

ISSN 0073-8433

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION
TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN
NATURWISSENSCHAFTEN

SERIE 5 · NUMMER 2 · 1979

FILM C 1247

Zerspanen metallischer Werkstoffe
Aufbauschneidenbildung
Schnittvorgang im Feingefüge



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

Angaben zum Film:

Tonfilm (Komm. deutsch od. engl.), 16 mm, schwarzweiß, 115 m, 10¹/₂ min (24 B/s). Hergestellt 1968–1972 und 1976, veröffentlicht 1977.

Der Film ist für die Verwendung im Hochschulunterricht bestimmt. Veröffentlichung aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Hannover, Dr.-Ing. G. WARNECKE, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL; Kamera: G. HUMMEL, J. THIENEL, J. WEISS und E. FRIXE; Schnitt: G. HUMMEL.

Zitierform:

WARNECKE, G., und G. HUMMEL (IWF): Zerspanen metallischer Werkstoffe – Aufbauschneidenbildung – Schnittvorgang im Feingefüge. Film C 1247 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von G. WARNECKE und G. HUMMEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 5, Nr. 2/C 1247 (1979), 26 S.

Anschrift der Verfasser der Publikation:

Dr.-Ing. G. WARNECKE, Sieversdamm 27, D-3004 Isernhagen 2.
Ing. G. HUMMEL (IWF), Nonnenstieg 72, D-3400 Göttingen.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftlichen Ergänzungen zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus mehreren Lieferungen.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen
Tel. (05 51) 2 10 34

FILME FÜR FORSCHUNG UND HOCHSCHULUNTERRICHT

GÜNTER WARNECKE, Hannover, und GÜNTER HUMMEL (IWF), Göttingen:

Film C 1247

Zerspanen metallischer Werkstoffe – Aufbauschneidenbildung – Schnittvorgang im Feingefüge

Verfasser der Publikation: GÜNTER WARNECKE, Hannover, und GÜNTER HUMMEL,
Göttingen

Mit 10 Abbildungen

Inhalt des Films:

Zerspanen metallischer Werkstoffe – Aufbauschneidenbildung – Schnittvorgang im Feingefüge. Mit Hilfe einer besonderen Versuchsmethode, bei der der Zerspanvorgang als Orthogonalschnitt an einer Glasplatte abläuft, ist es möglich, die Vorgänge der Spanentstehung, wie sie sich im Innern des Werkstoffgefüges und an den Werkzeugkontaktzonen abspielen, der direkten Beobachtung zugänglich zu machen. Mikrokinematografische Aufnahmen zeigen das Eindringen eines Schneidkeils in die Randschicht des polierten und geätzten Werkstückgefüges. Infolge der Reibung in den Werkzeugkontaktzonen und der Kaltverfestigung des Werkstückstoffs in den sekundären Scherzonen bilden sich im Schneidkantenbereich und auf der Spanfläche Werkstoffanlagerungen, die sich zu einer Aufbauschneide formen. Die Form, Größe und Stabilität der Aufbauschneide sind dabei das Ergebnis einer Wechselwirkung ihres Festigkeitsverhaltens und der Belastung durch den Zerspanvorgang. Die Schnittbedingungen, insbesondere die Schnittgeschwindigkeit, lösen einen komplizierten Einflußmechanismus aus und wirken so auf den Bildungsvorgang. Diese Zusammenhänge sind beispielhaft beim Zerspanen verschiedener Werkstoffe mit veränderten Schnittbedingungen in diesem für den Unterricht konzipierten Film dargestellt.

Summary of the Film:

Metal Cutting – Built-up Edge Formation – Cutting in Microstructure. With the aid of a special experimental method designed to allow the cutting process to proceed as an orthogonal cut along a glass plate, it is possible to render accessible to direct observation the process of chip formation as it occurs within the structure of the material and in the tool contact zones. Microcinematographic shots show penetration of a cutting wedge into the marginal layer of the polished and etched material structure. As a result of the friction generated in the tool contact zones, and of the strain-hardening of the workpiece material in the secondary shearing zones, material builds up in the region of the cutting edge and on the rake face forming what is termed a “built-up edge”. The shape, size and strength of the built-up cutting edge are the result of the interaction between its strength

characteristics and the stresses and strains caused by the cutting process. The cutting conditions, particularly the cutting speed, trigger off a complicated mechanism which affects the process of formation. These interrelationships are shown in this film – which was conceived for instructional purposes – by way of example in the cutting of different materials using varied cutting conditions.

Résumé du Film:

Enlèvement de copeaux sur des matériaux métalliques – Formation d'arêtes constitutives – Découpe dans la microstructure. Il est possible, à l'aide d'une méthode expérimentale particulière, dans laquelle le processus d'enlèvement de copeaux se déroule comme une coupe orthogonale sur une plaque de verre, de rendre accessibles à l'observation directe les phénomènes de formation de copeaux tels qu'ils se produisent à l'intérieur de la structure du matériau et dans les zones de contact avec l'outil. Des prises de vues microcinématographiques montrent la pénétration d'un coin coupant dans la couche superficielle de la structure polie et corrodée de la pièce d'usinage. Par suite du frottement dans les zones de contact avec l'outil et du durcissement par écrouissage du matériau de la pièce dans les zones de cisaillement secondaires, il se forme, dans le domaine des arêtes coupantes et sur la surface de coupe, des incrustations de matériau qui forment entre elles une arête constitutive. La forme, la taille et la stabilité de l'arête constitutive sont le résultat d'une interaction de leur comportement de solidité et de la charge due à l'enlèvement de copeaux. Les conditions de coupe, notamment la vitesse de coupe, déclenchent un mécanisme influent complexe et agissent ainsi sur le phénomène de formation. Ces rapports sont représentés exemplairement dans ce film conçu pour l'enseignement, lors de l'enlèvement de copeaux dans divers matériaux, avec des conditions de coupe variées.

Allgemeine Vorbemerkungen

Bewertungskriterien des Zerspanvorgangs

Der Zerspanvorgang bzw. die Zerspanbarkeit werden zweckmäßigerweise nach folgenden Kriterien bewertet und beurteilt: Energie, Standzeit, Arbeitsergebnis, Spanbildung. Die Spanbildung umfaßt dabei sowohl die makrogeometrische Spanformung als auch den grundlegenden Vorgang mikrogeometrischer Spanentstehung mit der Verformung und Trennung des Werkstoffgefüges. Damit in unmittelbarem Zusammenhang stehen die verschiedenen Erscheinungsformen des Zerspanvorgangs, die Spanarten bzw. Spanentstehungsformen sowie die Aufbauschneidenbildung, die den Zerspanvorgang und die Zerspanbarkeit in vielfältiger Weise beeinflussen.

Spanbildung bei metallischen Werkstoffen

Beim Zerspanvorgang dringt ein in seiner Geometrie definierter Schneidkeil infolge der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück in die Randschicht des Werkstücks ein und verdrängt den in Schnittrichtung vor ihm liegenden Werkstoff. Dabei wird der Werkstoff gestaucht und geht durch Scherung in den Span über. Bei diesem Vorgang sind das Werkzeug und das Werkstück in bestimmten Zonen höchsten Belastungen ausgesetzt.

Abb. 1 zeigt eine Einteilung dieser an der Spanentstehung beteiligten Werkstoffbereiche in fünf Wirkzonen. Zone 1 kennzeichnet die unmittelbare Spanentstehungszone. Sie wird als primäre Scherzone bezeichnet und erstreckt sich von der Schneidkante zum Übergang vom Werkstück zum Span an der freien Oberfläche. Zone 5 ist die sog. Verformungsvorlaufzone, in der der Spanentstehungsvorgang plastische und elastische Verformungen des Werkstoffgefüges hervorruft. Diese Verformungen verursachen einen Restspannungszustand im Werkstück. Die sekundären Scherzonen, 2 auf der Spanfläche, 3 im Bereich der Schneidkante und 4 an

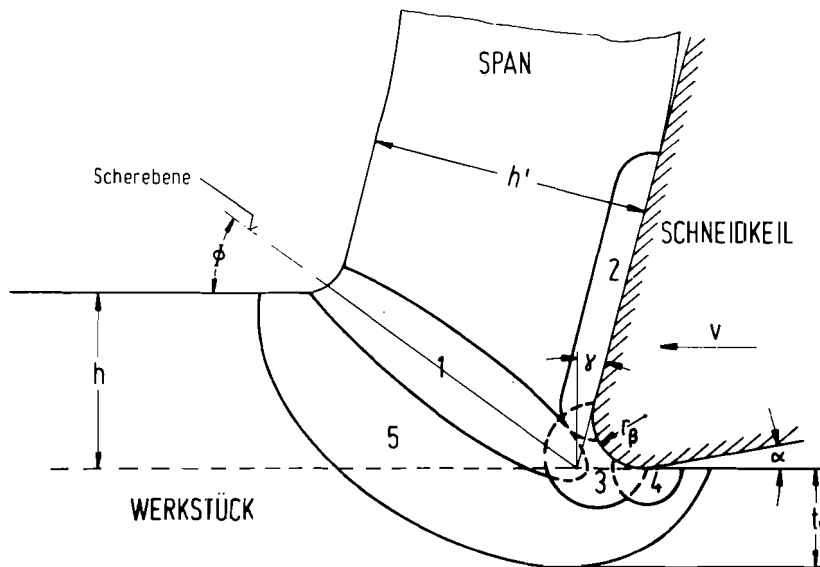


Abb. 1. Wirkzonen bei der Spanentstehung

der Freifläche, entstehen durch Reibung an den Werkzeugkontaktflächen. Die dort wirkenden Reibkräfte versuchen, die Werkstoffschichten in der Spanunterseite und an der Schnittfläche des Werkstücks zurückzuhalten, so daß dort infolge der hohen Spannungen der Werkstoff zu fließen beginnt. In der Schneidkantenzone 3 erfolgt die eigentliche Werkstofftrennung zwischen Werkstück und Span. Diese Zone stellt auf Grund der Geometrie des Schneidkantenbereichs, insbesondere bei abgerundeter Schneide, eine Stauzone dar, die den Keim für Aufbauschneiden bildet.

In diesen fünf Wirkzonen spielen sich verschiedene physikalische und chemische Vorgänge ab. Infolge des Verformungs- und Trennvorgangs bei der Spanentstehung sowie der sich daraus ergebenden thermischen Einflüsse muß mit Gefügeveränderungen und Verfestigungen im zerspannten Werkstoff, mit Reibungsvorgängen, Verschweißungen, Adhäsions- und Diffusionsvorgängen sowie chemischen Reaktionen in den Grenzschichten und Berührungspunkten zwischen Werkstück- und Schneidstoff gerechnet werden.

Spanarten

Bei der Spanentstehung wird der Werkstoff auf der Spanfläche gestaucht und gleitet unter Scherung in der Scherzone über die Spanfläche ab. Ausgehend von der Wechselwirkung des Gleitgeschehens in der Scherzone und auf der Spanfläche, abhängig vom Werkstückstoff, von der Art der Beanspruchung durch den Schneidkeil und von einer Vielzahl von Einflußgrößen erzeugt der Zerspanvorgang eine Vielfalt

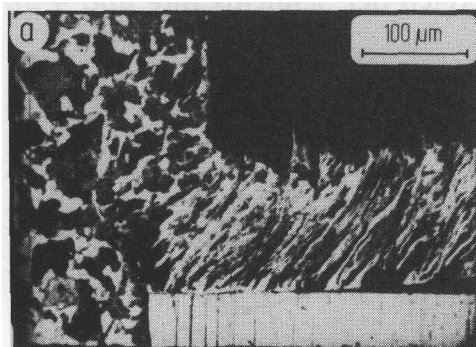


Abb. 2. Spanarten. a: Fließspan;
b: Scherspan; c: Reißspan

von Spanentstehungsformen bzw. Spanarten, die üblicherweise in die drei Gruppen der Fließspäne, der Scherspäne und der Reißspäne eingeteilt werden. In Abb. 2 ist je ein Beispiel für diese drei Spanarten dargestellt. Fließspäne entstehen durch überwiegend plastische Scherverformung ohne Rißbildung in der primären Scherzone; Scherspäne entstehen durch plastische Verformung bis zum Werkstoffversagen mit anschließender Rißbildung, so daß sich Späne aus mehr oder weniger zusammenhängenden einzelnen Spänelementen bilden; Reißspäne entstehen ohne nennenswerte plastische Verformung durch Herausreißen regelloser Spanstücke.

Fließ- und Scherspäne entstehen bei der Zerspanung duktiler, d.h. plastisch verformbarer Werkstoffe, z.B. Stahl, während Reißspäne bei spröden Werkstoffen, z.B. Gußeisen, entstehen. Eine klare Abgrenzung zwischen diesen drei Spanarten ist nicht möglich, da die Übergänge fließend sind.

Aufbauschneidenbildung

Einer der bemerkenswertesten Vorgänge bei der Spanentstehung ist die Aufbauschneidenbildung. Dabei setzt sich Werkstückstoff im Schneidkantenbereich fest und bildet auf dem Werkzeugschneidkeil einen zusätzlichen kleinen Schneidkeil,

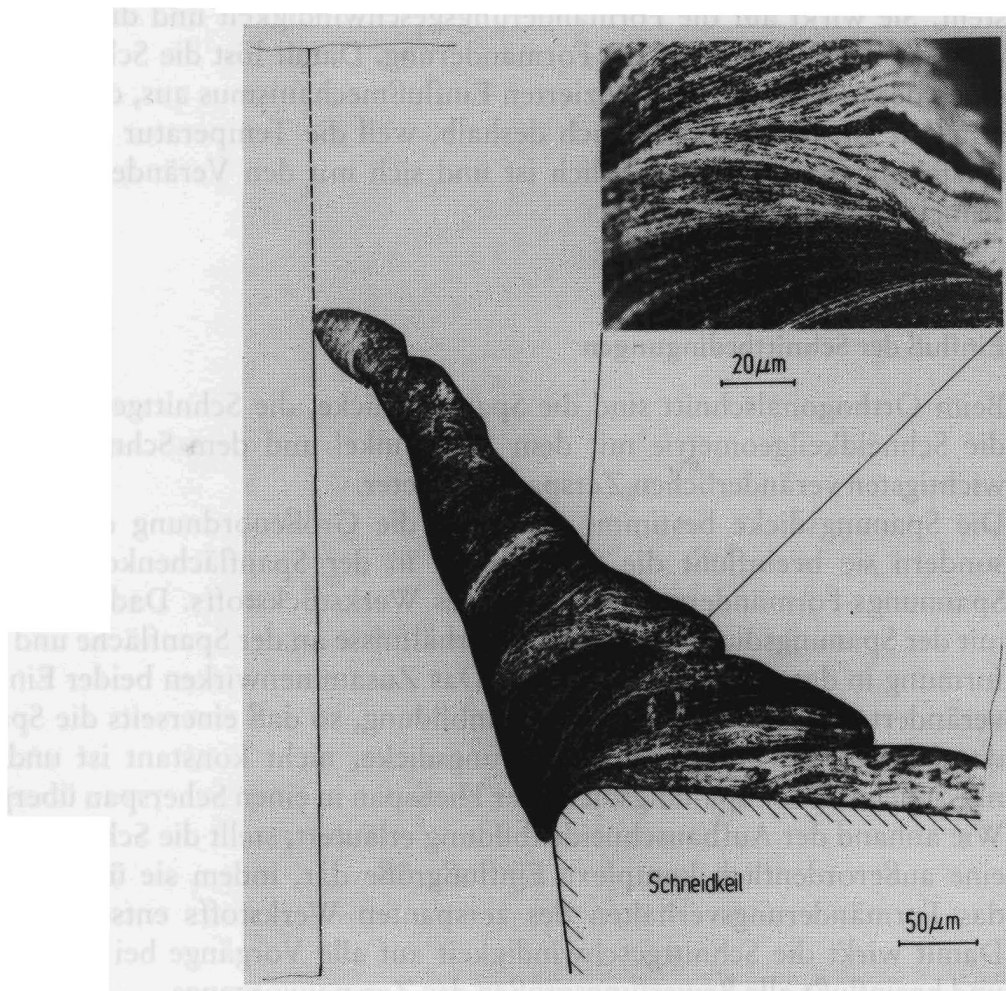


Abb. 3. Form und Struktur einer Aufbauschneide

der die Funktion der Werkzeugschneide übernimmt. Durch die Aufbauschneide wird die Schneidkeilgeometrie grundlegend verändert, so daß bei ständig wechselnden Bildungsformen der gesamte Zerspanvorgang beeinflusst wird (Abb. 3).

Der Entstehungsmechanismus der Aufbauschneide beruht auf der Verklebung und Verschweißung von Schneidstoff und Werkstückstoff sowie auf der Neigung zur Kaltverfestigung des zerspannten Werkstoffes als der entscheidenden Grundvoraus-

setzung. Das Wachsen der Aufbauschneide bis zu einer bestimmten Größe hängt dabei vor allem von der Wechselwirkung zwischen dem Festigkeitsverhalten des Werkstückstoffes und der Belastung der Aufbauschneide durch den Zerspanvorgang ab.

Das Festigkeitsverhalten wird im wesentlichen vom Einfluß der Formänderung, der Temperatur und der Formänderungsgeschwindigkeit bestimmt. Während bei zunehmender Formänderung und Formänderungsgeschwindigkeit die Festigkeit ebenfalls zunimmt, weist sie bei steigender Temperatur unter Ausnahme des Blauwärmebereichs eine im allgemeinen fallende Tendenz auf. Der Einfluß dieser drei Parameter wird über die Veränderung der einzelnen Zerspanbedingungen angesprochen, wobei die Schnittgeschwindigkeit die beherrschende Einflußgröße darstellt. Sie wirkt auf die Formänderungsgeschwindigkeit und die Temperatur sowie über die Temperatur auf die Formänderung. Damit löst die Schnittgeschwindigkeit einen derart vielfältig komplizierten Einflußmechanismus aus, der quantitativ kaum erfaßbar ist, insbesondere auch deshalb, weil die Temperatur innerhalb der Spanentstehungszone unterschiedlich ist und sich mit den Veränderungen der Aufbauschneide ebenfalls ändert.

Einfluß der Schnittbedingungen

Beim Orthogonalschnitt sind die Spanungsdicke, die Schnittgeschwindigkeit sowie die Schneidkeilgeometrie mit dem Spanwinkel und dem Schneidkantenradius die wichtigsten veränderlichen Zerspanparameter.

Die Spanungsdicke bestimmt nicht nur die Größenordnung der Spanentstehung, sondern sie beeinflusst die Spannungen in der Spanflächenkontaktzone und das Spannungs-Formänderungsverhalten des Werkstückstoffes. Dadurch verändern sich mit der Spanungsdicke die Reibungsverhältnisse an der Spanfläche und die Scherverformung in der primären Scherzone. Das Zusammenwirken beider Einflußvorgänge verändert die Charakteristik der Spanbildung, so daß einerseits die Spanstauchung, das Verhältnis von Span- zu Spanungsdicke, nicht konstant ist und andererseits mit zunehmender Spanungsdicke der Fließspan in einen Scherspan übergehen kann.

Wie anhand der Aufbauschneidenbildung erläutert, stellt die Schnittgeschwindigkeit eine außerordentlich komplexe Einflußgröße dar, indem sie über die Temperatur das Formänderungsverhalten des zerspannten Werkstoffs entscheidend verändert. Damit wirkt die Schnittgeschwindigkeit auf alle Vorgänge bei der Spanentstehung und beeinflusst alle Bewertungsgrößen des Zerspanvorgangs.

Spanwinkel und Schneidkantenradius bestimmen die Schneidkeilgeometrie, die insbesondere den Grad der Werkstoffverformung und die Werkzeugbeanspruchung beeinflusst. Während an der scharfen Schneidkante der Werkstoff bei der Trennung des Spans vom Werkstück abgesichert wird, bewirkt die abgerundete Schneide eine intensive sekundäre Scherung, die im Punkt der Trennung in Schnitt- und Spanablaufriechung auseinanderfließt. Die extreme Werkstoffverformung im Schneidkantenbereich führt zu entsprechender Verfestigung und begünstigt damit die Aufbauschneidenbildung.

Zur Entstehung des Films

Untersuchung der Spanbildung

Für die Deutung ursächlicher Zusammenhänge beim Zerspanvorgang ist die Untersuchung der verschiedenen Erscheinungsformen der Spanbildung von großer Bedeutung.

Ordnet man den vier Bewertungskriterien des Zerspanvorgangs charakteristische Untersuchungsmethoden zu – für die Energie z.B. die Schnittkraftmessung, für die Standzeit die Verschleißmessung und für das Arbeitsergebnis die Oberflächenmessung –, dann sind es für die Spanbildung visuelle Untersuchungsmethoden, die ein anschauliches Bild vom Zerspanvorgang ermöglichen. Die verschiedenen Verfahren zur bildlichen Erfassung der Spanbildung lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen:

- a) die statischen Verfahren durch Festhalten eines Moments der Spanentstehung mit Hilfe fotografischer Methoden und
- b) die kinematischen Verfahren durch kontinuierliches Aufzeichnen mit Hilfe kinematografischer Methoden.

Bei den statischen Verfahren spielen Vorrichtungen zur schnellen Schnittunterbrechung eine große Rolle. Bei den kinematischen Verfahren kommt es darauf an, den Zerspanvorgang so zu gestalten, daß die zu beobachtenden Bereiche für eine Filmkamera zugänglich sind.

Die Untersuchung der Mikrogeometrie der Spanentstehung zielt insbesondere auf die Darstellung der Vorgänge im Innern des Werkstoffgefüges und in den Werkzeugkontaktzonen. Hierfür sind bei mikrokinematografischen Zerspanuntersuchungen, d.h. Untersuchungen im Mikrobereich der Werkstoffe mit Hilfe von Filmaufnahmen, ganz besondere versuchstechnische Maßnahmen notwendig, die durch folgende einschränkende Bedingungen bestimmt werden:

1. die zweidimensionale Betrachtungsweise der Spanentstehung,
2. die Beobachtung von Oberflächenbereichen,
3. die begrenzte Schärfentiefe bei mikroskopischer Beobachtung und
4. die Möglichkeiten der Aufnahmetechnik unter besonderer Berücksichtigung
 - a. der Aufnahmefrequenz und
 - b. der Beleuchtung.

In Verbindung mit der Forderung, den Zerspanvorgang so darzustellen, daß die der Beobachtung zugänglichen Bereiche mit den Vorgängen im Innern der Spanwurzel vergleichbar sind, wurde eine Versuchsmethode entwickelt, bei der der Zerspanvorgang entlang einer Glasplatte abläuft und durch diese mit Hilfe eines Mikroskops beobachtet und gefilmt wird. Dabei soll die Glasplatte einerseits die Spanwurzelbreitung verhindern und andererseits die für die mikroskopische Beobachtung notwendige definierte Ebene herstellen. Diese Methode wurde erstmals von ISAJEV und GORBUNOVA [1] angewendet und von WIEBACH und HUMMEL [4] weiterentwickelt.

Versuchstechnik¹

Auf der Grundlage dieser Versuchsmethode wurde die in Abb. 4 dargestellte Spezial-Drehmaschine für mikrokinematografische Zerspanuntersuchungen entwickelt und gebaut. Der Antrieb erfolgt von einem stufenlos verstellbaren HEYNAU-Trieb über das sechsstufige Hauptgetriebe und die lange Hauptspindel auf den Zerspankopf. Die Vorschubbewegung wird hinter dem Hauptgetriebe abgezweigt und über das Vorschubgetriebe auf den Vorschubschlitten geleitet. Diese Versuchsmaschine ermöglicht Schnittgeschwindigkeiten von 0,005 bis 100 m/min und Vorschübe von 2 bis 125 $\mu\text{m}/\text{U}$.

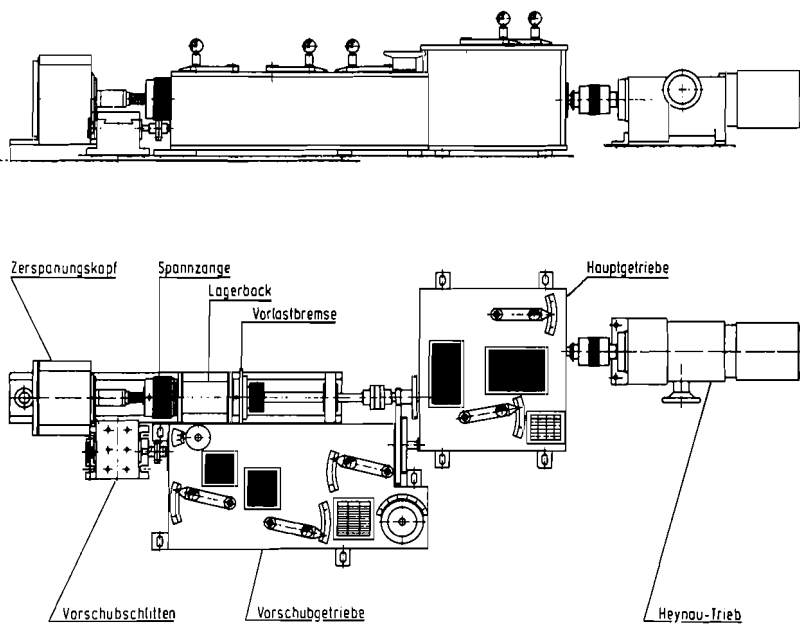


Abb. 4. Spezial-Drehmaschine; Anordnung der Baugruppen

Der Zerspanvorgang ist dabei so gestaltet, daß ein Werkzeug eine scheibenförmige, polierte und geätzte Werkstückprobe, die mit einer Quarzglasplatte verspannt ist und umläuft, radial einsticht. Die Einheit Werkstück/Quarzglasplatte ist in dem in Abb. 5 dargestellten Zerspankopf so gelagert, daß ein Ringfenster entsteht, durch das die Beobachtung der Spanentstehung mit einem Mikroskop möglich ist (Abb. 6).

¹ Bei der Lösung der schwierigen versuchstechnischen Probleme, insbesondere bei der Entwicklung der Aufnahme- und Beleuchtungstechnik für die mikrokinematografischen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, sowie bei der Versuchsdurchführung haben sich Herr E. FRIXE und Herr J. THIENEL vom Institut für den Wissenschaftlichen Film in Göttingen (IWF) große Verdienste erworben.

Taunel- und Rundlauffehler sind kleiner als die Schärfentiefe mit etwa $10\ \mu\text{m}$ bei einem Bildfeld von $0,4 \times 0,3\ \text{mm}^2$. Das Werkzeug sitzt auf dem Vorschubschlitten und gleitet an der Quarzglasplatte.

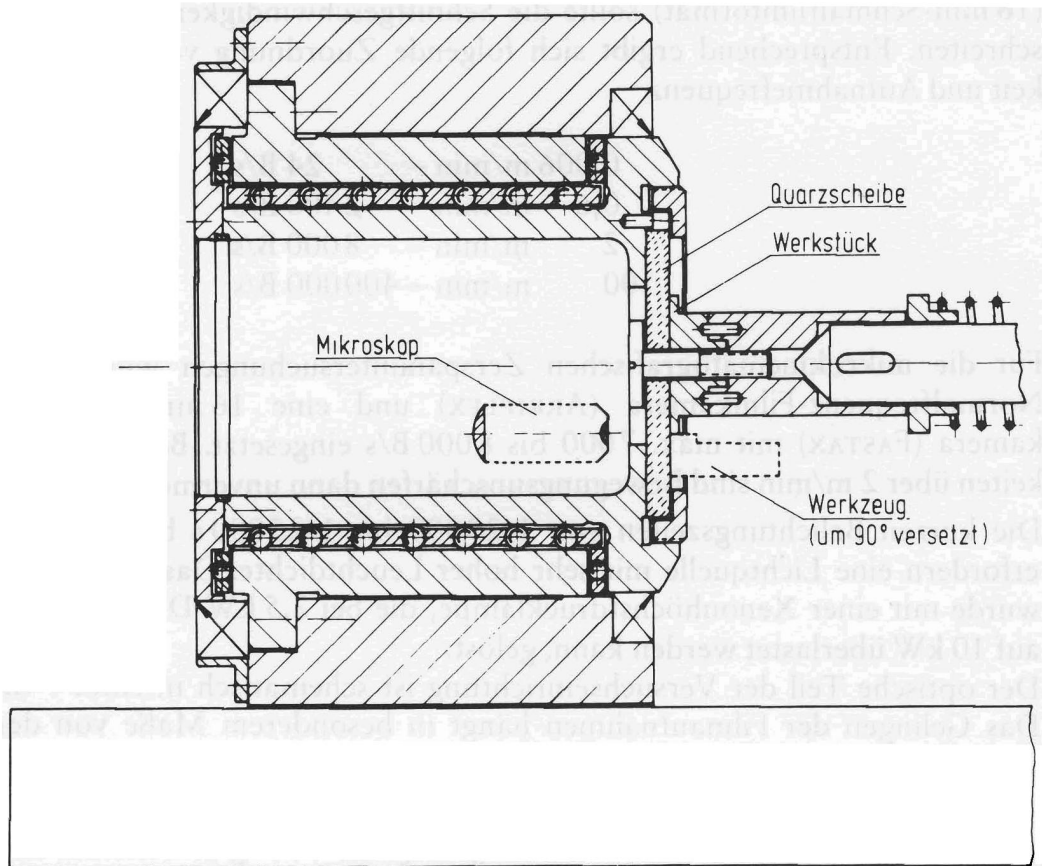


Abb. 5. Zerspankopf mit der Wirkstelle

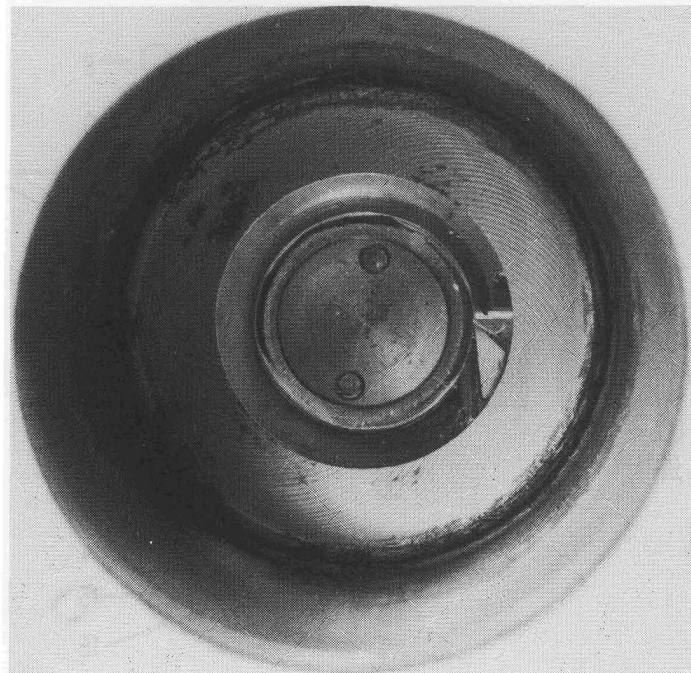


Abb. 6. Ringfenster im Zerspankopf

Filmkamera und Beleuchtungseinrichtung bestimmen die Möglichkeiten der Aufnahmetechnik. Für bewegungsscharfe Aufnahmen bei senkrechter Bewegung über die Bildfeldhöhe von 0,3 mm und einer Normal-Aufnahmefrequenz von 24 B/s (16 mm-Schmalformat) sollte die Schnittgeschwindigkeit 0,1 mm/s nicht überschreiten. Entsprechend ergibt sich folgende Zuordnung von Schnittgeschwindigkeit und Aufnahmefrequenz

0,006 m/min	–	24 B/s
0,6 m/min	–	2400 B/s
2 m/min	–	8000 B/s
100 m/min	–	400000 B/s

Für die mikrokinematografischen Zerspanuntersuchungen wurden eine 16 mm-Normalfrequenz-Filmkamera (ARRIFLEX) und eine 16 mm-Hochfrequenz-Filmkamera (FASTAX) mit max. 7000 bis 8000 B/s eingesetzt. Bei Schnittgeschwindigkeiten über 2 m/min sind Bewegungsunschärfen dann unvermeidlich.

Die kurzen Belichtungszeiten von 1/20000 bis 1/25000 s bei 7000 bis 8000 B/s erfordern eine Lichtquelle mit sehr hoher Leuchtdichte. Das Beleuchtungsproblem wurde mit einer Xenonhöchstdrucklampe, die bei 2,5 kW Dauerleistung kurzzeitig auf 10 kW überlastet werden kann, gelöst.

Der optische Teil der Versuchseinrichtung ist schematisch in Abb. 7 dargestellt. Das Gelingen der Filmaufnahmen hängt in besonderem Maße von der Versuchsvorbereitung und -durchführung ab. Die Werkstückprobe muß möglichst plan poliert sein, damit sich zwischen ihr und der Glasplatte kein Spalt bildet. Eine gleichmäßige und in der Intensität ausgewogene Ätzung entscheidet über die Güte

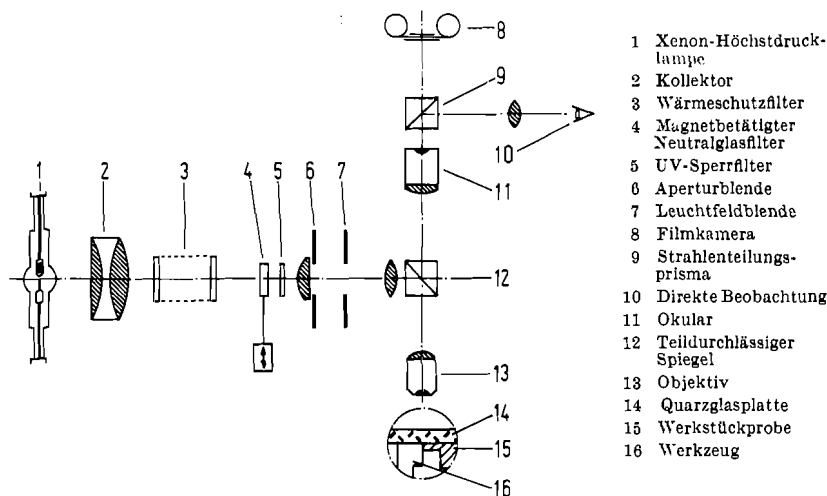


Abb. 7. Prinzip der optischen Versuchseinrichtung

des abgebildeten Werkstoffgefüges und der darin ablaufenden Vorgänge. Das Spezial-Werkzeug aus Schnellarbeitsstahl wird von Hand geläpft, damit bei der vorliegenden Vergrößerung das Werkzeug ideal scharf, ohne Schleifriefen und Kantenausbrüche erscheint. Der Gleitvorgang zwischen Glasplatte und Schneidkeil ist durch auftretende Glassprünge und Mikrorisse besonders kritisch, so daß mit einem Immersionsöl als Gleitmittel geschmiert wird.

Versuchswerkstoffe

Stahl C 45 W 3

Ein in der Zerspanforschung häufig untersuchter Werkstoff ist der C 45, dessen Gefüge bei 0,45 % C eine für die Spanbildung günstige Ferrit-Perlit-Verteilung zeigt. Der untersuchte unlegierte Werkzeugstahl C 45 W 3 ergibt das in Abb. 8 dargestellte Schliffbild. Deutlich ist der streifige Zementit im Perlit zu erkennen.

C 45 W 3 nach SEW 150-63
 normalgeglüht
 Härte HV 30 2020 N/mm²
 Zugfestigkeit nach
 DIN 50150 690 N/mm²

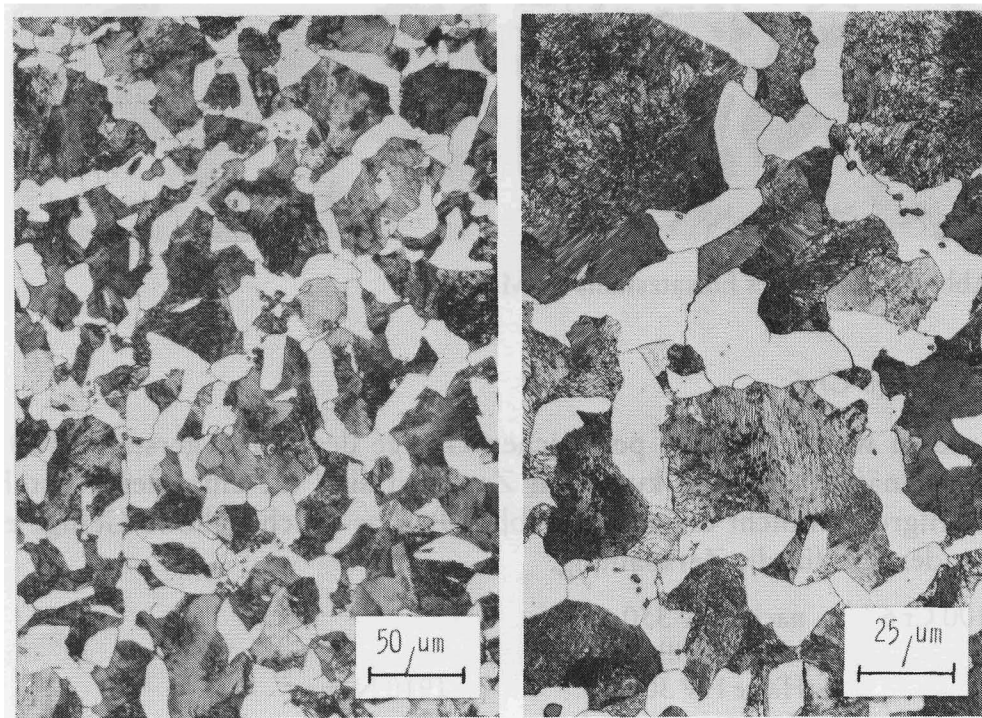


Abb. 8. Gefüge des Stahls C 45 W 3

Stahl 16 MnCr 5

Einsatzstahl 16 MnCr 5, normalgeglüht, Werkstoff-Nr. 1.7131

Chemische Zusammensetzung: C 0,14–0,19 %
(nach DIN 17210) Si 0,25 %
Mn 1,15 %
P \leq 0,035 %
S \leq 0,035 %
Cr 0,95 %

Härte: HV 30 = 150 kp/mm²

Zugfestigkeit (umgerechnet nach DIN 50150) $\sigma_B = 530$ N/mm².

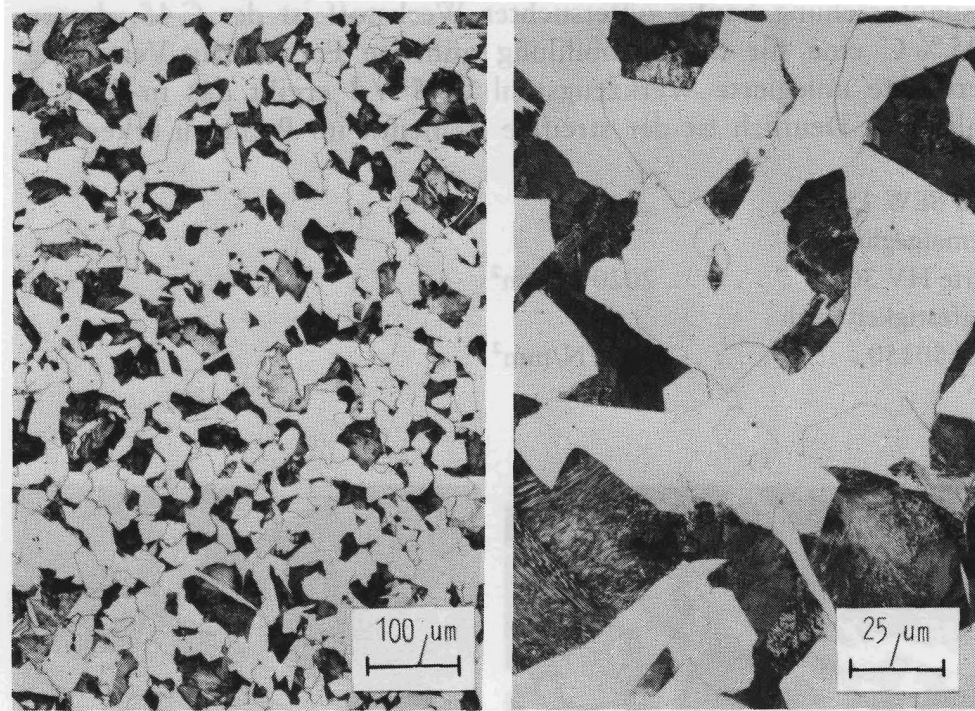


Abb. 9. Gefüge des Einsatzstahls 16 MnCr 5

Stahl 100 Cr 6

In dem weichgeglühten perlitischen Gefüge des Wälzlagerstahls 100 Cr6 mit dem gleichmäßig verteilten kugeligen Zementit sind die einzelnen Kristallite mit ihren Korngrenzen nicht erkennbar (Abb. 10). Das weichgeglühte Gefüge eignet sich besonders gut für die Zerspanung.

100 Cr 6	nach SEW 350-63	
	weichgeglüht	
	Härte HV 30	1910 N/mm ²
	Zugfestigkeit nach	
	DIN 50150	660 N/mm ²

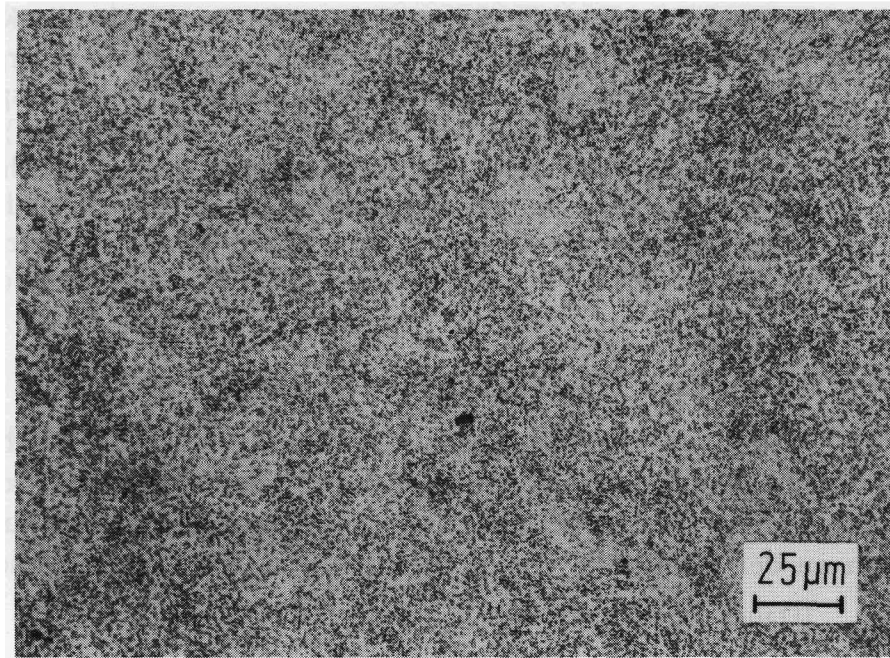


Abb. 10. Gefüge des Wälzlagerstahls 100 Cr 6

Filmbeschreibung

Wortlaut des gesprochenen Kommentars¹

Die mikrokinematographischen Aufnahmen zeigen den ebenen Zerspanvorgang, bei dem das Werkzeug durch den Schneidkeil, begrenzt durch Span- und Freiflächenkante, dargestellt wird. Gelegentliche versuchstechnisch bedingte Sekundärercheinungen, wie die Bildung eines dünnen Werkstofffilms aus kleinsten Spanteilchen auf dem Schneidkeil an der rotierenden Quarzglasplatte oder Schlieren und Luftbläschen im Schmierfilm des Immersionöls, beeinträchtigen die Beobachtung der Spanentstehungsvorgänge nur unwesentlich.

In der Spanentstehungszone gibt es Bereiche unterschiedlicher Spannungs- und Formänderungszustände, die die polierte und geätzte Werkstückoberfläche an der Glasplatte verändern, so daß Rückschlüsse auf die Art der Werkstoffverformung möglich sind. Infolge hoher Druckbeanspruchung wird der Werkstoff gestaucht und gegen die Glasplatte gepreßt. Dabei legen sich die so beanspruchten Oberflächenbereiche mikrogeometrisch dicht an die Glasplatte an, so daß sie gegenüber dem unverformten Werkstoffgefüge, das durch die Ätzung je nach Gefügebestandteil eine Hell-Dunkel-Schattierung aufweist, heller erscheinen. Oberflächenbereiche, die nicht durch entsprechende Druckbeanspruchung gegen die Glasplatte gepreßt werden, werden durch den Schervorgang oder auch durch Dehnungen infolge von Zugbeanspruchung mikrogeometrisch rau und erscheinen aufgrund der diffusen Reflexion dunkler. Neben der Scherverformung in der Spanwurzel werden auch Verformungen vor der Scherzone (Bereich 5 in Abb. 1) sichtbar.

Bei der Spanentstehung geht vom Schneidkeil sowohl eine Stauch- als auch eine Keilwirkung aus. Während die Stauchung mit einer Druckbeanspruchung des Werkstoffs

¹ Die *Kursiv*-Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film. – Die eingerückten Abschnitte in Kleindruck geben zusätzliche Informationen.

verbunden ist und die Scherung bewirkt, verursacht die Keilwirkung eine Zugbeanspruchung, unter der das Werkstoffgefüge auseinandergetrieben wird. Da der Gefügezusammenhalt größer als die auftretende Zugbeanspruchung ist, kommt es nicht zu einer Rißbildung vor der Schneide (voreilender Riß). Die Werkstofftrennung erfolgt durch Abscheren. Unter der Zugbeanspruchung durch die Keilwirkung werden die Spanunterseite und die Randschicht des Werkstücks rau und lösen sich teilweise geringfügig von der Glasplatte, so daß die Bereiche dunkler und teilweise unscharf erscheinen. Diese Vorgänge erzeugen beim laufenden Film den Eindruck eines „Saugeffekts“.

1. Drehbank, Übersicht und Fahrt ins Detail

Der Zerspanvorgang kann durch die Bildung von Aufbauschneiden beeinflusst und verändert werden. Unter praxisüblichen Bedingungen, wie hier an einer Drehmaschine, ist dieser bemerkenswerte Vorgang der Aufbauschneidenbildung, der sich an der Wirkstelle von Werkstück und Werkzeug abspielt, nicht zu erkennen.

(Dauer der Sequenz: 25 s)

2. Mikrozerspanungs-Versuchsstand, Übersicht

Mit Hilfe einer besonderen Versuchstechnik kann nun der Zerspanvorgang so dargestellt werden, daß er durch ein Mikroskop beobachtet und gefilmt werden kann.

(Dauer der Sequenz: 16 s)

3. Mikrozerspanungs-Versuchsstand, Detail

Der Zerspanvorgang läuft als Orthogonalschnitt an der definierten Ebene einer Quarzglasplatte ab. Dadurch wird es möglich, die Phasen der Werkstoffverformung im Spanwurzelbereich und die Vorgänge an den Werkzeug-Kontaktzonen sichtbar zu machen. Die folgende Aufnahme . . .

(Dauer der Sequenz: 20 s)

4. Stahl C 45, Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min, Spanwinkel 20°, Schneidenradius etwa 60 µm, Anschnittvorgang, 48 B/s.

Der Anschnittvorgang hängt im wesentlichen von der Schneidkantenrundung ab, da der Widerstand gegen das Eindringen des Schneidkeils in die Oberflächenschicht des Werkstücks mit größer werdendem Radius zunimmt. Die erste Berührung zwischen Werkzeug und Werkstück findet an der von der Freifläche ausgehenden Schneidkantenrundung statt. Mit fortschreitender Schnitt- und Vorschubbewegung wird die gerundete Schneidkante immer tiefer in die Oberfläche eingedrückt. Dabei entsteht durch intensive Scherverformung eine Fließschicht an der Werkstückoberfläche. Nach Überschreiten der Mindestspannungsdicke, die sich durch Zusammendrücken der mikrogeometrischen Unebenheiten der Oberflächenschicht ergibt, beginnt die Spanbildung mit einer zunehmenden Werkstoffanhäufung vor der Schneidkantenrundung. Die Beanspruchung des Werkstücks wird durch die heller werdende Randschicht sichtbar. Sie ist während der Phase des Andrückens größer als bei der dann folgenden Spanentstehung, die von Beginn an von einer Aufbauschneidenbildung begleitet wird.

. . . . zeigt das Eindringen eines abgerundeten Werkzeug-Schneidkeils in die Randschicht des polierten und geätzten Werkstücks. Hoher Druck, Reibungsvorgänge, Verklebungen und Verschweißungen in den Werkzeug-Kontaktzonen sowie Verformungen und Verfestigung des Werkstoffs tragen zur Bildung einer Aufbauschneide bei.

Die Bildfeldbreite bei diesen mikroskopischen Aufnahmen beträgt 0,4 mm.

(Dauer der Sequenz: 33 s)

5. Spanwinkel 20° , Schneidenradius etwa $60 \mu\text{m}$; 48 B/s

Hier bildet sich eine gut abgegrenzte und scharfe Aufbauschneide, die praktisch den abgerundeten Schneidkeil zu einem scharfkantigen ergänzt. Da die Aufbauschneide an der Rundung keinen ausreichenden Halt findet, wandert sie bald mit dem Werkstück über die Freifläche ab, indem sie sich tief in die Schnittfläche eindrückt. Der sich unmittelbar anschließende Entstehungsvorgang einer neuen Aufbauschneide gibt eine lückenlose Darstellung des Bildungsmechanismus bis zur voll ausgebildeten Aufbauschneide. Dieser Vorgang wiederholt sich ein weiteres Mal. Die wechselnde Hell-Dunkel-Schattierung im Werkstoffgefüge deutet auf die sich ändernde Beanspruchung hin.

Aus dem fließenden Werkstoff bildet sich eine Aufbauschneide, deren Form, Größe und Stabilität von den Schnittbedingungen abhängen. Wird das Kräftegleichgewicht an der Aufbauschneide gestört, so löst sie sich von der Schneide und wandert mit dem Werkstück ab. Unmittelbar danach beginnt die Bildung einer neuen Aufbauschneide. Formungsvorgang, stabile Phase mit scharfem Schneidkeil und Vorverlagerung des Schervorgangs. Beginnende Instabilität, Abgleiten und Eindringen in die Werkstück-Randschicht, erneute Aufbauschneidenbildung.

(Dauer der Sequenz: 62 s)

6. Spanwinkel 0° , Schneidenradius etwa $50 \mu\text{m}$; 48 B/s

An der Schneidkantenrundung sitzt wieder eine scharf abgegrenzte, spitze Aufbauschneide, die sich durch die Belastung aus dem Spanentstehungsvorgang allmählich zur Freifläche hin verschiebt, bis sie endgültig mit dem Werkstück abwandert, indem sie sich tief in die Schnittfläche hineindrückt. Aufgrund der starken Werkstoffverformung und der damit verbundenen Verfestigung an der abgerundeten Schneidkante beginnt unmittelbar die Bildung einer neuen Aufbauschneide, die sich erst nach wechselndem Bildungsvorgang deutlich sichtbar profiliert. Die Wechselwirkung zwischen Aufbauschneidenbildung und Spanentstehung zeigt sich in der Ungleichförmigkeit dieses Bildungsvorgangs.

Bei einem Spanwinkel von 0° wird der Span stärker umgelenkt und der Verformungsbereich vor der abgerundeten Schneidkante ist kleiner. Die Aufbauschneide wächst und ragt über die Spanfläche hinaus, bis sie instabil wird und abwandert. Neuer Bildungsvorgang. Abgleiten des Spitzenbereichs und Ausbildung einer neuen Aufbauschneidenkontur.

(Dauer der Sequenz: 40 s)

Einfluß der Schnittgeschwindigkeit

Zeitdehnung bis zu 300fach

Kohlenstoffstahl C 45

Schnittgeschwindigkeit 2,5 m/min bis 60 m/min

7. Schnittgeschwindigkeit 2,5 m/min, 6300 B/s

An der Schneidkante hat sich eine kleine Aufbauschneide festgesetzt. Kurzzeitig anhaftende Werkstoffteilchen wandern mit dem Werkstück ab und ergeben so eine schuppige Schnittfläche. Besonders ausgeprägt ist die sekundäre Scherung mit einer Fließschichtbildung in der Spanunterseite.

Als die entscheidende Einflußgröße für die Aufbauschneidenbildung erweist sich die Schnittgeschwindigkeit. Sie wirkt über die Temperatur und die Formänderungsgeschwindigkeit auf das Verformungs- und Festigkeitsverhalten des Werkstoffs. Beim Zerspanen des Stahls C 45 mit 2,5 m/min hat sich an der scharfen Schneide nur eine kleine Aufbauschneide festgesetzt. Bis zu dieser Schnittgeschwindigkeit sind bewegungsscharfe Aufnahmen möglich.

(Dauer der Sequenz: 35 s)

8. Schnittgeschwindigkeit 10 m/min, 7000 B/s

Bei dieser Schnittgeschwindigkeit bestimmt eine relativ große, sehr stabile Aufbauschneide die Spanbildung. Sie erscheint im Profil ähnlich scharf markiert wie der Schneidkeil und geht nahtlos in diesen über. Entsprechend klein ist der Bereich wechselnder Fließvorgänge an der Aufbauschneidkante, bei denen sich kleinste Werkstoffteilchen kurzzeitig festsetzen und mit dem Werkstück oder Span wieder abwandern. Die für die Spanentstehung günstige Schneidkeilgeometrie der Aufbauschneide sorgt für eine relativ kontinuierliche Spanbildung ohne eine ausgeprägte sekundäre Scherung mit Fließschichtbildung.

Bei höheren Schnittgeschwindigkeiten, wie hier bei 10 m/min, sind Bewegungsunschärfen unvermeidlich. Eine sehr stabile und scharf geformte Aufbauschneide hat sich hier mit dem Werkzeugschneidkeil verbunden. Sie begünstigt die Spanbildung und schützt gleichzeitig die Werkzeugschneide. An der Spitze der Aufbauschneide findet ein unregelmäßiges Festsetzen und Abwandern kleiner Werkstoffteile statt.

(Dauer der Sequenz: 40 s)

9. Schnittgeschwindigkeit 20 m/min, 6300 B/s

Die Aufbauschneide ist hier größer und schlanker. Sie hat einen stabilen Kern, an dessen Spitze sich Werkstoffteilchen kurzzeitig zu äußerst schmalen Keilen aufbauen. Aufgrund der geringen Stabilität werden diese Bereiche der Aufbauschneide bald zusammengedrückt und wandern als Schuppen an der Werkstückoberfläche oder Spanunterseite ab. Dabei scheint der Span nach seiner Trennung vom Werkstück an der Aufbauschneidenspitze streckenweise ohne Kontakt abzulaufen und sich erst wieder in einem größeren Abstand von der Schneidkante auf der Spanfläche abzustützen.

Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit, hier bei 20 m/min, nimmt die Größe der Aufbauschneide zu. Sie wächst in Schnittrichtung und erhält so eine schlankere Form. Bis auf die kurzzeitig wechselnden kleinen Anlagerungen an der Spitze ist diese etwa 70 Mikrometer hohe Aufbauschneide außerordentlich stabil.

(Dauer der Sequenz: 34 s)

10. Schnittgeschwindigkeit 30 m/min, 6400 B/s

Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit nimmt die Größe (Höhe und Länge) der Aufbauschneide weiter zu. Der zur Spitze immer schmaler werdende Keil wächst teilweise weit über die Werkzeugschneide hinaus, so daß sich ein Freiflächenspalt einstellt, der die Spannungsdicke entsprechend vergrößert. Der Bereich der Aufbauschneide mit wechselndem Bildungsmechanismus auf einem stabilen Kern nimmt ebenfalls zu. Spanentstehung und -ablauf sowie die Schnittflächenbildung sind gleichermaßen unregelmäßigen Veränderungen unterworfen. Die Empfindlichkeit einer derart schlanken, steilen Aufbauschneide wird durch Schwankungen infolge wechselnder Belastung deutlich.

Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 30 m/min hat die Aufbauschneide eine beachtliche Größe erreicht. Der zur Spitze immer schlanker werdende Keil wächst teilweise weit über die Werkzeugschneide hinaus, so daß sich ein Freiflächenspalt einstellt, der die Spannungsdicke erheblich vergrößert. An der Spitze befindet sich auf dem stabilen Kern ein größerer Bereich mit wechselnden Werkstoffanlagerungen.

(Dauer der Sequenz: 30 s)

11. Schnittgeschwindigkeit 60 m/min, 5600 B/s

Bei den hier vorliegenden Schnittbedingungen beherrscht das Wechselgeschehen der Aufbauschneidenbildung in besonderer Weise die Spanbildung. Der Übergangsbereich von der Aufbauschneide zum Span und Werkstück ist durch intensive plastische Verformungen gekennzeichnet und dabei so groß, daß ein fester, stabiler Aufbauschneidenkern kaum noch abzugrenzen ist. Dieser Bereich, in dem der Werkstoff fließt, verändert seine Lage, Größe und Form in so schneller und unregelmäßiger Folge, daß hier die mögliche negative Wirkung einer Aufbauschneidenbildung besonders deutlich wird. Die Spanbildung, die Geschwindigkeitsverhältnisse, der Freiflächenspalt und damit die Spannungsdicke sowie die Oberflächengestalt und -struktur wechseln ständig, so daß das Zerspanergebnis nicht mehr kalkulierbar ist.

Bei 60 m/min Schnittgeschwindigkeit bewirkt der zunehmende Einfluß der Zerspanntemperatur ein intensives, wechselndes Fließen des Werkstoffs im Bereich der Aufbauschneide. Mit der sich ändernden Aufbauschneidenform verläuft die Spanentstehung entsprechend unregelmäßig. Die Zerspanntemperatur beeinflusst das Festigkeitsverhalten des Werkstoffs. Wie eine teigige Masse türmt sich der Werkstoff vor der Schneide auf, wird zusammengedrückt, mit dem Werkstofffluß geschoben und schließlich losgerissen. Die abgleitenden Teile der Aufbauschneide wandern sowohl mit dem Span als auch mit dem Werkstück ab.

(Dauer der Sequenz: 54 s)

Einsatzstahl 16 MnCr 5

Schnittgeschwindigkeit 1,25 m/min bis 5 m/min

12. Schnittgeschwindigkeit 1,25 m/min, 6500 B/s

Der Spanbildungsvorgang bei einer Spanungsdicke von etwa 45 µm verläuft relativ kontinuierlich, so daß ein Fließspan mit einer gleichmäßigen Struktur und einer verhältnismäßig ausgeglichenen Spanoberfläche entsteht. Die sekundäre Scherung lenkt die Strukturlinien zur Schneidenspitze ab und erzeugt eine helle Fließschicht in der Spanunterseite. Die Aufbauschneide weist mit einem Spanwinkel von etwa 30° und einer negativen Freiflächenfase dieselben Merkmale wie die Aufbauschneiden bei kleineren Schnittgeschwindigkeiten auf.

Der Einsatzstahl 16 Mangan-Chrom 5 neigt zum Schmieren und bildet deshalb stärker verrundete Aufbauschneiden. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 1,25 m/min ist die Aufbauschneide noch relativ klein. Ihre Form ergibt hier eine negative Freiflächenfase.

(Dauer der Sequenz: 30 s)

13. Schnittgeschwindigkeit 2,5 m/min, 6500 B/s

Hier hat die Aufbauschneide eine bemerkenswerte Größe angenommen, so daß die Spanentstehung und der Spanablauf deutlich sichtbar beeinflusst werden. Der wirksame Spanwinkel beträgt etwa 25°, die Spanungsdicke kann mit etwa 55 µm angegeben werden. Das Profil der Spanoberfläche erscheint ohne die vorher beobachteten ausgeprägten Spitzen gleichförmiger und ausgeglichener. Der stabile Kern der Aufbauschneide wird durch einen ziemlich scharfkantigen 90°-Keil gebildet, der auf die Hauptgleitrichtungen unter 90° hindeutet. Werkstoffablagerungen auf diesem stabilen Kern wandern nach kurzer Zeit wieder ab.

Bei 2,5 m/min hat sich eine größere stabile Aufbauschneide gebildet. Ein relativ großer Keilwinkel in Verbindung mit einem negativen Freiwinkel kennzeichnet diese Aufbauschneide. An ihrer Freifläche setzen sich unregelmäßig kleine Werkstoffteilchen fest, lösen sich wieder und wandern mit dem Werkstück ab.

(Dauer der Sequenz: 35 s)

14. Schnittgeschwindigkeit 5 m/min, 6500 B/s

Bei einer Spanungsdicke von etwa 50 µm ist der Zerspanungsvorgang hier mit einer beachtlichen Aufbauschneide verbunden, deren Höhe 90 µm und deren Länge auf der Spanfläche 140 µm beträgt. Die Spanablauffläche erscheint als gekrümmte Kante mit einem Anfangs-Spanwinkel von etwa 50°. Da der Span die Werkzeug-Spanfläche kaum noch berührt, übernimmt praktisch die Aufbauschneide die Funktionen des Schneidkeils. Die abgerundete Aufbauschneidenspitze erscheint durch das unregelmäßige Festsetzen und Abwandern unterschiedlich großer Werkstoffteile ziemlich instabil. Manchmal entsteht der Eindruck, daß die ganze Aufbauschneide schwankt und ein größerer Teil abgeschert würde.

Die Größe der Aufbauschneide hat bei 5 m/min Schnittgeschwindigkeit weiter zugenommen. Ihre Form ist schlanker und verändert sich im Spitzenbereich durch

kurzzeitig wechselnde Anlagerungen. Die abgerundete Spitze baut über den Werkzeugspannschneidkeil vor und bildet damit einen Freiflächenspalt.

(Dauer der Sequenz: 33 s)

Wälzlagerstahl 100 Cr 6

Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min und 20 m/min

15. Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min, 48 B/s, Spanwinkel 15° , Spannungsdicke etwa $90 \mu\text{m}$

Bei dem gleichmäßig-feinkörnigen, weichgeglühten Werkstoffgefüge entsteht unter entsprechend gleichförmiger Scherverformung ein Fließspan mit relativ glatter Spanoberseite. Die Spanseitenfläche ist infolge unterschiedlicher Beanspruchung in der Scherzone in einen hellen und dunklen Bereich unterteilt. Die von der Schneidkante ausgehende dunkle Zone deutet die Keilwirkung an, die durch den zu beobachtenden Saugeffekt noch besonders angezeigt wird. Die helle Zone entsteht durch die Druckbeanspruchung in den oberflächennahen Bereichen.

Die Keilwirkung wird durch den deutlichen Saugeffekt sichtbar. Der Span ist auch hier gleichmäßig in einen dunklen und einen hellen Bereich unterteilt, wodurch die unterschiedliche Beanspruchung in der Spanentstehungszone zum Ausdruck kommt. Im weiteren Verlauf der Spanbildung kommt es zu Abschervorgängen, wie sie von der Scherspannbildung her bekannt sind. Dabei verändert sich der bis dahin dunkle Bereich an der Spanunterseite und zeigt zunehmende Reibbeanspruchung auf der Spanfläche an. Eine kleine, stabile, scharf abgegrenzte Aufbauschneide, die mit dem Schneidkeil eine Einheit zu bilden scheint, begleitet die Spanbildung.

Der Wälzlagerstahl 100 Chrom 6 ist im weichgeglühten, feinkörnigen Zustand gut zerspanbar. Bei der sehr geringen Schnittgeschwindigkeit von 0,01 m/min bleibt die Stabilität der kleinen Aufbauschneide auch bei wechselnden Belastungszuständen erhalten.

(Dauer der Sequenz: 32 s)

16. Schnittgeschwindigkeit etwa 20 m/min, Spannungsdicke etwa $35 \mu\text{m}$, 6800 B/s

Bei einer Schnittgeschwindigkeit von 20 m/min zeigt die Aufbauschneidenbildung grundlegend andere Verhältnisse. An der Span- und Freiflächenseite der massiven, flachen Aufbauschneide kann im Übergangsbereich zum Span und Werkstück gleichmäßiges, intensives Fließen beobachtet werden. Beide Flächen an der Aufbauschneide bilden miteinander einen Winkel von etwa 90° und zeigen damit Hauptschubspannungsrichtungen an. Infolge des negativen Aufbauschneidenfreiwinkels ist an der Schnittfläche des Werkstücks eine glättende Wirkung zu beobachten, so daß die üblicherweise mit der Aufbauschneidenbildung verbundene Verminderung der Oberflächengüte nicht auftritt.

Die Aufbauschneide bei 20 m/min Schnittgeschwindigkeit fällt durch ihre besondere Form auf. Um den stabilen, nahezu rechtwinklig geformten Keil der Aufbauschneide fließt der Werkstoff im Übergangsbereich zum Span und zum Werkstück

außerordentlich gleichmäßig. Entsprechend gleichförmig ist auch die entstehende Werkstück-Oberfläche. Die Fließrichtungen um den Aufbauschneidenkern deuten die Richtungen der Hauptschubspannungen an.

(Dauer der Sequenz: 40 s)

English Version of the Spoken Commentary¹

(Metal Cutting – Built-up Edge Formation – Cutting in Microstructure.)

The cutting process can be influenced and changed through the formation of built-up edges. Under practical conditions, such as here on the lathe, – this remarkable process of forming a built-up edge, which takes place at the actual point of impingement of workpiece and tool, cannot be distinguished.

With the help a special experimental technique, the metal-cutting operation can be prepared in such a way that microscopic observation and filming are possible.

The cutting operation is performed as an orthogonal cutting at the definite optical plane of a quartzglass plate. It is thus possible to visualize the individual phases of material structure deformation in the area of the chip root and the processes in the zones of tool contact.

The following shot shows the penetration of a rounded tool cutting wedge into the surface layer of a polished and etched workpiece.

High pressure, friction, adhesive and welding processes in the zones of tool contact, as well as – Deformations and strain hardening of cut material contribute to the formation of a built-up edge.

The frame width of these cinemicrographs represents about 0.4 mm.

From the flowing material a built-up edge arises; its shape, size and stability depending on the cutting conditions. If the balance of forces at the built-up edge is deranged, it detaches itself from the cutting edge and runs off with the workpiece. Immediately afterwards, the formation of a new built-up edge is resumed. The formation process. A stable phase with a sharp wedge at the built-up edge and forward dislocation of shearing process, beginning instability – sliding off – and impressing into the surface layer of the workpiece. Renewed formation of a built-up edge.

At a rake angle of 0° the chip is deflected more forcefully, and the area of deformation round the cutting edge is smaller. The built-up edge grows and juts out over the rake face until it becomes unstable – and runs off.

Renewed formation process. The foremost area slides off – followed by the formation of a new built-up edge.

¹ The passages in *italics* correspond with the subtitles in the film.

Einfluß der Schnittgeschwindigkeit

Zeitdehnung bis zu 300fach

Kohlenstoffstahl C 45

Schnittgeschwindigkeit 2,5 m/min bis 60 m/min

(Influence of Cutting Speed—High-speed Effect—300 x—Carbon Steel C 45.)

The cutting speed proves to be the decisive limiting factor in built-up edge formation. Speed acts via the temperature and the deformation velocity upon the deformation behaviour and stability of the cut material. In cutting carbon steel C 45 at a speed of 2.5 m per min., only a small built-up edge becomes affixed to the cutting edge. Up to this speed sharply defined camera shots are possible.

At higher cutting speeds, such as here at 10 m per min., motion unsharpness is inevitable. In this case, a very stable and acutely shaped built-up edge has joined the cutting wedge of the tool. It promotes chip formation while at the same time protecting the cutting edge. At the apex of this built-up edge, small particles of material settle and run off irregularly.

With increasing cutting speed — here at 20 m per min. — the built-up edge also increases in size. It grows in the cutting direction and takes on a slender appearance. Apart from the momentary accumulations of minor particles at the apex, this built-up edge of about 70 µm in height is extremely stable.

At a cutting speed of 30 m per min., the built-up edge reaches considerable proportions. The wedge, which becomes increasingly pointed towards the apex, now grows out beyond the cutting edge, with the result that a space is formed between flank and cutting edge, considerably increasing the thickness of the uncut chip. At the apex of the built-up edge, a wider area of changing material accumulations is located about a stable nucleus.

At a cutting speed of 60 m per min., the increasing influence of the cutting temperature causes an intensive, changing flow of cut material in the area of the built-up edge. In conformity with the changing shape of the built-up edge, the chip formation is also irregular. The cutting temperature also influences the strength behaviour of the cut material. Like a pasty mass the material is piled up at the cutting edge, compressed, pushed along with the flow of the cut material, and finally torn off. The parts of the built-up edge that slip away run off with the chip as well as with the cut surface of the workpiece.

Einsatzstahl 16 MnCr 5

Schnittgeschwindigkeit 1,25 m/min bis 5 m/min

(Carburizing Steel 16 MnCr 5.)

The carburizing steel 16 manganese chromium 5 tends to smear, and therefore it forms more rounded built-up edges. At a speed of 1.25 m per min., the built-up edge is still relatively small. In shape it exhibits a negative first flank.

At 2.5 m per min., a larger, stable built-up edge is formed. This built-up edge is characterized by its relatively large wedge angle in conjunction with a negative

clearance angle. On its flank, small particles of cut material settle irregularly, are dislodged again and run off with the workpiece.

At 5 m per minute cutting speed, the size of the built-up edge increases still further. It has a more slender shape and its apical area changes with the momentary accumulations of material. The rounded apex projects in front of the tool cutting wedge, resulting in a space being formed between the flank and the cut surface.

Wälzlagerstahl 100 Cr 6

Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min und 20 m/min

(Ball-bearing Steel 100 Cr 6.)

The ball-bearing steel 100 chromium 6 with annealed fine-grained structure can readily be cut. At this very low cutting speed of 0.01 m per min., the stability of the small built-up edge is preserved even under changing loads.

At a cutting speed of 20 m per min., the built-up edge takes on a remarkable appearance. Round the stable, almost rectangular wedge of the built-up edge, the cut material flows with exceptional steadiness in the transition area between built-up edge and chip and workpiece. The cut surface of the workpiece also has an accordingly smooth appearance.

The directions taken by the flowing material are indicative of the directions of the principle shear stresses.

Literatur

- [1] ISAJEV, A.I., und V.N. GORBUNOVA: A new Filming Method for Investigating the Process of Plastic Deformations in the Zone of Chip Formation. Res. Film 3, 6 (1960), 349–356.
- [2] WARNECKE, G.: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. Technischer Verlag Resch KG, Gräfelfing b. München 1974.
- [3] WIEBACH, H.G.: Beitrag zur Untersuchung des Zerspanvorgangs mit Hilfe fotografischer Methoden. Werkstattstechnik 55, 3 (1965), 128–133.
- [4] WIEBACH, H.G., und G. HUMMEL: Mikrokinematografische Studien über das Zerspanen von Metallen. Res. Film 5, 5 (1966), 501–509.

Filmveröffentlichungen

- [5] AHLBORN, H., R. HAHN und INST. WISS. FILM: Zerspanen eines Kupfer-Einkristalls – Schnittvorgang im Feingefüge – Orientierungsabhängigkeit der Spanbildung. Film E 1995 des IWF, Göttingen 1974. Publikation von H. AHLBORN und R. HAHN, Göttingen 1974, 11 S.
- [6] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl C 45 W 3 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Spannungsdicke. Film E 1814 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.

- [7] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl C 45 W 3 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schnittgeschwindigkeit. Film E 1934 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 18 S.
- [8] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl C 45 W 3 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation des Spanwinkels. Film E 1951 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.
- [9] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl C 45 W 3 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation des Schneidenradius. Film E 1952 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 19 S.
- [10] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Gußeisen GG 20 – Schnittvorgang im Feingefüge – Spanentstehungsvorgänge. Film E 1953 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.
- [11] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Gußeisen GG 20 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schnittgeschwindigkeit. Film E 1984 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.
- [12] WARNECKE, G., und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Gußeisen GG 20 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schneidengeometrie. Film E 1994 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.
- [13] WARNECKE, G., Chr. NEDESS und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl X 2 CrNi 18 9 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schnittgeschwindigkeit. Film E 2138 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE und Chr. NEDESS, Göttingen 1975, 18 S.
- [14] WARNECKE, G., Chr. NEDESS und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl X 2 CrNi 18 9 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation des Schneidenradius. Film E 2139 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE und Chr. NEDESS, Göttingen 1975, 18 S.
- [15] WARNECKE, G., und G. HUMMEL (IWF): Zerspanen metallischer Werkstoffe – Spanentstehung – Schnittvorgang im Feingefüge. Film C 1246 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von G. WARNECKE und G. HUMMEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 5, Nr. 1/C 1246 (1979), 28 S.
- [16] WARNECKE, G., und G. HUMMEL (IWF): Zerspanen metallischer Werkstoffe – Aufbauschneidenbildung – Schnittvorgang im Feingefüge. Film C 1247 des IWF, Göttingen 1977. Publikation von G. WARNECKE und G. HUMMEL, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 5, Nr. 2/C 1247 (1979), 26 S.
- [17] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen der Aluminium-Legierung AlCuMgPb – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schnittgeschwindigkeit. Film E 1527 des IWF, Göttingen 1971. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1971, 17 S.
- [18] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl 9 S 20 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schnittgeschwindigkeit. Film E 1528 des IWF, Göttingen 1971. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1971, 17 S.
- [19] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl 9 S 20 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Spannungsdicke. Film E 1621 des IWF, Göttingen 1970. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1971, 17 S.
- [20] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl 16 MnCr 5 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Schnittgeschwindigkeit. Film E 1622 des IWF, Göttingen 1970. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1971, 16 S.

- [21] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl 16 MnCr 5 – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation der Spannungsdicke. Film E 1623 des IWF, Göttingen 1970. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1971, 15 S.
- [22] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen der Aluminium-Legierung AlCuMgPb – Schnittvorgang im Feingefüge – Variation des Spanwinkels. Film E 1815 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.
- [23] WIEBACH, H.G., G. WARNECKE und INST. WISS. FILM: Zerspanen von Stahl 100 Cr 6 – Schnittvorgang im Feingefüge. Film E 1983 des IWF, Göttingen 1975. Publikation von G. WARNECKE, Göttingen 1975, 17 S.

Abbildungsnachweis

Abb. 1–11: G. WARNECKE u. G. HUMMEL.