

2 Stand der Wissenschaft und Technik

State of the Art

Die Entwicklung von Simulationsmethoden für die Vorhersage von Werkzeugverschleiß erfordert die Kenntnis wissenschaftlicher Theorien auf dem Gebiet der Tribologie. Folglich wird eingangs dieses Kapitels das tribologische System „Zerspanung“ diskutiert. Im Anschluss wird der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich bestehender Modellierungsansätze zum Werkzeugverschleiß skizziert. Insbesondere die numerisch gestützte Vorhersage von Werkzeugverschleiß steht dabei im Fokus. Abschließend wird ein Fazit zu problemrelevanten wissenschaftlichen Arbeiten und Theorien gezogen, bevor im Weiteren die Zielsetzung und Vorgehensweise dieser Arbeit dargelegt werden.

2.1 Tribologisches System der Zerspanung

Tribological system of metal cutting

Tribologie bezeichnet die interdisziplinäre Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung [GESE02, S. 3]. Tribologie umfasst damit Reibungs- und Verschleißphänomene sowie Schmierung und Grenzflächenwechselwirkungen [ZUM 87a, S. 29; GESE02, S. 3]. Sowohl Reibung als auch Verschleiß resultieren aus Dissipationseffekten in örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten innerhalb der geometrischen Kontaktflächen in Abhängigkeit eines Beanspruchungskollektives sowie der Struktur des tribologischen Systems [CZIC10, S. 12 ff.]. Tribologische Systeme erfüllen stets einen Zweck und werden in der Technik zur Übertragung von Arbeit, Material oder Informationen eingesetzt [ZUM 87a, S. 31].

Verschleiß und Reibung sind keine Materialeigenschaften, sondern ergeben sich aus dem Zusammenwirken verschiedener Elemente in einem tribologischen System [CZIC10, S. 624; ZUM 87a, S. 30; BOBZ12, S. 24]. Tribologische Systeme setzen sich grundsätzlich aus vier Bestandteilen zusammen. Das verschleißrelevante Element des tribologischen Systems wird als Grundkörper bezeichnet. Als Gegenkörper wird das Element benannt, dessen Verschleiß für den Prozessverlauf nicht entscheidend ist. Zwischen Grund- und Gegenkörper befindet sich das Zwischenmedium. Das vierte Element eines tribologischen Systems ist das Umgebungsmedium, welches Grund- und Gegenkörper umgibt, vgl. Abbildung 2.1 [GESE02, S. 6].

Von außen wirkt ein Beanspruchungskollektiv auf ein tribologisches System ein, welches den Verlauf sowie die Dauer der mechanischen Belastung, der Relativgeschwindigkeit und vorherrschende Temperaturen umfasst. Verschleiß ergibt sich aus dem Zusammenwirken der Elemente eines tribologischen Systems in Abhängigkeit vom aufgeprägten Beanspruchungskollektiv. Das Tribosystem verändert sich laufend aufgrund der aufgetragenen Belastung. [BOBZ12, S. 28]

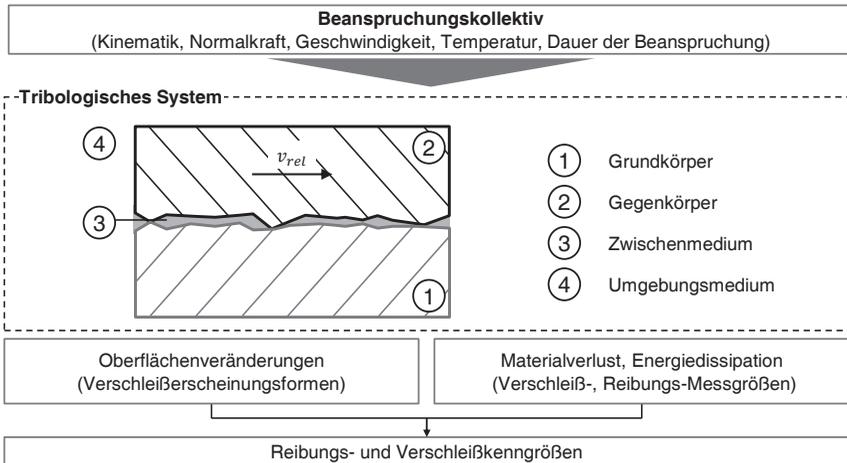
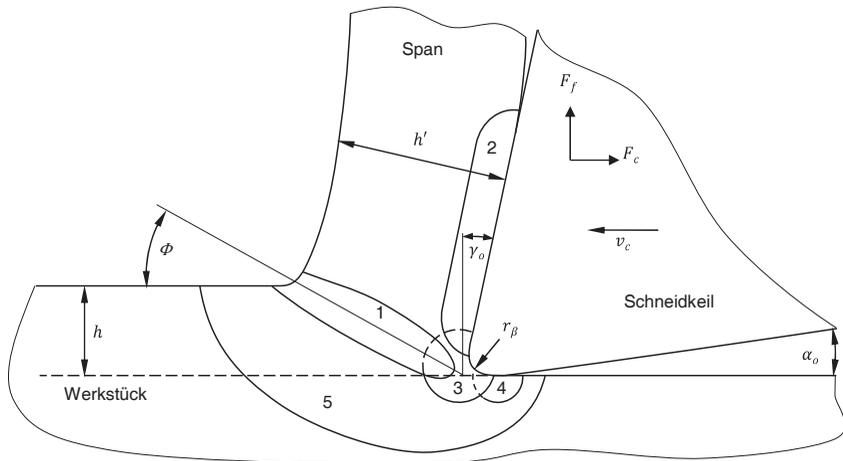


Abbildung 2.1: Tribologisches System nach GfT [GESE02, S. 6]

Tribological system according to GfT

Der Zerspanprozess repräsentiert ein offenes stoffdeterminiertes tribologisches System, in dem das Zerspanwerkzeug als Grundkörper fungiert [WEIN98, S. 10; CZIC10, S. 565; BOBZ12, S. 24]. Das Werkstück bzw. der Span stellt den Gegenkörper dar. Als Zwischenmedium treten je nach Kühlschmierstrategie und Bearbeitungsprozess verschiedene Medien auf. Das Umgebungsmedium beim Zerspanprozess ist in der Regel Luft. Das tribologische System Zerspannung ist als offen zu charakterisieren, da ein ständiger Stofffluss über die Systemgrenzen erfolgt. Der Zerspanprozess dient der Stofftrennung und nicht der Kraft-, Energie-, oder Signalübertragung (bspw. tribologische Systeme Bremse bzw. Relais) und ist somit stoffdeterminiert [CZIC10, S. 9; BOBZ12, S. 24].

Die Analyse des tribologischen Systems Zerspannung erfordert das Verständnis der Prozesse, die bei der Spanbildung ablaufen. Abbildung 2.2 skizziert den freien, orthogonalen Schnitt und fünf Wirkzonen, die nach WARNECKE maßgeblich relevant für die Spanentstehung sind [WARN74, S. 2]. Die Zone 1 wird als primäre Scherzone bezeichnet und ist dem Werkzeug in Schnittrichtung vorgelagert. Der Werkstoff wird in der primären Scherzone plastisch geschert und geht in den Span über. Hier erfährt der Werkstoff den Großteil der plastischen Verformung. Weitere plastische Deformationen des Werkstoffes erfolgen aufgrund von Reibungsvorgängen auf der Spanfläche (Zone 2), im Bereich des Schneidkantenradius (Zone 3) und der Freifläche (Zone 4). Die Trennung des Werkstoffes in Span und Werkstück erfolgt in der Zone 3. Die Zone 5 kennzeichnet die Verformungsvorlaufzone, in der lediglich geringe plastische Deformationen auftreten. [DENK11, S. 24; WARN74, S. 2]



h : Spanungsdicke	α_o : Orthogonal-Freiwinkel	Φ : Scherwinkel
h' : Spandicke	γ_o : Orthogonal-Spanwinkel	F_c : Schnittkraft
v_c : Schnittgeschwindigkeit	r_β : Schneidkantenverrundung	F_f : Vorschubkraft

Abbildung 2.2: Wirkzonen in der Spanentstehung nach WARNECKE [WARN74, S. 2]

Deformation zones in chip formation according to WARNECKE

Bei der Analyse des tribologischen Systems ist zwischen zweierlei Kontaktzonen zu unterscheiden, die durch unterschiedliche Bedingungen gekennzeichnet sind [ASTA06, S. 124]. Zum einen bildet die bei der Zerspanung neu erzeugte Werkstückoberfläche mit der Freifläche des Zerspanwerkzeuges eine Kontaktzone. Zum anderen ergibt sich eine zweite Kontaktzone aus der Paarung von Span und Spanfläche des Werkzeuges. Beide Kontaktzonen haben gemein, dass hohe Kontaktspannungen sowie Temperaturen vorliegen, dass die Oberfläche des Gegenkörpers neu erzeugt wurde und in statu nascendi chemisch hoch reaktiv ist [ASTA06, S. 124]. Weiterhin treten in beiden Kontaktzonen hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen Grund- und Gegenkörper auf. Während an der Freifläche die Relativgeschwindigkeit der Schnittgeschwindigkeit entspricht, hängt die Ablaufgeschwindigkeit des Spans über der Spanfläche von einigen Parametern wie dem Werkstoff, dem Schneidstoff, der Geometrie des Werkzeugs und den Prozessparametern ab, ist aber grundsätzlich kleiner als die Schnittgeschwindigkeit.

Die Spannungen, welche am Zerspanwerkzeug örtlich vorherrschen, können experimentell nicht präzise bestimmt werden. Einen Überblick über die experimentellen Untersuchungsmethoden gibt TRENT [TREN88, S. 35 ff.]. Zwar kann die integrale Zerspankraft mittels piezoelektrischer Sensoren im Versuch gemessen werden, jedoch ist die Kontaktfläche als Bezugsgröße nicht bekannt bzw. kann nur ungenau erfasst werden. Die Angabe von mittleren Spannungen über das Abschätzen der Kontaktfläche ist möglich, jedoch konnte mit Split-Tool Versuchen nachgewiesen werden, dass die Spannungsverteilung an der Spanfläche nicht gleichmäßig ist. [TREN88]

ZOREV entwickelte ein Modell zur Beschreibung der Kontaktspannungen an der Spanfläche von Zerspanwerkzeugen, vgl. Abbildung 2.3. Er untersuchte den Spanbildungsprozess anhand von Spanwurzeln und stellte fest, dass der Kontaktbereich zwischen Span und Spanfläche in zwei Zonen zu unterteilen ist, einen plastischen und einen elastischen Teil. Im plastischen Teil ($0 \leq x \leq S$) sind die Normalspannungen zwischen Span und Werkzeug sehr hoch. Durch diese hohen Kontaktnormalspannungen werden die übertragbaren Tangentialspannungen durch die Schubfließspannung des Werkstoffes begrenzt. Daher kommt es zu einem internen Abscheren des Werkstoffes und keiner konstanten Relativbewegung zwischen Span und Werkzeug. [ZORE67; TREN88, S. 31 ff.]

Mit zunehmendem Abstand von der Schneidkante ($S < x \leq B$) fällt die Normalspannung σ_N ab. Im Bereich hinter dem Punkt S nimmt sie einen Wert an, bei dem ein Abgleiten des Spans über die Spanfläche erfolgt. Am Punkt B hebt der Span von der Spanfläche ab. [ZORE67]

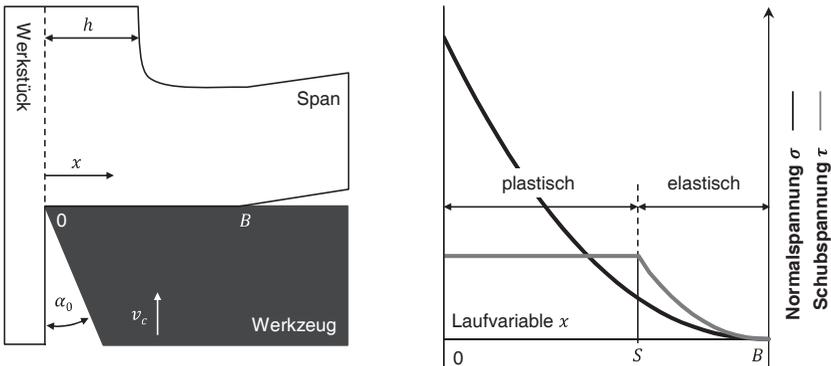


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Kontaktspannungsverteilung an der Spanfläche nach ZOREV [ZORE67, S. 345]

Schematic representation of the distribution of contact stress at the rake face according to ZOREV

Der Kontakt zwischen Freifläche und Werkstückoberfläche entsteht durch die elastische Ausdehnung bzw. Rückfederung des zerspannten Werkstoffes [ASTA06, S. 179]. Da die Vorschubgeschwindigkeit v_f gegenüber der Schnittgeschwindigkeit v_c zumeist vernachlässigbar klein ist, kann eine Relativgeschwindigkeit angenommen werden, die der Schnittgeschwindigkeit entspricht. Im Gegensatz zu den Bedingungen an der Spanfläche liegt an der Freifläche kein plastischer Kontakt vor [ASTA06, S. 182].

In den Wirkzonen wird der überwiegende Teil der eingebrachten mechanischen Energie in thermische Energie umgewandelt [KLOC07, S. 65; PULS15, S. 9]. Dies geschieht zum einen durch die plastische Verformung des Werkstoffes, zum anderen durch die auftretenden Reibvorgänge. Der größte Anteil der thermischen Energie wird durch den Span aufgenommen und so aus der Zerspanzone transportiert [KLOC07, S. 65 f.]. Weitere Anteile der thermischen Energie fließen in das Werkstück, in das

Werkzeug und in die umgebende Luft. Die Aufteilung der thermischen Energie in die genannten Wärmeströme \dot{Q}_i ergibt sich aus den Wärmeleitfähigkeiten und -kapazitäten von Werkstoff und Schneidstoff sowie den mechanischen Werkstoffeigenschaften [PULS15, S. 33 ff.]. Im quasi-stationären Drehprozess entsteht ein thermisches Gleichgewicht aus zugeführter und abgeführter thermischer Energie. Die höchsten Temperaturen ergeben sich zwischen Spanfläche und Span. Die Temperaturen an der Freifläche des Werkzeuges liegen grundsätzlich ca. 200-300 K niedriger [KLOC07, S. 67]. Die thermische Belastung hat, neben der mechanischen Belastung, einen entscheidenden Einfluss auf den Verschleiß von Zerspanwerkzeuge sowie auf den Anteil der auftretenden Verschleißmechanismen [COOK69, S. 5 ff.; CZIC10, S. 565 ff.].

Die Unterschiede der tribologischen Bedingungen an den beiden skizzierten Kontaktzonen bedingen das unterschiedliche Verschleißverhalten von Zerspanwerkzeugen an der Span- und Freifläche. Insbesondere die deutlich höhere Temperatur an der Spanfläche führt dazu, dass thermisch induzierte Verschleißvorgängen eine größere Bedeutung beigemessen wird. An der Freifläche kommt dagegen zum Tragen, dass die Relativgeschwindigkeiten – in Abhängigkeit von der Spanstauchung und dem Ort auf der Spanfläche – um ein Vielfaches höher liegen können [ASTA06, S. 180].

Üblicherweise wird in der Tribologie bei kontaktierenden Oberflächen davon ausgegangen, dass infolge der Mikrogeometrie der Oberflächen Berührungen nur in diskreten Mikrokontakten auftreten [CZIC10, S. 38]. Unterschieden wird folglich zwischen einer nominellen Kontaktfläche A_0 und einer kleineren realen Kontaktfläche A_r , die sich aus der Summe der Mikrokontaktflächen $A_{r,i}$ zusammensetzt. Für die Reibungs- und Verschleißprozesse ist die reale Kontaktfläche ausschlaggebend [BOBZ12, S. 28; CZIC10, S 117].

BOWDEN und TABOR entwickelten ein Modell, das grundlegende Mechanismen kontaktierender Oberflächen behandelt [BOWD50]. Sie erkannten erstmals die Bedeutung der stets nicht-idealen Oberflächentopografie zweier in Kontakt stehender Körper. BOWDEN und TABOR gingen davon aus, dass der Kontakt zwischen zwei Körpern nur an den kontaktierenden Rauheitsspitzen zustande kommt und die Summe dieser Mikrokontakte $A_{r,i}$ die realen Kontaktfläche A_r bildet, vgl. Formel (1). Die reale Kontaktfläche A_r ist dabei weitaus kleiner als die nominelle (makroskopische) Kontaktfläche A_0 .

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_{r,i} \quad (1)$$

Folglich werden Kräfte zwischen den kontaktierenden Körpern über die reale Kontaktfläche A_r übertragen. Die Mikrokontakte verformen sich infolge einer Normalbelastung F_N plastisch, bis die folgende Gleichgewichtsbedingung gegeben ist und die reale Kontaktfläche die Belastung trägt:

$$A_r = \frac{F_N}{\sigma_F} \quad (2)$$

Unter der Annahme, dass die Druckfließgrenze σ_F näherungsweise konstant ist, gilt damit ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Normalbelastung und der realen Kontaktfläche zweier kontaktierender Körper:

$$A_r \sim F_N \quad (3)$$

In einigen Veröffentlichungen ersetzt die Härte H des weicheren Körpers die Druckfließgrenze σ_F in Gleichung (2) [ZUM 87a; BOWD50; RABI95].

Der Zusammenhang nach Gleichung (3) ist die Grundlage für viele Ansätze in der Tribologie, unter anderem auch der im folgenden Abschnitt diskutierten Reibmodelle. Die thermomechanischen Bedingungen in der Zerspanung zwischen Spanfläche und Span sind so gravierend, dass einige Forscher von vollständigem Kontakt, also der Gleichheit von A_r und A_0 ausgehen [TREN88; CHIL99; ASTA06, S. 126]. Dieser Argumentation folgend, besitzt Gleichung (3) nur Gültigkeit für den elastischen Kontaktbereich an der Spanfläche und für die Kontaktzone Freifläche/Werkstück.

2.1.1 Reibung

Friction

In tribologischen Systemen entsteht äußere Reibung als Wechselwirkung zwischen zwei sich berührenden Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen [GESE02].

Die ersten systematischen Untersuchungen zur Reibung gehen auf LEONARDO DA VINCI (1452-1519) zurück [DOWS79, S. 96]. Bereits DA VINCI erkannte die zwei grundlegenden Zusammenhänge, die nahezu 200 Jahre später durch AMONTON postuliert wurden und heute als AMONTON'S Gesetze bekannt sind [MACC56, S. 615]:

- „Friction produces double the amount of effort if the weight be doubled.“
- „The friction made by the same weight will be of equal resistance at the beginning of the movement although the contact may be of different breadths or lengths.“

AMONTON postulierte analog dazu, dass der Reibungswiderstand proportional zur Normalbelastung ist und dass der Reibungswiderstand unabhängig von der (nominell) kontaktierenden Oberfläche ist [AMON06].

- Die Reibungskraft ist direkt proportional zu der aufgebrachtten Normalkraft.
- Die Reibungskraft ist unabhängig von der scheinbaren Kontaktfläche.

COULOMB bestätigte experimentell die Erkenntnisse DA VINCIS und AMONTONS und stellt darüber hinaus fest, dass die dynamische Reibung nahezu unabhängig ist von der Relativgeschwindigkeit der Reibpartner. COULOMB formulierte zunächst die Hypothese, dass Reibung seine Ursache in molekularer Haftung der Oberflächen hat, verwarf sie allerdings ob der Tatsache, dass dies scheinbar ein Widerspruch zu der Erkenntnis war, dass Reibung unabhängig von der Kontaktfläche ist. Diesen Widerspruch konnten erst BOWDEN und TABOR durch die oben skizzierten Arbeiten auflösen.