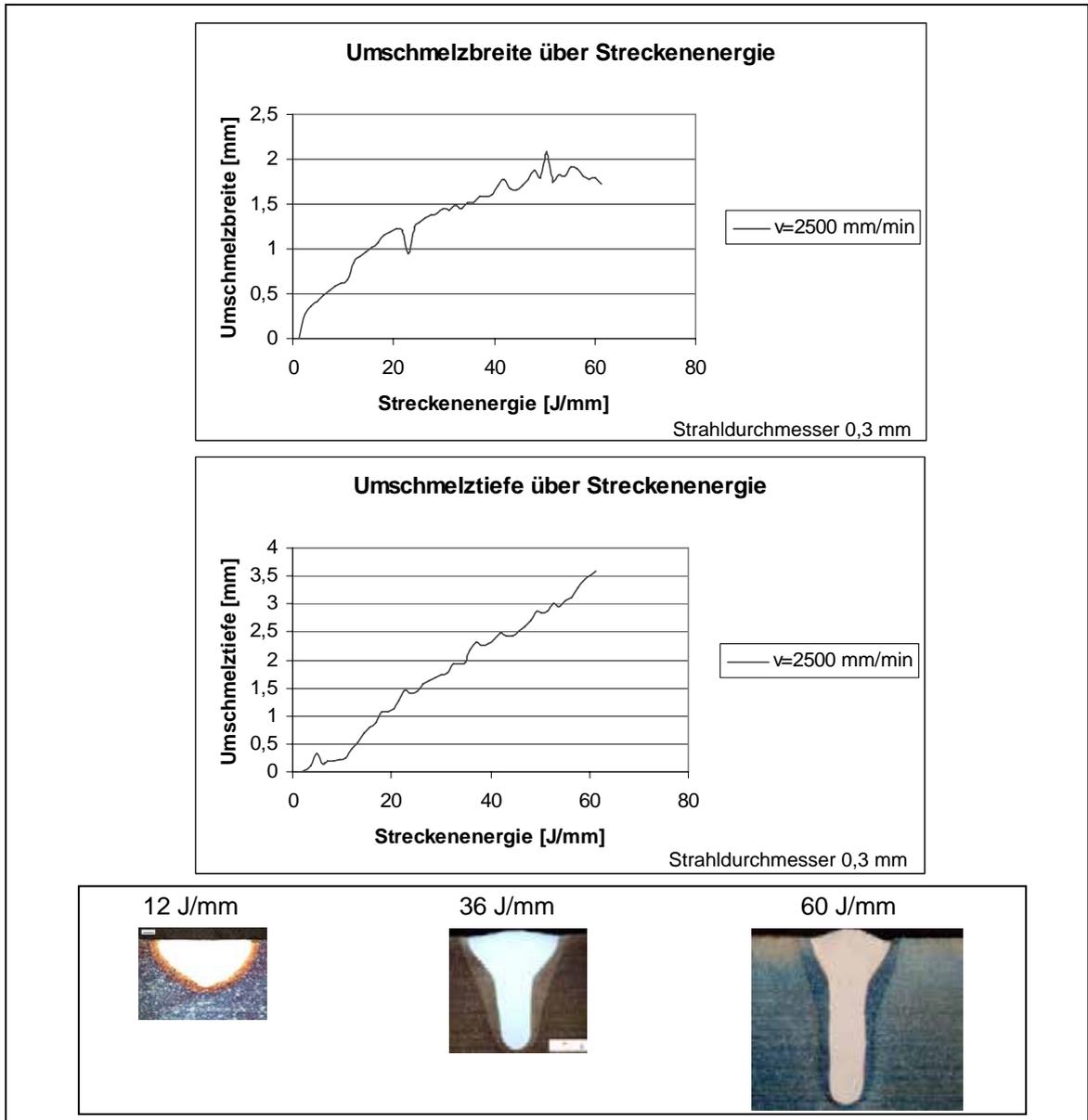


Abbildung 10
Darstellung der Härtewerte im umgeschmolzenen Bereich

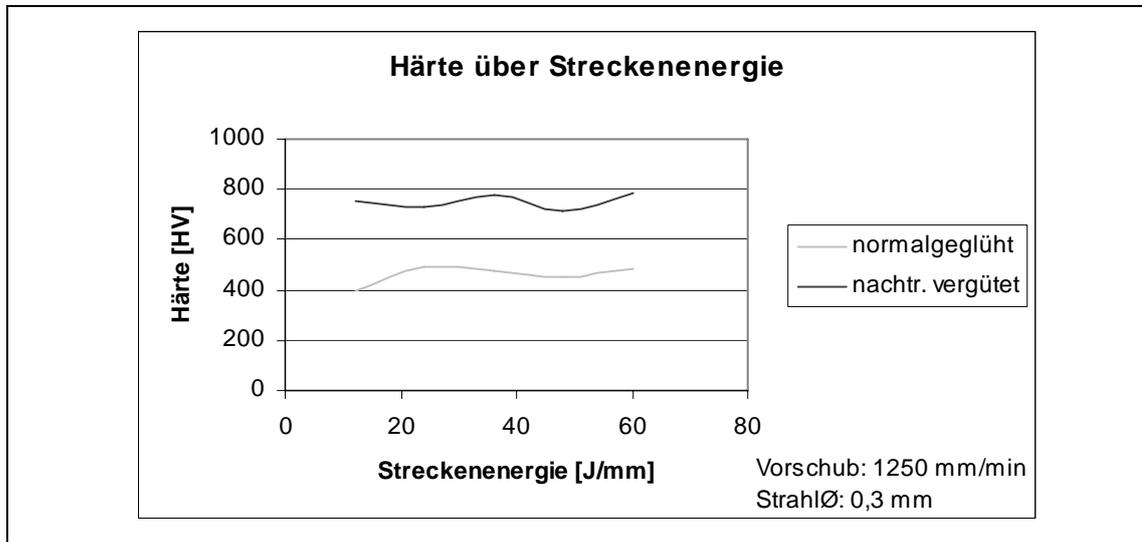
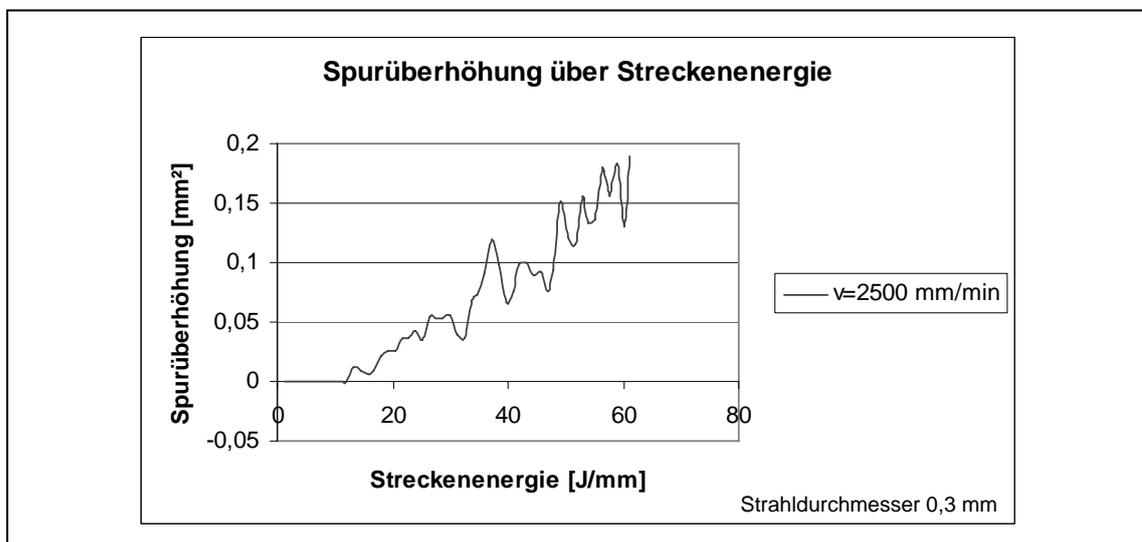


Abbildung 11
Darstellung der Spurüberhöhung



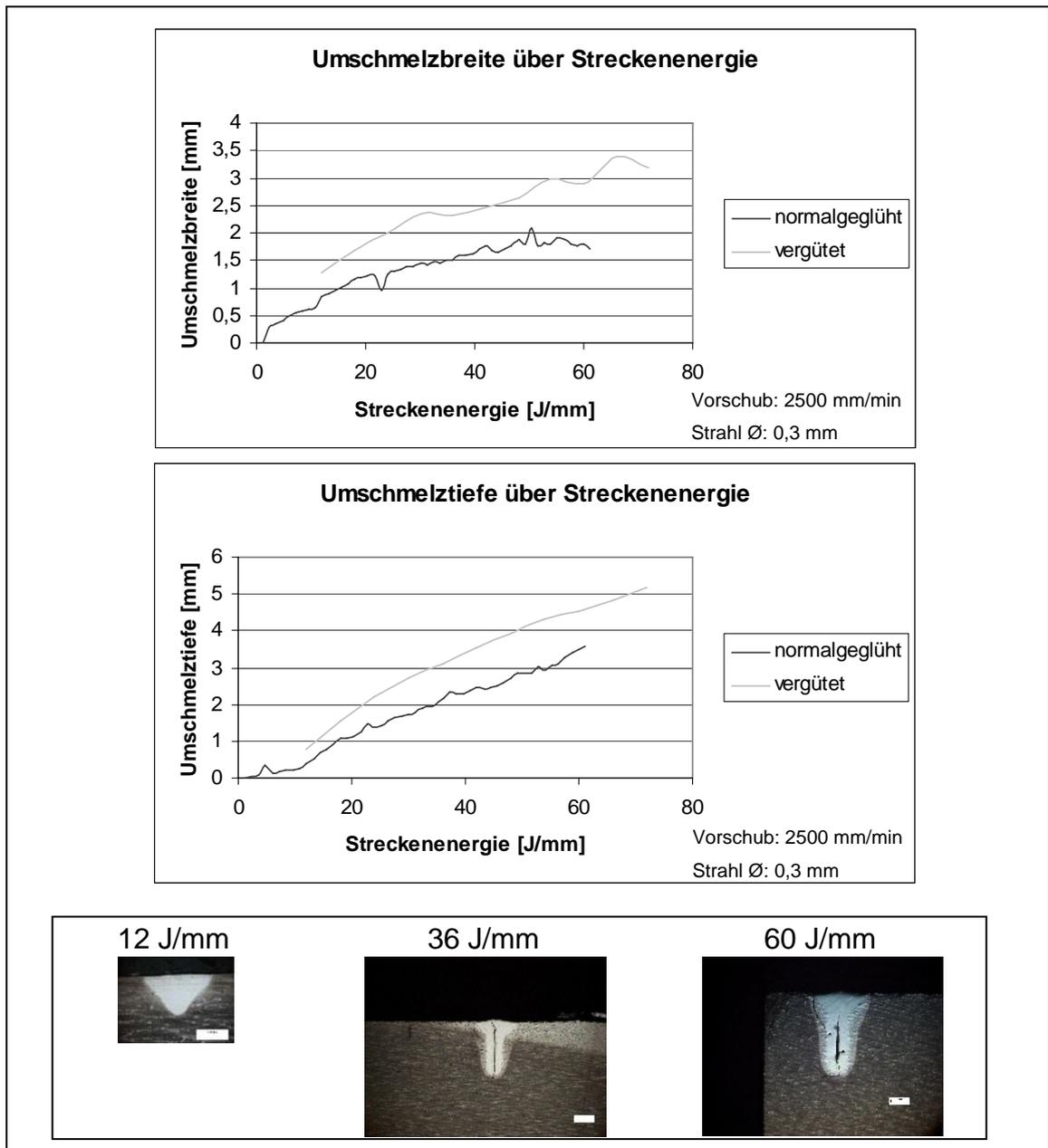
2.2 Laserumschmelzen im vergüteten Zustand ohne Vorwärmung

Das Laserumschmelzen im vergüteten Zustand erweist sich als problematisch. Hier bereitet insbesondere die Rissbildung bei Streckenenergien ab 30 J/mm erhebliche Schwierigkeiten. Im Vergleich zu den Versuchen im normalgeglühten

Zustand treten jedoch deutliche Zunahmen der Umschmelzbreite und Umschmelztiefe auf. Konkret wächst die maximal ermittelte Spurbreite um 61%, die maximal ermittelte Spurtiefe um 26% gegenüber dem normalgeglühten Zustand an.

Abbildung 12

Darstellung der Umschmelzbreite und Umschmelztiefe

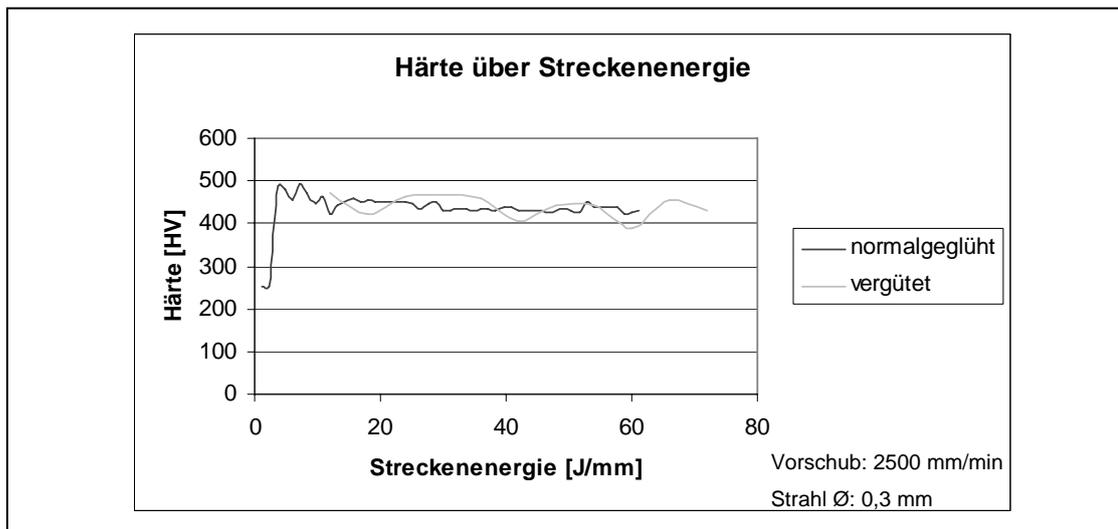


Die Härten im umgeschmolzenen Bereich liegen hier im selben Wertebereich wie im normalgeglühten Zustand. Durch das Aufschmelzen des vergüteten

Stahls vollziehen sich im aufgeschmolzenen Bereich bei der Abkühlung die selben Umwandlungsvorgänge wie im normalgeglühten Zustand, daher sind auch gleiche Härtewerte zu erwarten.

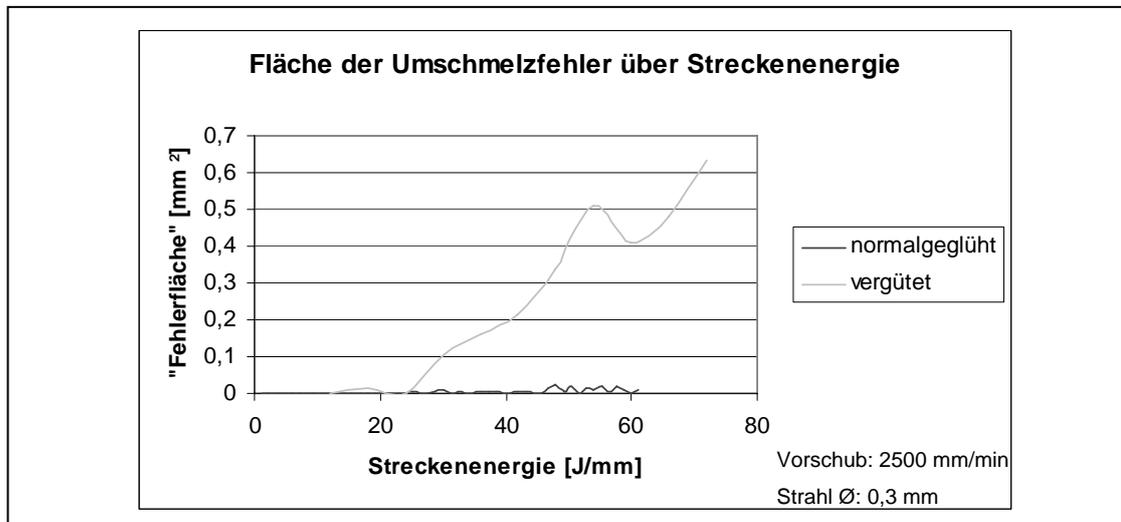
Abbildung 13

Darstellung der Härtewerte im umgeschmolzenen Bereich



Alle Fehler, die in dieser Versuchsreihe vorwiegend in Form von Rissen auftreten, sind flächenmäßig erfasst. Abbildung 14 zeigt deutlich wie die zweidimensional ermittelten „Fehlerflächen“ mit steigender Streckenenergie zunehmen. Dieser Anstieg der Fehlerrate begründet sich zum einen in einer Vergrößerung der Risse und zum anderen in einer vermehrten Anzahl von Rissen im Umschmelzbereich.

Abbildung 14
Darstellung der Umschmelzfehler



2.3 Laserumschmelzen im vergüteten Zustand mit Vorwärmung bei 450°C

Die in 2.2 beschriebene Versuchsreihe zeigt, dass die direkte Bearbeitung im vergüteten, kalten Zustand schon bei geringer Energieeinbringung zu Spannungsrissen führt. In dieser Versuchsreihe erfuhren die Proben eine Vorwärmung von 450°C, um die Abkühlung zu verlangsamen und somit Spannungsrissen vorzubeugen. In diesem Zusammenhang wurden mehrere Vorwärmtemperaturen untersucht.

Bei einer Vorwärmung von 450°C treten die ersten Risse ab einer Streckenenergie von 40 J/mm auf. Weiterhin steigt die maximale Spurbreite um 75%, die maximale Umschmelztiefe um 52%, gegenüber den Werten bei normalgeglühtem Ausgangsmaterial, an. Die relativ großen Zunahmen der Extremwerte lassen sich durch die eingebrachte Wärmeenergie erklären. Da die Einwirkzeit des Laserstrahls gegenüber den vorherigen Versuchsreihen unverändert ist, jedoch schon Wärme in den Werkstoff eingebracht wurde, ist die eingebrachte Gesamtenergie entsprechend höher.

Die Härtewerte bleiben im selben Härtebereich wie im Umschmelzbereich des normalgeglühten Ausgangsmaterials.

Wie in Abbildung 16 zu erkennen ist, zeigt die Vorwärmung die bereits angenommene Wirkung. Die Fläche der Umschmelzfehler reduziert sich hier insbesondere im oberen Streckenenergiebereich, aus oben genanntem Grund. Eine weitere Erhöhung der Vorwärmtemperatur mit dem Ziel einer weiteren Fehlerreduzierung scheint hier also angebracht zu sein.

Abbildung 15
Darstellung der Umschmelzbreite und Umschmelztiefe

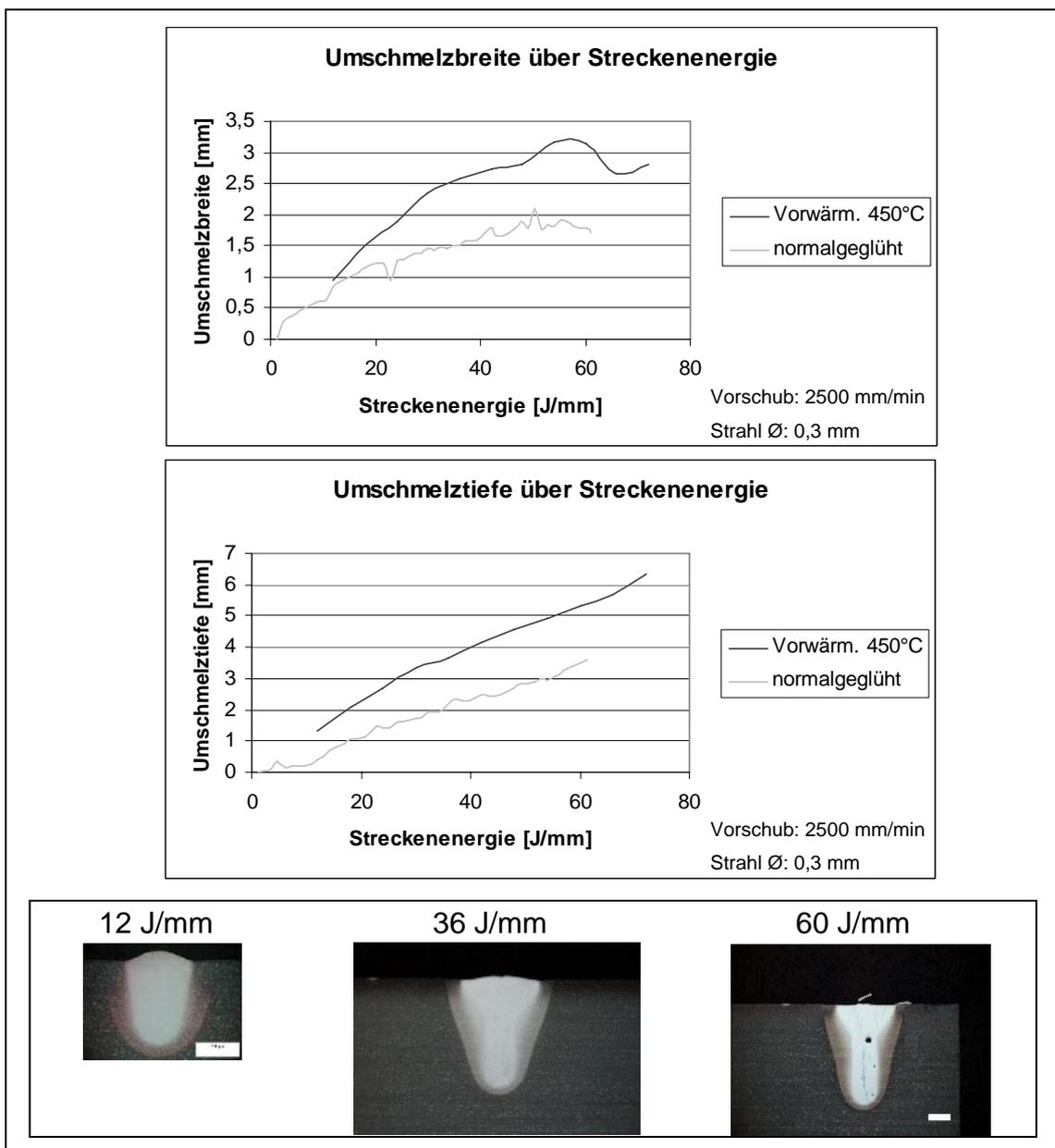
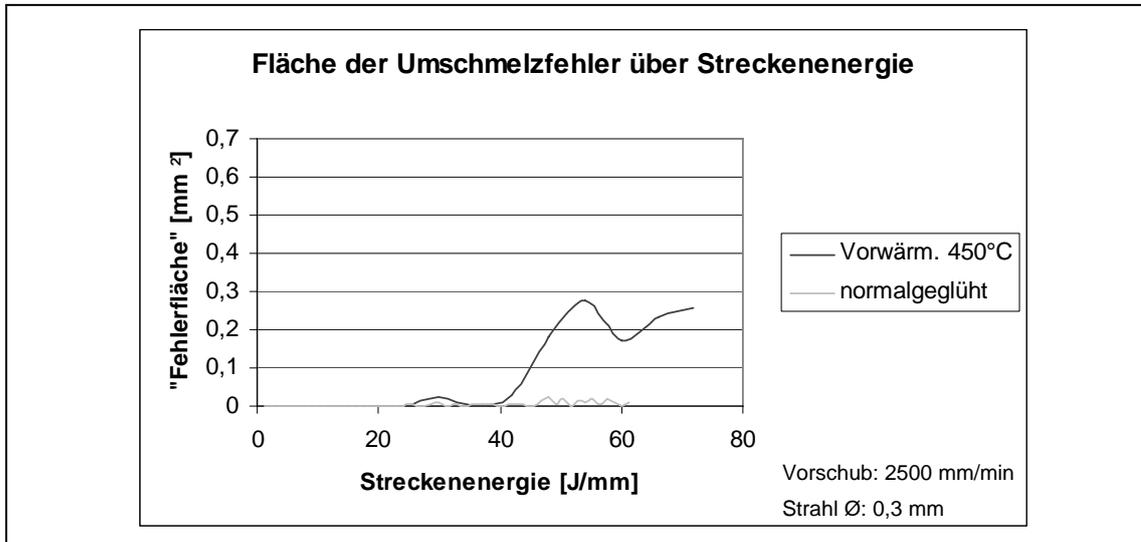


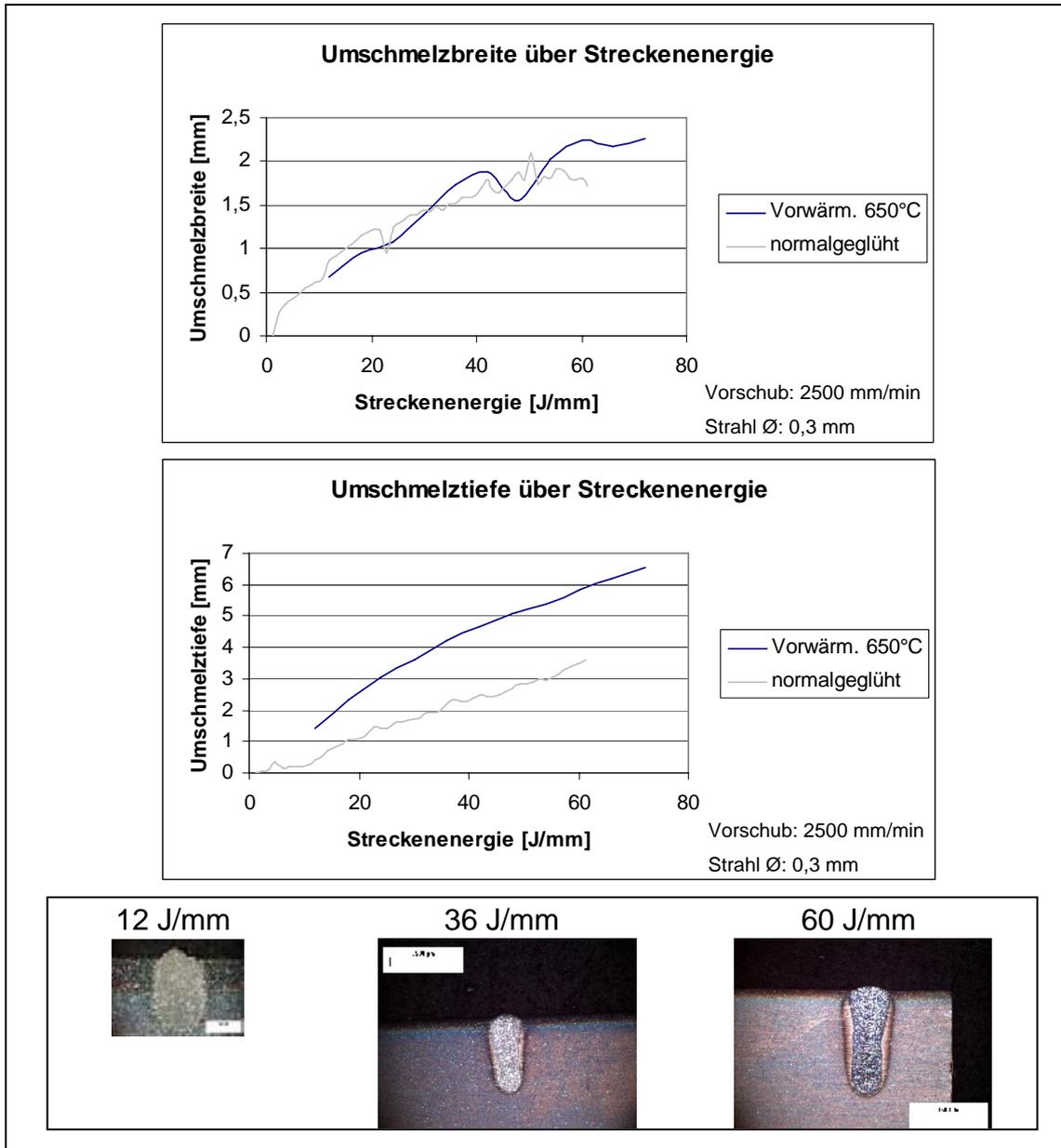
Abbildung 16
Darstellung der Umschmelzfehler



2.4 Laserumschmelzen im vergüteten Zustand mit Vorwärmung bei 650°C

Eine weitere betrachtete Vorwärmtemperaturstufe liegt bei 650°C. Bereits in den Schlifffildern in Abbildung 17 wird deutlich, dass die Vorwärmung, neben der Rissbildung auch die Spurgeometrie des Umschmelzbereichs in deutlichem Maße beeinflusst. Auffällig ist hier erstmals der sehr schlanke Umschmelzbereich, der von der sonst typischen Form abweicht. Durch die bei der Vorwärmung eingebrachte Energie kann der Laserstrahl rascher in das Material eindringen, daher sind die Umschmelzbreite sowie auch die Wärmeeinflusszone an der Oberfläche geringer als bei den vorherigen Versuchsreihen. Die maximale Umschmelzbreite ist daher nur noch um 24% größer als bei normalgeglühtem Gefüge. Im Gegensatz dazu hat die maximale Umschmelztiefe weiter auf ein Maximum von 65% gegenüber normalgeglühtem Material zugenommen.

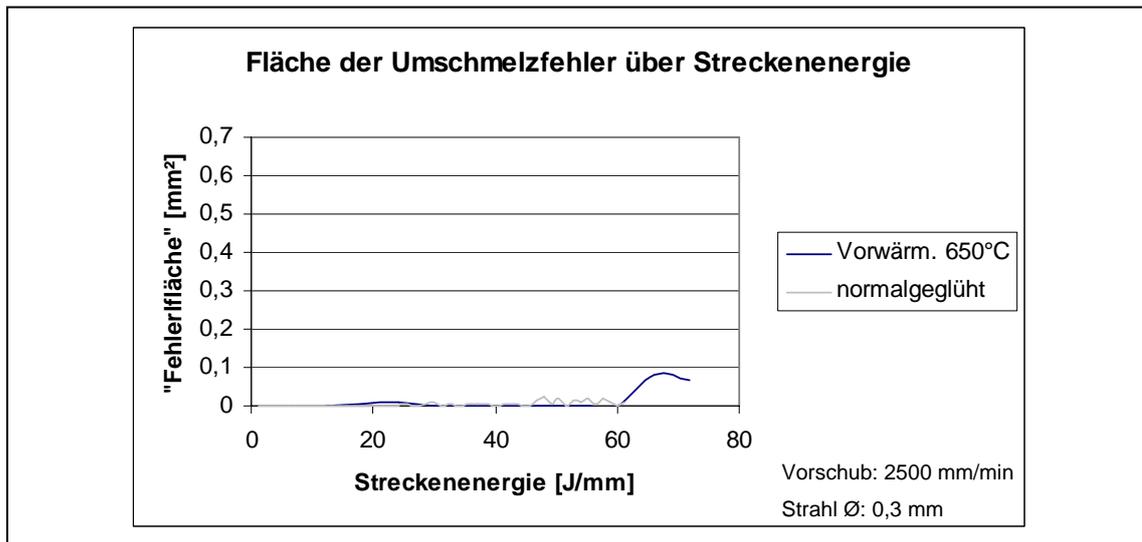
Abbildung 17
Darstellung der Umschmelzbreite und Umschmelztiefe



In Abbildung 18 bestätigt sich der bereits in der vorherigen Versuchreihe angenommene Effekt, dass die Fehlerrate durch eine Erhöhung der Vorwärmtemperatur gesenkt werden kann. Bei dieser Vorwärmstufe treten die ersten Fehler erst ab Streckenenergie um 60 J/mm auf. Die Fehler liegen aber, im Gegensatz zu dem bisher typischen Fehlerbild von ausschließlich Rissen, hier in einer Mischung aus Poren und Rissen vor. Die Ursache der Poren kann in einer Schmelzbadüberhitzung mit daraus resultierender CO-Gasbildung liegen. Auch

bei dieser Versuchsreihe liegen die Härtewerte im bekannten Bereich zwischen 400 und 500 HV.

Abbildung 18
Darstellung der Umschmelzfehler



Zur Identifizierung der optimalen Vorwärmtemperatur sollten in diesen Untersuchungen die Grenzen der Vorwärmung aufgezeigt werden. Aus diesem Grund wurde eine weitere Vorwärmstufe untersucht.

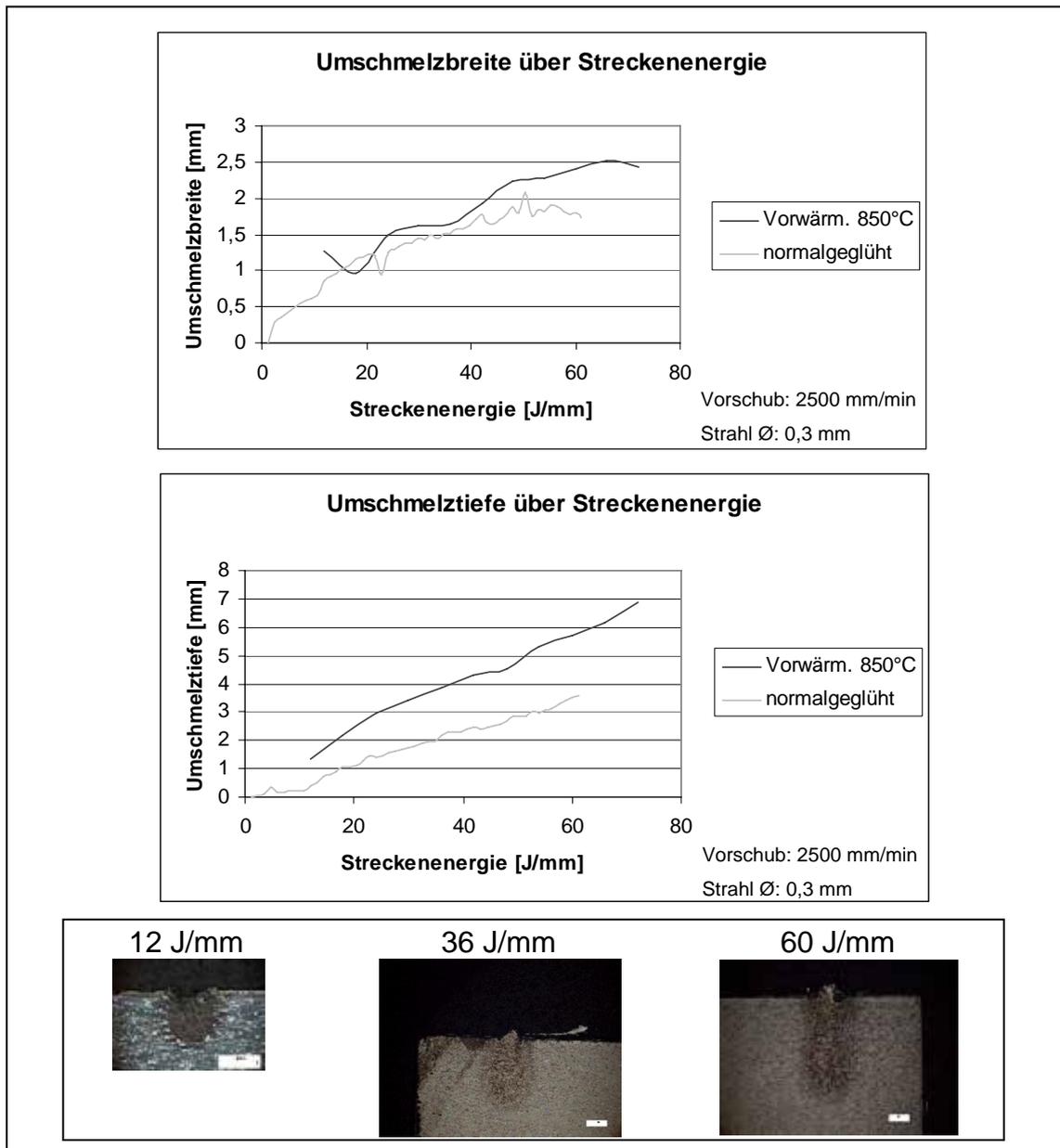
2.5 Laserumschmelzen im vergüteten Zustand mit Vorwärmung bei 850°C

Betrachtet man die Schlibfbilder in Abbildung 19 wird sofort deutlich, dass bei dieser Vorwärmstufe die Grenzen erreicht sind. Die eingebrachte Wärmeenergie reicht aus, dass bereits mit geringer Laserleistung Material nicht aufgeschmolzen, sondern verdampft wird. Der Extremwert der Spurbreite liegt ähnlich wie bei der Vorwärmstufe 650°C bei 33% Zunahme gegenüber dem Normalgeglühten. Die geringe Zunahme rührt von der eingebrachten Wärmeenergie her, die natürlich auch das Aufschmelzen in die Breite begünstigt. Die maximale Eindringtiefe liegt, wie schon bei 650°C Vorwärmung ebenfalls bei 65% gegenüber normalgeglüht. Die Stagnation der maximalen Eindringtiefe lässt auf eine Sättigung schließen. Hier wäre eine weitere Zunahme zu erwarten gewe-

sen. Eine Begründung für das tatsächliche Verhalten liegt in der Bildung eines abschirmenden Plasmas durch das Verdampfen des Werkstoffs.

Abbildung 19

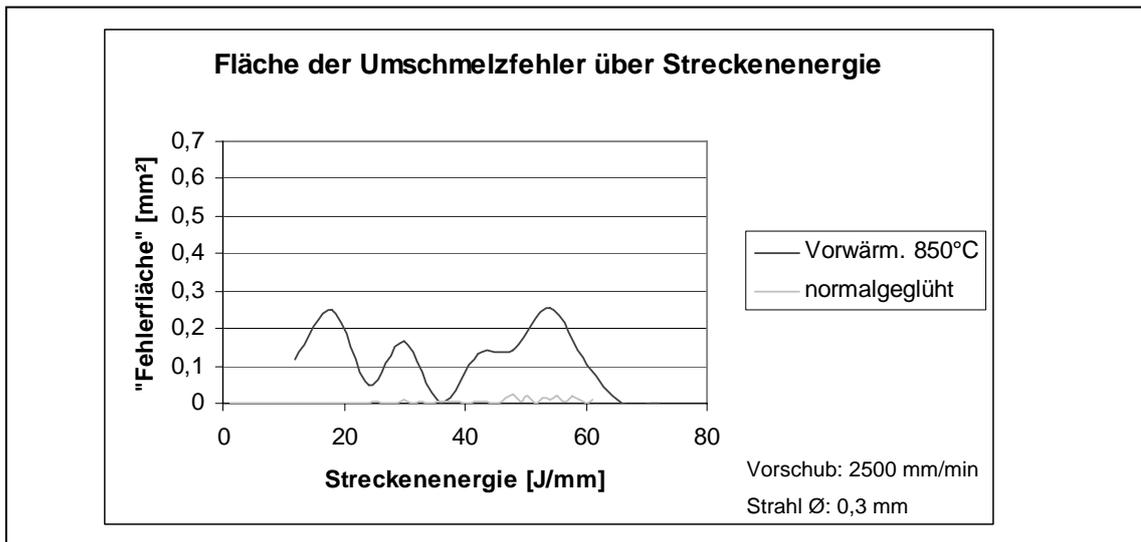
Darstellung der Umschmelzbreite und Umschmelztiefe



Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der Kurve der Umschmelzfehler wider. Wie bei der vorherigen Vorwärmstufe liegen die Fehler auch hier in Form von Lunkern, Poren oder Materialausdampfungen vor. Durch dieses unregelmäßige Verhalten über den gesamten Streckenenergiebereich ist kein sicherer, fehlerfreier Umschmelzprozess möglich. Eine Rissbildung ist jedoch nicht festzustellen. Die Fehlerrate nimmt wie in Abbildung 20 zu sehen ist gegenüber der Vor-

wärmstufe bei 650°C deutlich zu, so dass hier augenscheinlich bereits zu viel Wärmeenergie eingebracht wurde.

Abbildung 20
Darstellung der Umschmelzfehler



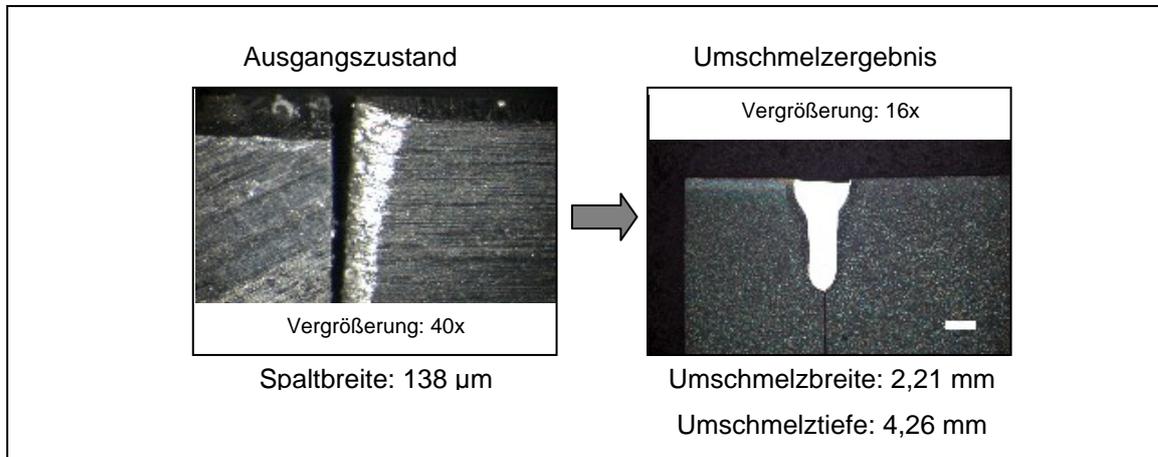
2.6 Verifizierung der Umschmelzversuche

Bei den bisher vorgestellten Parameteruntersuchungen handelte sich ausschließlich um fehlerfreies Material, welches umgeschmolzen wurde. Wichtig ist jedoch nun die Frage, ob sich das Verfahren überhaupt in der Praxis einsetzen lässt um Werkzeugverschleißerscheinungen wie beispielsweise Risse, für die insbesondere das Laserumschmelzen Potential bietet, zu beheben.

Hierzu wurden zwei Proben an ihren Stirnflächen präpariert und als Stumpfstoß mit sehr engem Spalt zusammengespannt. Diese Spalte wurden dann vermessen und mit den ermittelten Parametersets verschweißt.

Das Ergebnis ist ein fehlerfrei umgeschmolzener „Riss“ (Abbildung 21). Die Ausdehnung des aufgeschmolzenen Werkstoffs kompensiert das fehlende Material nahezu vollständig, so dass kein Zusatzmaterial erforderlich ist. Die erreichte Umschmelztiefe liegt über den bei der Parameterfindung ermittelten Werten. Dies ist aus Gründen einer verstärkten Mehrfachreflektion im Spalt zu erklären. Die in Abbildung 8 vorgenommene Eingliederung des Laserumschmelzens scheint somit durchaus sinnvoll und praktikabel.

Abbildung 21
Umschmelzversuch am simulierten Riss



Das in Abbildung 21 dargestellte Ergebnis zeigt deutlich, dass dieses Verfahren Potential besitzt und durch Weiterentwicklung ein Einsatz im Gebiet der Werkzeuginstandsetzung durchaus denkbar ist.

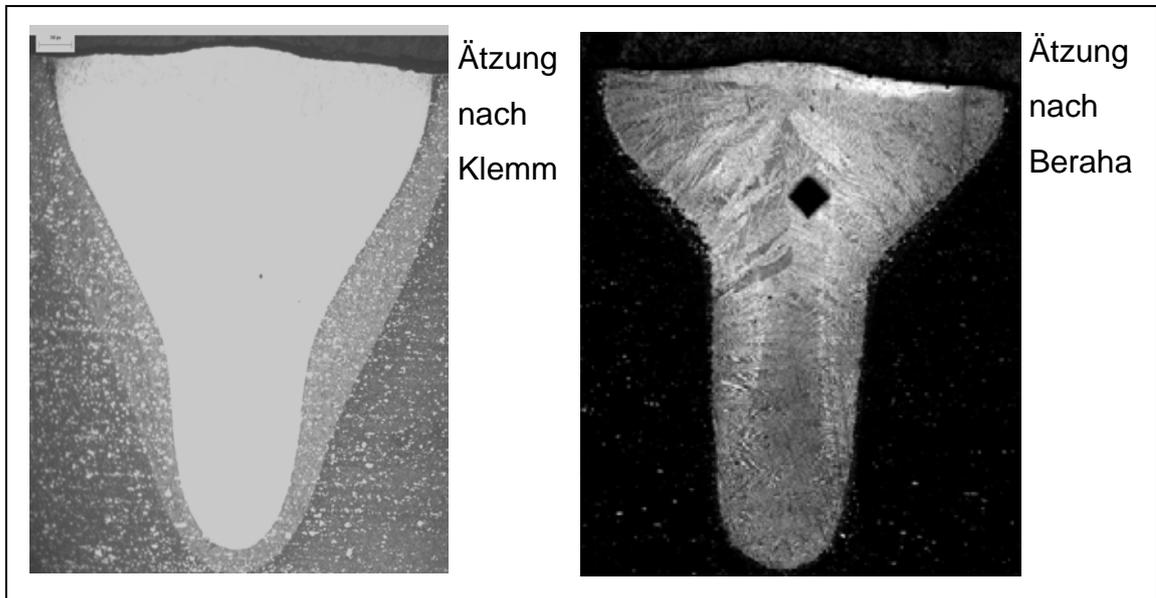
3 Metallographische Betrachtung der Untersuchungen

Die Laserumschmelzraupen wurden anhand von metallographischen Schlifflinien im Lichtmikroskop auf ihre Gefügeausbildung untersucht. Es zeigte sich, dass für die Gefügeausbildung vor allem der Ausgangszustand des Werkstückes entscheidend ist. Von den unterschiedlichen Behandlungszuständen der Werkstücke wurde für die folgende Gefügebetrachtung jeweils eine repräsentative Position auf der Umschmelzraupe ausgewählt. Die Beurteilung gilt der Ausbildung in dem von der Laserbehandlung nicht beeinflussten Grundwerkstoff im Vergleich zum Gefüge der Wärmeeinflusszone, dem Übergang zur Schmelzzone und dem Gefüge der Schmelze.

Eine Ätzung nach Klemm entwickelt das Ferrit-Fe₃C+Sonderkarbid-Gefüge. Eine Ätzung nach Murakami färbt die Sonderkarbide – Eisenkarbide bleiben hell. Durch eine Ätzung nach Beraha zeigt sich das Austenitgefüge.

Abbildung 22 macht die unterschiedlichen Gefügestrukturen in Abhängigkeit von der Wahl des Ätzmittels deutlich.

Abbildung 22
Gefügestrukturen mit unterschiedlichen Ätzungen



3.1 Ausgang normalgeglüht → umgeschmolzen

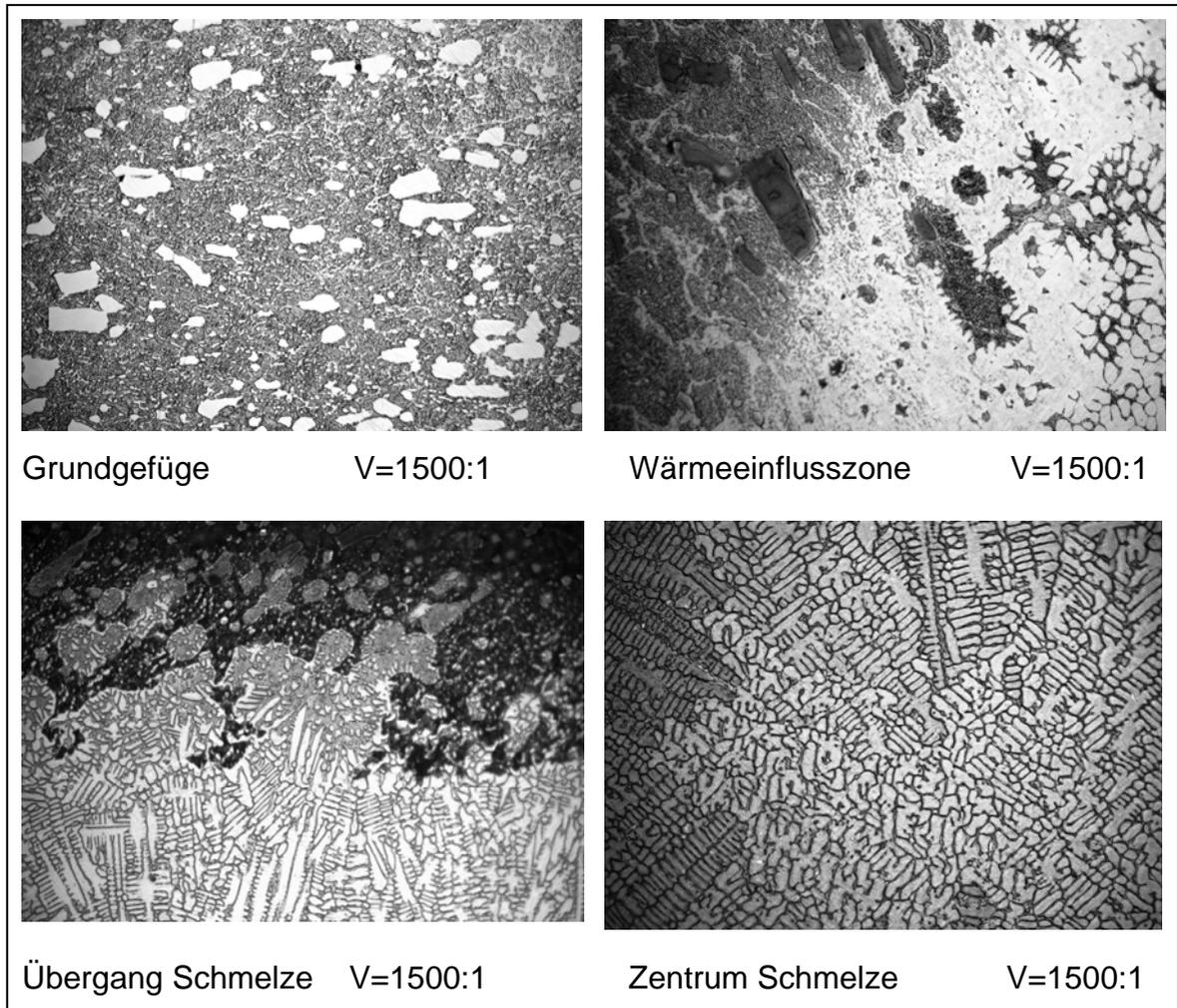
Das Grundgefüge besteht aus groben primären Sonderkarbiden, eingebettet in einer Matrix bestehend aus Ferrit und kugeligem Sekundärzementit.

Die Wärmeeinflusszone zeigt, dass ein Teil der Eisenkarbide in Lösung gehen und dann bei der raschen Abkühlung Troostitinseln bilden. Die Sonderkarbide bleiben zum großen Teil noch in ihrer groben Form erhalten (durch Murakami-Ätzung braun gefärbt).

In der Übergangszone zur Schmelze sind auch die Primärkarbide verschwunden. Das Gefüge besteht aus einem Gefügemisch aus Bainit und aus der Schmelze erstarrtem, feinem Karbidnetz, eingebettet in eine Austenitmatrix.

Das Zentrum der aufgeschmolzenen Zone zeigt primäre Austenitkristallen und ein feines Karbidnetz.

Abbildung 23
Gefügebereiche im Schliffbild

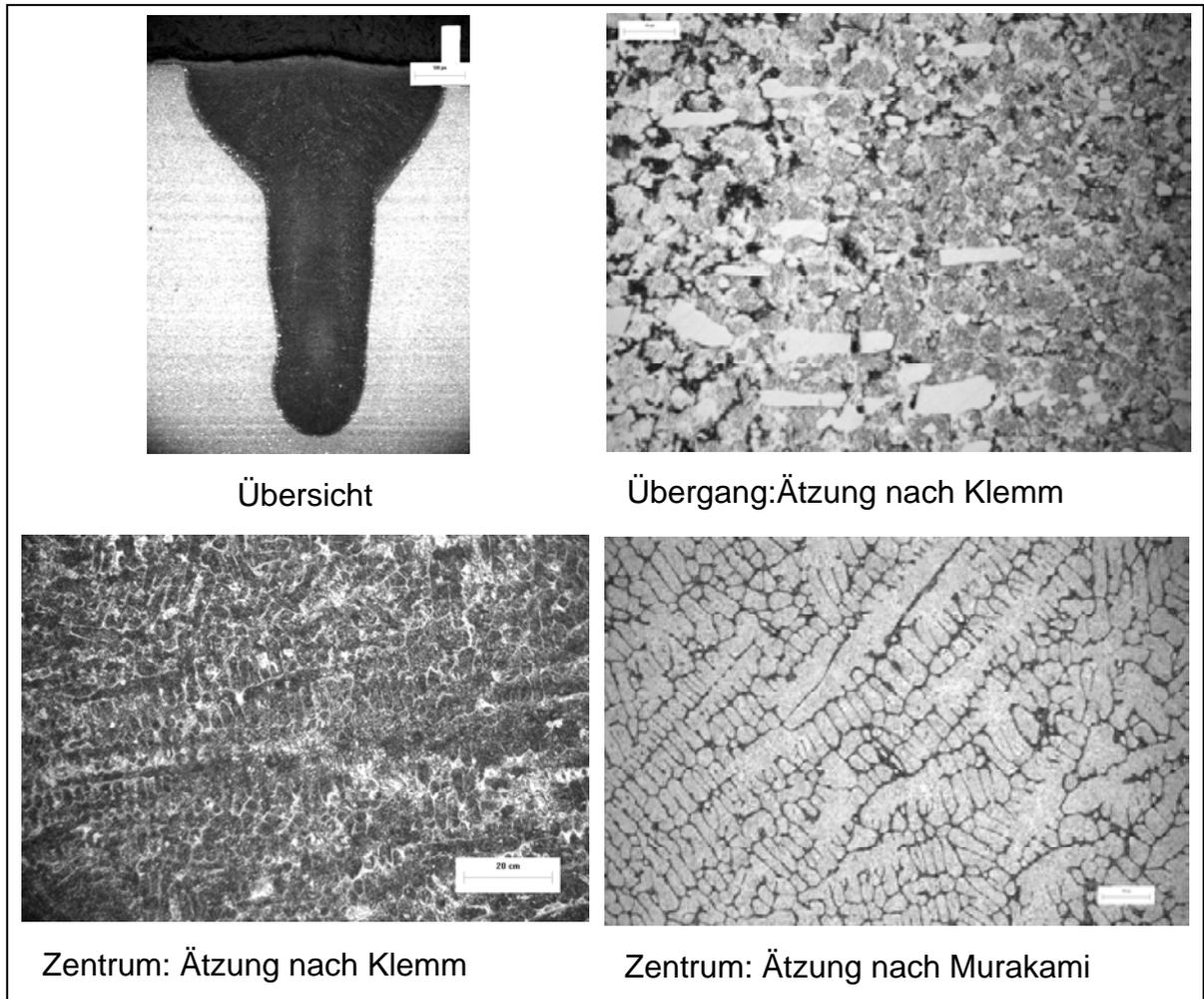


3.2 Ausgang normalgeglüht → umgeschmolzen → 750°C geglüht

Bereits in der Übersicht zeigt die Ätzung nach Klemm einen Angriff in der Schmelzzone, der Austenit hat sich infolgedessen umgewandelt. Der Übergangsbereich weist neben den primären Karbiden ein Gemisch aus feinen Sekundärkarbiden und Perlit mit Troostitinseln auf, das heißt der Restaustenit hat sich in ein Ferrit-Zementitgemisch umgewandelt.

Auch das Austenitgefüge des Zentrums hat eine Umwandlung in einen feinstlamellaren Perlit erfahren. Eine Ätzung nach Murakami macht deutlich, dass das Karbidnetz der Sonderkarbide durch die Wärmebehandlung unbeeinflusst geblieben ist.

Abbildung 24
Gefügebereiche im Schlibbild



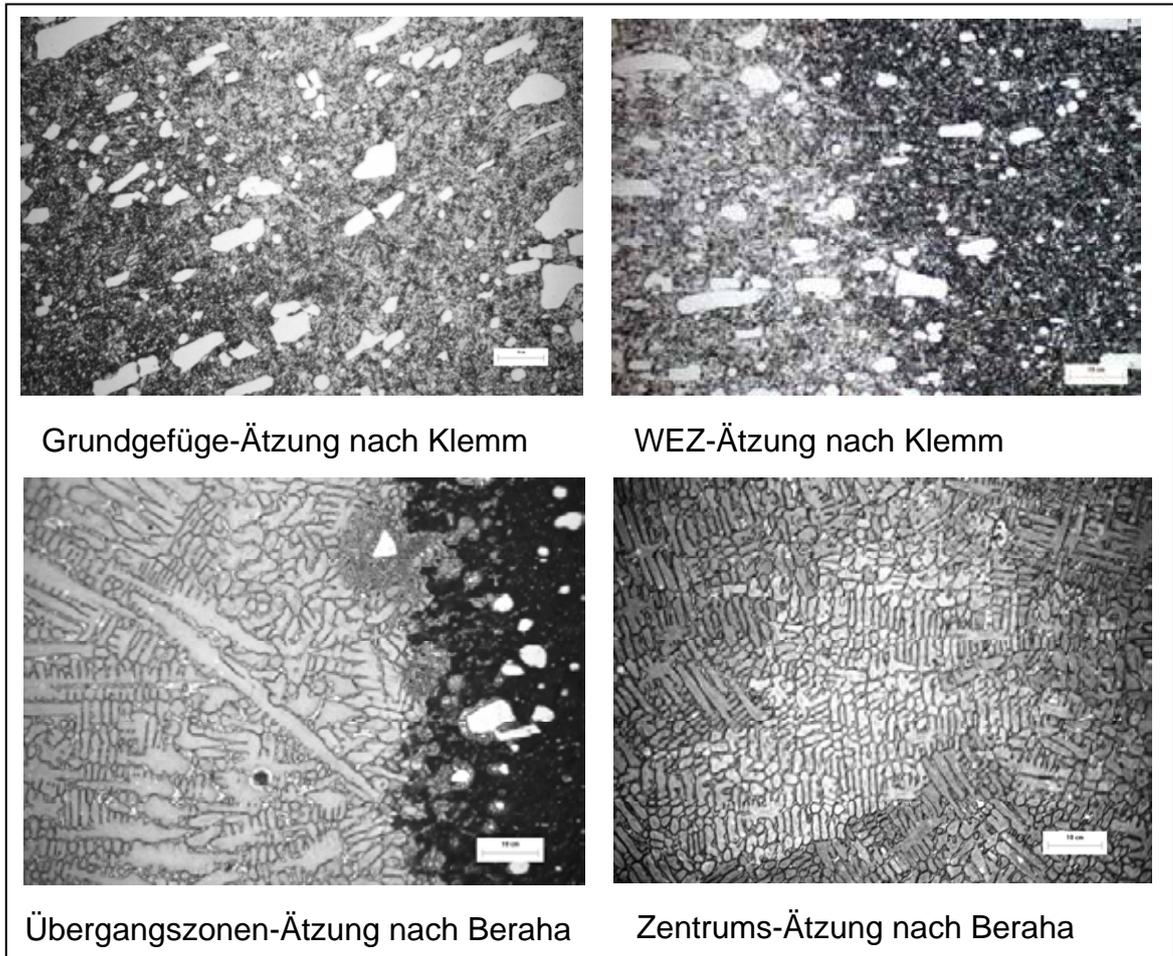
3.3 Ausgang vergütet → umgeschmolzen

Da die meisten Werkzeuge im vergüteten Zustand vorliegen sollen die Auswirkungen dieser Wärmebehandlung auf die Gefügestruktur untersucht werden. (Abbildung 25)

Das Ausgangsgefüge besteht aus Vergütungsgefüge und den durch die Wärmebehandlung unbeeinflussten Primärkarbiden. In der Wärmeeinflusszone (WEZ) kommt es durch eine nochmalige Anlasswirkung zu einer Vergrößerung der Feinstausscheidungen und dadurch zu einem dunkleren Ätzangriff. An der Grenzfläche zur Schmelze nimmt die Größe und Menge der Primärkarbide ab und die ursprüngliche Vergütungsstruktur wird durch feinststreifigen Perlit und

Austenitinseln ersetzt. Das Zentrum weist, wie im normalgeglühten Ausgangszustand, Austenitstruktur mit Karbidnetzen auf.

Abbildung 25
Gefügebereiche im Schlifffbild



3.4 Ausgang normalgeglüht → umgeschmolzen → vergütet

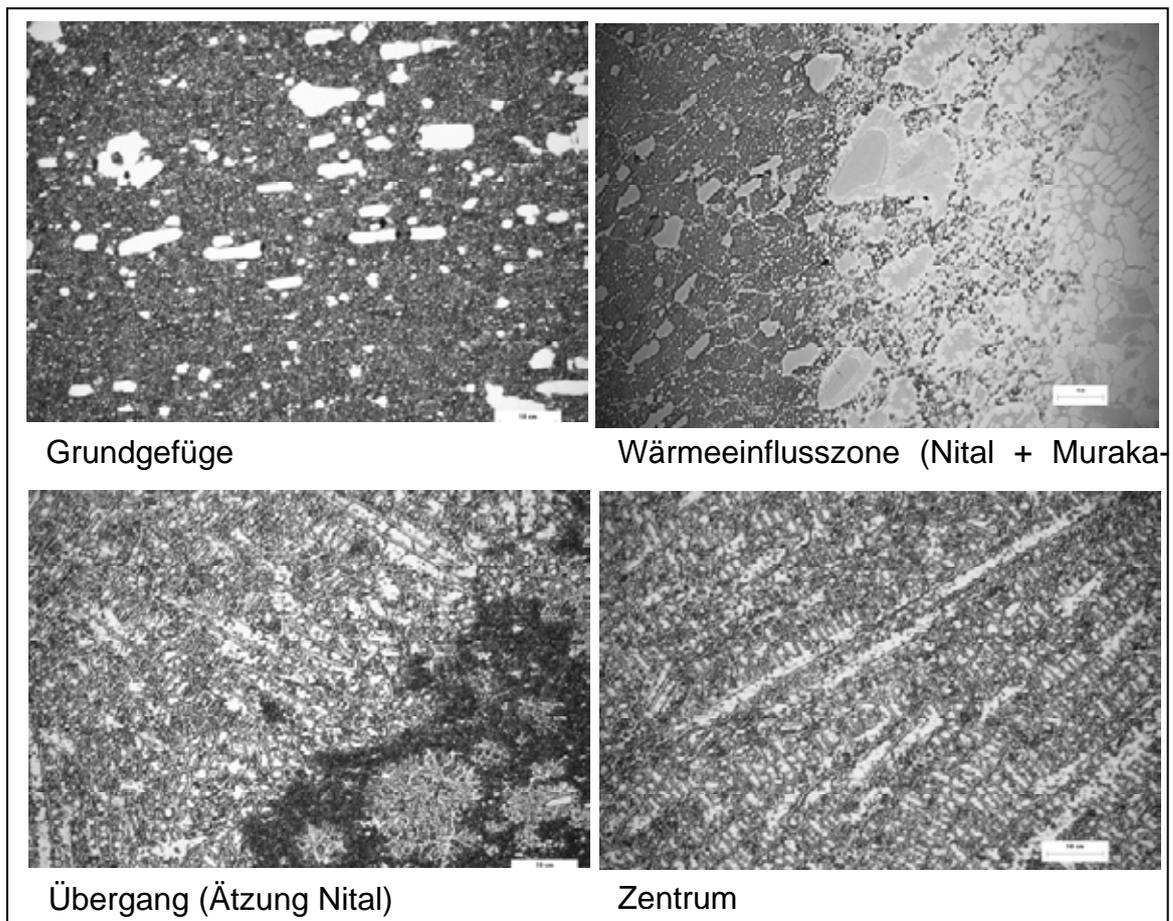
Da der vergütete Ausgangszustand sich aus umschmelztechnischer Sicht als schwierig erweist, soll geprüft werden, welche Auswirkungen ein anschließendes Härten nach dem Umschmelzvorgang hat.

Das Grundgefüge weist neben den nicht in Lösung gegangenen Primärkarbiden, die auch noch in der Wärmeinflusszone festzustellen sind. (Ätzung nach Murakami) ein feines Vergütungsgefüge auf. Der Übergang zum aufgeschmol-

zenen Bereich zeigt feine Sonderkarbide als Folge der Anschmelzung in einer Matrix aus Vergütungsgefüge.

Die Schweißzone besteht aus dem bekannten feinen Karbidnetz und einer Matrix bestehend aus Vergütungsgefüge und nicht strukturiertem Martensit, vermutlich eine Folge des hohen Anteils an Legierungselementen.

Abbildung 26
Gefügebereiche im Schlibbild



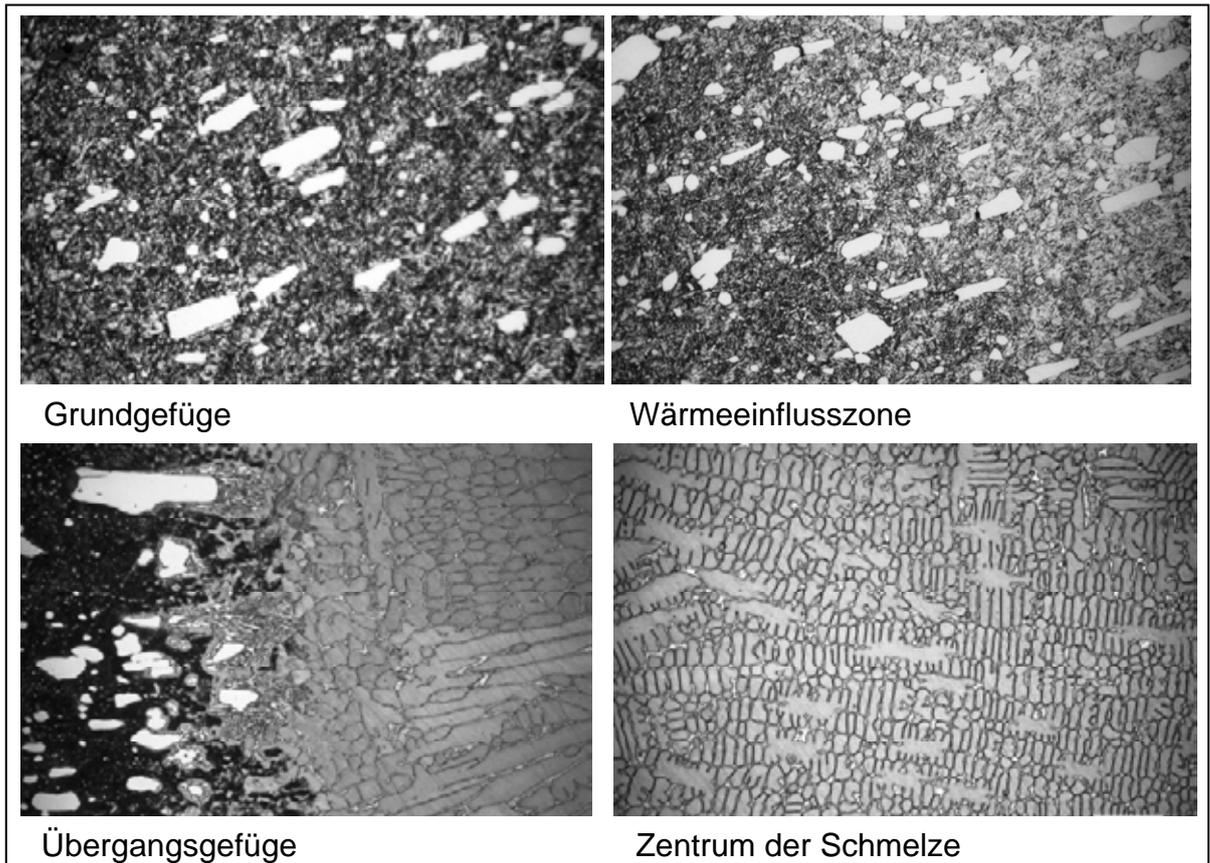
3.5 Ausgang vergütet → 450°C vorgewärmt → umgeschmolzen

Da der vergütete Ausgangszustand beim Aufschmelzen, aufgrund zu hoher Spannungen, zu keinem befriedigenden Ergebnis geführt hat, sollte geklärt werden inwieweit sich eine Vorwärmung, die sich günstiger auf das Abkühlverhalten nach der Laserbehandlung auswirken sollte, die Gefügeausbildung beeinflusst.

Sowohl im Grundgefüge, als auch in der Wärmeeinflusszone sind die primären Sonderkarbide vorhanden. Allerdings weist der schwächere Ätzangriff im Be-

reich der Schweißzone auf eine Vergrößerung der Fe_3C hin. Direkt an der Kontaktzone zur Schmelze bilden sich um die noch vorhandenen Primärkarbide Austenithöfe. Die Schmelzzone besteht aus Austenitmischkristallen und dem Karbidnetz.

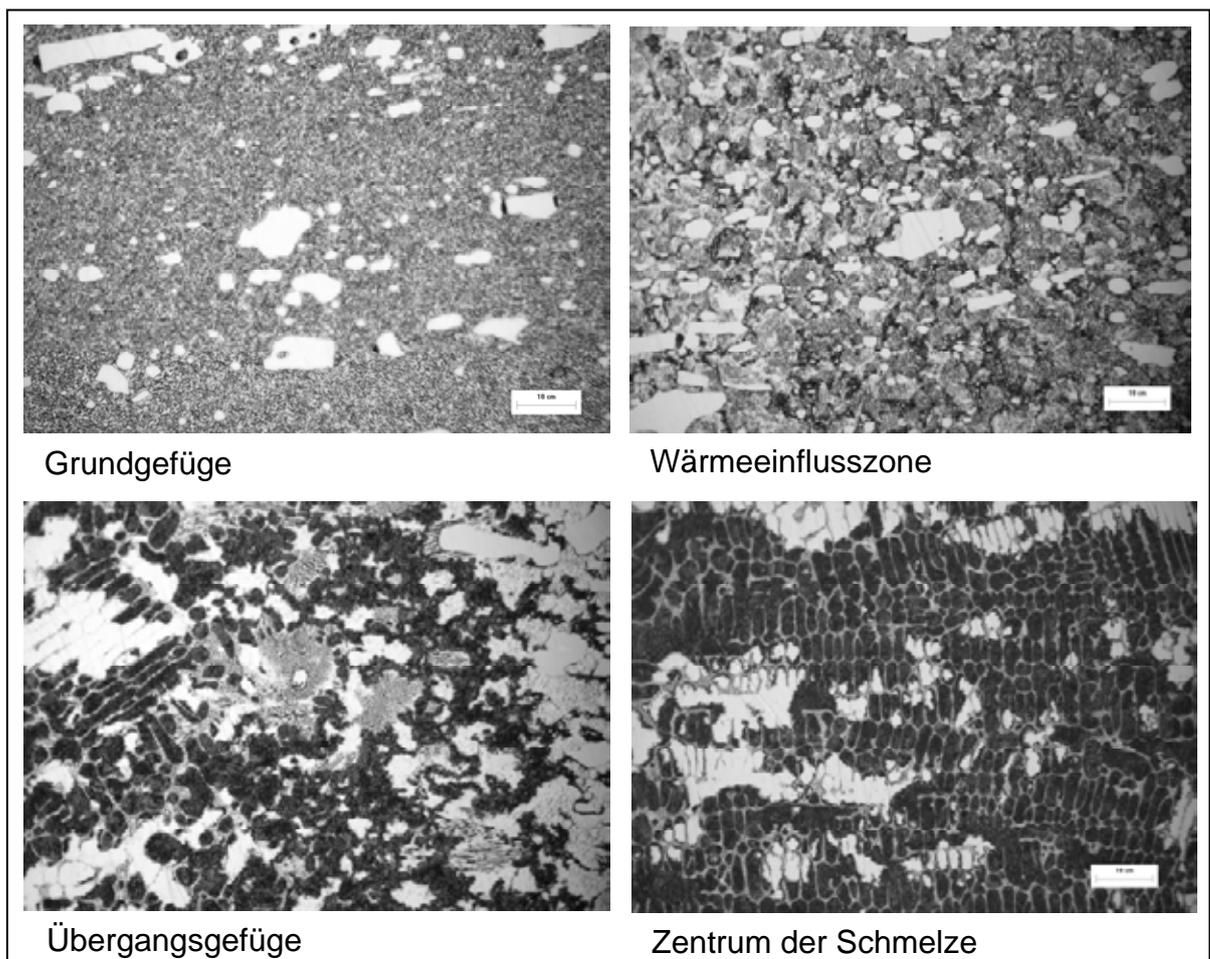
Abbildung 27
Gefügebereiche im Schlibbild



3.6 Ausgang vergütet → 650°C vorgewärmt → umgeschmolzen

Durch das Vorwärmen des vergüteten Werkstoffes auf 650°C kommt es zu einer deutlichen Vergrößerung der Fe₃C Ausscheidungen im Grundwerkstoff, die Wärmeeinflusszone weist infolge der Erwärmung beim Umschmelzen Anteile von Zwischenstufengefüge auf, deren Anteil zur Schweißnaht hin deutlich zunimmt. In der Schweißnaht kommt es infolge der reduzierten Wärmeabfuhr zu einer deutlich verminderten Abkühlgeschwindigkeit, was die Umwandlung des Austenits in Zwischenstufe und Martensit zur Folge hat. Die Bildung des Karbidnetzes bleibt davon unbeeinflusst.

Abbildung 28
Gefügebereiche im Schliffbild

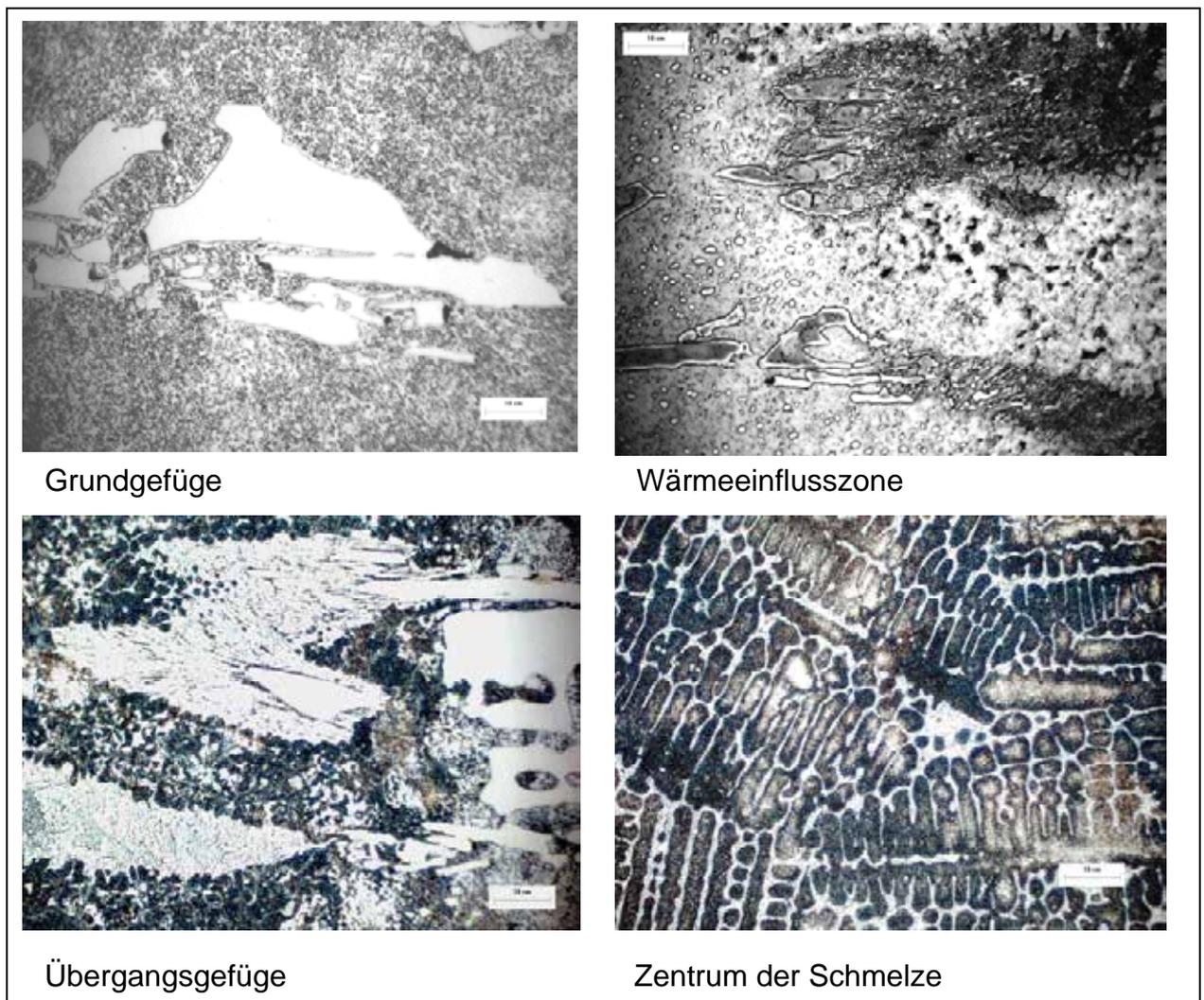


3.7 Ausgang vergütet → 850°C vorgewärmt → umgeschmolzen

Das Grundgefüge zeigt die typische Weichglühstruktur mit groben Primärkarbiden. Bedingt durch die hohe Vorwärmung entsteht an der Kontaktzone zur Schmelze Perlit. Die Schmelzzone wandelt sich in ein Perlit-Bainit-Gemisch um, die Karbidnetzbildung bleibt von der Vorwärmung unbeeinflusst.

Abbildung 29

Gefügebereiche im Schliffbild



3.8 Härteverlauf : „Grundwerkstoff - Schmelze - Grundwerkstoff“

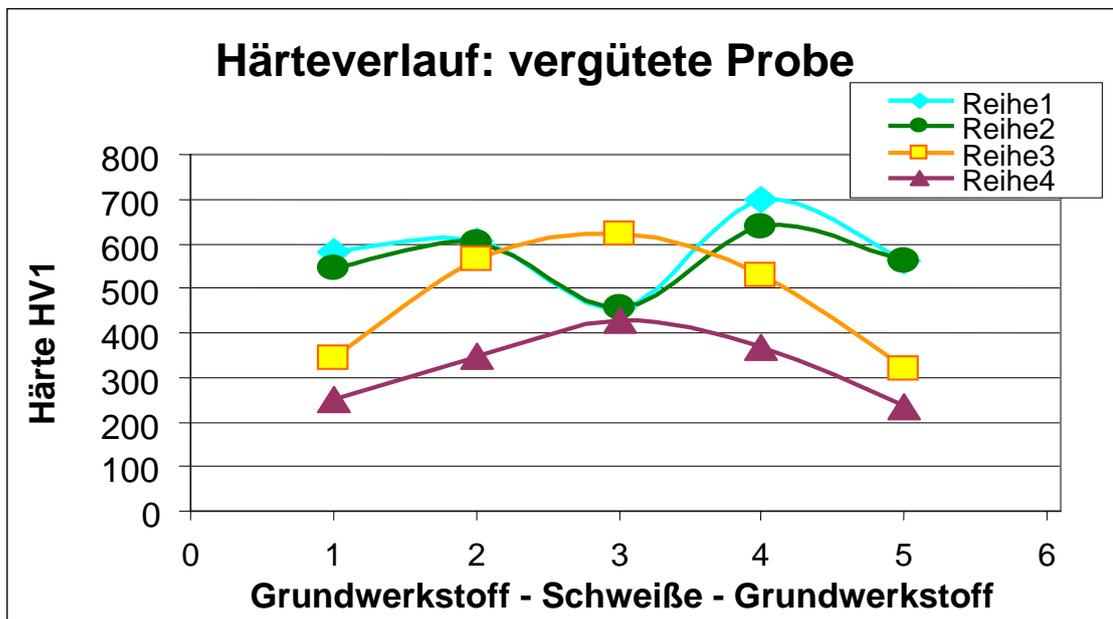
Abbildung 30 zeigt den Einfluss des Umschmelzens auf den Härteverlauf über den wärmebeeinflussten Bereich bei vergüteten Proben. Dabei zeigt sich, dass

die Vorwärmung einen ganz entscheidenden Einfluss auf die Härte hat. So zeigen die Proben ohne bzw. mit niedriger Wärmebehandlung (Reihe 1 und 2) einen geringen Anstieg der Härte in der Wärmeeinflusszone bei hoher Grundhärte. Bedingt durch das relativ weiche Austenitgefüge kommt es in beiden Fällen zu einem deutlichen Abfall der Härte in der Umschmelzzone. Erhöht man die Vorwärmtemperatur auf einen Bereich knapp unterhalb A_1 (Reihe 3), so erhält man durch diese Wärmebehandlung einen deutlichen Festigkeitsabfall des Werkstückes. Bedingt durch die Erwärmung beim Schmelzen entsteht beim Abkühlen in diesem Bereich Zwischenstufengefüge und Martensit, was zu einer deutlichen Härtesteigerung führt. Die Erwärmung auf eine Temperatur über A_1 führt zu einer Weichglühung des Grundwerkstoffes und zu einer stark verminderten Wärmeabfuhr in der Umschmelzzone. Das bewirkt, dass nach dem Erstarren die Schmelze eine γ -MK-Perlit Umwandlung durchläuft, und somit die Härte in diesem Bereich nur mäßig ansteigt. Das Karbidnetz dürfte ebenfalls die Härtesteigerung mit beeinflussen.

Der Härteverlauf der umgeschmolzenen Probe im normalisierten Ausgangszustand zeigt einen Härteanstieg in Folge der Zwischenstufenbildung in der Wärmeeinflusszone. Der Schmelzbereich weist einen weichen Austenit-Mischkristall auf. Durch das Karbidnetz wird die Härte im Verhältnis zum Ausgangszustand jedoch erhöht (Reihe 1).

Eine nachträgliche Wärmebehandlung mit $740^\circ\text{C}/2\text{h}$ bewirkt eine Umwandlung der durch das Schweißen wärmebeeinflussten Zonen in ein feines perlitisches Gefüge, was zu einer gleichmäßigen Härte im Umschmelzbereich führt- mit einem leichten Anstieg der Härte im Vergleich zum Normalglühgefüge (Reihe 2). Ein anschließendes Härten führt zu dem erwarteten Härteanstieg, der vom Grundwerkstoff über die Schmelzzone hinweg gleichmäßig verläuft (Reihe 3).

Abbildung 30
Härteverlauf im vergüteten Zustand



Reihe 1: ohne weitere Behandlung

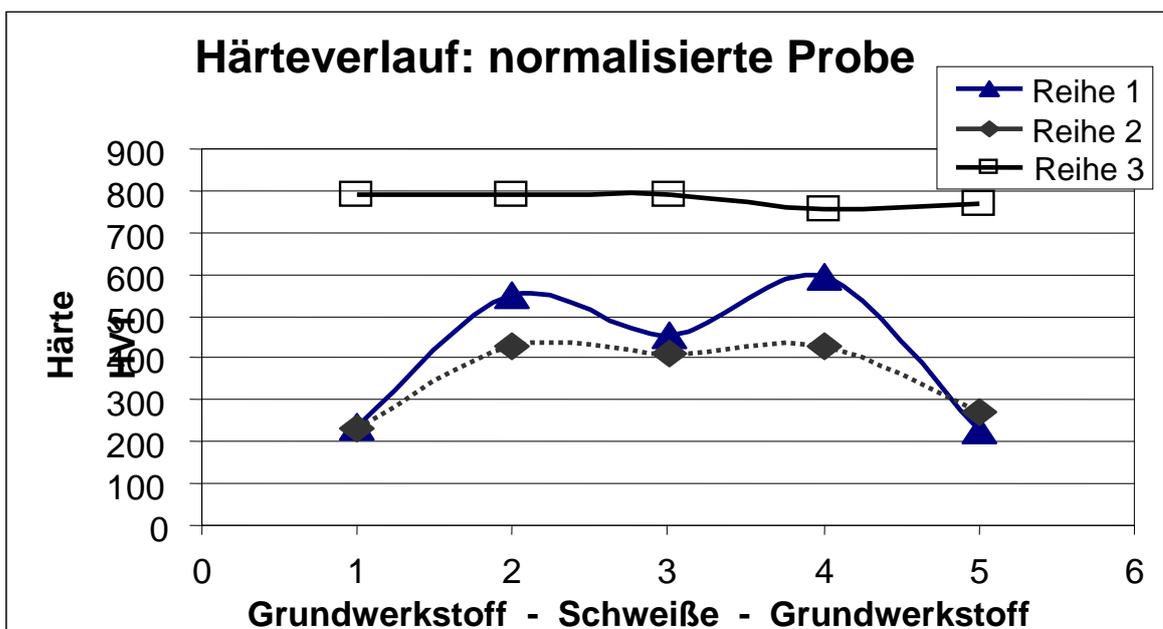
Reihe 2: vorgewärmt auf 450°C

Reihe 3: vorgewärmt auf 650°C

Reihe 4: vorgewärmt auf 850°C

Abbildung 31

Härteverlauf im normalgeglühten Zustand



Reihe 1: ohne weitere Behandlung

Reihe 2: nachträglich 740°C 2h gegläht

Reihe 3: nachträglich vergütet

4 Fazit und Ausblick

Die bisher erzielten Ergebnisse beim Laserumschmelzen zur Reparatur von Werkzeugen zeigen, dass dieses Verfahren grundsätzlich durchaus zur lokalen Reparatur von Werkzeugen eingesetzt werden kann. Bis zum endgültigen Industrieinsatz besteht allerdings noch Entwicklungsbedarf.

Hier gilt es zunächst das vorgestellte Vorgehen zur Auswahl eines geeigneten Laserverfahrens zu automatisieren und zu vervollständigen. In Bezug auf die Parameter soll in weiteren anstehenden Untersuchungen der Bereich um 650°C Vorwärmtemperatur weiter auf ein Optimum untersucht werden, um die Fehler-rate weiter zu minimieren und die Prozesssicherheit zu maximieren.

Horst Bürkle, Rainer Menge

**Betrachtung zur Breitung beim Kaltwalzen von Kupfer-
Flachdraht aus Runddraht mit und ohne Zwischenglühung**

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung**
- 2 Anlagentechnik**
- 3 Versuche**
 - 3.1 Vorüberlegungen**
 - 3.2 Versuchsergebnisse**
 - 3.2.1 Mechanische Kennwerte**
 - 3.2.2 Toleranzen und Kantenqualität**
- 4 Schlussfolgerungen**

Zusammenfassung

Es wurde eine Übersicht über das Walzen von Flach- aus Runddraht gegeben und die speziellen Probleme hinsichtlich der Abstimmung des Einlauf- und Endquerschnitts, der erreichbaren Kantenqualität und der erreichbaren Breitentoleranz in Abhängigkeit von verschiedenen Stichfolgen ohne und mit Zwischenglühung dargestellt. Als Schlussfolgerung ergibt sich, dass in den einzelnen Umformstufen bestimmte Grenzumformgrade einzuhalten sind. Weiterhin können die kritischen Qualitätsparameter mit einer Zwischenglühung verbessert werden.

Summary

This paper gives a survey about the rolling of flat wire out of round wire and it describes the specific problems regarding the adaptation of the input and final cross sections, the achievable edge quality and the achievable width tolerance in dependence of different pass sequences without and with intermediate annealing. The conclusion is that certain strain limits have to be kept in the individual shaping stages. Furthermore the critical quality parameters can be improved by intermediate annealing.

1 Einleitung

FFC-Leiter (flexible flat cable) werden am Markt immer stärker für verschiedenste Anwendungen eingesetzt. Beispiele dafür sind der Ersatz bzw. eine Ergänzung des Kabelbaums im Automobil durch mehradrige FFC-Kabel, die sowohl für die Energie- als für die Steuerungsverbindungen (über ein Bus-System) zuständig sind. Ebenso können Flachdrähte zur Umwicklung von Kabeln eingesetzt werden. Die üblichen Abmessungen liegen im Bereich 0.035 x 0.4 mm; 0.035 x 0.6 mm über 0.1 x 1.54 mm; 0.2 x 4.08 mm bis hin zu 0.2 x 10 mm; 0.2 x 20 mm. Bei der Herstellung stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung:

- Walzen von breiten Bändern und Spalten der Bänder
 - Vorteil: hohe Produktivität beim Walzen
 - Nachteil: begrenzte Länge und Kantenqualität
- direktes Walzen des Enddrahtes aus Runddraht
 - Vorteil: sehr große Lauflängen (z.B. für die Extrusion)
 - Nachteil: höherer Aufwand in der Anlagentechnik bezogen auf den Einzeldraht

Im Folgenden wird auf das Fertigungsverfahren Kaltwalzen von Rund- an Flachdraht eingegangen. Dabei soll diskutiert werden, wie bestimmte Anforderungen an das Endprodukt, so zum Beispiel

- enge Toleranzen in Dicke und Breite
- lange Lauflängen
- hohe Oberflächenqualität
- hohe Produktivität
- gute Geradheit, minimaler Säbel

erfüllt werden können. Ein spezielles Problem ist die Ermittlung des optimalen Einlaufdurchmessers für größere Flachdrahtbreiten (Drähte mit $h/b > 40$). Die dazu erfolgten Versuche werden im Folgenden vorgestellt.

2 Anlagentechnik

Hinsichtlich der Anlagentechnik stand ein 5-gerüstiges Walzwerk von Bühler (EWT 160-5) + der Induktionsglühe RI-170-F-300 + traversierendem Spuler mit folgender Konfiguration zur Verfügung:

- Gerüst 1: Duo 160 mm
- Gerüst 2: Vierrollenwalzapparat 200 mm
- Gerüst 3: Duo 160 mm
- Gerüst 4: Duo 140 mm
- Gerüst 5: Duo 140 mm

Die Anlage ist zum Walzen und Glühen von Endabmessungen von 0.1 x 0.8 mm bis 0.2 x 20 mm ausgelegt.

3 Versuche

3.1 Vorüberlegungen

Zunächst muss bezogen auf das zu fertigende Endprodukt 0.2 x 9.16 mm der Ausgangsdurchmesser bestimmt werden. Mit der üblichen Abschätzung für Kupfer

$D_0 = \frac{h_{End} + b_{End}}{2} \cdot 0.8$ ergibt sich für D_0 etwa 3.8 mm. Das Einlaufmaterial sollte in-

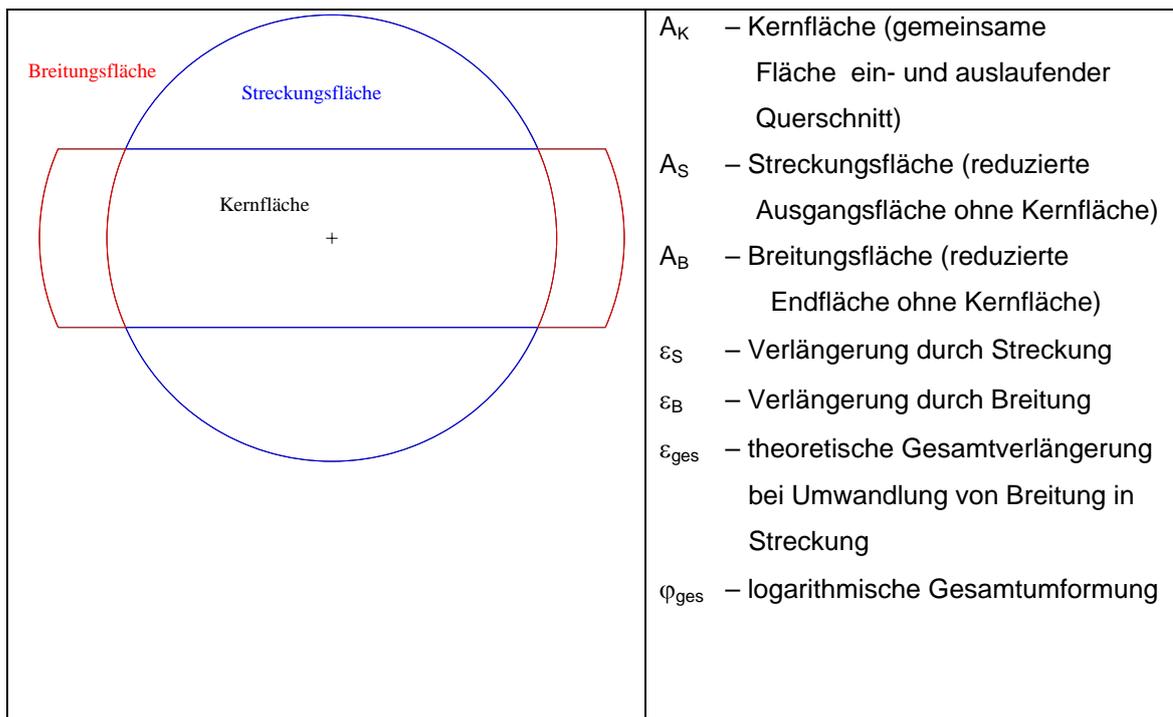
line-geglüht sein, um ein feinkörniges Gefüge zu haben. Diese wirkt sich sehr positiv auf die Oberflächenqualität bei der Endabmessung aus.

Es bestand die Möglichkeit, mit einer sehr straffen Stichfolge in fünf Stichen an die Endabmessung zu gehen oder das Programm auf zweimal fünf Stiche aufzuteilen, wobei hier noch mit oder ohne Zwischenglühung gearbeitet werden konnte.

Um die Umformung besser einzuschätzen, wurde das Berechnungskonzept von Walter Demny [1] modifiziert. Die Idee besteht darin, den Ausgangs- und den Endquerschnitt pro Stich über die Flächen zu vergleichen, wobei zwischen der Kernfläche, die beide Schnitte besitzen, der Streckungsfläche, nur im Aus-

gangsquerschnitt, und der Brei­ tungsfläche, nur im Endquerschnitt, unterschieden wird.

Abbildung1
Flächenaufteilung



Damit lassen sich folgende Zusammenhänge ableiten:

$A_{Ausgang} = A_K + A_S$ $A_{End} = A_K + A_B$ $\varepsilon_S = \frac{A_K + A_S}{A_K + A_B}$ $\varepsilon_B = \frac{A_K + A_B}{A_K}$ $\varepsilon_{ges} = \frac{A_K + A_S}{A_K} = \varepsilon_S \cdot \varepsilon_B$ $\varphi_{ges} = \ln(\varepsilon_{ges})$	<p>Mit der Einführung der Gesamtumformung aus Streckung und Brei­ tung wird die Brei­ tung wie eine zusätzliche Streckung behandelt. Damit kann zum Beispiel für größere Brei­ tungen gerade im ersten Stich die Umformung besser erfasst werden.</p>
--	---

Mit diesem Modell wurden die Stichfolgen berechnet und das Material gewalzt.

Abbildung 2
Übersicht Stichfolgen V1 und V2

V2	Stichpläne	V1
D = 3.8 mm		D = 3.8 mm
h x b = 1.91 x 5.37 mm		h x b = 1.10 x 7.61 mm
h x b = 1.47 x 5.99 mm		h x b = 0.87 x 7.85 mm
h x b = 0.93 x 6.91 mm		h x b = 0.44 x 8.85 mm
h x b = 0.67 x 7.21 mm		h x b = 0.28 x 9.03 mm
h x b = 0.55 x 7.35 mm		h x b = 0.20 x 9.16 mm

Abbildung 3
Übersicht Stichfolgen V3 und V4 (Vorplanung)

V3 + V4	Stichpläne
h x b = 0.55 x 7.35 mm	
h x b = 0.41 x 7.52 mm	
h x b = 0.35 x 7.68 mm	
h x b = 0.26 x 7.73 mm	
h x b = 0.22 x 7.74 mm	
h x b = 0.20 x 7.76 mm	

Des Weiteren wurden auch die Kantenqualität und die Toleranz in der Breite betrachtet.

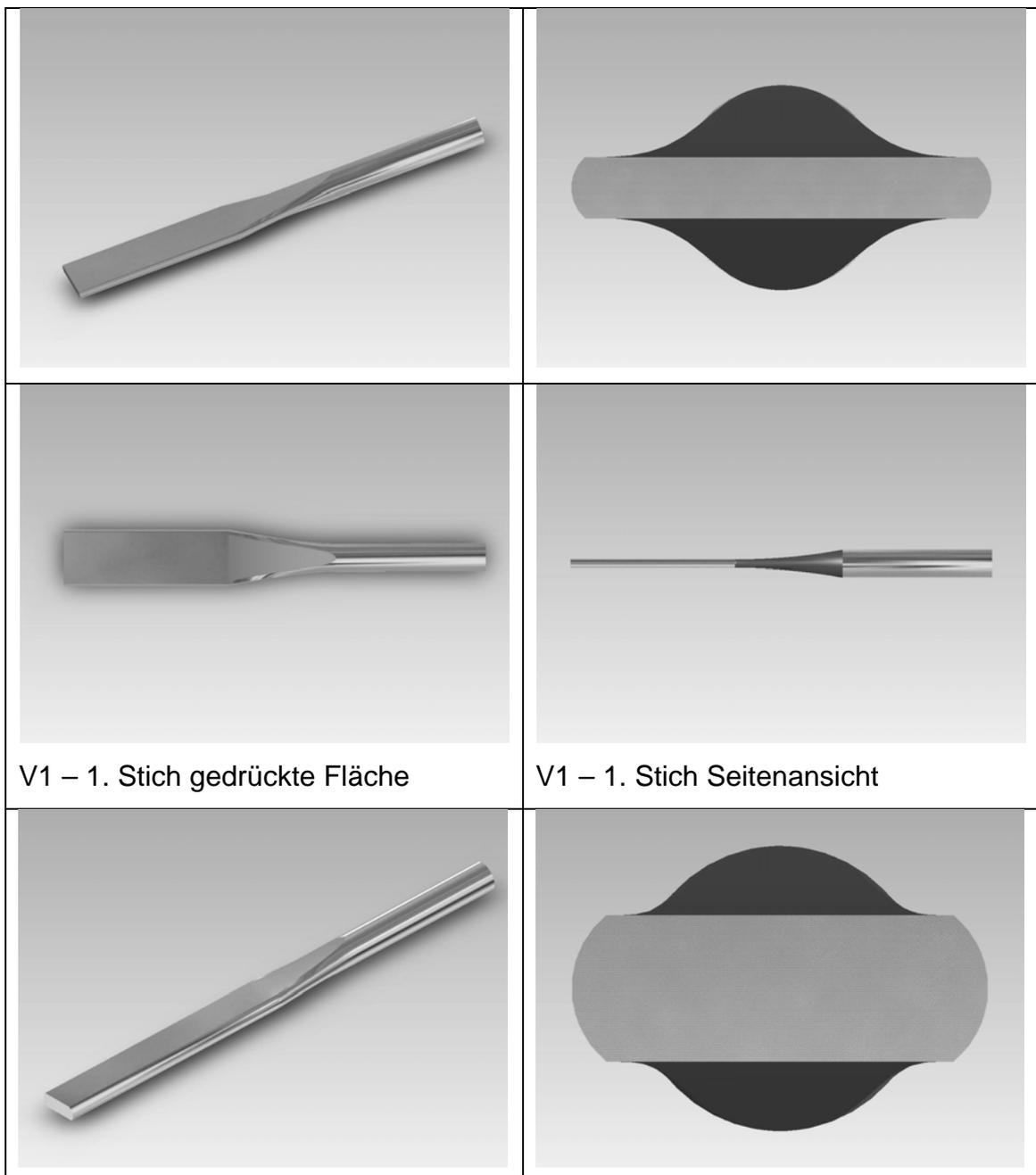
3.2 Versuchsergebnisse

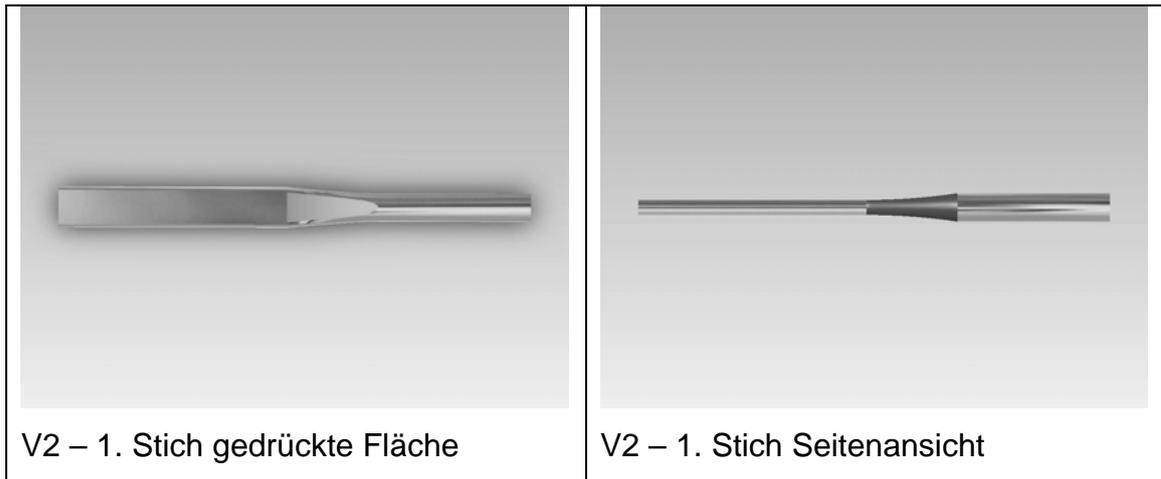
3.2.1 Mechanische Kennwerte

Die unterschiedlichen Breitungen im ersten Stich bei den Varianten V1 und V2 sind in den folgenden Bildern dargestellt, um die Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften besser zu verstehen.

Abbildung 4

3-D Darstellung der ersten Stiche V1 und V2





V2 – 1. Stich gedrückte Fläche

V2 – 1. Stich Seitenansicht

Zunächst wurden die mechanischen Eigenschaften der Drähte bestimmt.

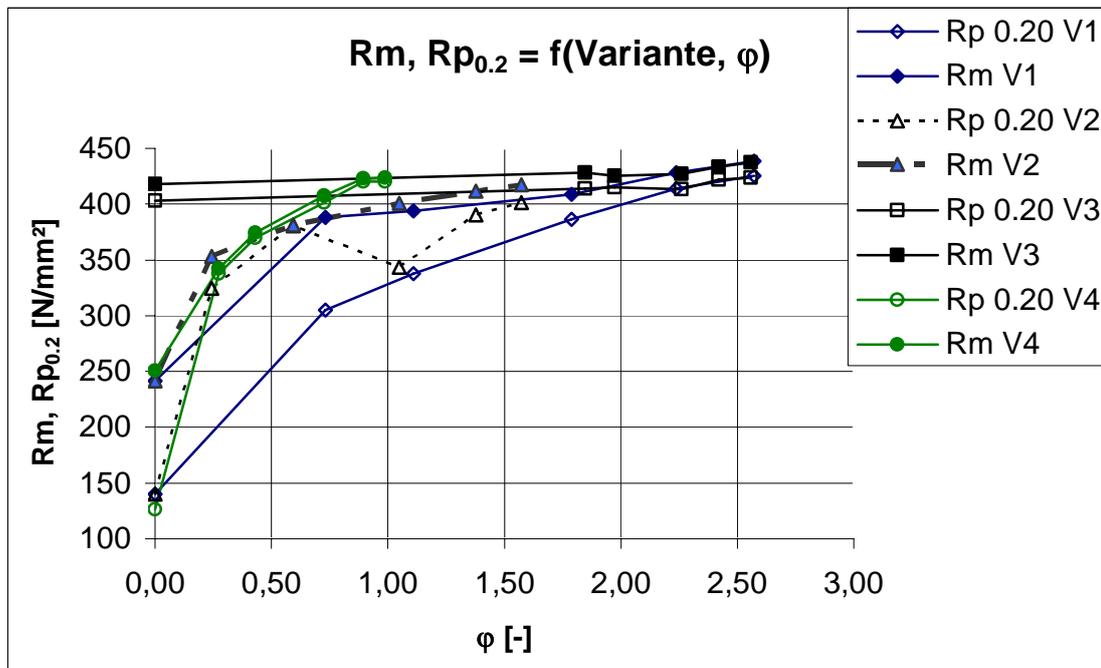
Tabelle 1

mechanische Kennwerte der Drähte aus den einzelnen Stichfolgen

	h/D [mm]	b [mm]	A _{Kern} [mm ²]	A _{Streck} [mm ²]	A _{Breitung} [mm ²]	ε _S [-] (Streckung)	ε _B [-] (Breitung)	ε _{ges} [-] (gesamt)	φ _{ges} [-]	R _{p0.20} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A _{L0=200} [%]
V1	3.80									140.0	241.5	41.5
	1.10	7.61	5.453	5.888	4.191	1.176	1.769	2.080	0.732	305.0	388.0	1.8
	0.87	7.85	6.621	1.750	0.200	1.414	1.030	1.457	1.108	337.5	394.0	0.5
	0.44	8.85	3.454	3.376	0.431	1.756	1.125	1.975	1.789	386.5	408.5	2.5
	0.28	9.03	2.478	1.416	0.042	1.542	1.017	1.568	2.239	414.0	428.0	2.3
	0.20	9.14	1.806	0.722	0.013	1.385	1.007	1.395	2.572	425.5	438.5	2.0
V2	3.80									140.0	241.5	41.5
	1.91	5.37	8.900	2.441	2.310	1.012	1.260	1.274	0.242	324.5	353.0	2.5
	1.47	5.99	7.894	2.363	0.903	1.274	1.114	1.420	0.593	380.5	381.0	1.5
	0.93	6.91	5.571	3.235	0.847	1.371	1.152	1.579	1.050	343.5	401.0	1.3
	0.67	7.21	4.630	1.797	0.192	1.331	1.042	1.386	1.377	390.5	411.5	1.5
	0.55	7.35	3.966	0.865	0.068	1.195	1.017	1.216	1.572	401.5	417.5	2.0
V3	0.54	7.32								403.0	418.0	2.0
	0.41	7.53	3.001	0.952	0.084	1.278	1.028	1.314	1.845	414.0	428.0	2.0
	0.36	7.66	2.711	0.377	0.045	1.120	1.016	1.138	1.975	415.0	425.5	2.0
	0.27	7.72	2.068	0.689	0.014	1.323	1.007	1.332	2.261	413.5	427.0	2.0
	0.23	7.74	1.776	0.309	0.002	1.171	1.001	1.173	2.421	422.0	433.5	3.0
	0.20	7.76	1.548	0.232	0.002	1.147	1.001	1.149	2.559	423.5	437.5	2.5
V4	0.54	7.32								126.5	250.5	38.5
	0.41	7.52	3.001	0.952	0.080	1.280	1.027	1.314	0.273	337.5	342.5	13.5
	0.35	7.68	2.632	0.451	0.054	1.147	1.020	1.171	0.431	370.0	374.5	1.8
	0.26	7.73	1.997	0.691	0.011	1.338	1.005	1.345	0.727	401.5	407.5	3.0
	0.22	7.74	1.701	0.309	0.000	1.181	1.000	1.181	0.893	420.0	423.0	2.0
	0.20	7.76	1.548	0.155	0.002	1.097	1.001	1.099	0.987	420.0	423.5	1.8

Die Festigkeitswerte wurden in Abhängigkeit von der logarithmischen Formänderung in einem Diagramm dargestellt.

Diagramm 1
mechanische Kennwerte der Drähte der einzelnen Stichfolgen

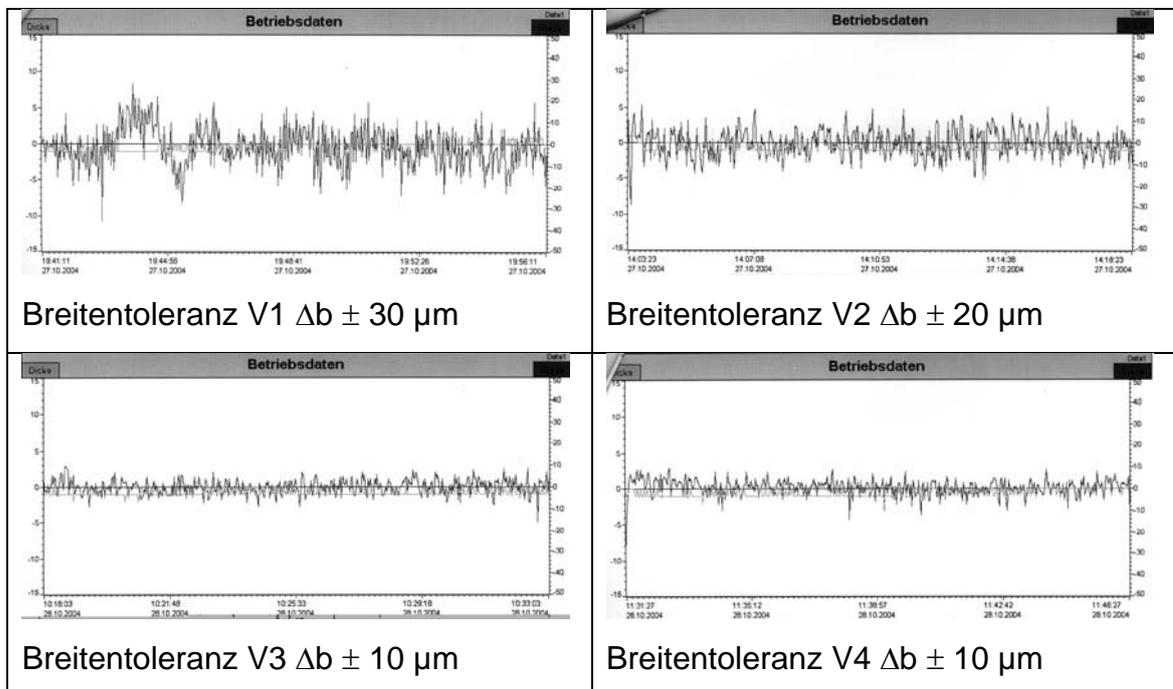


Aus Tabelle 1 und Diagramm 1 lassen sich folgende Ergebnisse ableiten: Egal, ob in 5 Stichen oder in zweimal 5 Stichen ohne und mit Zwischenglühung gewalzt wurde, bei allen Varianten wird etwa die gleiche Endfestigkeit erreicht. Allerdings zeigt sich, dass die Breitung in den ersten Stichen erzielt werden muss, ab einem bestimmten Kantenverhältnis 1:8 ... 1:10 fließt das Material kaum noch in die Breite. Zusätzliche Einflüsse, wie Gegenzüge, Schmierungsbedingungen oder Walzendurchmesser, die auch einen Einfluss auf die Breitung haben, wurden nicht variiert. Auffällig ist, dass bei Variante 1 die Festigkeit und auch die Streckgrenze unter den Werten der anderen Varianten bleiben. Da hier mit sehr hohen Einzelabnahmen gearbeitet wurde, könnte eine Erholung während des Walzens möglich sein.

3.2.2 Toleranzen und Kantenqualität

Ein weiteres Qualitätsmerkmal für die Flachdrähte ist die Kantenqualität. Ebenso muss auf die Breitentoleranz geachtet werden. In den folgenden Bildern werden die grafischen Darstellungen der Breitentoleranz und die erzielte Kantenqualität vorgestellt:

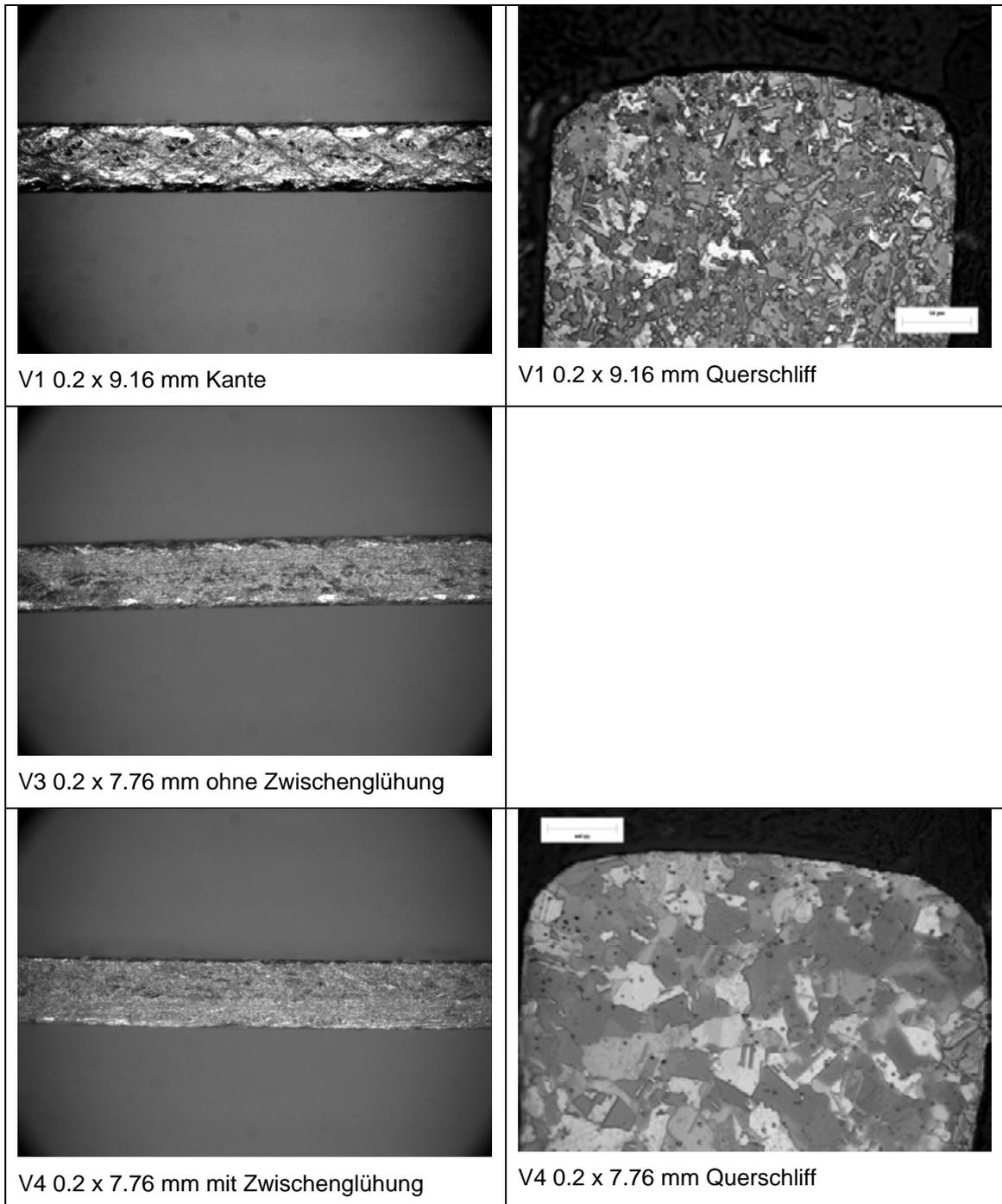
Abbildung 5
Breitentoleranzen



Aus den Bildern ist ersichtlich, dass mit der Aufteilung der Stichfolge auf mehr Stiche die Breitentoleranz wesentlich besser beeinflusst werden kann und auch in deutlich engeren Grenzen gehalten wird.

Ebenso ist der Einfluss der Stichfolge auf die Kantenqualität zu erkennen:

Abbildung 6 Kantenqualität



Auch die Kantenqualität wird durch die höhere Stichzahl positiv beeinflusst. Die Kantenoberfläche ist gleichmäßiger und die Ecken sind sauber abgerundet.

4 Schlussfolgerungen

Aus den Versuchen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Die Aufteilung der Umformung auf Einzelumformschritte von $\varphi \sim 0.2$ (0.15) ... 0.5 (0.55) (Höhenreduktion bis ca. 60%) zeigt deutliche Verbesserungen in
 - der Kantenqualität
 - der Breitentoleranz
 - den mechanische Eigenschaften
- Eine Zwischenglühung verbessert diese Eigenschaften zusätzlich.
- Prinzipiell kann mit dem Modell
 - Walzen auf der Flachbahn gerechnet werden
 - Der erste Stich rund – flach erfordert zusätzliche Betrachtungen, Breitung und Streckung sind getrennt zu erfassen
- Das Vormaterial sollte hinsichtlich der Oberflächenqualität vorselektiert sein, um damit auch die Voraussetzungen für eine optimale Kantenqualität zu verbessern.
- Das Vormaterial wurde inline induktiv-konduktiv geglüht, um wegen der damit verbundenen Feinkörnigkeit gute Voraussetzungen hinsichtlich der Oberflächenqualität zu schaffen.
- Obwohl bei den Varianten V3 / V4 die angestrebte Breite nicht ganz erreicht wurde, zeigen die Versuche, dass sich hinsichtlich Kantenqualität und Breitentoleranz mit diesen Varianten deutlich bessere Ergebnisse erzielen lassen. Wenn diese Varianten für die Endabmessung 0.2 x 9.16 mm realisiert werden sollen, muss der Einlaufdurchmesser geringfügig angehoben werden.

Literatur

- [1] Demny, Walter
Draht-Welt Düsseldorf 57 (1971) Nr. 9; S. 440 – 444

Festvortrag
von
Dr. Ing. E.h. Heinz Dürr

Drei Unternehmerleben:
Eigentümer,
Sanierer bei der AEG,
Vorstand bei der Deutschen Bahn AG

Ausschnitte des Vortrags, gehalten an der Hochschule Pforzheim
im Rahmen des Technik-Forums 2004
und des Studiums Generale
am 24. November 2004

1 Grundsätzliches

Es sind persönliche Erfahrungen, die ich Ihnen heute vortragen werde; eine Übertragung dieser Erfahrungen auf Unternehmensführung ganz allgemein wäre zu weitgehend.

„Unternehmensführung“ für einen Kleinstbetrieb mit beispielsweise 20 Mitarbeitern und „Unternehmensführung“ für ein Großunternehmen wie die AEG oder die Deutsche Bahn, da muss es große Unterschiede geben. Der Typus des Unternehmensführers, sprich des „Unternehmers“, ist und muss in diesen beiden Extremen anders sein. Was für ein Kleinunternehmen gut ist, muss noch lange nicht für ein Großunternehmen gut sein; und umgekehrt. Es gibt allerdings sehr wohl gleichgerichtete Anforderungen, wie wir noch sehen werden.

Ich werde heute über die Führung von Großunternehmen sprechen, wobei ich die Erfahrungen aus der Führung eines mittelständischen Betriebs vor meiner Konzern-Zeit, nämlich der Firma DÜRR, nicht unterschlagen werde. Zumal die DÜRR AG auch heute noch mehrheitlich im Besitz meiner Familie ist und ich den Aufsichtsrat dieses mittelständischen Multis führe.

Vorab: Meine Definition auf die Frage, was ist ein Unternehmen?

Vordringliche Aufgabe jedes Unternehmens ist es, den Markt, also die Gesellschaft, mit Gütern und Dienstleistungen zu versorgen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass einerseits das eingesetzte Kapital verzinst wird (auch wenn heute manche meinen, einziges Kriterium habe der Börsenkurs zu sein), andererseits, dass die Arbeitsplätze in dem Unternehmen möglichst sicher und langfristig angelegt sind. Sowohl die Produktion von Gütern und Dienstleistungen wie die Vermögensbildung der Kapitalgeber als auch die Schaffung, Erhaltung und Sicherung von Arbeitsplätzen sind gesellschaftliche Aufgaben. Ein Unternehmen kann seiner inneren Struktur nach somit als eine gesellschaftliche Veranstaltung angesehen werden.

Der Großteil, wenn nicht alle der in einem Unternehmen Beschäftigten - und natürlich auch der Unternehmer - haben allergrößtes Interesse daran, dass ihre gesellschaftliche Veranstaltung „Unternehmen“ auf Dauer angelegt ist. Ein genauso großes Interesse hat die Gesellschaft als Ganzes an langfristig gut funktionierenden Unternehmen.

Nur dann kann ein Unternehmen dem gerecht werden, was der Bertelsmann-Patriarch Reinhard Mohn so formuliert hat: „Der übergeordnete Auftrag eines Unternehmens ist der Leistungsbeitrag für die Gesellschaft.“

Woran erkennt man nun, ob die gesellschaftliche Veranstaltung Unternehmen funktioniert und erfolgreich ist?

Die Einnahmen müssen größer sein als die Ausgaben; das heißt, es muss Gewinn gemacht werden.

Es ist unsozial, wenn ein Unternehmen keinen Gewinn macht. Denn ohne Gewinn kann langfristig die Existenz des Unternehmens und damit seiner Arbeitsplätze nicht sicher sein.

Es sei denn, das Unternehmen wird von Außenstehenden, von Dritten, subventioniert; das heißt letztendlich vom Steuerzahler finanziert.

Gewinn ist also nicht ausschließlicher Zweck des Unternehmens, sondern eine Messgröße dafür, ob ein Unternehmen funktioniert und ob es richtig geführt wird. Hermann J. Abs, der „Gottvater“ der deutschen Banker, hat das so ausgedrückt: „Die Gewinnerzielung allein ist keine ausreichende Legitimation der wirtschaftlichen Betätigung gegenüber der Gesellschaft.“ Gewinnerzielung wird damit aber auch zum Zwang, dem das Zusammenwirken innerhalb des Unternehmens unterliegt. Um Gewinn zu machen, muss in einem Unternehmen Disziplin herrschen und oberstes Gebot die Sparsamkeit sein.

Eine Bemerkung noch über den unmoralischen Treibsatz jener zu Ende gegangenen Jahre als die Börse zum Casino wurde. Und zwar indem ich den Ökonomen Fredmund Malik zitiere: „Die wirklichen Feinde des Kapitalismus sind seine lautes-

ten Befürworter. Sie beflügelten einen Börsenboom, der nicht auf Wertschöpfung gestützt war, sondern auf Gier, auf Schulden, auf die Angst, die Chance seines Lebens zu verpassen, und auf systematische Fehlinformationen, wie die Zinkereien der Bilanzen von Unternehmen wie Enron und Worldcom jetzt zeigen.“

2 Persönliche Erfahrungen und Erkenntnisse

Nach diesen grundsätzlichen Bemerkungen zu meinen speziellen Erfahrungen.

Zunächst: Es ist ein großer Unterschied, ob ich ein Unternehmen zu führen habe, das am Anfang seiner Geschichte steht, das ich womöglich selbst gegründet habe, das sich im Aufbau befindet und neue Produkte herausbringt. Oder ob ich für die Führung eines Unternehmens verantwortlich bin, das seit 100 Jahren besteht, eine lange innere Tradition hat und nun mit erheblichen Strukturveränderungen zu kämpfen hat.

Es ist ein großer Unterschied, ob ein Unternehmen in neue, gerade entstehende Märkte hineingeht oder ob sich ein Unternehmen an geänderte oder sich ändernde Märkte - meist sind das auch schrumpfende Märkte - anpassen muss.

Schumpeter unterscheidet zwei Typen von Unternehmern, von denen eigentlich nur der erste zu großer Bekanntheit gelangt ist: Dieser Typ 1 ist der Unternehmer des Aufbaus, der Innovation, des Wagemuts. Er setzt ständig „neue Kombinationen“ von Produktionsmitteln durch und hält damit eine dynamische Wirtschaft in Schwung. Er ist das Stimulans der wirtschaftlichen Entwicklung, die „Hefe im Teig“, er setzt den Prozess der „schöpferischen Zerstörung“ in Gang.

Dieser Unternehmertypus ist der typische Unternehmer des Klein- und Mittelbetriebs, der vorwärts drängt, innovativ, risikobewußt zu neuen Ufern strebt. Dieser Unternehmer, oft „schumpetersche“ genannt, genießt allenthalben Ansehen. Er wird von vielen, vor allem Politikern, gefordert und macht er Fehler, so merkt man es meist erst sehr spät. Und wenn man sie entdeckt, dann ist man eher geneigt, ihm diese Fehler nachzusehen. Das sei eben Berufsrisiko.

Daneben setzt Schumpeter den Unternehmer-Typ 2, den „statischen“, bewahrenden Unternehmer. Dieser Typus kann mehr als der „Betriebsleiter“ gesehen werden, der vor allem bestehende Strukturen optimiert. In meinen Funktionen bei der AEG und der Deutschen Bahn hatte ich mehr mit Anpassungen und grundlegenden Strukturveränderungen zu tun, kann mich also als diesen Unternehmertyp sehen. Es ist selbstverständlich, dass dabei wachsende Märkte nicht aus dem Auge zu verlieren sind.

Eine hoch entwickelte Industriegesellschaft wie die unsrige braucht beide Unternehmertypen, den erhaltenden wie den, der Neues schafft. Und in vielen Fällen, besonders in Unternehmen, die viele Jahre bestehen, müssen die Unternehmensführer die Fähigkeit haben, beiden Zielsetzungen gerecht zu werden.

In diesem Zusammenhang eine grundsätzliche Anmerkung: Die Marktwirtschaft ist unter allen bekannten Wirtschaftsformen die Beste, aber auch sie ist unvollkommen. Denn die „unsichtbare Hand“ des Marktes regelt eben nicht alles. Der Markt sagt uns Unternehmern nicht wie wir handeln müssen, sondern er sagt uns nur hinterher ob wir richtig gehandelt haben. Er verhindert keine Fehler, sondern bestraft sie im Irrtumsfall. Diese Strafe trifft dann auch diejenigen Beteiligten, die auf die falsche Entscheidung keinen oder wenig Einfluss hatten. Die Marktwirtschaft braucht klare Spielregeln und funktionierende Kontroll- und Sanktionsmechanismen. Die Bundesrepublik hat sich in ihren Gründerjahren für die soziale Marktwirtschaft entschieden. Bei allem dringenden Reformbedarf sollten wir den Kern dieses erfolgreichen Modells erhalten; zumal wir feststellen, dass manche der hochgelobten amerikanischen Regeln wesentlich weniger gut sind.

Und lassen Sie mich hinzufügen: Ich habe im Laufe meines Berufslebens die Erfahrung gemacht, dass eigentümergeleitete Unternehmen über einen längeren Zeitraum oftmals erfolgreicher sind als solche in einem breit gestreuten Aktionärsbesitz. Die Erklärung ist relativ einfach: Die eigentümergeleiteten Unternehmen sind im Regelfall auf langfristige Wertsteigerung ausgerichtet und können entsprechend geführt werden; sie müssen nicht jeden Börsen-Hyp mitmachen.

Man könnte auch sagen: Unternehmen mit derartigen Besitzverhältnissen können sich eine Erfolg versprechende bodenständige Unternehmensstrategie leisten. Es entwickelt sich eine Unternehmenskultur des gegenseitigen Vertrauens zwischen Mitarbeitern und Management; die Mitarbeiter haben nicht einfach einen Arbeitsplatz, sondern sie arbeiten bei „ihrem“ Unternehmen.

Bei allen Erklärungsansätzen geht es auch um die Frage: Was macht erfolgreiche Unternehmen, also solche, bei denen die Einnahmen größer sind als die Ausgaben, eigentlich erfolgreich? Ist es etwa die jeweils herrschende Managementphilosophie? Ich halte diese Diskussionen über Managementphilosophien eher für akademisch. Ertragreicher ist es, wenn man in der Praxis nachschaut was bestimmte Unternehmen anders bzw. besser machen.

In dem mittlerweile berühmt gewordenen Buch „Auf der Suche nach Spitzenleistungen“ („In search of excellence“) werden acht Merkmale herausgefiltert, die bei allen erfolgreichen Unternehmen gleichermaßen festgestellt wurden. Ich sehe dies mehr oder weniger auch so und möchte deshalb etwas näher darauf eingehen.

Da ist zum ersten das Primat des Handelns; gekennzeichnet durch Schlagworte wie „Probieren geht über studieren“ oder „Das Wichtigste ist, es zu versuchen“. Es muss ad hoc auf die Veränderungen des Marktes reagiert werden.

Zum zweiten gilt die Nähe zum Kunden. Es muss sich eine Service- und Qualitätsbesessenheit bilden, die der Einstellung „Der Kunde ist König“ Inhalt gibt. Nicht alles, was ein hochrangiger Spezialist entwickelt, wird auch vom Kunden gewünscht.

Hier muss man auch mal wieder nicht wenigen der jung-dynamischen Analysten die Prioritäten klar machen: Ein Unternehmen muss die Kunden zufrieden stellen, nicht die Aktionäre. Denn nur ein Unternehmen mit zufriedenen Kunden kann auch zufriedene Aktionäre haben.

Zum dritten soll es bei einem Unternehmen einen Freiraum für Unternehmertum geben. Denn mehr „Treffer“ lassen sich nur dann erzielen, wenn auch mehr Ver-

suche gemacht werden. Die informelle Kommunikation im Unternehmen muß gestärkt werden.

Ein vierter Punkt liegt in der Beachtung des Humankapitals, der Einbeziehung der betroffenen Menschen in die Entscheidungen.

Damit zusammen hängt fünftens ein sichtbar gelebtes Wertesystem. Eine sichtbare Führung muss deutlich machen, dass die Dinge, die gesagt werden, auch in die Tat umgesetzt werden.

Das sechste Merkmal ist die Bindung an das angestammte Geschäft: „Schuster bleib bei Deinen Leisten“. Das Wachstum der Spitzenunternehmen ist fast vollständig hausgemacht.

Das siebte Kriterium ist ein einfacher, flexibler Aufbau, der sich in einer einfachen Organisation mit wenig Stäben niederschlägt.

Das achte und letzte Merkmal liegt in einer straffen, aber zugleich lockeren Führung. Man könnte das in dem Satz zusammenfassen: „Soviel Führung wie nötig, so wenig Kontrolle wie möglich.“

Meine Erkenntnis: Es gibt keine allgemein gültigen Rezepte, mit denen man kurzfristige Erfolge erzielen könnte. Wichtig ist, dass das Soziosystem des Unternehmens beachtet wird („people-oriented“). Die „weichen“ Faktoren, das Humankapital, also die Menschen, Stil der Führung, treten gegenüber den „harten“ Faktoren, wie Strategie, Struktur und Organisation in den Vordergrund.

3 Moralischer und ethischer Handlungsrahmen

Die Forderung nach Moral bei der Unternehmensführung, und ich meine hier die Forderung von außen, geht besonders an die Unternehmensleiter, die anpassen müssen. Denn der erhaltende, anpassende Unternehmer muss eben auch Werke schließen, Arbeitsgebiete aufgeben, Belegschaften reduzieren. Er ist es, der in die Schlagzeilen gerät, in dem man oft den „bösen“ Unternehmer sieht. In einer hoch entwickelten Industriegesellschaft mit reifen Märkten ist dieser Unternehmer aber für die Erhaltung des Gesellschaftssystems und seiner Lebensqualität von zumindest gleich großer Bedeutung wie der innovative.

Dies gilt umso mehr, weil wir als Unternehmer heute in einem Umfeld tätig sind, das sich derart radikal verändert wie kaum zuvor seit Beginn der Industrialisierung.

Lassen Sie mich für diese veränderte Umwelt, aber auch einer für die Entwicklung völlig unterschiedlicher und neuer Denkweisen zwei Beispiele nennen: Erstens die Bedeutung der Größe - Größe an sich, physische Größe, ist kein vorrangiges, gesellschaftlich erstrebenswertes Ziel mehr.

Sie stellen heute fest, dass nicht mehr die Firmen am angesehensten sind, die die größten Fabriken haben, sondern die am meisten Leistung und Wissen auf möglichst kleiner Fläche unterbringen. Betrachten wir die gewaltige Verdichtung von Information auf kleinster Fläche, stellen wir fest, Größe wird heute durch den Einsatz von Geist erreicht. Schlagwortartig: Geist schlägt Material!

Zweitens - ganz aktuell - die Bedeutung der Energie. Bis vor einigen Jahren galt die Überzeugung, dass die Probleme der Industriegesellschaft durch einen stetig steigenden Einsatz von Energie gelöst werden könnten. Heute suchen wir nach immer neuen Wegen zu einem rationelleren Umgang mit Energie. Die rein quantitative Betrachtungsweise wurde durch eine qualitative ersetzt.

Derartige Änderungen des gesellschaftlichen Umfelds haben natürlich auch Auswirkungen auf das, was in einem Unternehmen zu tun ist. Die Unternehmensführung muss diese Änderungen „merken, sie kann nicht einfach von Prognosen ableiten („Merken ist wichtiger als ableiten“). Und wenn die Unternehmensführung

merkt, dass sich der Markt, die Technologie und das gesellschaftliche, politische Umfeld ändern, dann muss gehandelt werden. Auch wenn schmerzliche Einschnitte zu machen sind, wobei diese möglichst früh zu setzen sind, um den Anpassungsprozeß möglichst gleitend zu gestalten. Die Moral bzw. die sittliche Verpflichtung der Unternehmensführung liegt darin, die notwendigen Anpassungen im Interesse des Gesamtunternehmens durchzuführen. In diesem Sinne wäre es unmoralisch, schmerzliche Anpassungen zu unterlassen, selbst wenn kurzfristig damit dem Einzelnen geholfen wäre.

In solchen Fällen kommt dann immer wieder die Diskussion um High-Tech und Low-Tech auf. Erstens ist alle High-Tech von heute die Low-Tech von morgen; und zweitens: Eine Volkswirtschaft kann nicht nur von Hochtechnologie leben. Sie ist genauso auf die Produktion und den Absatz von traditionellen Erzeugnissen angewiesen. Erst eine gesunde Mischung aus beiden sichert die notwendige Rentabilität und damit Beschäftigung.

Was soll ein Unternehmer tun, der in seinem Unternehmen Strukturen verändern muss, der anpassen muss? Er muss seine Entscheidungen immer zunächst im Interesse seines Unternehmens prüfen, abwägen und treffen. Und diese dann konsequent umsetzen. Ein allzu intensives Hinhören auf das, was die Öffentlichkeit sagt, kann hier nur ablenken.

Deshalb halte ich auch nicht besonders viel von denen, die von Unternehmern Visionen verlangen. Denn die werden in Meyers Großem Standard-Lexikon als „Halluzination aus dem optischen Sinnesbereich“ definiert.

Oder um mit Karl Popper zu sprechen: „Statt als Propheten zu posieren, müssen wir zu den Schöpfern unseres Geschicks werden. Wir müssen lernen, unsere Aufgabe zu erfüllen so gut wir nur können und wir müssen auch lernen, unsere Fehler aufzuspüren und einzusehen.“

Unternehmensführung ist als menschlicher Erkenntnisprozeß eine ständige Abfolge von Versuch und Irrtum.

Und die Moral dabei ist: Es immer wieder zu versuchen.

Das Unternehmerische: Möglichst wenig zu irren.