

4 Verfahren

4.1 Schneiden

Das Laserstrahlschneiden ist bis heute das in der Industrie am weitesten verbreitete laserbasierte Fertigungsverfahren. Ein Grund dafür mag in seiner relativ einfachen *technischen* Realisierung liegen; vor allem jedoch ist es die ihm eigene außerordentliche Flexibilität, die es Eingang in so viele Branchen hat finden lassen: Mit dem denkbar einfachsten Schneidwerkzeug, wie es ein fokussierter Laserstrahl darstellt, lässt sich in nahezu jedem Material praktisch jede beliebige Kontur erzeugen. Der Informationsgehalt der herzustellenden Form ist also nicht im Werkzeug, sondern in dessen Bahnführung bzw. Steuerung enthalten, während die verschiedenen Varianten des Verfahrens eine Adaption an die Stoffeigenschaften bei gleichzeitiger Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeits- und Qualitätsmerkmalen erlauben. Die Vorteile gegenüber anderen thermischen Verfahren liegen in der sehr viel höheren Schneidgeschwindigkeit, der größeren Maßhaltigkeit und Formtreue und in der geringeren Abmessung von Wärmeeinflusszonen (WEZ), in welchen chemische und metallurgische Veränderungen auftreten. Beim Trennen von biegeschlaffen Teilen aus Kunststoffen, Textilien oder dünnen Metallfolien kann auch die kraftfreie Wirkung des Schneidwerkzeugs Laserstrahl als positives Kriterium gelten.

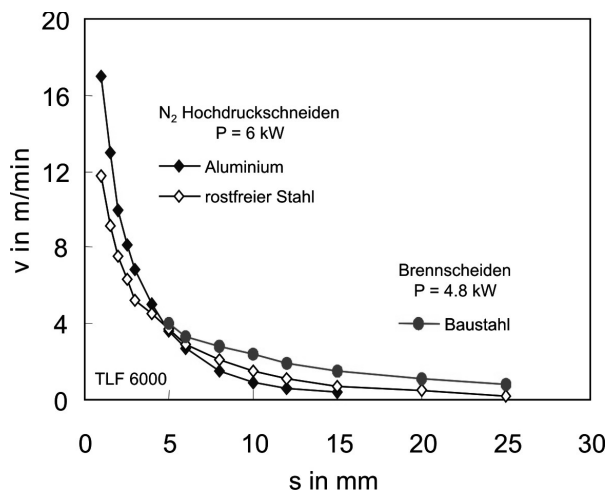


Bild 4.1 Zusammenhang von Schneidgeschwindigkeit und Blechdicke bei konstanter Laserleistung; CO₂-Laser mit zirkularer Polarisation [Quelle: TRUMPF]: Die gezeigten Daten sind produktionsrelevante Richtwerte eines robusten Prozesses, der auch bei gewissen Schwankungen der Prozessparameter, so z. B. der Fokusslage innerhalb eines Millimeters, noch eine gute Schnittqualität liefert. Die Geschwindigkeiten liegen damit unterhalb des maximal erzielbaren Werts der so genannten Trenngeschwindigkeit.

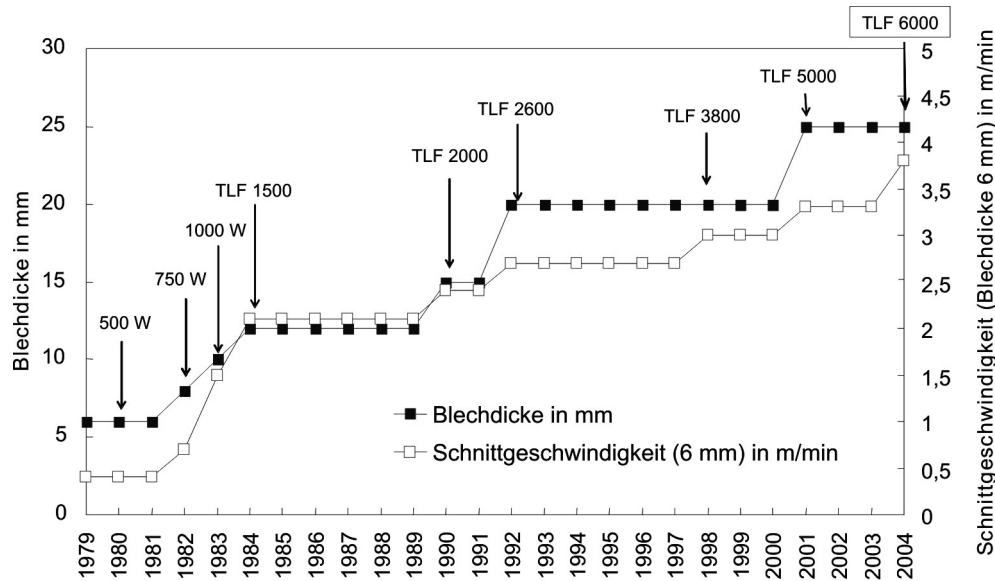


Bild 4.2 Beispiel für die historische Entwicklung des Leistungsniveaus von CO₂-Lasern zum Schneiden und damit ermöglichten Geschwindigkeitssteigerungen [Quelle: TRUMPF].

Im Rahmen dieser Abhandlung steht der *Prozess* im Vordergrund; von einem Eingehen auf beim Schneiden besonders wichtige steuerungstechnische Aspekte muss abgesehen werden. Eine weitere Einschränkung erfolgt bezüglich der Werkstoffe, von denen hier nur metallische betrachtet seien.

Was als industrieller Standard von Leistungsdaten für das Schneiden von Stahl und Aluminium mit CO₂-Lasern, dem überwiegend hierfür benutzten Lasertyp, gelten darf, ist in Bild 4.1 exemplarisch wiedergegeben. In Ergänzung dazu dokumentiert Bild 4.2, wie mit der Verfügbarkeit von Geräten mit immer höheren Leistungen (bei gleich bleibend guter Fokussierbarkeit) die trennbare Materialstärke und erzielbare Geschwindigkeit im Verlaufe der vergangenen 30 Jahren zugenommen haben.

4.1.1 Verfahren

Das Verfahren beruht darauf, dass der fokussierte Laserstrahl auf die geneigte Schnittfront auftrifft, siehe Bild 4.3, dort den Werkstoff aufschmilzt und ihn teilweise oder ganz verdampft. Ein im allgemeinen koaxial zum Laserstrahl gerichteter Gasstrahl entfernt durch Impulsübertragung dieses Material im wesentlichen längs der Schnittfront und hinterlässt infolge der Relativbewegung Strahl(en)/Werkstück die Schnittfuge. Die entstandenen Schnittflächen zeigen eine Riefenstruktur, deren geometrische Merkmale von den Prozessparametern abhängen.

Wiewohl die Technologie des Laserstrahlschneidens als beherrscht und abgesichert wahrgenommen wird (und in der industriellen Praxis sich auch so bewährt!), sind die involvierten physikalischen Vorgänge äußerst komplex und – insbesondere was den Austrieb der Schmelze

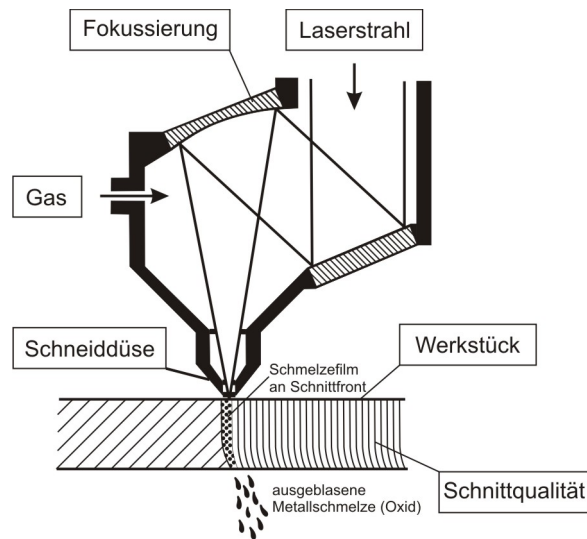


Bild 4.3 Schematische Darstellung des Laserstrahlschneidens. Die Fokussierung erfolgt entweder mittels einer Spiegeloptik oder – meistens – einer Linse. Im hier gezeigten Falle müsste ein Fenster beim Strahleintritt in den Bearbeitungskopf für den Druckaufbau sorgen, während eine Linse auch die Funktion des druckdichten Elements übernimmt.

und die dabei entstehende Riefenstruktur anbelangt – nicht voll verstanden. Dies hat mit dem Zusammen- und Wechselwirken von Mechanismen der Energie- und Impulsübertragung auf den im wesentlichen an der Schnittfront entstehenden und dort existierenden Schmelzefilm zu tun, sowie mit den nicht vorhandenen Möglichkeiten, das Geschehen *direkt* beobachten zu können.

Die den Schneidvorgang beeinflussenden Einflussfaktoren sind in Bild 4.4 wiedergegeben. Die Strahleigenschaften Wellenlänge und Polarisation bestimmen die Absorption, die zudem von der Neigung und Krümmung der Schnittfront (den mittleren Einfallswinkel und gegebenenfalls eine zweite Reflexion festlegend) beeinflusst wird, während M^2 und die Fokussierbedingungen die Geometrie des Strahles definieren und damit primär für die Fugenbreite verantwortlich sind; als brauchbare Näherung dafür kann $b \approx d_f$ gelten. Zusammen mit der Leistung wird dadurch der zugängliche Parameterbereich von Werkstückdicke und erzielbarer Schneidgeschwindigkeit festgelegt, was unmittelbar aus der integralen Energiebilanz (4.2) ersichtlich ist. Die für den Materialaustrieb benötigte Gasströmung wird in einer Düse erzeugt. Deren Strömungscharakteristik und die sich daraus ergebenden Wirkungen im Spalt hängen von der Geometrie der Düse, dem darin herrschenden Ruhedruck und – insbesondere bei konventionellen Düsen – ihrem Abstand von der Werkstückoberfläche ab. Je nach Gasart kann es zudem zu chemischen Reaktionen in der WWZ kommen.

Die Unterscheidung der verschiedenen Schneidverfahren erfolgt allgemein üblich nach dem Zustand – flüssiges Werkstückmaterial, Oxidationsprodukt oder Dampf/Gas –, in welchem der Fugenwerkstoff entfernt wird:

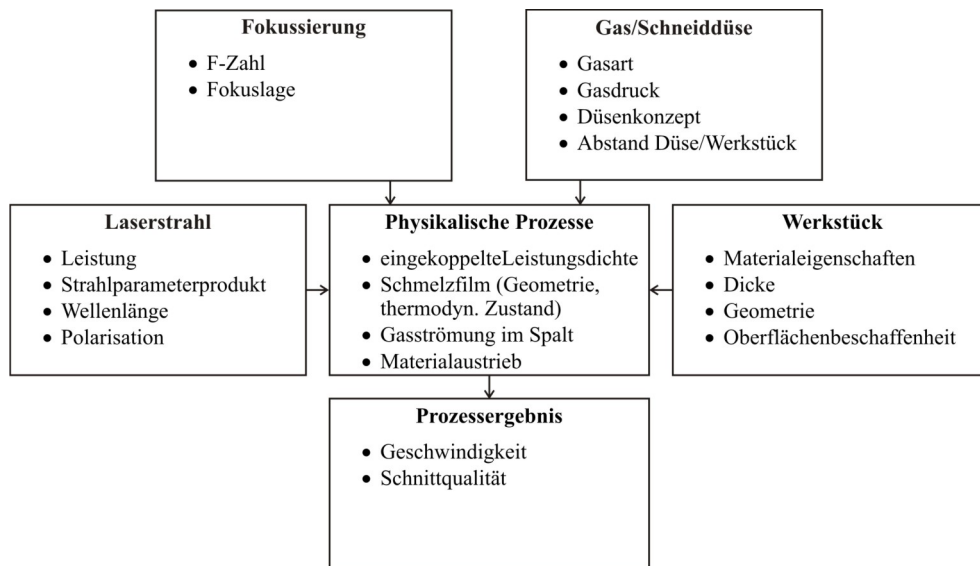


Bild 4.4 Physikalische Prozesse des Schneidvorgangs und damit das Ergebnis beeinflussende Faktoren.

- Beim *Schmelzschnneiden* wird der durch die eingekoppelte Laserstrahlung aufgeschmolzene Werkstoff mittels eines Inertgases – Stickstoff oder Argon – ausgetrieben. Nach diesem Verfahren lassen sich Metalle oxidfrei und mit hoher Schnittkantenqualität trennen.
- Der beim *Brennschnneiden* verwendete Sauerstoff setzt in einer exothermen chemischen Reaktion mit dem Material Energie frei, die zusätzlich zur eingekoppelten Strahlenergie für den Aufschmelzvorgang zur Verfügung steht. Insbesondere im Bereich niedriger Laserleistung lassen sich mit diesem Verfahren deshalb weit höhere Geschwindigkeiten als mit dem Schmelzschnneiden erzielen. Auch für das Trennen dicker Bleche bietet sich aus Wirtschaftlichkeitsgründen diese Variante an. Als Nachteil können eine auf der Schnittfläche haftende Oxidschicht und eine geringere Schnittqualität gelten. Ist das Oxidationsprodukt wie bei Aluminium eine Keramik (Al_2O_3) mit höherer Schmelztemperatur und Zähigkeit als die des flüssigen reinen Metalls, so kann es zu Problemen beim Austrieb kommen; die Begrenzung bei der erzielbaren Geschwindigkeit ist dann nicht das Leistungsangebot, sondern eine als Folge hoher zu überwindender Reibungskräfte nicht mehr hinreichende Impulsübertragung von der Gasströmung.¹⁵
- Beim *Sublimierschnneiden* erfolgt durch die absorbierte Laserleistung eine direkte Umwandlung des festen Fugenmaterials in einen gasförmigen Aggregatzustand. Dabei kann es sich je nach Werkstoff um einen Verdampfungsvorgang (z. B. bei Kunststoffen) oder einen „echten“ Sublimationsvorgang (z. B. bei manchen Keramiken

¹⁵ Der naheliegende Ansatz, den Ruhedruck in der Düse zu erhöhen, ist aufgrund einer dann nicht mehr zu akzeptierenden starken Riefenbildung nicht zielführend; siehe auch Bild 4.36.

und Graphit) handeln. Dem Gasstrahl kommt hier vor allem die Aufgabe zu, den Fugenbereich vor Oxidation und die Bearbeitungsoptik vor Ablagerungen zu schützen.

- Eine in ihrer Wirkweise von den vorstehend definierten Verfahren abweichende Variante des Laserstrahlschneidens wird allgemein üblich als „Hochgeschwindigkeitsschneiden“ bezeichnet. Dabei erfolgt die Energieeinkopplung – ähnlich wie beim Tiefschweißen – in einer Kapillare und die Schmelze wird erst in einem Bereich ausgetrieben, der in einem Abstand von mehreren Strahldurchmessern hinter der Kapillare liegt [105]. Aufgrund dieser andersgearteten physikalischen Vorgänge bietet es sich an, hierbei von *Kapillarschneiden* zu sprechen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich ausschliesslich auf das Schmelz- und Brennschneiden mit Lasern im cw-Betrieb. Das so genannte „Feinschneiden“ mit gepulster Laserstrahlung wird zumeist im Zusammenhang mit feinwerktechnischen Anwendungen erwähnt.

4.1.2 Energiebilanz und daraus ableitbare Prozessergebnisse

Die Erörterung des mit einem Laser vorgegebener Parameter (Leistung, Strahlqualität, Wellenlänge und gegebenenfalls Polarisation) erschließbaren Bereichs trennbarer Blechdicken s in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v , $s(v)$, lässt sich anschaulich anhand einer globalen Energiebilanz durchführen. Aus der Energiebilanz in Abschnitt 3.1.1 und mit einer Prozessleistung P_p von

$$P_p = vbs\rho [c \cdot \Delta T_p + h_s] \quad (4.1)$$

folgt für die hier interessierenden Verfahren

$$\eta_A P + P_{ch} = vbs\rho [c \cdot \Delta T_p + h_s] + P_V, \quad (4.2)$$

worin vbs das je Zeiteinheit erschmelzbare Schnittfugenvolumen \dot{V} darstellt, siehe Bild 4.5

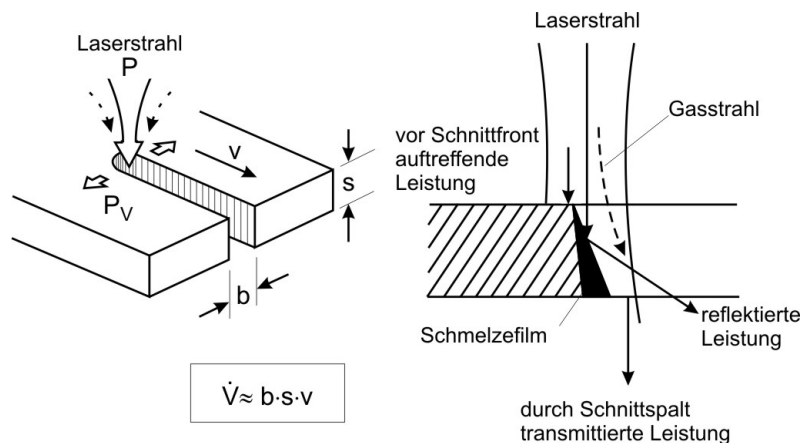


Bild 4.5 Schematische Illustrationen zur integralen Energiebilanz des Laserstrahlschneidens (li) und zu den gebräuchlichen Modellvorstellungen der Wechselwirkungen an der Schnittfront (re).

(li). Nachstehend seien die einzelnen Terme in (4.2) näher beleuchtet, zunächst aus dem Blickwinkel theoretischer Aussagen und sodann experimenteller Evidenz.

4.1.2.1 Energieeinkopplung durch Fresnelabsorption

Der an der Schnittfront nicht absorbierte Anteil der Laserleistung wird aus der Fuge schräg nach unten reflektiert; ob es dabei zu einer Energieeinkopplung in die seitlichen Schnittflächen bzw. den dort z.T. anhaftenden Schmelzefilm kommt, ist wahrscheinlich, aber nicht quantifizierbar. Entsprechend der in Bild 4.5 (re) stark vereinfacht wiedergegebenen Verhältnisse kann je nach Schnittfrontneigung ein Teil der Strahlung die Schnittfuge auch ungenutzt verlassen. Weiterhin wird ein Großteil der im „Vorlauf“ des Strahls senkrecht auf die Blechoberfläche gelangenden Laserleistung reflektiert. In welchem Ausmaß die beiden letztgenannten Vorgänge auftreten, hängt vom Schnittfrontwinkel ab, der sich selbstregulierend aus dem Prozess ergibt. In der Literatur werden Werte zwischen 70 und 89 Grad erwähnt, wobei die Neigung der Schnittfront mit wachsender Geschwindigkeit und abnehmender Blechdicke zunimmt, siehe z. B. [106] [107]. Die in Bild 3.21 aufgeführten Beträge des Einkoppelgrads stellen wegen der zugrunde liegenden Annahme, dass die Schnittfrontprojektion in Strahlrichtung dem Strahldurchmesser entspricht ($\tan\Theta = d/s$), demgemäß Obergrenzen dar. Von Bedeutung sind insgesamt neben ihrer Neigung die Krümmung der Front, die Dicke des Materials, der wellenlängen- wie temperaturabhängige Absorptionsgrad sowie die Strahleigenschaften, eine Vielzahl von Parametern also, welche – gegebenenfalls auch über das Auftreten von Mehrfachreflexionen – den Einkoppelgrad bestimmen. Zwei Aspekte sind dabei offenkundig, nämlich dass die Wahrscheinlichkeit eines weiteren Strahlauftreffs umso grösser wird, je gekrümmter die Front ist und dass dieser umso weniger Bedeutung hat, je höher der Absorptionsgrad ist.

Die Schilderung dieser Situation zeigt, dass die modellmässige Zuordnung der Energieeinkopplung auf Vorgänge allein an einer geraden Schnittfront eine Vereinfachung bedeuten muss.

4.1.2.2 Energiezufuhr infolge Oxidation

Neben der Absorption von Laserstrahlung an der Oberfläche des die Schnittfuge bedeckenden Schmelzefilms stellt beim Brennschneiden die *Verbrennungsleistung* P_{ch} eine weitere Energiequelle dar. Sie geht in die Energiebilanz a priori nicht als eine konstante GröÙe ein (was man bei einem konstant gehaltenen Sauerstoffstrom annehmen könnte), sondern erweist sich als ein von Blechdicke, Fugenbreite und vor allem von der Geschwindigkeit abhängiger Beitrag. Dies sei mit folgenden Überlegungen gezeigt.

Mit dem je Zeiteinheit oxidierten Volumen \dot{V}_{ox} und der bei der Verbrennung frei werdenden spezifischen Enthalpie h_{ox} ergibt sich die Verbrennungsleistung zu

$$P_{ch} = \rho \cdot \dot{V}_{ox} \cdot h_{ox} \quad (4.3)$$

Der größtmögliche Anteil, den P_{ch} bei der Energiezufuhr liefern kann, tritt dann auf, wenn das gesamte aufgeschmolzene Volumen auch oxidiert wird, d.h. bei

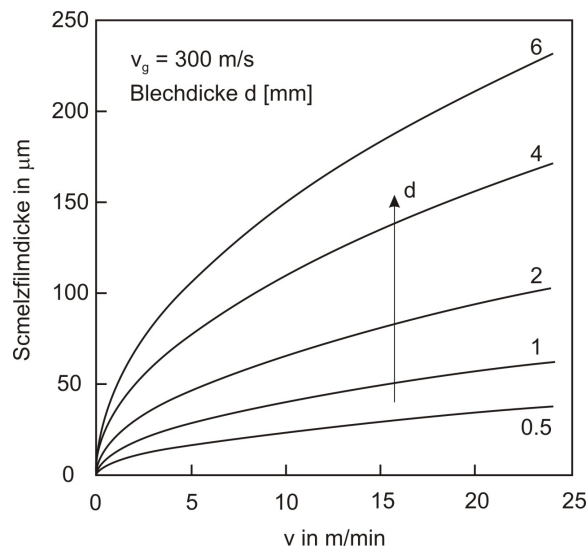


Bild 4.6 Berechnete Schmelzfilmdicken (an der Blechunterseite) in Abhängigkeit von Schneidgeschwindigkeit und Blechdicke (Fe); v_g ist die Gasgeschwindigkeit im Spalt.

$$\dot{V} = \dot{V}_{ox} \text{ bzw. } v_{ox} = v, \quad (4.4)$$

wenn also die Vordringgeschwindigkeit der Oxidationsfront in den Schmelzefilm v_{ox} der Schneidgeschwindigkeit v entspricht. Hier würde also die Oxidationsfront mit der Phasengrenze flüssig/fest an der Schnittfront zusammen fallen, und die Dicke des Oxidfilms entspräche der Schmelzfilmdicke. Da die Oxidation ein diffusionsgesteuerter Prozess ist, hängt sie von der Temperatur des Schmelzefilms ab. Mit Erreichen der Verdampfungstemperatur hat deshalb die Vordringgeschwindigkeit ihren größten Wert erreicht. Damit wird deutlich, dass eine Abschätzung von P_{ch} die Kenntnis von Dicke und Temperatur des Schmelzefilms voraussetzt.

Der Ermittlung von sowohl unter Aspekten der Energiebilanz wie des Schmelzestriebs wichtigen Größen wird im Rahmen mehrerer theoretischer Modelle nachgegangen [108], [109], [110], [111], [112], [113]. Sie liefern u.a. qualitativ übereinstimmende Aussagen, wonach Dicke wie Temperatur des Schmelzefilms bei konstanter Leistung und Blechdicke mit der Schneidgeschwindigkeit so lange ansteigen, bis Verdampfung einsetzt.

Die nachstehend gezeigten Bilder sind einer Arbeit entnommen, in welcher die Verbrennungsleistung aus dem Verhältnis der Dicken von Oxidationsschicht und Schmelzefilm berechnet wurden [107]. Diesem Ansatz folgende Rechnungen weisen ein stetes Anwachsen der Schmelzfilmdicke mit der Geschwindigkeit und der Blechdicke auf, siehe Bild 4.6 (in [114] wird aus experimentellen Befunden auf Filmdicken von etwa $100 \mu\text{m}$ geschlossen). Auf darauf beruhenden Abschätzungen der eindimensionalen Wärmestromdichte durch den Schmelzefilm an das noch feste Fugenmaterial ergeben sich die in Bild 4.7 gezeigten Temperaturen auf dessen Oberfläche. Mit Erreichen von T_v führt der Materialverlust infolge von Verdampfung zu einer Abnahme der Schmelzfilmdicke, weshalb die wiedergegebenen Daten nur für jenen Geschwindigkeitsbereich als relevant anzusehen sind, wo $T < T_v$ gilt. Dies bedeutet

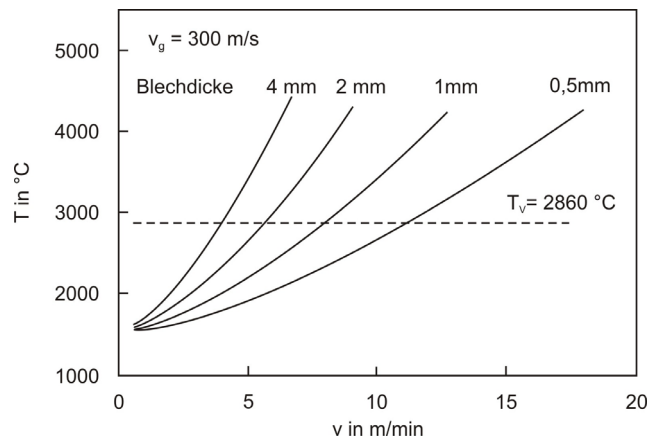


Bild 4.7 Für den konduktiven Energietransport durch den Schmelzefilm (mit Dicken entsprechend Bild 4.6) erforderliche Oberflächentemperaturen. Der zugrunde liegende Ansatz ist nur für Prozesstemperaturen bis zu Verdampfungstemperatur gültig, wenn kein Massenverlust und keine damit verknüpfte Dickenreduzierung auftritt.

jedoch keine Einschränkung bezüglich der hier geführten Diskussion, da zum einen in dem interessierenden Bereich die Schmelzefilmdicken gut mit den Ergebnissen eines Modells übereinstimmen, in dem Impuls- und Energiebilanz gekoppelt behandelt wurden [113], und zum anderen für sehr hohe Schneidgeschwindigkeiten sich P_{ch} ohnedies nicht mehr ändert. Die aus den Daten von Bild 4.6 und Bild 4.7 resultierende Abhängigkeit der Verbrennungsleistung von der Schnittgeschwindigkeit und der Blechdicke, siehe Bild 4.8, ist physikalisch plausibel und steht in qualitativem Einklang mit experimentellen Befunden.

Obige Ausführungen haben u.a. auch deutlich gemacht, dass als charakteristische Prozesstemperatur nicht die Schmelztemperatur, sondern ein deutlich höherer Wert in einer globalen

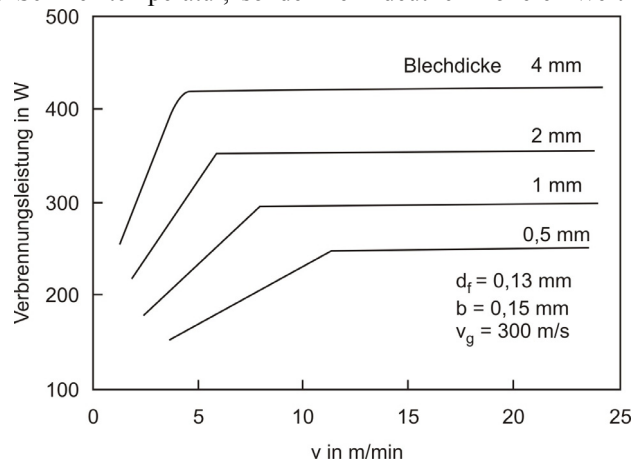


Bild 4.8 Aus den Daten von Bild 4.6 und Bild 4.7 sowie damit verknüpften Oxidschichtdicken berechnete Verbrennungsleistungen P_{ch} .