

# ENCYCLOPAEDIA CINEMATOGRAPHICA

Editor: G. WOLF

---

*E 1621/1970*

**Zerspanen von Stahl 9 S 20**  
**Schnittvorgang im Feingefüge**  
**Variation der Spannungsdicke**

Mit 6 Abbildungen

GÖTTINGEN 1971

---

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

## Zerspanen von Stahl 9 S 20

### Schnittvorgang im Feingefüge

### Variation der Spanungsdicke<sup>1</sup>

G. WARNECKE, Hannover

#### Allgemeine Vorbemerkungen

##### Der Zerspanungsvorgang bei metallischen Werkstoffen

Bei allgemeinen und grundlegenden Betrachtungen des Zerspanungsvorganges wählt man zweckmäßigerweise den einfachsten Zerspanungsfall, den Orthogonalschnitt, der folgende Bedingungen erfüllen muß: keine Nebenschneide, Schneidenlänge größer als Spannungsbreite, Einstellwinkel  $\kappa = 90^\circ$ , Neigungswinkel  $\lambda = 0^\circ$ . Unter der Voraussetzung, daß die Spanungsdicke im Verhältnis zur Spannungsbreite sehr klein ist, ist es möglich, den Zerspanungsvorgang als ebenes zweiachsiges Problem zu behandeln. (Begriffe und Geometrie des Zerspanungsvorganges sind in DIN 6580 und DIN 6581 genormt.)

Ein in seiner Geometrie definierter Schneidkeil dringt in die Randschicht des Werkstückes ein und verdrängt den in Schnittrichtung vor ihm liegenden Werkstoff. Dabei entsteht der Span durch Scherung in einer bestimmten Zone, die mit der Schnittrichtung den Scherwinkel  $\Phi$  einschließt. Zur Analyse des Spanbildungsvorganges wird der unter der Einwirkung des Schneidkeils stehende Werkstoffbereich entsprechend Abb. 1 in fünf Wirkzonen eingeteilt. (WARNECKE [11]).

1. Die *primäre Scherzone* erstreckt sich von der Schneidkante zur freien Oberfläche und ist die eigentliche Spanentstehungszone.

2. Die *sekundäre Scherzone auf der Spanfläche* entsteht durch Fließen des Werkstoffes an der Spanunterseite. In dieser Fließschicht erfolgt der Geschwindigkeitsausgleich zwischen Span und Spanfläche.

<sup>1</sup> Angaben zum Film und Filminhalt (deutsch, englisch, französisch) s. S. 17.

3. In der *Zone der Schneidkante* wird der Span vom Werkstück getrennt. Im Vergleich zur theoretisch ideal scharfen Schneide wird bei einem Werkzeug der Übergang von der Span- zur Freifläche immer durch eine angenäherte Zylindermantelfläche mit endlichem Radius gebildet.

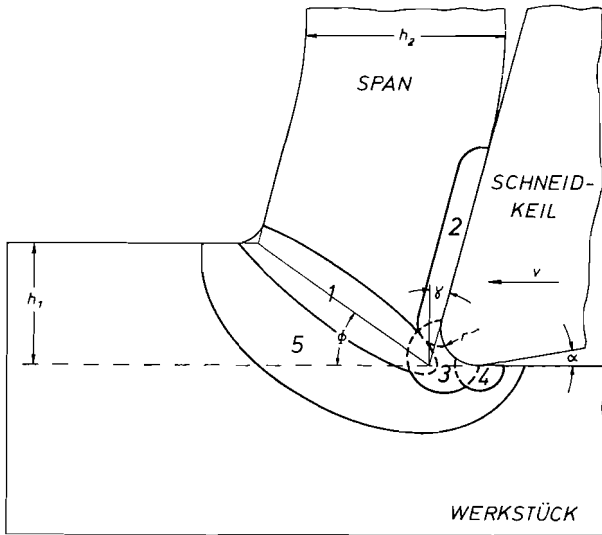


Abb. 1. Wirkzonen bei der Spanentstehung  
(Erläuterungen im Text)

4. Die *sekundäre Scherzone auf der Freifläche* entsteht durch die elastische Rückfederung des Werkstoffes nach dem Trennvorgang an der Schneidkante.

5. *Verformungsvorlaufzone*. Außerhalb der eigentlichen Scherverformungszonen wirken auf das Werkstück Spannungen, die zwar mit zunehmender Querschnittsfläche im Werkstück geringer werden, aber vor der Spanentstehungszone und in die Tiefe des Werkstückes senkrecht zur Schnitttrichtung plastische und elastische Verformungen verursachen.

Neben diesen Verformungsvorgängen wirken eine Reihe weiterer physikalischer und chemischer Vorgänge zusammen und beeinflussen sich gegenseitig. Gefügeveränderungen durch Verformungen und Umwandlungen im zerspannten Werkstoff, Reibungs-, Adhäsions-, Verschweißungs- und Diffusionsvorgänge sowie chemische Reaktionen spielen bei der Spanentstehung eine große Rolle. Außerdem muß man die große Zahl

veränderlicher Schnittbedingungen und Einflußgrößen berücksichtigen, um das Wesen der Zerspanung und die Erscheinungsformen der Spanbildung zu erfassen und zu beurteilen (DEGNER u. a. [2], VIEREGGE [10]).

### Zerspanbarkeit und Spanbildung

Für die Bewertung und Beurteilung von Zerspanungsfällen wurde der Begriff der Zerspanbarkeit geprägt. Da eine einheitliche und umfassende Definition dieses Begriffes und eine entsprechende Zerspanbarkeitskennziffer bis heute fehlen, sind mehrere Maßstäbe notwendig, den Zerspanungsvorgang nach verschiedenen Gesichtspunkten zu bewerten. So wurde von SCHALLBROCH und BETHMANN [8] die Zerspanbarkeit in die vier folgenden Hauptbeurteilungsfaktoren aufgeschlüsselt:

- Energie* (Kräfte, Temperaturen)
- Standzeit* (Verschleiß, Temperaturen)
- Arbeitsergebnis* (Oberflächengüte, Form- und Maßgenauigkeit)
- Spanbildung* (Spanform, Spanentstehung)

<i>Spanform</i> (Makrogeometrie):	<i>Spanentstehung</i> (Mikrogeometrie):
Arbeitstechnik, z. B.	Spanarten
Werkzeugspiel bei Automaten	Aufbauschneidenbildung
Spänetransport	Verformungen
Massenfertigung	Verformungszonen
Belästigung	Verformungsarten
	Verformungsgrad
	Verformungsstrukturen

Bei der Spanentstehung handelt es sich um Vorgänge, die von Ort und Zeit abhängen und die sich unter schnellen periodischen oder unregelmäßigen Veränderungen im Mikrobereich abspielen. Damit wird die Bedeutung der mikrogeometrischen Betrachtungsweise bei der Beurteilung der Spanentstehung offensichtlich (WIEBACH [12]).

### Spanarten und Aufbauschneidenbildung

Auf Grund einer unterschiedlichen Zerspanungsmechanik entstehen die verschiedenen Erscheinungsformen der Spanbildung. Die Spanarten werden heute meistens in Fließ-, Scher- und Reiß- oder Bröckelspäne bzw. in kontinuierliche und diskontinuierliche Späne unterteilt. Die Übergänge zwischen den einzelnen Spanarten sind fließend, und ihre Entstehung hängt im wesentlichen von den Werkstoffeigenschaften und den Zerspanungsbedingungen ab. Während Fließ- und Scherspäne bei der Zerspanung duktiler Werkstoffe durch plastische Scherverformung entstehen, sind Reiß- oder Bröckelspäne das Ergebnis bei der Zerspanung spröder Werkstoffe, z.B. Grauguß, indem unregelmäßige Spanstücke nahezu verformungslos aus dem Gefüge herausgerissen werden.

Bei der Fließspanbildung kann es unter bestimmten Bedingungen zu Werkstoffablagerungen an der Schneidkante und auf der Spanfläche kommen, die als Aufbauschneide die Schneidengeometrie verändern und den Zerspanungsvorgang beeinflussen. Zwischen Werkzeug und Span wirken Adhäsionskräfte, und in der sekundären Scherzone ist der Werkstoff größten Verformungen, die eine entsprechende Verfestigung bewirken, unterworfen, so daß sich der Schervorgang in Werkstoffschichten geringerer Verfestigung verlagert und die höher verfestigten Werkstoffteilchen auf der Spanfläche stehenbleiben. So wächst die Aufbauschneide keilförmig in Schnittrichtung und übernimmt die Funktion der Schneide, bis sie auf Grund der wirkenden Kräfte instabil wird, mit dem Span oder dem Werkstück abwandert und sich von neuem bildet. Erreichen die Zerspanungstemperaturen den Rekristallisationsbereich, ist eine Verfestigung nicht mehr möglich, und es bilden sich keine Aufbauschneiden (GAPFISCH und SCHILLING [4]).

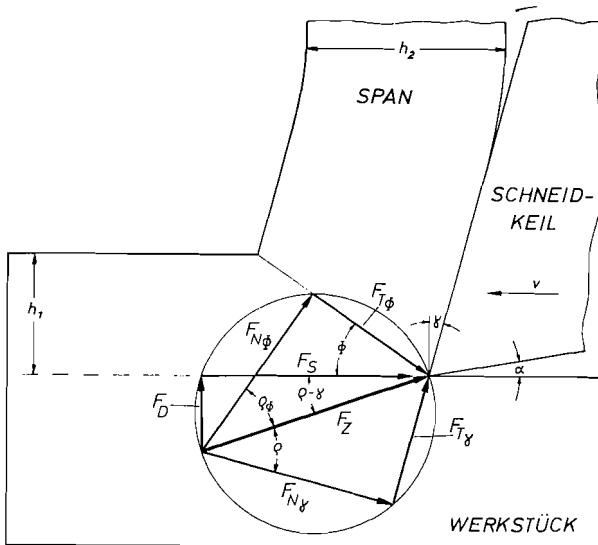


Abb. 2. Kräftegeometrie beim Orthogonalschnitt

$F_z$  Zerspankraft,  $F_S$  Schnittkraft,  $F_D$  Drangkraft,  $F_{N\gamma}$  Normalkraft auf der Spanfläche,  $F_{T\gamma}$  Tangentialkraft auf der Spanfläche,  $F_{N\phi}$  Normalkraft in der Scherebene,  $F_{T\phi}$  Tangentialkraft in der Scherebene,  $\phi$  Scherwinkel,  $\gamma$  Spanwinkel,  $\rho$  Reibungswinkel auf der Spanfläche,  $\rho_\phi$  innerer Reibungswinkel in der Scherebene

### Zerspanungsmodelle und Scherwinkeltheorien

Zerspanungsmechanische Betrachtungen gehen häufig von bestimmten Modellvorstellungen des Zerspanungsvorganges aus, auf deren Grundlage theoretische Lösungen des Zerspanungsproblems entwickelt werden (DOHMEN [3], KHARE [6], ZOREV [14]). Die primäre Verformungsart aller Fließspanmodelle erfolgt durch Scherung, so daß der Scherwinkel  $\Phi$  (Abb. 1) eine zentrale Bedeutung erhält. Nach der Form des Schergebietes wird zwischen Scherebenen- und Scherzonenmodellen und -theorien unterschieden, wobei entweder eine Ebene bzw. leicht gekrümmte Fläche oder eine Zone endlicher Dicke angenommen wird. Die in großer Zahl entwickelten Scherwinkelgleichungen stellen im allgemeinen Winkelbeziehungen zwischen der Kräftegeometrie auf der Spanfläche und in der Scherzone mit dem Scherwinkel  $\Phi$ , dem Spanwinkel  $\gamma$  und dem Spanflächen-Reibungswinkel  $\varrho$  dar (Abb. 2). Durch eine ganze Reihe von Bedingungen, Vereinfachungen und Einschränkungen bei allen Modellen und Theorien ist eine umfassende Lösung bisher nicht gefunden worden, so daß die Scherwinkelbeziehungen nur für verschiedene Einzelzerspanungsfälle Gültigkeit besitzen.

#### Verformungsgeometrie

Für die Untersuchung des Werkstoffverhaltens bei der Spanentstehung ist eine genaue Kenntnis des Verformungsvorganges in der primären Scherzone notwendig.

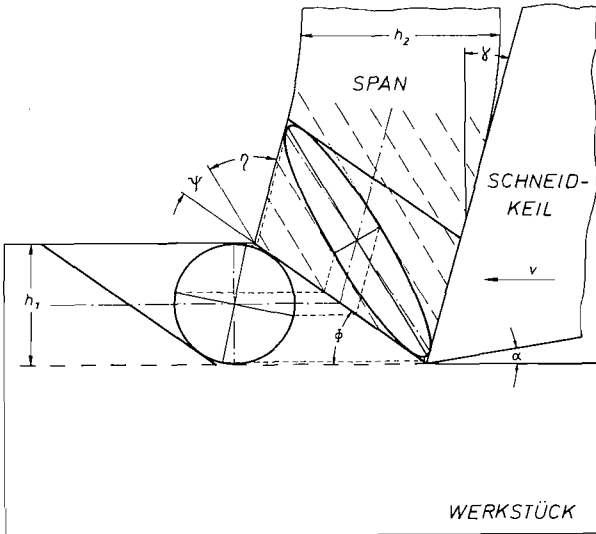


Abb. 3. Verformungsmodell

$h_1$  Spannungsdicke,  $h_2$  Spandicke,  $\alpha$  Freiwinkel,  $\gamma$  Spanwinkel  
 $\Phi$  Scherwinkel,  $\Psi$  Strukturwinkel,  $\eta$  Strukturwinkel

Eine relativ leicht bestimmbare Verformungsgröße stellt die Spanstauchung als Verhältnis der Span- zur Spannungsdicke  $\lambda = \frac{h_2}{h_1}$  dar. Sie hat allerdings nur als Vergleichswert bei Zerspannungsuntersuchungen eine gewisse Bedeutung.

Um die Verhältnisse bei der Verformung eines einzelnen Kristalls im Werkstoffgefüge zu klären, wurde das Modell in Abb. 3 entwickelt. Danach durchläuft ein Gefügeelement mit kreisförmigem Querschnitt eine Scherebene und verformt sich zu einer Ellipse im Span. Die große Achse zeigt die Strukturrichtung im Span an, die mit der Scherebene den Strukturwinkel  $\psi$  und mit der Spanfläche den Strukturwinkel  $\eta$  bildet.

Aus der Geometrie in Abb. 3 ergeben sich folgende Beziehungen

$$\cot \Phi = \frac{\lambda - \sin \gamma}{\cos \gamma}$$

$$\Phi + \psi + \eta - \gamma = 90^\circ$$

$$2 \cot 2\psi = \cot \Phi + \tan(\Phi - \gamma)$$

$$2 \cot 2\psi = \frac{1}{\cos \gamma} \left[ \left( \lambda + \frac{1}{\lambda} \right) - 2 \sin \gamma \right]$$

Diese Zusammenhänge und die daraus bestimmbaren Verformungsgrade hat KÖHLER [7] untersucht.

#### Variation der Spannungsdicke

Mit der Variation der Spannungsdicke wird nicht nur die Größenordnung der Spanentstehung verändert, sondern es muß in diesem Zusammenhang der sog. „size effect“ berücksichtigt werden, der in der Tatsache, daß bei sehr kleinen Spannungsdicken die spezifische Schnittkraft zunimmt, begründet ist (BACKER u. a. [1], THOMSEN u. a. [9]). Entsprechend steigt beim Zugversuch die Zugfestigkeit bei kleinsten Probenquerschnitten. Daraus kann geschlossen werden, daß die Spannungsdicke besonders im Bereich kleiner Werte nicht nur direkt, sondern auch indirekt über das Werkstoff-Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf den Zerspannungsvorgang wirkt. So wird auch verständlich, daß sich mit der Spannungsdicke die Charakteristik der Spanbildung verändern kann.

#### Zur Entstehung des Films

Da sich die Vorgänge bei der Spanentstehung im Mikrobereich des Werkstoffgefüges, abhängig von Ort und Zeit, abspielen, ist eine räumliche und je nach Schnittgeschwindigkeit auch eine zeitliche Dehnung notwendig, um die Vorgänge für das menschliche Auge sichtbar zu machen, was praktisch nur durch eine Kombination von Mikroskopier- und Filmtechnik möglich ist.

Die Probleme mikrokinematografischer Zerspanungsstudien wurden von WIEBACH und HUMMEL mit einer ersten diesem Zweck angepaßten Versuchseinrichtung untersucht [12], [13], [15]. Nach diesen Erfahrungen wurde ein neuer Versuchsstand entwickelt und gebaut, der die Voraussetzungen für eine mikrokinematografische Erfassung der Spanentstehung optimal erfüllt<sup>1</sup>. Abb. 4 zeigt die Anordnung der einzelnen Baugruppen der Versuchsmaschine, die für Schnittgeschwindigkeiten von 0,01 bis 60 m/min und für einen Vorschubbereich von 2 bis 125  $\mu\text{m}$  ausgelegt wurde.

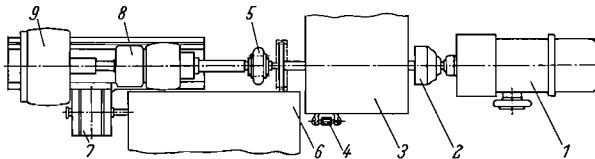


Abb. 4. Schema der Versuchseinrichtung

1 H-Trieb, 2 Kupplung, 3 Hauptgetriebe, 4 Vorlastbremse, 5 Kupplung, 6 Vorschubgetriebe, 7 Vorschubschlitten, 8 Spannzange, 9 Zerspanungskopf

Die Versuchsmethode beruht darauf, daß eine polierte und geätzte scheibenförmige Werkstückprobe (etwa 30 mm  $\varnothing$ ) mit einer planpolierten Quarzglasscheibe drehbar verspannt wird, während das Werkzeug fest auf dem Vorschubschlitten an die Glasplatte gedrückt die Probe im Orthogonalschnitt radial einsticht. Die Glasplatte verhindert ein seitliches Ausweichen des Werkstoffes und ermöglicht so die Beobachtung in einer Ebene. Das Prinzip dieser Methode wird in der Schnittdarstellung (Abb. 5) des Zerspanungskopfes als dem wesentlichsten Bauteil dieser Versuchseinrichtung deutlich. Die Lageranordnung mit Nadel- und Rillenkugellager hält die Taumelfehler innerhalb der Fokustiefe des Mikroskopes.

Der optische Teil des Versuchsstandes besteht aus einem Mikroskop mit einem Strahlenteilungskörper, um den Vorgang gleichzeitig filmen und direkt beobachten zu können, sowie einer Beleuchtungseinrichtung mit einem Opak-Illuminator (Abb. 6). Bei der gewählten Objektfeldbreite von etwa 400  $\mu\text{m}$  und einer Schnittgeschwindigkeit von 0,01 m/min wird eine 16-mm-Schmalfilmkamera (Arriflex) in Verbindung mit einer Hochleistungs-Mikroskopierleuchte eingesetzt. Höhere Schnittgeschwindigkeiten erfordern den Einsatz einer Hochfrequenz-Kamera (Fastax) und dementsprechend einer Xenon-Höchstdrucklampe mit 2,5 kW im

<sup>1</sup> Die Probleme beim Bau dieser Versuchseinrichtung wurden von der Zentralwerkstatt Göttingen GmbH vorbildlich gelöst.



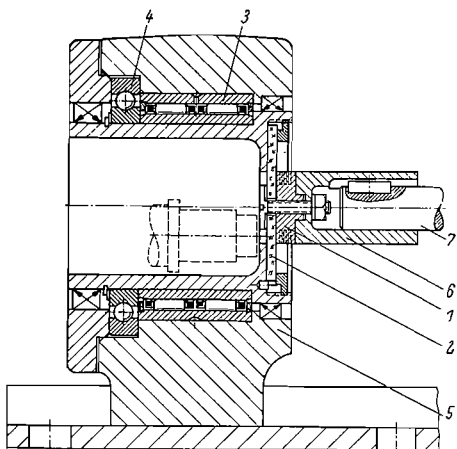


Abb. 5.  
Zerspanungskopf (Wirkstelle mit rotierender Glasplatte)

- 1 Prüfstück, 2 Glasplatte,
- 3 Radiallager, 4 Axiallager,
- 5 Lagerbock, 6 Prüfstück-träger, 7 Antriebswelle

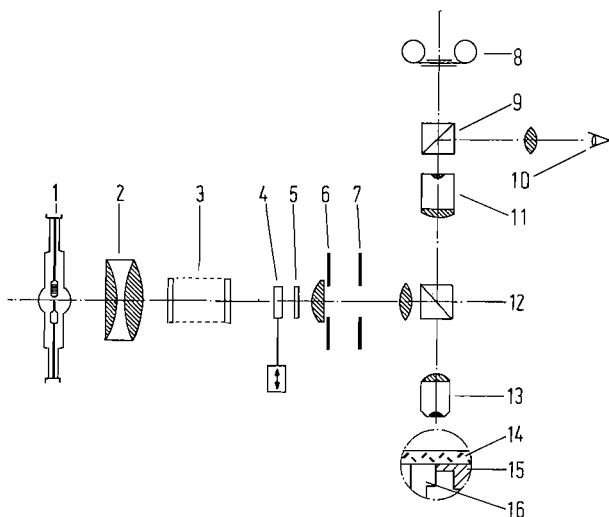


Abb. 6. Schematischer Aufbau der Mikroskopier- und Beleuchtungseinrichtung

- 1 Xenon-Höchstdrucklampe, 2 Kollektor, 3 Wärmeschutzfilter, 4 Magnetbetätigter Neutralglasfilter, 5 UV-Sperrfilter, 6 Aperturblende, 7 Leuchtfeldblende, 8 Filmkamera, 9 Strahlenteilungsprisma, 10 Direkte Beobachtung, 11 Okular, 12 Teildurchlässiger Spiegel, 13 Objektiv, 14 Quarzglasscheibe, 15 Werkstückprobe, 16 Werkzeug

Dauerbetrieb, 5 kW für 4 s und 10 kW für 2 s kurzzeitige Überlastung. Eine optimale Leuchtdichte wurde mit einem Spezialkollektor nach Berechnungen von HEYSE [5] erreicht. Wärmeschutzgläser, UV-Sperrfilter, Apertur- und Leuchtfeldblende sind notwendige Voraussetzungen für eine einwandfreie Beleuchtung im Aufricht-Hellfeld.

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 des abgebildeten Werkstoffgefüges und der darin ablaufenden Vorgänge. Das Spezial-Werkzeug aus Schnellarbeitsstahl wird von Hand geläppt, 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<sup>1</sup>.

#### Technologische Angaben

Automatenstahl 9 S 20, weichgeglüht, Werkstoff-Nr. 1.0711

Chemische Zusammensetzung: C	≤ 0,12%
(nach DIN 1651)	Mn 0,70%
	P 0,07%
	S 0,24%

Härte: HV 20 = 110 kp/mm<sup>2</sup>

Zugfestigkeit (umgerechnet nach DIN 50150)  $\sigma_B = 39$  kp/mm<sup>2</sup>.

#### Filmbeschreibung<sup>2</sup>

*Schnittgeschwindigkeit 0,01 m/min*

*Spanwinkel 0°*

*48 B/s*

*Bildfeldbreite etwa 400 µm*

Der Film zeigt den ebenen Zerspanungsvorgang in der Ansicht senkrecht zur Hauptschneide. Da der Schneidkeil, begrenzt durch Span- und Freiflächenkante, an der Quarzscheibe gleitet, ist es nicht ganz zu vermeiden, daß sich kleinste Werkstoffteilchen und Quarzsplitter

<sup>1</sup> Herrn E. FRIE (IWF) sei für seinen unermüdlichen Einsatz bei der Versuchsdurchführung gedankt.

<sup>2</sup> Die *Kursiv*-Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film.]

zwischen Schneidkeil und Quarzplatte schieben und als hauchdünne Schicht an der Keilfläche hängenbleiben bzw. Riefen erzeugen. Durch die Zugabe von Immersionsöl können, besonders bei größeren Schnittgeschwindigkeiten, im Schmierfilm Schlieren und Luftbläschen auftreten. Diese verfahrensbedingten Mängel wirken sich gar nicht oder nur geringfügig auf die Qualität der Ergebnisse aus.

Das Gefüge besteht zum überwiegenden Teil aus Ferrit mit Mangansulfideinschlüssen. Die mittlere Korngröße kann mit etwa 40 bis 50  $\mu\text{m}$  angegeben werden und liegt damit im Bereich der veränderten Spannungsdicke.

Durch plastische Verformungen ändern sich die Reflexionsverhältnisse, so daß man aus den Veränderungen der Helligkeit ganz allgemein auf Verformungen im Werkstoffgefüge schließen kann. Dabei liegt die Vermutung nahe, daß bei Druckspannungen die entsprechenden Werkstoffbereiche gegen die Quarzplatte gepreßt werden, das Licht besser reflektieren und durch helle Zonen sichtbar werden, während bei Zugspannungen die Oberfläche aufgeraut wird, so daß weniger oder kein Licht reflektiert wird. Bei dem vorliegenden zweiachsigen Spannungszustand, der durch zwei Normal- und eine Schubspannungsgröße gekennzeichnet ist, sind derartige Rückschlüsse rein qualitativ und nur als grobe Näherung zu betrachten. Neben dem Schervorgang in der Spanwurzel werden auch die Verformungen im Bereich 5 nach Abb. 1 sichtbar. Hierbei fällt besonders auf, daß diese Verformungen vom eigentlichen Schergebiet ausgehen und sich im einzelnen Kristall z. T. sprunghaft fortpflanzen. Beim „Einschießen“ dieser Verformungen entsteht der Eindruck, als würden manchmal im Kristall Gleitbänder sichtbar. Die bleibende Verformung unter der Schnittfläche im Werkstück kann als sichtbare Verformungstiefe erfaßt werden.

### *Spannungsdicke etwa 6 $\mu\text{m}$*

Eine auffallende Aufbauschneide bestimmt die Spanbildung am Anfang dieser Einstellung. Sie erzeugt einen Spanwinkel von etwa 35°, und infolge ihrer beachtlichen Größe, Höhe und Länge im Verhältnis zur Spannungsdicke, scheint der Span die Werkzeug-Spanfläche kaum noch zu berühren, so daß die Aufbauschneide die Funktionen des Schneidkeils voll übernimmt. Da die scharfe Aufbauschneide die Kristalle glatt abschert, entsteht bei dieser im Vergleich zur Korngröße sehr kleinen Spannungsdicke ein zusammenhängender Span. In dem hell erscheinenden, überwiegend ferritischen Gefüge werden Verformungen durch das Entstehen dunkler Zonen sichtbar. Die starken Kontraste in der Spanwurzel und im Span lassen keine Einzelheiten der Spanentstehung erkennen. Da die Verformungen auf Grund der regellosen Anordnung der Kristalle im Gefüge ebenfalls ungleichförmig sind, erscheint die Schnitt-

kante nicht als Gerade, sondern wie eine unregelmäßig gebrochene Kante. Inhomogenitäten bewirken eine wechselnde Belastung des Schneidkeils bzw. der Aufbauschneide, so daß diese sich von der Spanfläche löst und abwandert. Die beschriebene Aufbauschneide beginnt mit dem Span abzuwandern, indem sie sich kurzzeitig löst, für einen Moment noch einmal auf der Spanfläche haftet und dann endgültig verschwindet. Sofort bilden sich neue Schneidenansätze oder Aufbauschneiden, die jedoch auf Grund ihrer Instabilität nach kurzer Zeit von der Schnittfläche abgeschert und mitgenommen werden, bis sich wiederum eine stabile Aufbauschneide formt. Die Späne entstehen als Spiralspäne unterschiedlicher Form und zeigen die für einen Automatenwerkstoff typische Spanbrüchigkeit.

### *Spanungsdicke etwa 30 $\mu\text{m}$*

Die Spanentstehung verläuft in der durch den vorangegangenen Schnitt vorverformten Oberflächenschicht. Das Werkzeug weist bereits einen gewissen Verschleißzustand mit Freiflächen- und Kolkverschleiß auf. An der Schneidenspitze hat sich eine winzige Aufbauschneide ausgebildet, die durch den gleichmäßigen Übergang zum Kolk kaum zu erkennen ist. Aufbauschneide und Kolk begünstigen den Spanablauf und bestimmen sicher auch die Spanform, die durch den Anfang einer engen Spirale gegeben ist. Einzelheiten der Spanentstehung und der Struktur im Span sind nur schwer zu erkennen, da durch die Verformungen kontrastreiche, hell-dunkel-markierte Werkstoffzonen entstehen, in denen sich einzelne Punkte beim Durchgang durch die Verformungszonen nicht verfolgen lassen. Die Verformungstiefe wird durch einen dunklen Bereich unter der nicht sichtbaren Schnittkante angedeutet. Bemerkenswert ist das Entstehen von Fließschichten in den sekundären Scherzonen. Während an der Freifläche nur vereinzelt Fließschichten auftreten, bilden sich an der Spanfläche in der Spanunterseite ausgeprägte Fließschichten, die sich an dem hell-dunkel-markierten Span als gleichmäßig helle Streifen abzeichnen.

### *Spanungsdicke etwa 60 $\mu\text{m}$*

1. Diese Aufnahme zeigt in eindrucksvoller Weise die Verformung einzelner Kristalle bei der Spanentstehung. Die eigentliche Scherverformung in der Spannungsdickenschicht setzt an der Werkstückoberfläche ein und verlagert sich mit fortschreitendem Zerspanungsvorgang in tiefer gelegene Schichten. Dabei wird deutlich, daß die Scherrichtung nicht mit dem oben definierten Scherwinkel übereinstimmt. Die Grenze der Scherzone zum Werkstück verläuft von der Schneidenspitze zunächst in Schnittrichtung und knickt dann in Scherrichtung zum Oberflächenübergangspunkt Werkstück-Span ab. Unmittelbar an der Schneiden-

spitze erscheint eine dunkle Zone, die auf Zugspannungen hindeutet. Diese Zugspannungen ergeben sich aus dem Trennvorgang an der scharfen Schneide, die die Kristalle ohne sichtbare Verformung abschert. Die Spanoberfläche erscheint als unregelmäßig ausgebildete Kontur und ist das Ergebnis des inhomogenen Verformungs- und Spannungszustandes eines kristallinen Werkstoffes. Durch die starke Verformung erscheinen die einzelnen Kristalle im Span als langgestreckte, dünne Lamellen, die dem Span eine bestimmte Struktur geben. Infolge der sekundären Scherung auf der Spanfläche werden die Strukturlinien zur Schneidenspitze hin abgelenkt. Die sekundäre Scherung ist nicht so ausgeprägt, daß sich eine Fließschicht an der Spanunterseite bildet. Verformungen außerhalb der Spanentstehungszone sind praktisch nicht zu erkennen, da sich die Lichtverhältnisse kaum verändern. Der Verformungsvorlauf wird aber durch die Stauchung der Spannungsdickenschicht vor der Scherzone angedeutet. Die Spanbildung erscheint mal kontinuierlich als Fließspan und mal diskontinuierlich durch einzelne Scherspanlamellen.

2. Im Gegensatz zur ersten Szene sind hier ausgeprägte Verformungen außerhalb der Scherzone durch Veränderungen der Lichtverhältnisse und starke Helligkeitskontraste zu beobachten. Das Schergebiet und die Zone unmittelbar davor erscheinen hell, während der weitere Verformungsvorlauf durch dunkle Zonen angedeutet wird. Da beide Szenen an einer Werkstückprobe aufgenommen wurden, sind die Unterschiede vermutlich auf eine Anisotropie im Werkstückstoff zurückzuführen. Unter Vernachlässigung der inhomogenen Spanoberflächenverformung kann dieser Zerspannungsvorgang als kontinuierliche Fließspanbildung bezeichnet werden.

### *Scherspanbildung bei großer Spannungsdicke*

1. Die Spannungsdicke liegt im Bereich von 70 bis 90  $\mu\text{m}$ . Durch die Stauchung ist der genaue Wert aus dem begrenzten Bildfeld nicht zu ermitteln. Während die vorangegangenen Szenen kontinuierliche Spanbildungsvorgänge zeigten, entstehen bei dieser größeren Spannungsdicke nur Scherspannelemente, die durchaus unterschiedliche Erscheinungsformen annehmen. Durch die Scherspanbildung entsteht im Spanablauf ein gewisser Stick-Slip-Effekt, der dadurch entsteht, daß sich Werkstoffteile, ähnlich der Aufbauschneidenbildung, von der Schneidenspitze ausgehend auf der Spanfläche festsetzen. Der nachfolgende Werkstoff wird gestaucht, beginnt zu fließen, und der Schneidenansatz wächst durch Ablagerung weiterer Schichten, bis der Widerstand des aufgestauchten Werkstoffes so groß wird, daß das Spanelement von der Spanfläche losbricht und vom Werkstück deutlich sichtbar abgeschert wird. Dieser Abschervorgang kann zu einer teilweisen oder vollständigen Trennung eines Spanelementes führen. Bemerkenswert ist die dunkle

Zone vor der Schneidenspitze, die die Werkstofftrennung anzeigt. Das Abscheren verläuft zunächst von der Schneide in Schnittrichtung, knickt dann unter einem Scherwinkel ab, während gleichzeitig die Trennung von der Oberfläche in ebenfalls diese Scherrichtung einsetzt. Ist die Scherverformung zu groß, kommt es zu einer vollständigen Trennung, andernfalls bleibt ein gewisser Werkstoffzusammenhalt in der Scherzone erhalten, so daß sich ein zusammenhängender Scherspan bildet, der durch die stark zerklüftete Spanoberseite gekennzeichnet ist. Die Struktur ist nicht wie beim Fließspan eindeutig ausgerichtet, sondern zeigt die ständig wechselnden Verformungsrichtungen und damit die verschiedenen Entstehungsstadien eines Scherspanelementes. Beim Vergleich mit der vorangegangenen Szene wird deutlich, daß der Übergang vom Fließ- zum Scherspan nicht abgegrenzt werden kann, sondern fließend ist. Eine Verformungstiefe wird durch dunklere Schatten im Gefüge angezeigt.

2. Hier ist die Spanungsdicke so groß, daß die Werkstück- und Spanoberfläche nicht mehr im Bildfeld erscheinen, so daß praktisch nur die Verformungsvorgänge in der Spanwurzel unmittelbar um den Schneidkeil beobachtet werden können. Die schon an Hand der 1. Aufnahme beschriebenen Vorgänge, Stick-Slip-Effekt, Bildung einer „toten Zone“, Abscheren usw., sind dabei noch wesentlich ausgeprägter. Die „tote Zone“ ist der zeitweilig bewegungslose Spanteil auf der Spanfläche. Sie nimmt bei diesem Zerspannungsvorgang ein beachtliches Ausmaß an und wächst noch über die Schneidenspitze hinaus, so daß ein Freiflächenspalt entsteht. Der Abschervorgang verläuft anfangs unter einem negativen Scherwinkel in das Werkstück hinein, bis sich das Spanelement von der Spanfläche löst und abzuwandern beginnt. Dabei schwenkt die Abscherrichtung durch die Schnittrichtung zu einem positiven Scherwinkel. Nach dem Abscheren tritt eine gewisse Entlastung ein, was an der unterschiedlichen Schwärzung der im Bildfeld sichtbaren Werkstückverformung zu beobachten ist. Durch das Abscheren unter einem positiven Scherwinkel ist am Werkstück eine Keilfläche entstanden, so daß beim Eindringen des Schneidkeils die Spanungsdicke langsam zunimmt und sich ein neues Spanelement bildet. Mit zunehmender Stauchung werden die in den Span übergehenden Werkstoffteile heller, und es zeichnet sich eine deutliche Struktur feiner, verformter Schichten ab, die auf extreme Verformungen schließen lassen. Es ist gut zu beobachten, daß sich kein Spanelement wie ein anderes bildet, d. h., daß der inhomogene, kristalline Werkstoffaufbau im betrachteten Bereich keine kontinuierlichen Vorgänge zuläßt.

## Literatur und Filmveröffentlichung

- [1] BACKER, W. R., E. R. MARSHALL and M. C. SHAW: The Size Effect in Metall Cutting. Trans. ASME 74 (1952), 61—72.
  - [2] DEGNER, W., H. LUTZE und E. SMEJKAL: Spanende Formung. Theorie — Berechnung — Richtwerte. VEB Verlag Technik, 3. Aufl., Berlin 1969.
  - [3] DOHMEN, H. G.: Zusammenfassung und Vergleich der zerspanungsmechanischen Theorien. Ind.-Anz. 87 (1965), 839—844 u. 1023—1032.
  - [4] GAPPISCH, M., und W. SCHILLING: Die Aufbauschneidenbildung bei der spanabhebenden Bearbeitung. Ind.-Anz. 87, 69 (1965), 1625—1634. Untersuchungen über die Aufbauschneidenbildung und deren Ursachen. Ind.-Anz. 87, 87 (1965), 2065—2074.
  - [5] HEYSE, E.: Über die Anwendung von Xenonlicht in der Mikrokine-matographie. Res. Film 4 (1963), 476—481.
  - [6] KHARE, M. K.: Untersuchung des Reibungsverhaltens zwischen Span und Spanfläche sowie Prüfung der Scherwinkelbeziehungen durch Zerspankraftmessung beim Schnittunterbrechungsvorgang. Diss. TU Berlin 1969.
  - [7] KÖHLER, G.: Modelltheoretische Betrachtungen und Untersuchungen mit Hilfe der Spanwurzel-Mikrografie als Beitrag zur Beschreibung des Verformungsvorganges bei der spanenden Bearbeitung metallischer Werkstoffe. Diss. TU Berlin 1968.
  - [8] SCHALLBROCH, H., und H. BETHMANN: Kurzprüfverfahren der Zerspanbarkeit. Teubner, Leipzig 1950.
  - [9] THOMSEN, E. G., J. T. LAPSLEY und R. C. GRASSI: Deformation Work Absorbed by the Workpiece During Metal Cutting. Trans. ASME 75 (1953), 591-603.
  - [10] VIERGEGE, G.: Zerspanung der Eisenwerkstoffe. Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1959.
  - [11] WARNECKE, G.: Untersuchungen zur Mikrogeometrie der Spanbildung metallischer Werkstoffe. Unveröffentlichte Forschungsarbeit am Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen TU Hannover.
  - [12] WIEBACH, H. G.: Beitrag zur Untersuchung des Zerspanungsvorganges mit Hilfe fotografischer Methoden. Werkstattstechnik 55, 3 (1965), 128—133.
  - [13] WIEBACH, H. G., und G. HUMMEL: Mikrokine-matografische Studien über das Zerspanen von Metallen. Res. Film 5 (1966), 501—509.
  - [14] ZOREV, N. N.: Metal Cutting Mechanics. Pergamon Press, Oxford 1966.
- 
- [15] WIEBACH, H. G.: Schnittvorgang im Feingefüge von Stahl bei kleinen Spandicken. Film B 885 des Inst. Wiss. Film, Göttingen 1965.

## **Angaben zum Film**

Das Filmdokument wurde 1970 zur Auswertung in Forschung und Hochschulunterricht veröffentlicht. Stummfilm, 16 mm, schwarzweiß, 63 m, 6 min (Vorführgeschw. 24 B/s).

Die Aufnahmen entstanden in den Jahren 1968 und 1969. Veröffentlichung aus dem Institut für Fertigungstechnik und Spanende Werkzeugmaschinen der Technischen Universität Hannover, Dr.-Ing. H.-G. WIEBACH, Dipl.-Ing. G. WARNECKE, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Ing. G. HUMMEL.

## **Inhalt des Films**

Der Film zeigt den Spanentstehungsvorgang beim Orthogonalschnitt an einer polierten und geätzten Werkstückprobe aus dem Automatenstahl 9S20. In dem überwiegend ferritischen Gefüge erscheint die Spanbildung hinsichtlich der primären und sekundären Scherverformung, der sichtbaren Werkstückverformung und der Spanerscheinungsformen im allgemeinen diskontinuierlich. Mit zunehmender Spannungsdicke wechselt der Spanbildungsvorgang vom ungleichförmigen Fließspan mit abnehmender Aufbauschneidewirkung zum ausgeprägten Scherspan.

## **Summary of the Film**

The film shows how chips are formed from a polished and etched testing workpiece made of free-cutting steel 9S20 during orthogonal cutting. In the predominantly ferritic structure the formation of chippings is generally irregular as regards primary and secondary deformation of shearing, visible deformation of workpiece and appearance of the chips. As the thickness of the chippings increases, the chip-formation changes, from the irregular flowing chip with decreasing formation of pick-up on the cutting edge to the pronounced shearing chip.

## **Résumé du Film**

Le film présente le processus de la formation de copeaux dans la coupe orthogonale d'un échantillon d'une pièce à usiner, polie et découpée, provenant de l'acier de décollement 9S20. Dans cette structure à caractère principalement ferritique, la formation de copeaux apparaît généralement discontinue en fonction de la déformation primaire et secondaire du cisaillement, de la déformation visible de la pièce à travailler et des différents aspects des copeaux produits. Plus la profondeur de coupe est grande, plus le processus de formation des copeaux se modifie, passant des copeaux écoulements irréguliers avec diminution de formation sur le tranchant aux copeaux franchement de cisaillement.