

Naturgesetze sind nicht vom Menschen geschaffen Trotzdem darf der Mensch damit schaffen

Die Natur ist zwar sehr komplex aufgebaut. Die Vorgänge, welche in ihr ablaufen, folgen dagegen verhältnismäßig einfachen Gesetzmäßigkeiten, den sogenannten Naturgesetzen. Den Naturwissenschaften obliegt es, die Struktur dieser Gesetze zu erkennen, ihren Ablauf analytisch darzustellen und damit deren Nutzung für den Anwender bereitzustellen. Hierzu können die Gesetze der Ähnlichkeitsmechanik genutzt werden.

Die Ähnlichkeitsmechanik ist ein Wissenschaftszweig, an den sich die Naturwissenschaft erst im 19. Jahrhundert herangetastet hat. Erst zu diesem Zeitpunkt hat man erkannt, worin die Einfachheit der Naturgesetze begründet ist. Anders als der Mensch kennt nämlich die Natur keine Maße. Prozesse in der Natur laufen sozusagen dimensionslos nach Ähnlichkeitsprinzipien ab.

Der Ablauf eines jeden am Prozess beteiligten physikalischen Vorgangs lässt sich durch eine dimensionslose Kennzahl beschreiben. Sind mehrere Vorgänge am Ablauf beteiligt, bestimmen entsprechend viele dieser Kennzahlen den Prozess. Die dimensionslosen Kennzahlen bestehen jeweils aus Potenzprodukten mehrerer Grundgrößen (vielfach drei). Ihren Aufbau erhält man durch die sogenannte Dimensionsanalyse. Die Kennzahlen für die einzelnen physikalischen Vorgänge sind nach den jeweiligen Entdeckern benannt.

Die Ähnlichkeitsmechanik postuliert: Prozesse sind dann ähnlich, wenn ihr Ablauf von gleichen physikalischen Vorgängen bestimmt wird und die Größe der dadurch vorgegebenen Kennzahlen gleich ist. Die Grundvoraussetzung für einen ähnlich ablaufenden Prozess bildet damit die Beteiligung gleichartiger physikalischer Vorgänge. Ist diese Voraussetzung gegeben, lassen sich darüber hinaus auch für solche Prozesse, welche unterschiedlich große Kennzahlen aufweisen, Vergleiche anstellen. Dazu bedarf es der Ableitung entsprechender Modellgesetze.

Hierzu ist es erforderlich, Messwerte, welche für den Ablauf des zu untersuchenden Prozesses ermittelt wurden, in Abhängigkeit von den dimensionslosen Kennzahlen grafisch aufzutragen. Dabei erhält man einfache Kurvenverläufe, deren Trendlinien die entsprechenden Gleichungen liefern. Mit diesen Gleichungen lassen sich Vorgänge vorausberechnen, welche bei ähnlichen Prozessen zu erwarten sind.

Dadurch dass eine dimensionslose Kennzahl aus mehreren Grundgrößen gebildet wird, enthalten Modellgesetze merklich weniger Parameter als die Gleichungen, welche mit Hilfe der Grundgrößen aufgestellt werden und liefern somit wesentlich besser überschaubare Zusammenhänge. Diesen Vorteil versuchte bereits 1954 Kronenberg für die Ableitung von Modellgesetzen für die Zerspannung zu nutzen. Er bemerkt hierzu. „Betriebsingenieure sind nur wenig vertraut mit der Dimensionsanalyse, weil frühere Veröffentlichungen sich nicht mit Zerspanungsproblemen sondern mit Problemen befassen, die für Wärmekraftingenieure von Interesse sind. Es besteht jedoch kein Grund, diese bequeme Methode nicht auch für die Zerspannung anzuwenden.“

Durch einen Fehler beim Ansatz der Dimensionsanalyse konnte Kronenberg weder die zutreffenden dimensionslosen Kennzahlen ermitteln noch die dazugehörigen Modellgesetze aufstellen. Hier liegt einer der Gründe, dass bis heute in der Zerspanung dimensionsbehafet gearbeitet wird. Die Messergebnisse, welche bei Versuchen zur Zerspanung gewonnen werden, werden daher nach wie vor dimensionsbehafet dargestellt.

Interessant ist dabei allerdings, dass aussagekräftige Versuchsergebnisse im Hinblick auf Ähnlichkeitsbetrachtungen seit mehr als einem halben Jahrhundert vorliegen. Hierzu zählen die Arbeiten von Lierath [1] und Meyer [2]. Beide Forscher haben Schnittkräfte in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit beim Drehen untersucht.

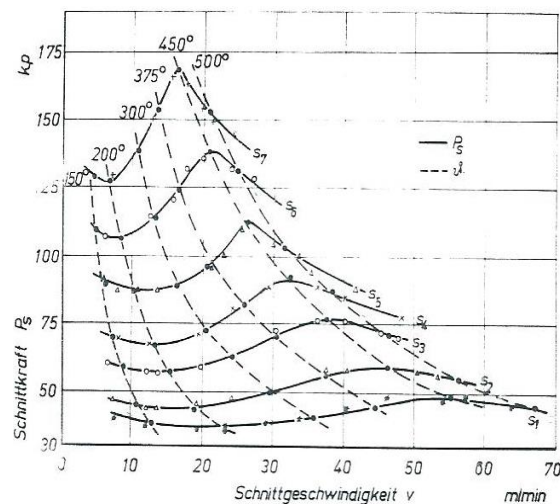


Abb. 1: Schnittkraft in Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit, Lierath

Lierath hat bei seinen Versuchen neben den Schnittkräften für unterschiedliche Vorschubwerte zusätzlich die Temperatur in der Nähe der Spanfläche gemessen.

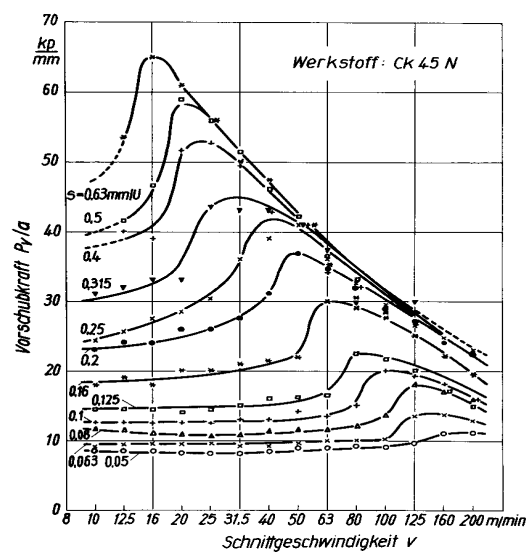


Abb. 2: Vorschubkraft in Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit, Meyer

Die Kurven für konstante Werte des Vorschubs weisen bei beiden Versuchen ähnlichen Verlauf auf. Aus der Auftragung in Abb. 1 geht hervor, dass die Temperatur im Kontaktbereich Spanunterseite / Spanfläche die Steigung des jeweiligen Kurvenverlaufs bestimmt. Eingehende Untersuchungen haben gezeigt, dass die Temperatur im Kontaktbereich die Reibungsverhältnisse bestimmt, unter denen der Span über die Spanfläche ausgeschoben wird.

Bei niedrigen Temperaturen besteht Festkörperreibung unter hohem Druck. Um den Span über die Spanfläche auszuschieben müssen die Kuppen der Mikrorauheit der Spanunterseite abgeschert werden. Die abgescherten Partikel lagern sich in den Mulden der Spanunterseite an und werden mit dem Span abtransportiert. Mit steigender Temperatur sinkt die Schubfestigkeit. Die Mikrorauheiten der Spanunterseite dringen tiefer in die Mikrotopologie der Spanfläche ein. Demzufolge wird mehr Material von den Kuppen abgeschert. Wird das Volumen der abgescherten Partikel so groß, dass die Mulden der Spanunterseite „überfüllt“ sind, lagert sich der Überschuss in den Mulden der Mikrostruktur der Spanfläche an und bildet Aufbauschneiden. Bei entsprechend hoher Temperatur schmilzt eine dünne Schicht der Spanunterseite und führt zur Mischreibung im Kontaktbereich Spanunterseite / Spanfläche. Der Span kann dadurch mit weniger Energie über die Spanfläche ausgeschoben werden.

Die Temperatur teilt somit den gesamten Bereich der Spanbildung in drei Bereiche mit unterschiedlichen Reibungsbedingungen auf. Trägt man demnach die Messwerte von Abb. 2 über der Temperatur auf, erhält man folgende Darstellung.

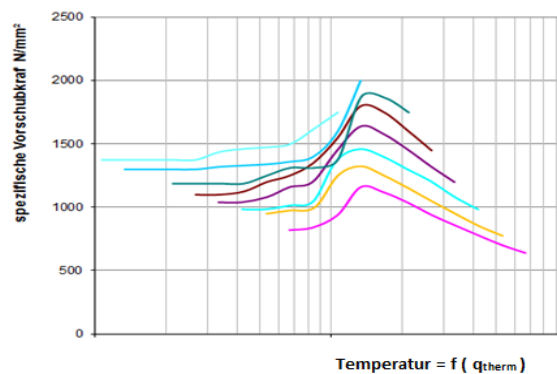


Abb. 3: spezifische Vorschubkraft in Abhängigkeit von Temperatur

Für die Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik zur Ableitung von Modellgesetzen für die Zerspanung bedeutet dies, dass die Grundvoraussetzung für einen ähnlichen Ablauf der Spanbildung über den gesamten Bereich nicht gegeben ist. Modellgesetze können damit jeweils nur in einem Bereich mit gleichem Reibungsverhalten abgeleitet werden.

Da die heute eingesetzten Werkzeuge auch bei hohen Temperaturen entsprechende Verschleißresistenz aufweisen, interessiert für die Auslegung wirtschaftlicher Zerspanprozesse ausschließlich der Bereich rechts vom Maximum in Abb. 3. Die erste Aufgabe bei der Ableitung von Modellgesetzen gilt damit der Ermittlung der Lage des Kraftmaximums in Abhängigkeit von den Schnittdaten.

Die Temperatur im Kontaktbereich Spanunterseite / Spanfläche ist davon abhängig wie groß der Anteil der Reibungswärme ist, welcher in den Span fließt und somit vom Span abtransportiert wird.

Beim kontinuierlich ablaufenden Span stellt sich ein stationäres Temperaturfeld im Bereich der Spanbildung ein. In Abb. 4 ist ein berechnetes Beispiel für eine zweidimensionale Wärmeausbreitung im Bereich der Spanbildung dargestellt.

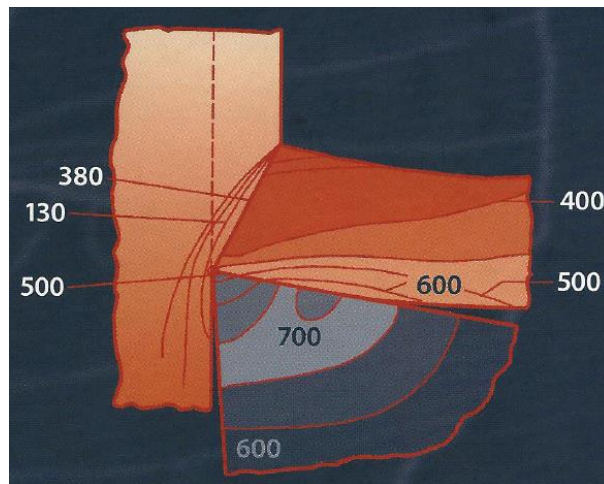


Abb. 4: Berechnetes Temperaturfeld im Bereich der Spanbildung, Klocke [3]

An der Unterseite des Spans liegen die höchsten Werte des Temperaturfeldes. Hier liegen die Isothermen nahe beieinander. Normal zur Spanfläche in Richtung zum oberen freien Rand des Spans hin werden die Abstände merklich größer. Das bedeutet, dass die Reibungswärme, welche durch das Ausschieben des Spans über die Spanfläche entsteht, im Kontaktbereich nicht die gesamte Dicke des Spans erfassen kann.

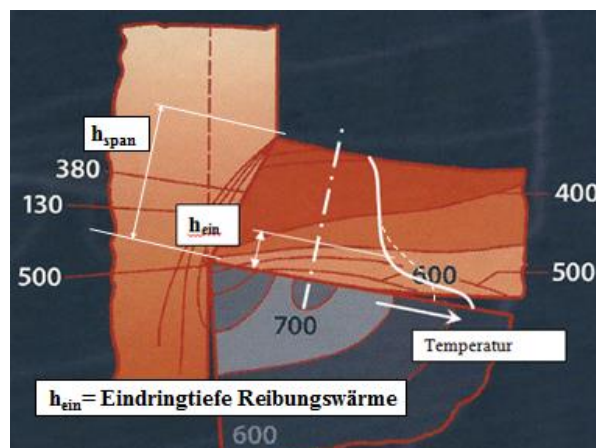


Abb. 5: Temperaturverteilung über die Spandicke

Wie in Abb. 5 dargestellt, dringt die Reibungswärme an der Stelle der höchsten Temperatur nur um den Betrag h_{ein} in den Span ein. Bei größerer Eindringtiefe ist die Temperatur auf der Spanfläche niedriger als bei geringerer Eindringtiefe (siehe gestrichelte und ausgezogene Kurve des Temperaturverlaufs).

Ein Maß für die Temperatur ist die Größe des thermischen Geschwindigkeitsverhältnisses q_{therm} . Dieses Verhältnis ist der Quotient aus der Geschwindigkeit, mit welcher der Span über die Spanfläche ausgeschoben wird, und der Geschwindigkeit, mit der sich die Isothermen senkrecht dazu in den Span hinein ausbreiten. Bei schwer spanbaren Werkstoffen breiten sich die Isothermen langsamer aus als bei leicht spanbaren.

Der Bereich mit wirtschaftlicher Spanbildung liegt damit, unabhängig von der Spanbarkeit des zu bearbeitenden Werkstoffs, oberhalb eines konstanten Grenzwertes für das thermische Geschwindigkeitsverhältnis. Für diesen Bereich lassen sich Modellgesetze ableiten.

Hierzu ist zunächst die geometrische Ähnlichkeit in der Hauptebene zu bestimmen. Die Hauptebene liegt zum einen in Richtung der Schnittgeschwindigkeit und zum anderen in der Ausschubrichtung des Spans. Man erhält den dimensionslosen Aufbau des Bereiches der Spanbildung in dieser Ebene, in dem man alle Längenmaße durch die Spanndicke h dividiert.

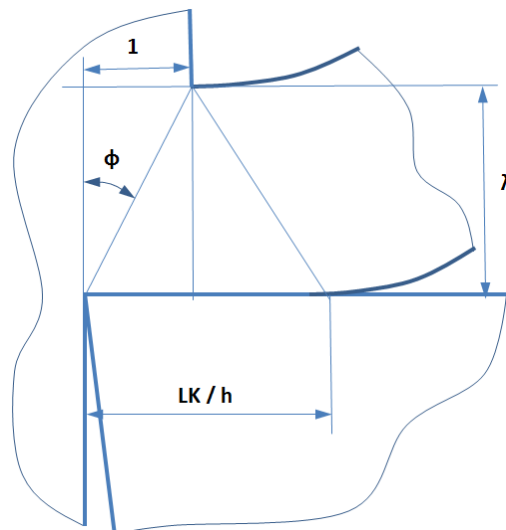


Abb. 6: Bereich der Spanbildung, dimensionslos

Der in Abb. 6 dargestellte Bereich ist durch die dimensionslosen Abmessungen Spanstauchung λ und bezogene Länge der Kontaktzone LK/h bestimmt (Spanwinkel γ gleich 0°). Winkel erhalten bei dieser Transformation ihre Größe bei.

Die Größen der dimensionslosen Längen werden von der Art des Ausschubens des Spans über die Spanfläche bestimmt. Im Kontaktbereich herrscht Mischreibung. Die gemittelte Normalspannung in diesem Bereich entspricht der Quetschgrenze des abzuspännenden Materials. Dieser Wert ist abhängig vom zu zerspannenden Material und von den mechanischen sowie thermischen Eigenschaften der Schneide jedoch unabhängig von der Temperatur im Kontaktbereich. Die Schubspannung im Kontaktbereich hängt hingegen von dieser Temperatur ab.

Die Größe der Spanstauchung lässt sich anhand der Schnittkräfte bestimmen. Dieser Zusammenhang kann aus der Darstellung in Abb. 7 abgeleitet werden.

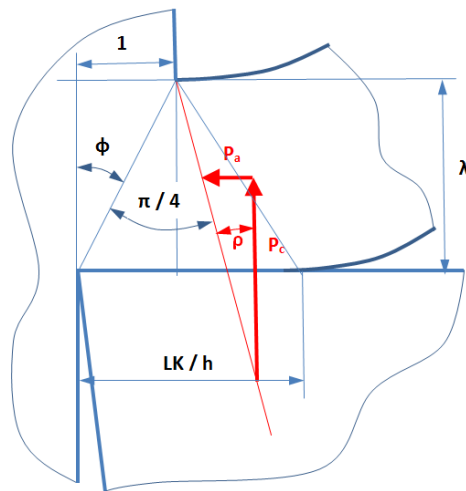


Abb. 7: Skizze zur Bestimmung der Größe der Spanstauchung

Die grün eingezeichnete Gerade ist die Schergerade. Hier herrschen die größten Schubspannungen. Im Normalfall liegt die Gerade für die maximalen Normalspannungen hierzu um 45° versetzt. Die entsprechende Gerade ist rot eingezeichnet und fällt zusammen mit der Richtung der Resultierenden von Schnitt- und Ausschubkraft. Die Ausschubkraft ist dabei die Resultierende von Vorschub- und Passivkraft. Die Spanstauchung ergibt sich somit als Funktion des Scherwinkels $\phi = \pi/4 - \rho$.

Die Größe der dimensionslosen Kontaktlänge hängt wie folgt von der Temperatur ab.

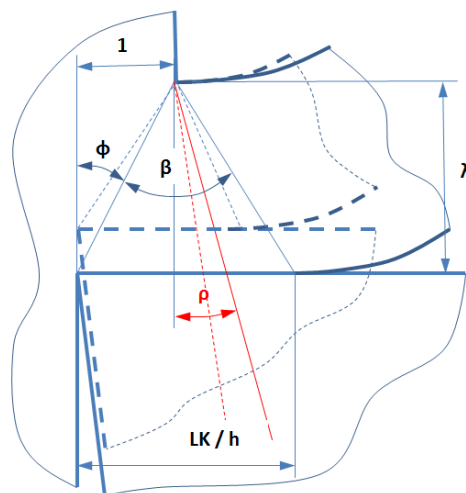


Abb. 8: Skizze zur Bestimmung der Größe der dimensionslosen Kontaktlänge

Erhöht man den Wert für das thermische Geschwindigkeitsverhältnis, so steigt die Temperatur. Dadurch sinkt die Schubspannung im Kontaktbereich. Demzufolge verringert sich der Wert für den Winkel ρ . Die Auswertung der Messergebnisse von Meyer hat gezeigt, dass sich dadurch der gesamte Bereich der Spanbildung unter Beibehaltung der Größe des Winkels β um den entsprechenden Winkel dreht. Die Abmessungen des dimensionslosen Kontaktbereichs der Spanbildung lassen sich damit konstruieren wenn die Werte für die Winkel ρ und β bekannt sind.

Für die Untersuchungen zur Abhängigkeit des Verschleißes von den Schnittdaten wurden Schnittdatenempfehlungen der Fa. Krupp Widia [4] herangezogen. Diese Zusammenstellung enthält für verschieden Hartmetallschneiden Werte für Schnittgeschwindigkeiten, welche eine Standzeit von 15 Minuten ergeben. Die Schnittgeschwindigkeiten sind jeweils in Abhängigkeit von der Spanbarkeit der Stahlart, der Spanungsdicke und der Spanungsbreite tabellarisch aufgelistet.

Diese Werte wurden in Abhängigkeit des thermischen Geschwindigkeitsverhältnisses aufgetragen und die Abhängigkeit von weiteren dimensionslosen Größen mit folgendem Ergebnis untersucht.

Die Verschleißbelastung einer Schneide ergibt sich aus der Fourier Zahl Fo der Spanbildung. Diese Fourier Zahl hängt ab von dem thermischen Geschwindigkeitsverhältnis und der Spanstauchung. Die Verschleißgeschwindigkeit hängt ab vom Verhältnis Fourier Zahl der Belastung zur Fourier Zahl der Verschleißresistenz einer Schneide. Letztere lässt sich dabei für die Bearbeitung aller Stähle durch eine konstante Zahl beschreiben.

Die Untersuchung hat damit aufgezeigt, dass bezüglich der Geometrie der Spanbildung der Einfluss der dimensionslosen Länge LB / h für die Ableitung des Verschleißverhaltens nicht entscheidend ist. Damit ist letztlich ausschließlich der Quotient von Ausschub- und Schnittkraft hierfür mitbestimmend.

Für eine vorgegebene Schneide lassen sich damit die Ergebnisse der Ähnlichkeitsbetrachtungen in einem Diagramm darstellen, welches für die Bearbeitung aller Stähle sowie aller Eingriffsbedingungen des Werkzeugs in das Werkstück Gültigkeit besitzt und damit wesentlich einfacher und allgemeiner anwendbar ist als die Taylor Gleichung.

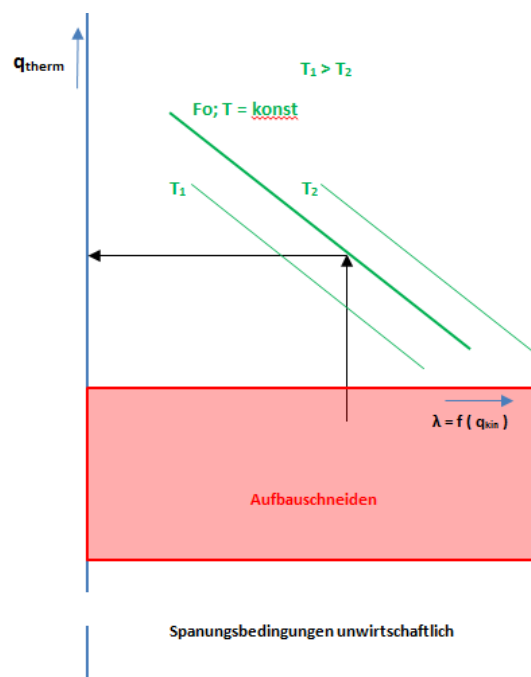


Abb. 9: Standzeitdiagramm für Auslegung wirtschaftlicher Zerspansprozesse

Damit ist gezeigt, dass sich auch für den komplexen Fall der Spanbildung und dem mit ihr einhergehenden Verschleiß einfach darstellbare Zusammenhänge aufzeigen lassen, wenn man die Gesetze der Ähnlichkeitsmechanik nutzt.

Wichtiger als dieser Nachweis ist jedoch die Bedeutung für die Wirtschaft. Eine wissenschaftliche Studie hierzu hat aufgezeigt, dass die Rate der Kostenreduzierung bis in den hohen zweistelligen Bereich hineinreicht. Diese Verbesserung wird dadurch erreicht, dass ausschließlich im wirtschaftlich nutzbaren Bereich der Spanbildung gearbeitet wird und damit sowohl Bearbeitungszeiten als auch Werkzeugverschleiß verringert wird.

Die Umsetzung der wissenschaftlichen Darstellung in praktisch anwendbare Tools obliegt der Firma Cuttingspeed GmbH, www.cuttingspeed.com. Diese Tools liegen nun vor und können als Lizenzprodukt vom Zerspaner eingesetzt werden.

Literatur

- 1 Lierath F.: Zusammenhang zwischen der mechanischen und thermischen Belastung und dem Verschleiß an spanenden Werkzeugen aus Schnellarbeitsstahl. Dissertation 1969
- 2 Meyer K. F.: Vorschub- und Rückkräfte beim Drehen mit Hartmetallwerkzeugen, Dissertation 1963
- 3 Klocke F. König W.: Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren, Springer 2007
- 4 Krupp Widia: Richtwerte für das Drehen von Eisenwerkstoffen