

Sz

13577

=2

Lasertechnik

Kai-Uwe Preißig

**Verfahrens- und Anlagenentwicklung
zum Laserstrahl-Hochgeschwindigkeits-
schneiden von metallischem
Bandmaterial**

Verlag Shaker

Sz 13577 #2

**"Verfahrens- und Anlagenentwicklung zum
Laserstrahl-Hochgeschwindigkeitsschneiden
von metallischem Bandmaterial"**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Diplom-Ingenieur Kai - Uwe Preißig
aus Dortmund

Referent: Universitäts-Professor Dr.-Ing. G. Herziger

Korreferent: Universitäts-Professor em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. W. König

Tag der mündlichen Prüfung: 6. September 1995

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Sz 13577=2

Berichte aus der Lasertechnik

Kai-Uwe Preißig

**Verfahrens- und Anlagenentwicklung zum
Laserstrahl-Hochgeschwindigkeitsschneiden
von metallischem Bandmaterial**



D 82 (Diss. RWTH Aachen)

**Verlag Shaker
Aachen 1995**

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Preissig, Kai-Uwe:

Verfahrens- und Anlagenentwicklung zum Laserstrahl-Hochgeschwindigkeits-
schneiden von metallischem Bandmaterial / Kai-Uwe Preissig. - Als Ms. gedr. -

Aachen : Shaker, 1995

(Berichte aus der Lasertechnik)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1995

ISBN 3-8265-1041-0

Copyright Verlag Shaker 1995

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-1041-0

ISSN 0945-084X

Shaker Verlag GmbH, Hubertusstr. 40, 52064 Aachen

Telefon: 0241 / 406351 - Telefax: 0241 / 406354

Vorwort

Diese Arbeit entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Herziger danke ich für die Stellung des interessanten Themas, die wertvollen Anregungen und sein stets förderndes Interesse am Fortgang der Arbeit.

Mein Dank gilt weiterhin Herrn Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. W. König für die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. H. Hartmann für die Übernahme des Vorsitzes.

Mein Dank gilt ebenfalls allen meinen Kollegen des Fraunhofer-Instituts für Lasertechnik für die vielen hilfreichen Diskussionen und Hilfestellungen ohne die eine solche Arbeit nicht zustande kommt.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen wissenschaftlichen- und studentischen Hilfskräften und Diplomanden für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit und für ihre stete Hilfs- und Einsatzbereitschaft.

Den Mitarbeitern der Feinmechanik- und Elektronik-Werkstatt möchte ich für die Unterstützung beim Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Systeme danken.

Zuletzt gilt mein Dank besonders meinen Eltern, deren Unterstützung das Erreichen dieses Zieles erst ermöglichte.

Aachen, September 1995

Kai - Uwe Preißig

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
1. Einleitung.....	1
2. Beschreibung des Hochgeschwindigkeitsschneid- prozesses.....	5
2.1 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Stahlwerkstoffen.....	10
2.1.1 Geometrie der Wechselwirkungszone.....	10
2.1.2 Energieeinkopplung.....	17
2.1.3 Schmelzaustrieb.....	23
2.2 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Nicht-Eisen-Metallen.....	34
2.2.1 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Kupfer.....	35
2.2.2 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Aluminium.....	38
3. Parametereinfluß beim Laserstrahl-Hochgeschwindig- keitsschneiden.....	42
3.1 Strahlformung.....	42
3.1.1 Strahlformung mit kreissymmetrischen Fokusquerschnitt.....	43
3.1.2 Strahlformung mit elliptischen Fokusquerschnitt.....	45
3.2 Fokusbildung.....	48
3.3 Schneidkopfneigung.....	51
3.4 Prozeßgas.....	53
3.5 Schneiddüse.....	59
3.6 Leistungsmodulation.....	64
4. Laserstrahl-Längsteilanlage.....	68

Verfahrens- und Anlagenentwicklung zum Laserstrahl-Hochgeschwindigkeitsschneiden von metallischem Bandmaterial

5.	Anwendungsbeispiele.....	75
5.1	Transformatorblech.....	75
5.2	Aluminium.....	81
5.3	Kupfer.....	84
5.4	Wolfram.....	86
5.5	Zink.....	87
5.6	Sonstige metallische Werkstoffe.....	89
5.7	Organische Werkstoffe.....	92
6.	Zusammenfassung.....	96
7.	Literaturverzeichnis.....	99
8.	Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen.....	109

1. Einleitung

Im industriellen Produktionsprozeß von Metallprodukten nimmt das Trennen eine zentrale Rolle ein. Die Bedeutung dieses Fertigungsschrittes kann dadurch veranschaulicht werden, daß jedes Blech nach dem Walzprozeß bzw. Dünnbandgießen zur Erzeugung definierter Breiten an den Kanten besäumt werden muß. Bei platinenförmigen Materialien werden hierfür sowohl mechanische als auch thermische Verfahren eingesetzt, während bei bandförmigen Materialien bislang nur mechanisch arbeitende Rollenmesser zum Einsatz kommen. Bild 1.1 zeigt eine typische für das Spalten von Bändern eingesetzte Längsteilanlage mit Abwickelhaspel, Schneidaggregat mit Rollenmessern, Bremsgerüst und Aufwickelhaspel (von rechts). Das besäumte Material wird anschließend von den Metallherstellern bzw. -verarbeitern entsprechend den Endabmessungen konfektioniert.

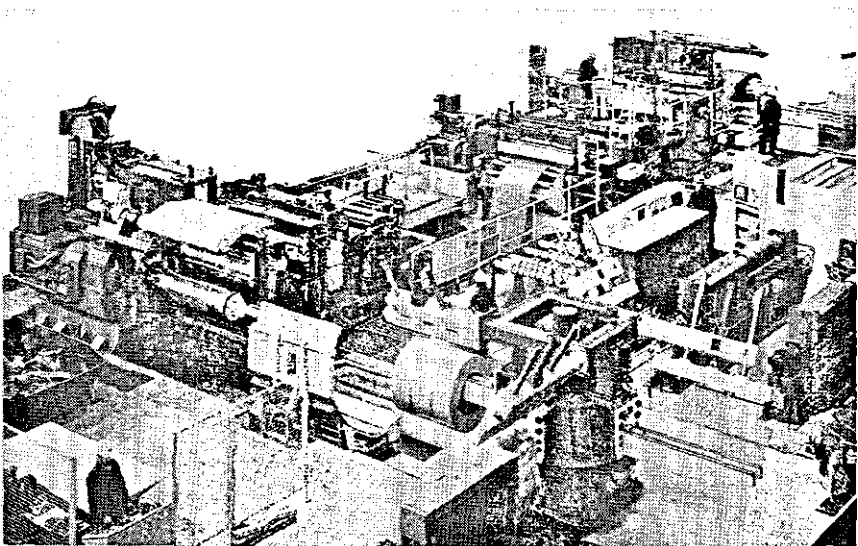


Bild 1.1: Konventionelle Längsteilanlage mit Rollenmessern [Georg 1992]

In den letzten Jahrzehnten führten steigende Anforderungen bezüglich Produktivität, Flexibilität und Schnittqualität an Anlagen zum Konfektionieren von Metallband zu einer stärkeren Innovationsbereitschaft [Jackson 1977] [Winship 1988], gerade im Hinblick auf den teuren europäischen Standort, der nur mit qualitativ hochwertigen Produkten bestehen kann [Bänder Bleche Rohre

11 - 1993]. Für die Maschinengruppe der Längsteilanlagen muß zur Steigerung der Produktivität eine Reduzierung der Nebenzeiten durch den Messerbau bei einer Änderung der Streifenbreite erreicht werden, so daß kleine Lose und kurze Lieferzeiten erreicht werden können. Ein Lösungsansatz hierfür ist das Automatisieren dieser bislang von Gerüstbauern ausgeführten Tätigkeit, bei der zur Demontage und Montage der Rollenmesser ca. 3.000 kg bewegt werden [Ramirez - Salinas 1989] [Nonn 1989] [Schoth 1990]. Je nach Anwendung ist für das manuelle Umrüsten eine Zeit zwischen 20 Minuten und 2 Stunden erforderlich [Ramirez - Salinas 1989]. Bild 1.2 zeigt einen Gerüstbauer bei der Montage eines Messerbalkens. Die Automatisierung durch z.B. auf der Welle verschiebbare Rundmesser mit Schnellspannkupplungen oder einer durch Roboter ausgeführte Montage reduziert die Messerbauzeiten auf unter 15 Minuten. Nebenzeiten, bedingt durch die Messeraufbereitung, bleiben auch bei der Automatisierung des konventionellen Verfahrens bestehen.

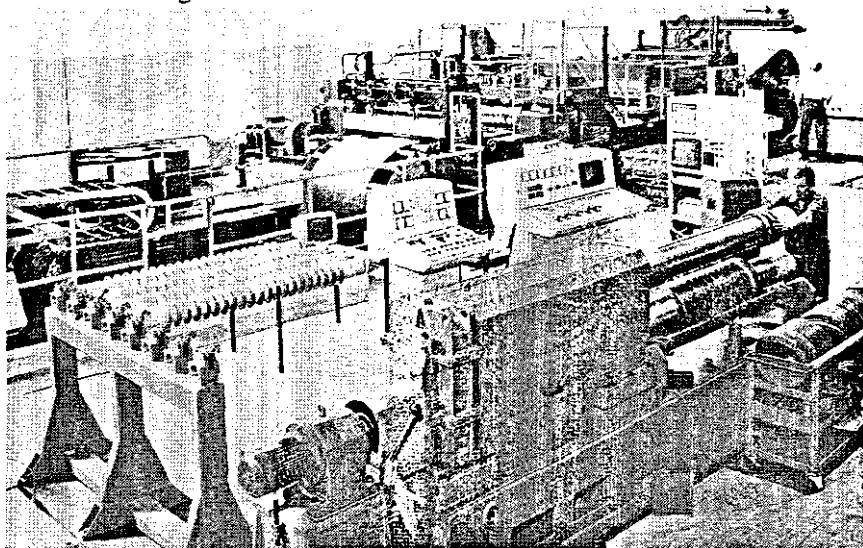


Bild 1.2: Gerüstbauer bei der Montage eines Messerbalkens [Georg 1992]

Neben einer Steigerung der Produktivität ist beim Trennen mit mechanischen Rollenmessern eine Erhöhung der Schnittqualität von entscheidender Bedeutung. Qualitätsmerkmale für die Schnittkante sind Grathöhe und Spannungsinduzierung durch den Schneidprozeß.

Die bislang bekannten Möglichkeiten zum gratfreien Längsteilen mit Rollen-

messern sind die "Counter Cutting" - Methode [Brockhaus 1970], die "Roll Slitting" - Methode [Murakawa 1979], die "Push Back Blanking" - Methode [Makino 1975] und die "Burr - Free Fine Slitting" - Methode [Takaishi 1990], die sich aufgrund des erhöhten technischen Aufwandes bislang in der industriellen Fertigung nicht durchsetzen konnten. Charakteristisch für die genannten Verfahren ist ein zweistufiger Trennprozeß, bei dem in der ersten Stufe ein Anschneiden (kein komplettes Trennen) erfolgt und durch ein Zurückdrücken zwischen einem Rollenpaar bzw. Schneiden mit umgekehrter Messeranordnung die Gratbildung an der Blechunterseite beim abschließenden Durchtrennen vermieden wird.

Bei vielen Werkstoffen ist die Spannungsinduzierung bzw. Kaltverfestigung im Schnittkantenbereich durch den Schneidprozeß eine erhebliche Qualitätsminderung und kann durch spezielle Verfahrensvarianten in der Längsteiltechnik zwar reduziert, aber nicht gänzlich vermieden werden [Tomizawa 1990].

Auch bei Verwendung aller qualitätssteigernder Maßnahmen vermindert sich die Schnittqualität auf Grund des kontinuierlichen Werkzeugverschleißes beim Längsteilen und erfordert eine regelmäßige Messeraufbereitung [Kühne 1985] [Schübler 1988].

Diese charakteristischen Eigenschaften der konventionellen Längsteiltechnik führen zu einem verstärkten Interesse an einem Laserstrahlschneidverfahren für Feinstbleche, das die hohen Schneidgeschwindigkeiten von teilweise über 100 m/min, wie sie mit dem mechanischen Trennverfahren erreicht werden, mit den fertigungstechnischen Vorteilen des Laserstrahlschneidens verbindet. Die fertigungstechnischen Vorteile sind:

- ◆ Das Schneidwerkzeug "Laserstrahl" arbeitet berührungslos und damit verschleißfrei, so daß Zeit- und Kostenaufwand eines regelmäßigen Werkzeugwechsels und die Werkzeugaufbereitung entfallen.
- ◆ Es wirken keine mechanischen Kräfte auf das Werkstück. Somit wird sowohl die Spannungsinduzierung in den Kantenbereich des Werkstückes vermieden als auch die notwendige Spanntechnik reduziert.
- ◆ Aufgrund der Möglichkeit, Konturen und Schneidposition mit Hilfe einer numerischen Steuerung zu programmieren, ist das Laserstrahlschneiden ein sehr flexibles Verfahren, bei dem die Breiteneinstellung beim Längsteilen automatisch erfolgen kann.

- ◆ Der Laserstrahl ermöglicht das Trennen unterschiedlichster Werkstoffe bzw. Werkstoffkombinationen.
- ◆ Der Laserstrahl erzeugt grat- bzw. bartarme Schnittkanten mit konstanter Schnittqualität und minimaler Wärme-Einfluß-Zone.

Da die maximalen Schneidgeschwindigkeiten bei dem konventionellen Laserstrahlschneidverfahren bisher auf Werte zwischen 15 und 20 m/min begrenzt waren, mußte für den Einsatz z.B. in Längsteilanlagen ein vollkommen neuartiges Laserstrahlschneidverfahren mit Schneidgeschwindigkeiten von über 100 m/min entwickelt werden.

In der vorliegenden Arbeit wird das neu entwickelte Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidverfahren beschrieben, die den Prozeß beeinflussenden Größen bestimmt und der Aufbau einer Laserstrahl - Längsteilanlage dargestellt. Abschließend werden Anwendungsbeispiele für dieses Verfahren aufgezeigt.

2. Beschreibung des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses

Um die in der Einleitung angesprochenen neuen Einsatzgebiete der Laserstrahlschneidtechnik für Feinbleche im Blechdickenbereich ≤ 0.5 mm für einen wirtschaftlichen, industriellen Produktionsprozeß zu ermöglichen, war die Entwicklung eines neuartigen Schneidverfahrens notwendig. Dieses Verfahren zeichnet sich durch die, im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschneiden von Feinblechen, fast eine Größenordnung erhöhte Schneidgeschwindigkeit aus (Bild 2.1) [Preißig 1994].

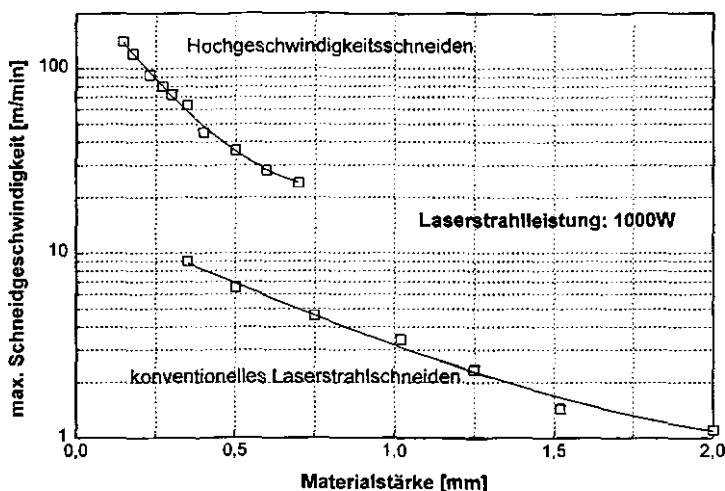


Bild 2.1: Vergleich des konventionellen Laserstrahlschneidens [Dickmann 1989a] [Dickmann 1990] mit dem Laserstrahl-Hochgeschwindigkeitsschneiden beim oxidfreien Schneiden von niedriglegiertem Stahl

Die Steigerung der Schneidgeschwindigkeit wird dadurch erreicht, daß das zum Trennen aufzuschmelzende Materialvolumen minimiert, die Energieeinkoppelung erhöht und das aufgeschmolzene Material effektiv aus der Schnittfuge ausgetrieben wird.

Zur Minimierung des zum Trennen aufzuschmelzenden Materialvolumens bei gleichzeitig guter Schnittqualität müssen sowohl die Fokussierungsbedingungen an die Blechdicke angepaßt, als auch eine für diesen speziellen Anwendungsfall hinsichtlich der Strahlqualität optimierte Laserstrahlquelle eingesetzt werden.

Eine notwendige Bedingung bei der Auslegung der Fokussierungsoptik ist die Anpassung der Rayleighlänge z_R an die Blechdicke s_{Blech} . Erfahrungsgemäß sollte für eine gute Schnittqualität die Rayleighlänge im Bereich der Blechdicke liegen [Herziger].

Desweiteren muß zum Erreichen von hohen Schneidgeschwindigkeiten der Fokusdurchmesser $2 r_F$ minimal sein. Der Zusammenhang zwischen Fokusdurchmesser und Rayleighlänge wird durch folgende Gleichung beschrieben [Petring 1994a]:

$$z_R = 2 r_F F \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} z_R &= \text{Rayleighlänge} \\ r_F &= \text{Fokusradius} \\ F &= \text{Fokussierkennzahl} \end{aligned}$$

Mit der Gleichung zur Bestimmung des Fokusradius [Ripper 1984]

$$r_F = \frac{k_0 D^3}{2 f^2} + \frac{2 \lambda f}{\pi K D} \quad (2.2); \quad F = \frac{f}{D} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} k_0 &= \text{Aberrationskoeffizient} \\ k_0 (ZnSe) &= 3,12 * 10^{-2} \\ k_0 (GaAs) &= 1,39 * 10^{-2} \\ \lambda &= \text{Wellenlänge} \\ D &= \text{Rohstrahldurchmesser auf der Fokussierungsoptik} \\ f &= \text{Brennweite} \\ K &= \text{Strahlqualitäts - Kennzahl} \end{aligned}$$

ergibt sich bei Verwendung von hinsichtlich Linsenfehlern korrigierten Optiken ($k_0=0$) und der Bedingung $z_R = s_{Blech}$ eine optimale Fokussierkennzahl von:

$$F_{opt.} = \sqrt{\frac{\pi K s_{Blech}}{4 \lambda}} \quad (2.4)$$

$$s_{Blech} = \text{Blechdicke}$$

Die an die Rayleighlänge angepasste optimale Fokussierkennzahl bei unkorrigierten Optiken wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{4\lambda}{\pi K} F^3 - s_{\text{Blech}} F + k_0 D = 0 \quad (2.5)$$

Bild 2.2 zeigt die optimale F - Zahl als Funktion des Laserstrahldurchmessers und der Blechdicke nach Gl. 2.5 in dem für diese Anwendung technisch relevanten Bereich für eine GaAs - Meniskuslinse und einer Laserstrahlquelle mit einer Strahlqualitätskennzahl $K = 0,75$. Bei unkorrigierten Optiken verringert sich die optimale Fokussierkennzahl F_{opt} mit steigendem Rohstrahldurchmesser als Folge der durch Linsenfehler bedingten erhöhten Rayleighlänge. Desweiteren nimmt nach Gl. 2.2 der Fokussdurchmesser bei konstanter Rayleighlänge mit steigendem Rohstrahldurchmesser D zu. Aus diesem Grund müssen bei einer Optimierung des Schneidprozesses hinsichtlich der Schneidgeschwindigkeit sowohl die Rayleighlänge z_R als auch der Fokussdurchmesser $2r_F$ berücksichtigt werden.

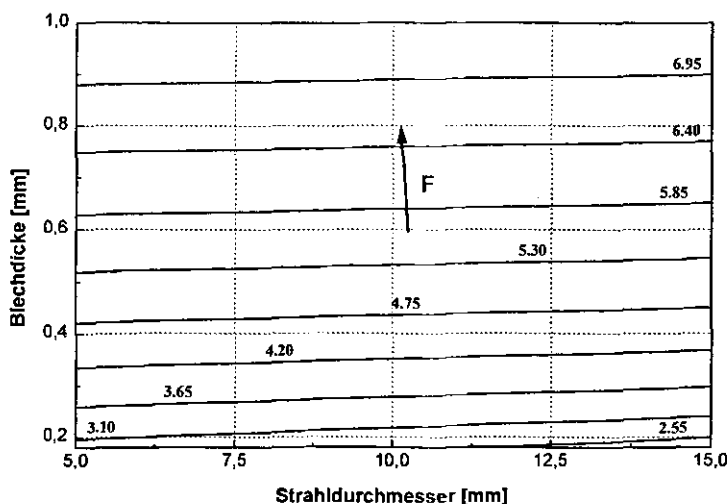


Bild 2.2: Abhängigkeit der optimalen Fokussierkennzahl F_{opt} von dem Rohstrahldurchmesser und der Blechdicke für $K = 0,75$

In Bild 2.3 ist der Fokusradius r_F als Funktion der Brennweite der Fokussieroptik und des Laserstrahldurchmessers aufgetragen.

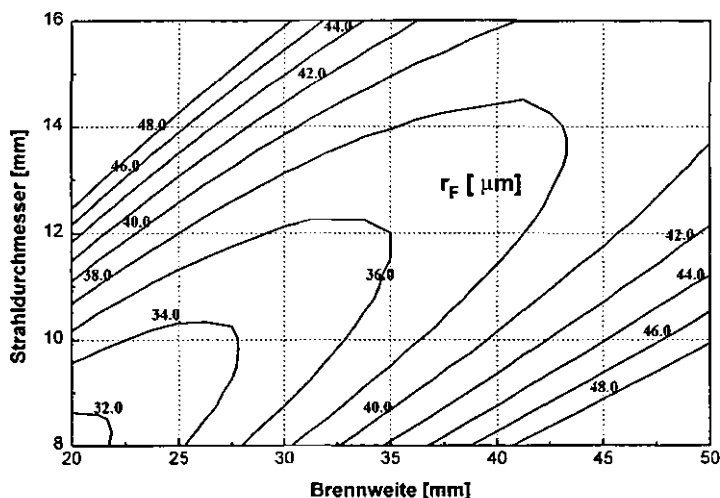


Bild 2.3: Abhängigkeit des Fokusradius r_F von der Brennweite und dem Rohstrahldurchmesser auf der Fokussieroptik für $K = 0,75$

Der zweite wesentliche Einflußfaktor zum Erreichen minimaler Fokusradius und somit hohen Schneidgeschwindigkeiten ist die Strahlqualität der Laserstrahlquelle, die durch die normierte Strahlqualitätskennzahl K gekennzeichnet ist. In einem Leistungsbereich von ca. 1,5 kW erreichen bislang nur CO_2 -Laserstrahlquellen die für diese Anwendung benötigte, extrem hohe Strahlqualität. Ein typischer Wert dieser Kennzahl für CO_2 -Laserstrahlquellen, die im industriellen Anwendungsfeld zum Trennen eingesetzt werden, ist $K = 0,5$. Das theoretische Optimum der Kennzahl liegt bei 1. Für die Untersuchungen zum Hochgeschwindigkeitsschneiden wurde eine kommerziell verfügbare Laserstrahlquelle mit Modenblenden so modifiziert, daß bei einer Ausgangsleistung von 1500 W eine Strahlqualität mit einer Kennzahl von $K = 0,75$ erzielt wurde. Bild 2.4 zeigt die Intensitätsverteilung des fokussierten Laserstrahls in dreidimensionaler Darstellung. Die Intensitätsverteilung entspricht näherungsweise einer idealen Gaußverteilung.

Bei Verwendung von korrigierten Fokussieroptiken und einer auf die Blechdicke abgestimmten Brennweite werden im Dauerstrich-Betrieb Laserstrahlintensitäten von über $5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ erreicht.

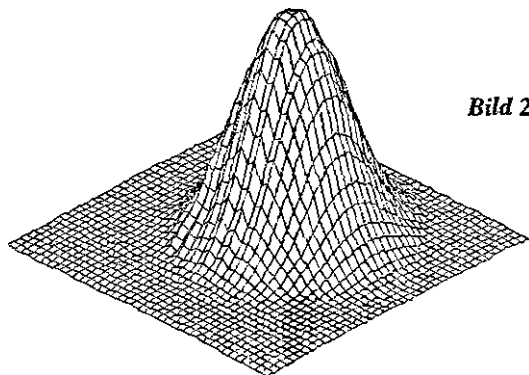


Bild 2.4: Intensitätsverteilung eines Laserstrahls mit Strahlkennzahl $K = 0,75$ in dreidimensionaler Darstellung

2.1 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Stahlwerkstoffen

Die Beschreibung des Hochgeschwindigkeits-Schneidprozesses wird im folgenden beispielhaft für die Gruppe der Stahlwerkstoffe anhand von Untersuchungen an niedriglegierten Stahlblechen (Bild 2.5) durchgeführt. Alle Stahlwerkstoffe haben das gleiche Prozeßverhalten, da sie sich hinsichtlich der wesentlichen, den Prozeß beeinflussenden Größen wie Absorptionsgrad, Wärmeleitfähigkeit, Schmelz- und Verdampfungstemperatur, dynamischer Viskosität und spezifischer Dichte nicht signifikant unterscheiden. Zur Bestätigung der gewonnenen Erkenntnisse werden diese mit den Ergebnissen zweier hinsichtlich ihrer thermo- und hydrophysikalischen Eigenschaften unterschiedlichen Werkstoffe, Aluminium und Kupfer, verglichen (Bild 2.6).

2.1.1 Geometrie der Wechselwirkungszone

Beim konventionellen Laserstrahlschneiden bestimmt der Durchmesser des fokussierten Laserstrahls, dessen Intensitätsverteilung und der Absorptionsgrad auf der sich ausbildenden Schneidfront die Geometrie der Wechselwirkungszone Laserstrahl/Werkstück. Die Fläche, auf der der Laserstrahl im Werkstück eingekoppelt wird, entspricht näherungsweise einem gegenüber der Strahlachse geneigten Halbzylindermantel. Entlang dieser Schneidfront wird der aufgeschmolzene Werkstoff von einem zum Laserstrahl coaxialen Gasstrahl nach unten ausgetrieben (Bild 2.7). Die Breite der Schnittfuge wird bei diesem Prozeß im wesentlichen vom Strahldurchmesser auf der Werkstückoberfläche bestimmt. Typische Werte liegen im Bereich von 0,2 bis 0,3 mm.

Im Gegensatz dazu zeichnet sich der Prozeß des Hochgeschwindigkeitsschneidens dadurch aus, daß sich die Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück nicht als Absorptionsfront, sondern als Dampfkapillare ausbildet (Bild 2.7). Ausschlaggebend hierfür ist ein durch die hohen Laserstrahlintensitäten ($> 5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$) starkes Aufheizen der Schmelzfilmoberfläche, so daß es zum teilweisen Verdampfen und zur Plasmabildung im Bereich der Wechselwirkungszone Laserstrahl/Werkstück kommt (s.a. Kapitel 2.2). Durch den Verdampfungsprozeß und den damit einhergehenden hohen Dampfdrücken auf der Schneidfront bildet sich die Schmelzströmung im Bereich der Wechselwirkungszone dominant azimuthal aus (s.a. Kapitel 2.3). Der Fokusdurchmesser liegt hierbei im Bereich $< 60 \mu\text{m}$. Ebenso wie beim konventionellen Laser-

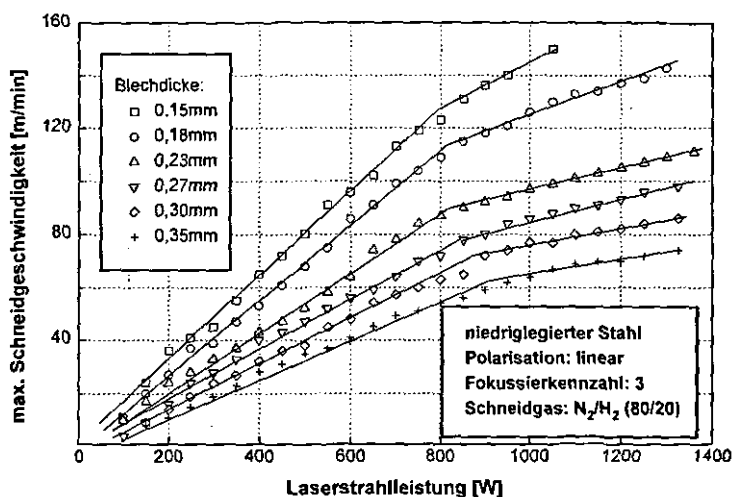


Bild 2.5: Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung für verschiedene Blechdicken

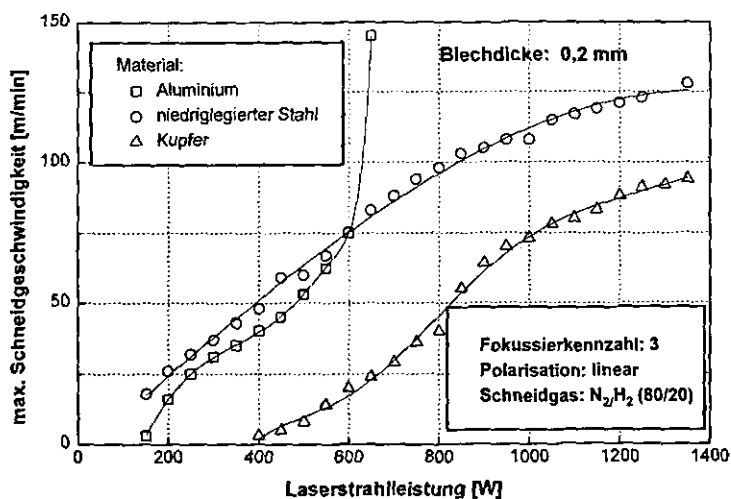


Bild 2.6: Vergleich der Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung bei niedriglegiertem Stahl, Aluminium und Kupfer

strahlschneiden wird beim Hochgeschwindigkeitsschneiden der Schmelzaustrieb durch einen koaxial zum Laserstrahl geführten Gasstrahl bewirkt. Der Effekt der Kapillarbildung tritt bei Eisen-Legierungen ab einer Schneidgeschwindigkeit von 25 - 30 m/min auf und kann experimentell durch

- videooptische Prozeßdiagnostik,
- Ermittlung der Schnittfugenbreite,
- Bestimmung der durch die Schnittfuge transmittierten Laserstrahlleistung,
- Beobachtung des Schmelzaustriebs,
- Plasmadiagnostik

nachgewiesen werden.

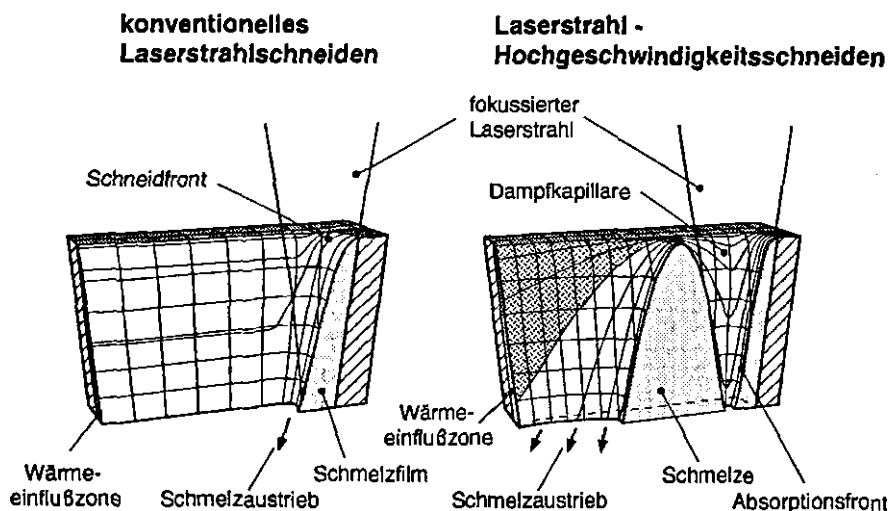


Bild 2.7: Schematische Darstellung der Wechselwirkungszone beim konventionellen- und beim Hochgeschwindigkeits-Laserstrahlschneiden

Bild 2.8 zeigt ein für den Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß typisches Videobild, das zur Diagnose der Wechselwirkungszone mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bei einer Aufnahme rate von 1.000 Bildern/Sekunde aufgenommen wurde. Die Beleuchtung der Wechselwirkungszone erfolgt hierbei mit einem fokussierten Nd:YAG-Laserstrahl. Bei Verwendung eines Schmalbandfilters vor dem Objektiv der Videokamera kann so die Kontur der Wechselwirkungszone ohne Beeinträchtigung durch das Leuchten des Plasmas

und der Schmelzströmung aufgelöst werden. Auf dem Bildausschnitt ist die nach unten geöffnete Dampfkapillare mit nachfolgendem Schmelzaustrieb zu erkennen.

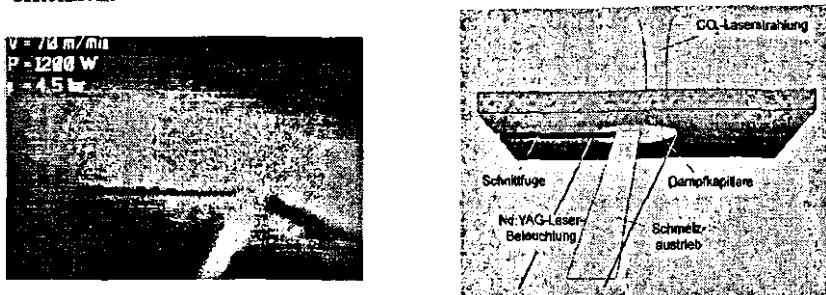


Bild 2.8: Videoaufnahme zur Diagnose der Wechselwirkungszone. Auf der rechten Seite ist zur Verdeutlichung eine Prinzipskizze dargestellt.

Mit Beginn der dominant azimuthalen Schmelzströmung und somit der Kapillarbildung ab einer Schneidgeschwindigkeit von 25-30 m/min tritt eine Verbreiterung der Schnittfuge auf, die bedingt ist durch einen geänderten Absorptionsmechanismus in der Dampfkapillare (s.a. Kapitel 2.2) und den konvektiven Energietransport durch die Schmelze in Richtung auf die Schnittflanken (Bild 2.9). Die in Bild 2.9 aufgetragene Schnittfugenbreite entspricht einer über der Blechdicke gemittelten Schnittfugenbreite, die durch gravimetrische Messungen bzw. über die aufgeschmolzene Masse bestimmt wurde. Der Effekt der Fugenverbreiterung mit Beginn der azimuthalen Schmelzströmung ist sowohl bei einer der Schneidgeschwindigkeit angepaßten Laserstrahlleistung (Bild 2.9 und 2.10) als auch bei konstanter maximaler Laserstrahlleistung zu erkennen (Bild 2.10).

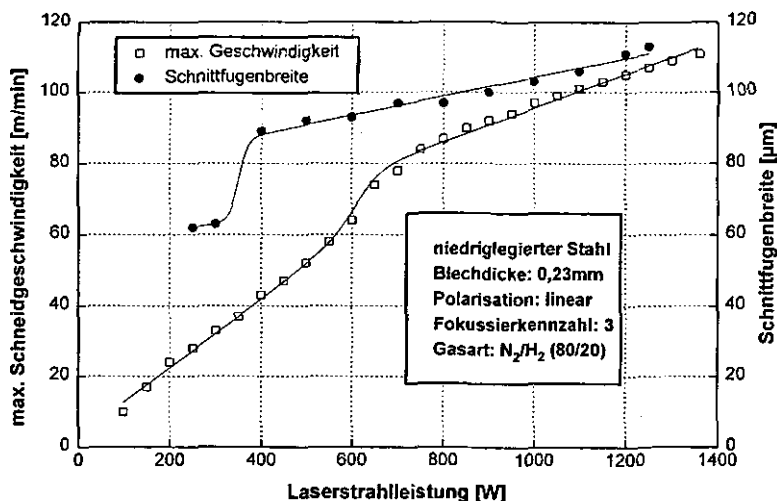


Bild 2.9: Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreite als Funktion der Laserstrahlleistung bei niedriglegiertem Stahl

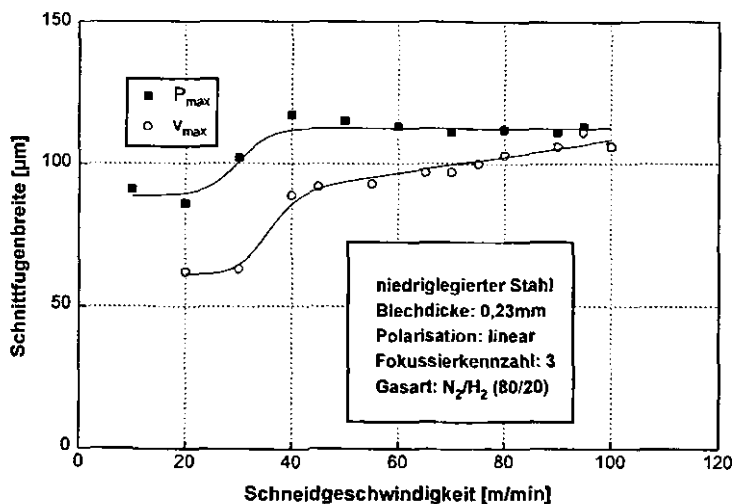


Bild 2.10: Schnittfugenbreite in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit bei $P_L = 1.300 \text{ W}$ und bei angepaßter Laserstrahlleistung

Ein weiterer Effekt, korrelierend mit der Kapillarbildung, ist in Bild 2.11 zu sehen. Mit dem ersten Auftreten der Kapillarbildung ist die von der Schneidfront reflektierte und durch die Schnittfuge transmittierte Laserstrahlleistung, die unterhalb der Wechselwirkungszone gemessen wurde, auf einen unter die Nachweisgrenze reduzierten Wert abgefallen. Ab der Schneidgeschwindigkeit, bei der eine nach unten geschlossene Kapillare entsteht, ist gleichzeitig die Schnittfugenverbreiterung festzustellen. Bei den in Bild 2.11 zugrundeliegenden Untersuchungen war die Laserstrahlleistung so gewählt, daß für die jeweilige Schneidgeschwindigkeit die Trennbarkeitsgrenze erreicht wird. Bei einem Leistungsüberschuß bleibt die Kapillare an der Werkstückunterseite offen und schließt sich erst im Bereich der Trennbarkeitsgrenze (Bild 2.12). Dieses Ergebnis wurde durch die Einzelbildauswertung der Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen bestätigt (s.a. Bild 2.8).

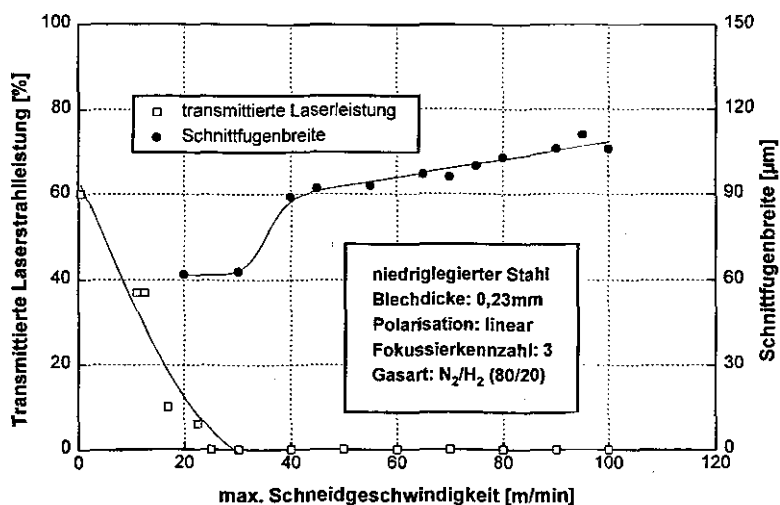


Bild 2.11: Transmittierte Laserstrahlleistung und Schnittfugenbreite bei angepaßter Laserstrahlleistung als Funktion der Schneidgeschwindigkeit

Weitere Indizien für eine Kapillarbildung sind der Mechanismus des Schmelzaustriebs und die Plasmabildung, auf die in den nachfolgenden Kapiteln ausführlich eingegangen wird.

Bei geringen Schneidgeschwindigkeiten (< 25 m/min) wird die Schmelze wie beim konventionellen Laserstrahlschneiden entlang der Schneidfront mit Hilfe

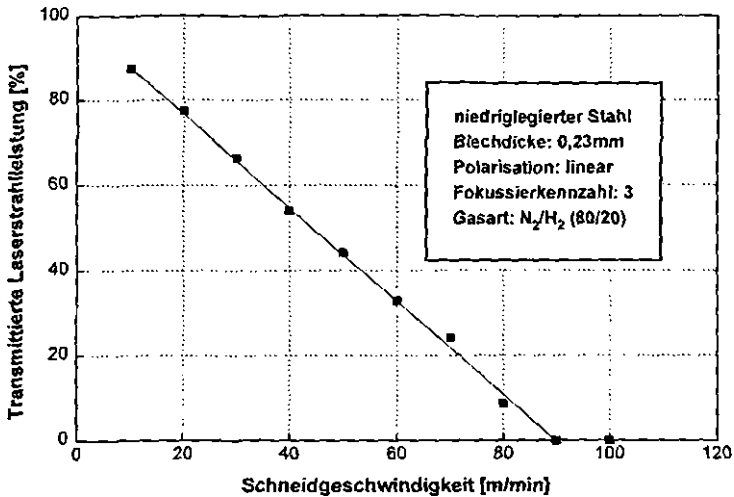


Bild 2.12: Transmittierte Laserstrahlleistung in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit bei einer Laserstrahlleistung P_L von 1.300 W

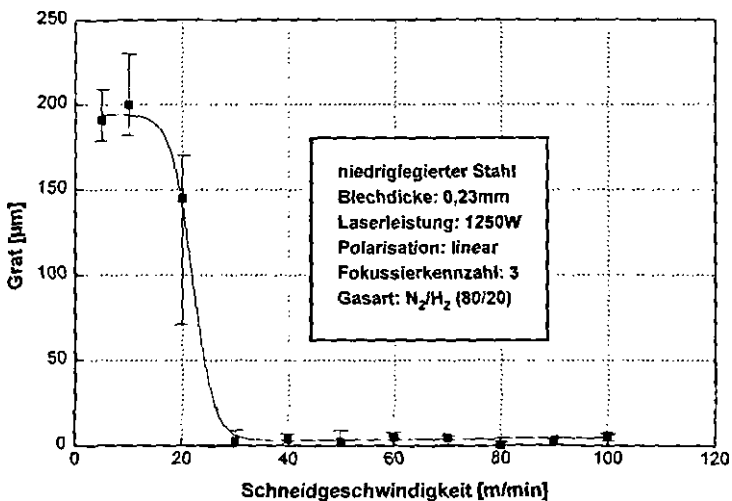


Bild 2.13: Gratbildung in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit bei $P_L = 1.250$ W

eines Gasstrahls aus der Schnittfuge ausgetrieben. Da die Schmelze bei dünnen Blechen auf der sehr kurzen Schneidfront nicht genügend beschleunigt werden kann, lagert sich die Schmelze in Form von Schmelztropfen (Grat) an der Blechunterseite an (Bild 2.13). Im Fall der Kapillarbildung und der damit einhergehenden Entstehung eines laserinduzierten Plasmas wird die Schmelze durch den Dampfdruckgradient zwischen Schneidfront und Schnittflanke (s.a Kapitel 2.3) genügend stark beschleunigt, um an der Blechunterseite abzureißen. Desweiteren wird durch die hohe Temperatur der Schmelze beim Hochgeschwindigkeitsschneiden die Viskosität des schmelzflüssigen Materials verringert und der Schmelzaustrieb erleichtert. Auf Maßnahmen zur Vermeidung der Gratabbildung bei Schneidgeschwindigkeiten $< 25 \text{ m/min}$ wird in Kapitel 3.6 eingegangen.

2.1.2 Energieeinkopplung

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zum konventionellen Laserstrahlschneiden ist der Mechanismus der Energieeinkopplung in das Werkstück. In den bisher bekannten Parameterbereichen des konventionellen Laserstrahlschneidens bei Laserstrahlintensitäten von einigen 10^6 W/cm^2 erfolgt die Energieeinkopplung aufgrund von Oberflächenabsorption (Fresnel - Absorption) auf der Schneidfront [Petring 1994a]. Hierbei wird der nicht auf der Schneidfront absorbierte Anteil der Laserstrahlung durch die offene Schnittfuge aus dem Bereich der Wechselwirkungszone reflektiert. Die maximal mögliche Schneidgeschwindigkeit ist hierbei deutlich von der Polarisation der Laserstrahlung abhängig [Keilmann 1992] und kann bei zirkularer und somit richtungsunabhängiger Polarisation zu einer Minderung der Schneidgeschwindigkeit bis zu 50 % im Vergleich zur linearen Polarisation führen.

Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden gewinnen neben der Oberflächenabsorption zusätzliche Absorptionsmechanismen an Bedeutung. In der geschlossenen Dampfkapillare gelangt der an der Schneidfront reflektierte Anteil der Laserstrahlung infolge Mehrfachreflexion an die Seitenwände und die Rückwand der Dampfkapillare, kann aber auch wieder auf die Schneidfront zurückreflektiert werden und dort zur Absorptionserhöhung beitragen (Bild 2.14). Außerdem wird die Laserstrahlung teilweise im Metaldampf absorbiert und heizt diesen aufgrund der hohen Intensitäten ($> 5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$) bis zur Plasmabildung auf [Petring 1991]. Ein absorptionserhöhender Mechanismus aus der Kombination

Mehrfachreflexion und Plasmaabsorption ist bislang nur beim Laserstrahlschweißen bekannt [Beck 1989].

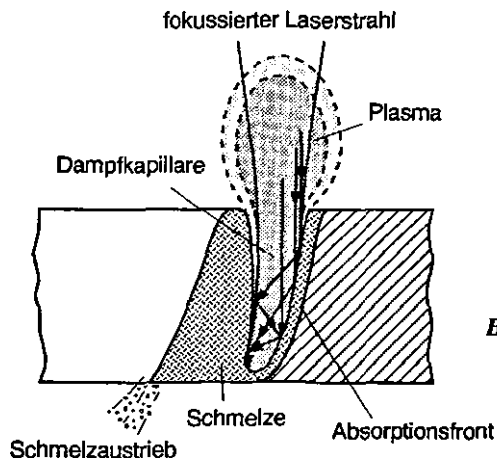


Bild 2.14: Absorptionsmechanismen beim Laserstrahl-Hochgeschwindigkeitsschneiden

Spektroskopische Untersuchungen des zwischen Schneiddüse und Blechoberseite befindlichen Plasmas haben bei niedriglegierten Stahlblechen mit einer Dicke von 0,23 mm ergeben, daß ab einer Schneidgeschwindigkeit von 30 m/min Linienemissionstrahlungen zu detektieren sind. In dem Geschwindigkeitsintervall von 40 m/min bis zur Trennbarkeitsgrenze von 100 m/min bildet sich ein Plasma mit einer nahezu geschwindigkeitsunabhängigen konstanten Elektronendichte aus. Für die Bestimmung der Elektronendichte wurde die Halbwertsbreite der Wasserstofflinie H_{α} bei 656,279 nm herangezogen. In dem Geschwindigkeitsbereich zwischen 40 und 100 m/min lagen die ermittelten Elektronendichten zwischen $7,2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und $8,3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Da im Bereich des Fokuspunktes die höchsten Laserstrahlintensitäten auftreten, kann davon ausgegangen werden, daß in der Dampfkapillare im Bereich der Schneidfront weit höhere Elektronendichten vorliegen und bei dem Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß von einem nicht zu vernachlässigenden Absorptionsanteil der Laserstrahlung im Plasma ausgegangen werden muß. Die Absorptionslänge α des Plasmas liegt bei diesen Elektronendichten im mm-Bereich. Der Absorptionsanteil der Laserstrahlung wird durch die ungerichtete

Plasmastrahlung teilweise auf der Schneidfront eingekoppelt und führt zu einer Geschwindigkeitssteigerung.

Ein Effekt der geänderten Energieeinkopplung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden ist im Einfluß der Polarisation auf die Schneidgeschwindigkeit zu erkennen. Im Gegensatz zum konventionellen Laserstrahlschneiden wird bei zirkularer Polarisation die gleiche Schneidgeschwindigkeit wie bei linearer (p-) Polarisation erreicht (Bild 2.15). Die Mehrfachreflexion in Kombination mit der Plasmaabsorption führt zu gleichen Absorptionsanteilen auf der Schneidfront. Die Polarisationsrichtung der Laserstrahlung wurde mit einem Polarisationsanalysator für die lineare (Bild 2.16) und zirkuläre Polarisation überprüft.

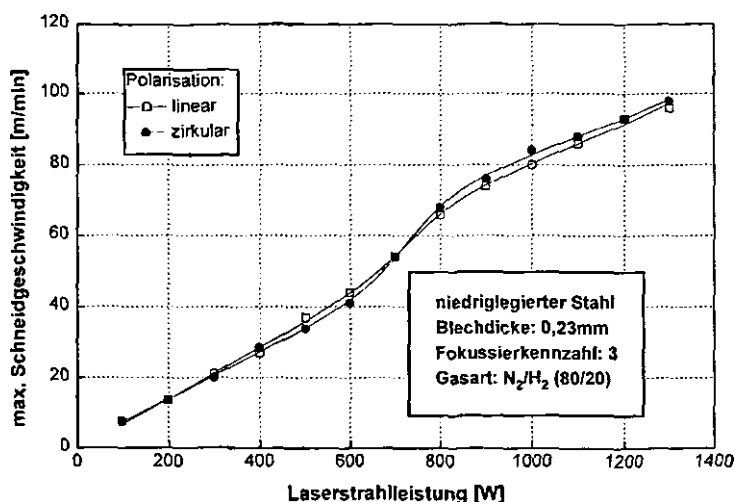


Bild 2.15: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung bei linearer und zirkularer Polarisation

Die vorhandene, aber im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschneiden weitaus geringere Polarisationsabhängigkeit des Hochgeschwindigkeits - Schneidprozesses zeigen Schneidversuche mit p- und s- polarisierter Laserstrahlung (Bild 2.17). Bei einer Laserstrahlleistung von 1.100 W liegt die mit s- polarisierter Laserstrahlung erreichte Schneidgeschwindigkeit um 22 % unter der mit p- polarisierter Laserstrahlung. Unter Annahme reiner Fresnelabsorp-

tion auf der Schneidfront und ohne Mehrfachreflexion und Plasmabildung in der Dampfkapillare ergeben theoretische Abschätzungen eine Verringerung der Schneidgeschwindigkeit bei s- Polarisation um 70 % [Petring 1988]. Der Vergleich der experimentellen und theoretischen Ergebnisse läßt auf einen erhöhten Absorptionsanteil auf der Schneidfront als Folge der Kapillarbildung (Mehrfachreflexion und Plasmabildung) schließen.

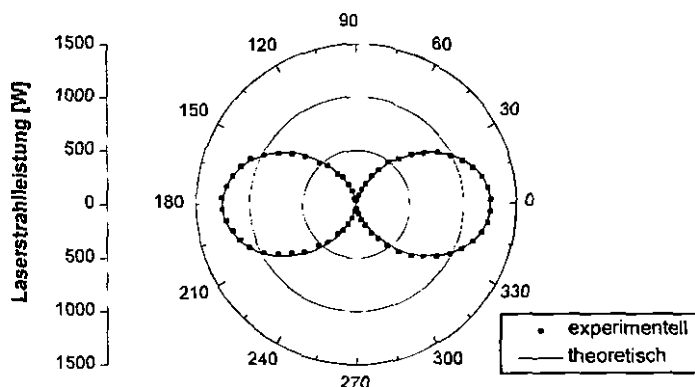


Bild 2.16: Polarisationsbestimmung mit einem Polarisationsanalysator

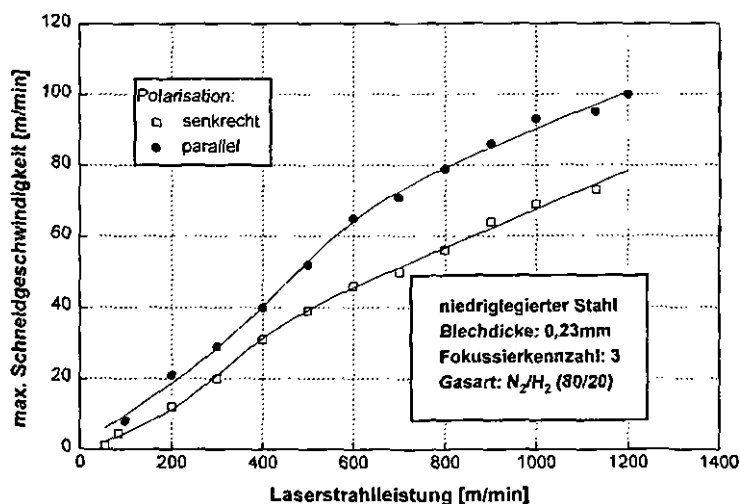


Bild 2.17: Schneidgeschwindigkeit bei senkrechter und paralleler Polarisation

Die nicht auf der Schneidfront absorbierte Laserstrahlleistung wird als Folge der Kapillarbildung an den Schnittflanken eingekoppelt, da sie nicht aus der nach unten geschlossene Dampfkapillare aus der Schnittfuge austreten kann (Kapitel 2.1.1; Bild 2.11). Dies kann durch die Bestimmung des Produktes aus Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreite als eine für die pro Zeitintervall eingekoppelte Energie proportionale Größe bei mit p- und s- polarisierter Laserstrahlung geschnittenen Blechen (Bild 2.18) nachgewiesen werden. Diese Untersuchungen zeigen, daß der Anteil der in die Wechselwirkungszone eingekoppelten Laserleistung polarisationsunabhängig ist, während sich die Energieeinkopplung bei s- Polarisation geringfügig in den Bereich der Schnittflanken verlagert.

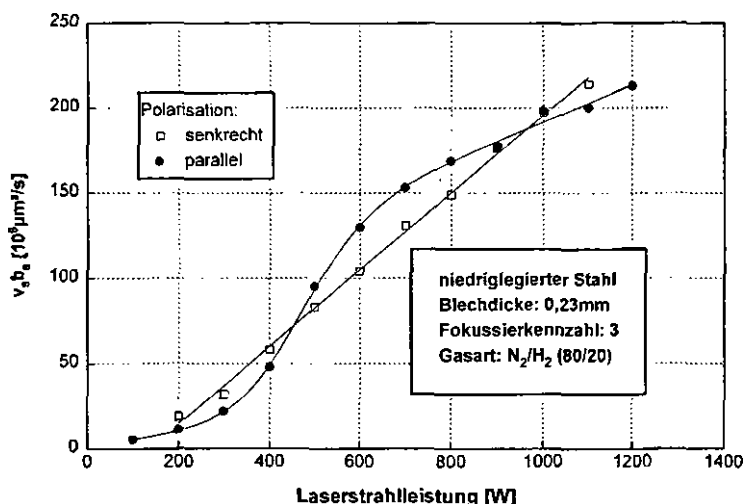
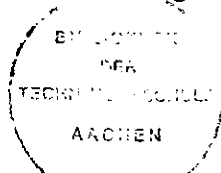


Bild 2.18: Vergleich des Produktes aus Schneidgeschwindigkeit v_s und Schnittfugenbreite b_s für senkrechte und parallele Polarisation

Das Energievolumen, das eine dem Absorptionsgrad proportionale Größe darstellt, ist in Bild 2.19 in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für unterschiedliche Blechdicken aufgetragen. In Bild 2.5 ist die für diese Versuchsreihe bestimmte leistungsabhängige maximale Schneidgeschwindigkeit dargestellt. Das Energievolumen wird aus dem pro Zeiteinheit aufgeschmolzenem Volumen ($v_s \cdot s_{\text{Blech}} \cdot b_s$), dividiert durch die dafür benötigte



Laserstrahlleistung P_L , bestimmt.

$$A_w = \frac{v_s \cdot s_{Blech} \cdot b_s}{P_L} \quad (2.6)$$

- A_w = Energievolumen
 s_{Blech} = Blechdicke
 b_s = mittlere Schnittfugenbreite
 P_L = Laserstrahlleistung

In Bild 2.19 ist zu erkennen, daß das Energievolumen, als Maß für die absorbierte Laserstrahlleistung in der Wechselwirkungszone, mit zunehmender Laserstrahlleistung bis zu einem Maximalwert von ca. 55 mm³/kJ bei einer Laserstrahlleistung von 700 W ansteigt und dann konstant bleibt. Im Vergleich zu niedrigen Laserstrahlleistungen (≤ 200 W) bzw. niedrigen Schneidgeschwindigkeiten kann das Energievolumen zu hohen Laserstrahlleistungen hin durch eine erhöhte Fresnelabsorption als Folge der höheren Oberflächentemperaturen der Schmelze und durch Mehrfachreflexion und Plasmaabsorption in der Dampfkapillare um ca. 60 % gesteigert werden.

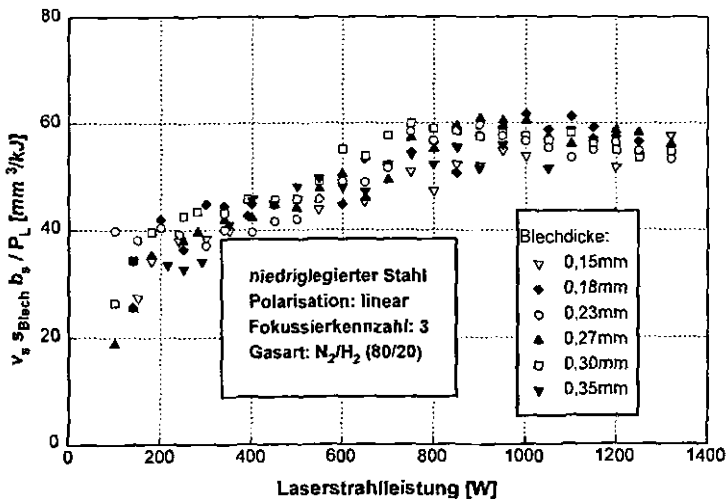


Bild 2.19: Energievolumen in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für verschiedene Blechdicken

2.1.3 Schmelzaustrieb

Im weiteren zeichnet sich das Prozeßverhalten durch eine dominant azimuthale Schmelzströmung in Richtung auf die Schnittflanken aus, wobei sich diese auf Grund des hohen Druckgradienten des abströmenden Metaldampfes auf der Schneidfront ausbildet. Die die Schmelze beschleunigenden Kräfte nehmen vom Scheitel der Schneidfront zu den Schnittflanken hin ab. Aus diesem Grund staut sich die Schmelze hinter der Absorptionsfront an den Schnittflanken und es kommt zur Kapillarbildung.

Hinter der Dampfkapillare wird die Schmelze durch den koaxial zum Laserstrahl geführten Gasstrahl aus der Schnittfuge ausgetrieben.

Die folgende Abschätzung des zum Schmelztransportes auf der Schneidfront benötigten Dampfdruckes soll zum Prozeßverständnis beitragen. Reibungskräfte und Kräfte durch Oberflächenspannungen werden bei diesem vereinfachten Modell vernachlässigt.

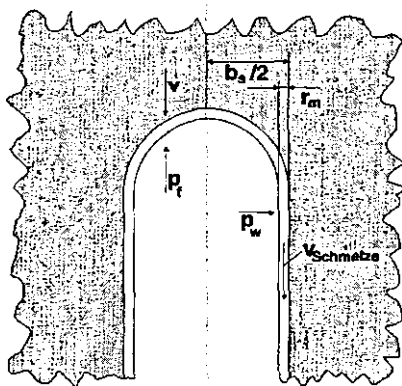


Bild 2.20: Schematische Darstellung des vorderen Schnittfugenbereichs beim Hochgeschwindigkeitsschneiden

Aus der Massenerhaltung (Bild 2.20) folgt:

$$\rho v \frac{b_s}{2} = \rho v_{\text{Schmelze}} r_m \quad (2.7)$$

- | | | |
|--------|---|-----------------------------|
| ρ | = | Dichte |
| v | = | Schneidgeschwindigkeit |
| b_s | = | mittlere Schnittfugenbreite |

$$\begin{aligned} v_{Schmelze} &= \text{Geschwindigkeit der Schmelze} \\ r_m &= \text{Schmelzfildmdicke} \end{aligned}$$

Die Druckdifferenz zwischen Schneidfront und Schnittflanke wird aus der Gleichung von Bernoulli berechnet:

$$p_F + \frac{\rho}{2} v^2 = p_w + \frac{\rho}{2} v_{Schmelze}^2 \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} p_F &= \text{statischer Dampfdruck auf der Schneidfront} \\ p_w &= \text{statischer Dampfdruck auf der Schnittflanke} \end{aligned}$$

Ist die Schnittfuge wesentlich breiter als der Schmelzfilm ($v_{Schmelze} \gg v$) vereinfacht sich die Gleichung für die Druckdifferenz:

$$\Delta p = p_F - p_w = \frac{\rho}{2} v^2 \frac{b_s^2}{4 r_m^2} \quad (2.9)$$

$$\Delta p = \text{Druckdifferenz}$$

Die Dicke des Schmelzfilms wird aus dem Temperaturverlauf an der Schneidfront abgeschätzt. Zur Bestimmung des Temperaturverlaufs auf der Schneidfront in Vorschubrichtung wird die Wärmeleitung eindimensional stationär angesetzt [Schulz 1987]. Die Randbedingungen hierzu sind:

1. An der Phasengrenze fest / flüssig ($x = 0$) hat das Material Schmelztemperatur $T|_{x=0} = T_m$
2. Durch den Laserstrahl wird auf der Schmelzfilmoberfläche bei $x = r_m$ ein Wärmestrom in den Schmelzfilm eingekoppelt, der das Material bis auf Verdampfungstemperatur erwärmt und die Schmelzenthalpie aufbringt.

$$-\lambda_w \frac{dT}{dx} \Big|_{x=r_m} = -\rho v c_p T \Big|_{x=r_m} - \rho v H_m \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \lambda_w &= \text{Wärmeleitfähigkeit} \\ T &= \text{Temperatur} \\ x &= \text{Länge} \\ c_p &= \text{spezifische Wärmekapazität} \\ H_m &= \text{Schmelzenthalpie} \end{aligned}$$

Mit diesen Randbedingungen ergibt sich folgender Temperaturverlauf im Schmelzfilm in Vorschubrichtung:

$$T(x) = \left(T_m + \frac{H_m}{c_p}\right) \exp\left(\frac{v}{\kappa} x\right) - \frac{H_m}{c_p} \quad (2.11)$$

κ = Temperaturleitfähigkeit

Hieraus läßt sich bei bekannter Oberflächentemperatur die Schmelzfilmdicke r_m berechnen:

$$r_m = \frac{\kappa}{v} \ln \left(\frac{T + \frac{H_m}{c_p}}{T_m + \frac{H_m}{c_p}} \right) \quad (2.12)$$

r_m = Schmelzfilmdicke

Die Oberflächentemperatur bestimmt gleichzeitig auch den Sättigungsdampfdruck, der die zur Bildung des Keyholes nötige Druckerhöhung erzeugt. Mit Hilfe der Gleichung von Clausius - Clapeyron kann die Temperaturabhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes beschrieben werden.

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{H_v(T)}{(V_D - V_s)T} \quad (2.13)$$

p_s = Sättigungsdampfdruck
 H_v = Verdampfungsenthalpie
 V_s = spezifische Volumen der Schmelze
 V_D = spezifische Volumen des Dampfes

Da das spezifische Volumen der Schmelze V_s wesentlich kleiner ist als das spezifische Volumen des Dampfes V_D , kann V_s vernachlässigt werden. Unter der Annahme, daß die Verdampfungsenthalpie temperaturunabhängig ist und der Dampf ein ideales Gas, vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$\frac{dp_s}{dT} = \frac{H_v p_s}{R T^2} \quad (2.14)$$

R = Gaskonstante

Die Integration der Gleichung 2.14 ergibt den temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck:

$$p_s(T) = p_0 \exp\left(\frac{H_v}{RT_0}\right) \exp\left(-\frac{H_v}{RT}\right) \quad (2.15)$$

p_0 = Sättigungsdampfdruck bei T_0

T_0 = Verdampfungstemperatur bei Normaldruck

Die Konstanten der Gl. 15 können zu einer Größe p_{max} zusammengefaßt werden:

$$p_{max} = p_0 \exp\left(\frac{H_v}{RT_0}\right) \quad (2.16)$$

Die obige Abschätzung wurde unter der Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichtes durchgeführt. Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden wird an der Kapillarfront aber nur Verdampfung berücksichtigt und nicht, wie beim thermodynamischen Gleichgewicht, Verdampfung und Kondensation [Herziger 1990]. Der Ablationsdruck auf der Schneidfront ist damit nur halb so groß wie der Sättigungsdruck.

Für den Ablationsdruck erhält man folgende Gleichung:

$$p_F(T) = \frac{1}{2} p_s(T) = \frac{1}{2} p_{max} \exp\left(-\frac{H_v}{RT}\right) \quad (2.17)$$

Aus Gl. (2.9), Gl. (2.12) und Gl. (2.17) ergibt sich die Druckerhöhung zwischen Schneidfront und Schnittflanken aus der impliziten Gleichung 2.18 zu:

$$\Delta p = \frac{\rho v^4 b_s^2}{8 \kappa^2} \left(\ln^2 \frac{\frac{H_v}{R} \frac{1}{\ln \frac{p_{max}}{2\Delta p}} + \frac{H_m}{c_p}}{T_m + \frac{H_m}{c_p}} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

Bild 2.21 zeigt die berechnete Druckdifferenz Δp in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit. Die Schnittfugenbreite b_s ist bei diesen Berechnungen mit einem Wert von 110 μm angesetzt worden. Der zum Schmelztransport benötigte Dampfdruck steigt mit der Schneidgeschwindigkeit.

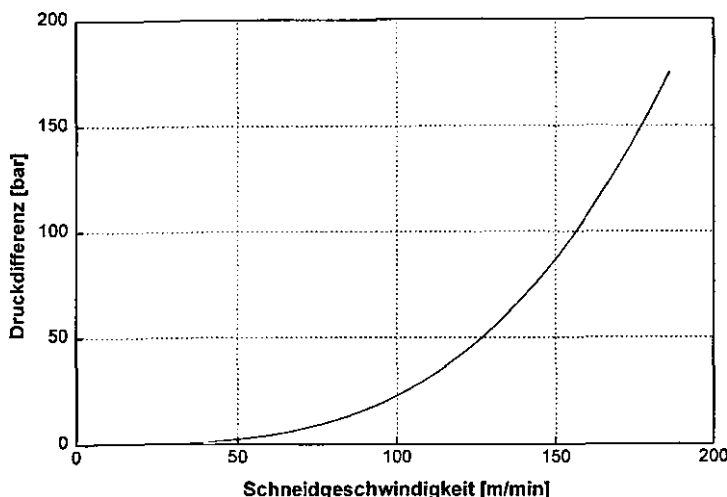


Bild 2.21: Dampfdruck auf der Schneidfront als Funktion der Schneidgeschwindigkeit

Bei einer Schneidgeschwindigkeit von z.B. 100 m/min muß eine Druckdifferenz von 23 bar vom Scheitel der Schneidfront zu den Schnittflanken aufgebaut werden.

Aus der Druckdifferenz lassen sich weitere, für das Prozeßverständnis relevante Größen abschätzen.

Bild 2.22 zeigt die Temperatur auf der Schmelzfilmoberfläche als Funktion der Schneidgeschwindigkeit.

Die Schmelzfilmdicke als Funktion der Vorschubgeschwindigkeit kann aus der Druckdifferenz, Gl. (2.17), und Gl. (2.12) bestimmt werden. In Bild 2.23 ist zu erkennen, daß die Schmelzfilmdicke mit der Vorschubgeschwindigkeit abnimmt.

Der Anteil des aufgeschmolzenen Schnittfugenmaterials, der verdampft wird, kann aus der Abdampfrate berechnet werden. Diese ergibt sich aus der Dichte und der Geschwindigkeit des Dampfes.

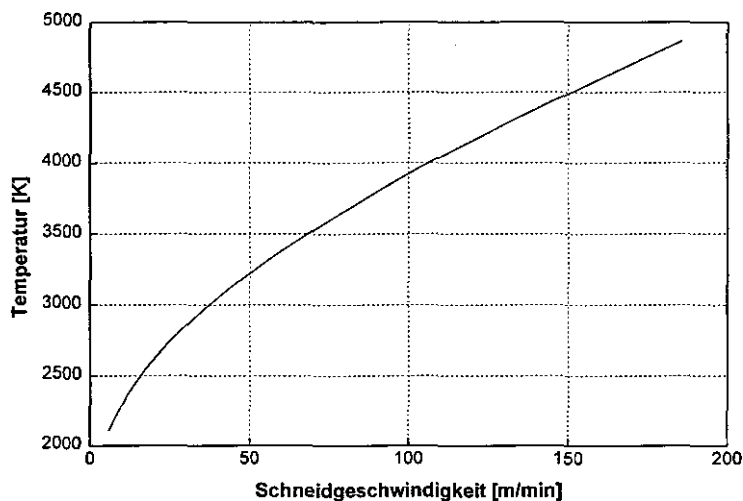


Bild 2.22: Schmelzfilmtemperatur als Funktion der Schneidgeschwindigkeit

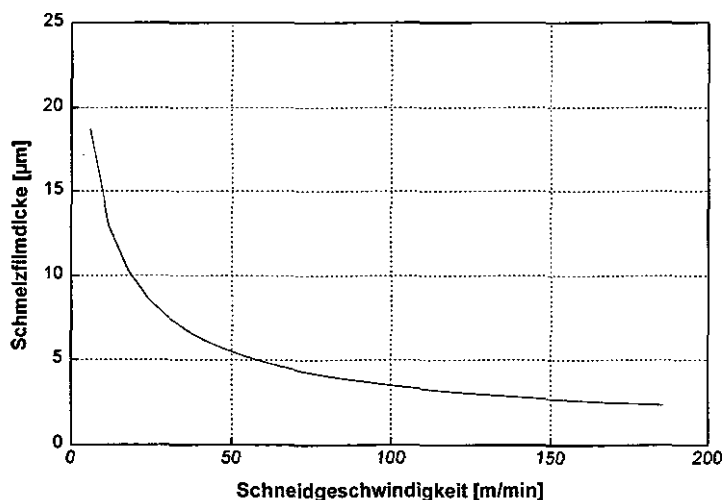


Bild 2.23: Schmelzfilmdicke als Funktion der Schneidgeschwindigkeit

Aus der Maxwellverteilung wird die mittlere Geschwindigkeit des Dampfes hergeleitet:

$$f(v_{Dx}, v_{Dy}, v_{Dz}) = n_s \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(- \frac{m}{2kT} v_D^2 \right) \quad (2.19)$$

v_{Dx}	=	Geschwindigkeit des Dampfes in x- Richtung
v_{Dy}	=	Geschwindigkeit des Dampfes in y- Richtung
v_{Dz}	=	Geschwindigkeit des Dampfes in z- Richtung
v_D	=	mittlere Geschwindigkeit des Dampfes
n_s	=	Teilchendichte
m	=	Teilchenmasse
k	=	Boltzmannkonstante

Die Verteilungsfunktion ist auf die Teilchendichte n_s normiert. Durch Integration über die Geschwindigkeitskomponenten in y- und z- Richtung erhält man die Geschwindigkeitsverteilung in x- Richtung:

$$g(v_{Dx}) = \int_{-\infty}^{+\infty} dv_{Dy} dv_{Dz} f(v_{Dx}, v_{Dy}, v_{Dz}) = n_s \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(- \frac{m}{2kT} v_{Dx}^2 \right) \quad (2.20)$$

Aus Gl. (2.19) und Gl. (2.20) berechnet sich die mittlere Geschwindigkeit zu:

$$v_D = \frac{\int_0^{\infty} dv_{Dx} v_{Dx} g(v_{Dx})}{\int_0^{\infty} dv_{Dx} g(v_{Dx})} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8}{\pi} R T} \quad (2.21)$$

Hierbei wird vorausgesetzt, daß sich das System auf der Schmelzfilmoberfläche im thermodynamischen Gleichgewicht befindet [Herziger 1990]. Die Dampfdichte ergibt sich aus Gl. (2.15) und Gl. (2.17) und der idealen Gasgleichung:

$$p_s V_D = \frac{p_s}{\rho_D} = R T \quad (2.22)$$

ρ_D = Dichte des Dampfes

zu:

$$\rho_D = \frac{p_{max}}{2RT} \exp \left(- \frac{H_v}{RT} \right) \quad (2.23)$$

Hiermit wird der Anteil des verdampften Materials berechnet:

$$\alpha_V = \frac{\rho_D v_D}{\rho v} \quad (2.24)$$

Der Anteil des verdampften Schnittfugenmaterials ist in Bild 2.24 als Funktion der Schneidgeschwindigkeit aufgetragen. Bei einer Schneidgeschwindigkeit von 100 m/min beträgt der Anteil des verdampften Schnittfugenmaterials ca. 9 % und nimmt mit steigender Schneidgeschwindigkeit progressiv zu. Die hierfür benötigte Verdampfungsenergie geht dem Schneidprozeß verloren und reduziert somit die Schneideffizienz (Schneidwirkungsgrad). Dieser Effekt deutete sich bereits in Bild 2.5 an, in dem für unterschiedliche Blechdicken die leistungsabhängige Schneidgeschwindigkeit aufgetragen ist. Die Meßpunkte ergeben im unteren Bereich einen leicht steigenden Kurvenlauf und gehen bei einer Laserleistung zwischen 800 und 950 W in einen degressiven Kurvenverlauf, bedingt durch die benötigte Verdampfungsenergie, über. Der ansteigende Kurvenverlauf im unteren Leistungs- bzw. Geschwindigkeitsbereich ist durch eine Absorptionserhöhung bei zunehmender Oberflächentemperatur der Schmelze und einen in diesem Bereich moderaten Verdampfungsanteil zu erklären [Petring 1994a]. Beide Bereiche sind zur Abschätzung der

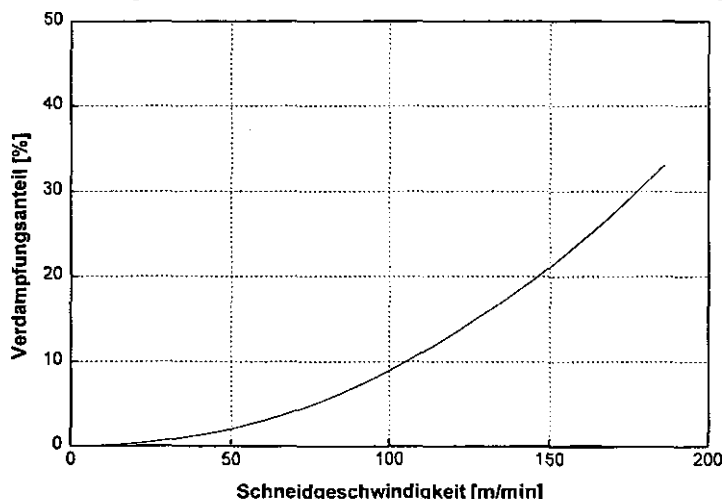


Bild 2.24: Verdampfungsanteil α_V als Funktion der Schneidgeschwindigkeit

Schneideffizienz durch Geraden angenähert worden. Ab dem Wendepunkt muß die zur Geschwindigkeitssteigerung benötigte Laserstrahlleistung, die dem Verhältnis der Kurvensteigungen entspricht, ca. um den Faktor 2 größer werden.

Bild 2.25 zeigt die einem Prozeßwirkungsgrad proportionale Größe $v_s \cdot s_{\text{Blech}} / P_L$ [mm²/J], die mit den in Bild 2.5 dargestellten Meßpunkten bestimmt wurden. Im Gegensatz zur Bestimmung des Energievolumens (Bild 2.19) wird hier nicht die Schnittfugenbreite berücksichtigt. Allen Kurven gemeinsam ist ein näherungsweise linearer Abfall dieser Größe ab einer Laserstrahlleistung von ca. 800 W. Von diesem Punkt an nimmt die Verdampfungsrate, die für den Schmelzaustrieb benötigt wird, und die Absorption im Plasma zu.

Das Gleichgewicht zwischen zu transportierendem Massenstrom $v_s \cdot s_{\text{Blech}} \cdot \rho$ und hierfür benötigten Dampfdruck stellt sich selbstkonsistent ein. Die Verdampfungsenergie wird dem Schneidprozeß auf der Absorptionsfront entzogen. Mit Verringerung der maximal möglichen Geschwindigkeit v_s wird der Prozeßwirkungsgrad reduziert.

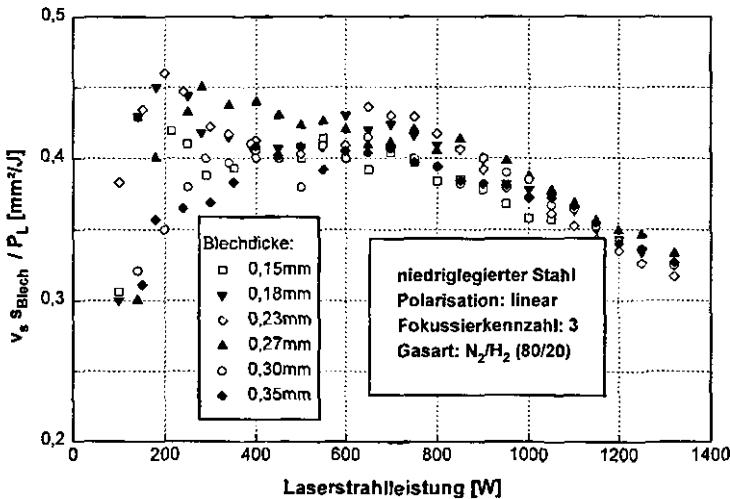


Bild 2.25: Prozeßwirkungsgrad in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für unterschiedliche Blechdicken

Informationen über den Schmelzaustrieb, der hinter der Wechselwirkungszone durch einen Gasstrahl erfolgt, können durch die Riefenneigung der Schnittkanten und die videooptische Betrachtung des Schmelzaustriebs gewonnen werden. Hinter der Dampfkapillare wird die Schmelze in Form von zwei Teilstrahlen aus der Schnittfuge ausgetrieben (Bild 2.26). Die Riefenneigung der Schnittkante, welche hier als Winkel zwischen der Senkrechten zur Blechoberkante und der Tangente an die Riefe definiert wird, nimmt im oberen Blechbereich zu und hat ungefähr ab der Blechmitte einen konstanten Wert. Durch die Prozeßgasströmung wird auf die azimuthal strömende Schmelze eine Kraftkomponente in Richtung Blechunterseite aufgebracht, welches sich im Riefenbild abzeichnet.

Unter der Annahme, daß die Richtung des Schmelzaustriebs der Riefenneigung an der Schnittkante entspricht, kann unter Zuhilfenahme von Hochgeschwindigkeits - Videoaufnahmen die Austrittsgeschwindigkeit der Schmelze abgeschätzt werden.

Für die Auswertung müssen zwei Koordinatensysteme betrachtet werden:

- die Riefenbildung als ortsfestes System bezüglich des Blechs, und
- die Richtung des Schmelzaustriebs auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen als bewegtes System, bei dem die Schneidgeschwindigkeit als zusätzliche Geschwindigkeitskomponente hinzukommt.

Die Schneidgeschwindigkeit, der Riefenwinkel und der Winkel des Schmelzaustriebs, der aus den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmt wird, ergibt ein Vektordiagramm, mit dessen Hilfe die Geschwindigkeit der Schmelze beim Austritt aus der Schnittfuge bestimmt werden kann (Bild 2.27).

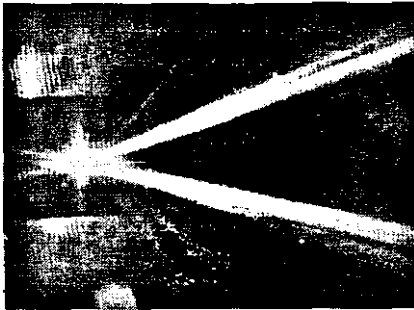


Bild 2.26: Schmelzaustrieb an der Blechunterseite

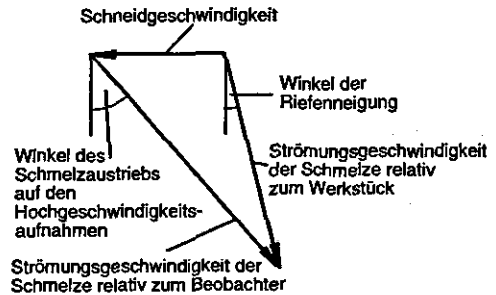


Bild 2.27: Winkelzusammenhang zwischen Schmelzaustrieb und Schneidgeschwindigkeit

Als Beispiel wird, wie bei der Bestimmung des für den Schmelzaustrieb notwendigen Dampfdruckes, eine Schneidgeschwindigkeit von 100 m/min gewählt. Bei dieser Schneidgeschwindigkeit stellt sich bei einem Prozeßgasdruck von 5,5 bar eine Riefenneigung von ca. 42° ein. Der Winkel des Schmelzaustriebs auf den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beträgt ca. 45° . Hieraus ergibt sich eine Geschwindigkeit der Schmelze beim Verlassen der Schnittfuge von ca. 22 m/s. Der Toleranzbereich der Austriebsgeschwindigkeit der Schmelze liegt bei diesen Untersuchungen bedingt durch die Meßungenauigkeiten bei der Bestimmung der Winkel zwischen 18 und 25 m/s.

Im Vergleich hierzu liegt die typische Geschwindigkeit der Schmelze beim konventionellen Laserstrahlschneiden ca. eine Größenordnung unter der Geschwindigkeit beim Hochgeschwindigkeitsschneiden [s.a. Petring 1994a].

Durch den im Bereich der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück azimuthalen Schmelztransport und den Schmelzaustrieb hinter der Dampfkapillare hat auch hier wieder der Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß, bei vergleichbaren Gasdrücken wie beim konventionellen Laserstrahlschneiden, den effektiveren Schmelzaustrieb.

2.2 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Nicht - Eisen - Metallen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, daß sich der beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Stahl einstellende Prozeß hinsichtlich Wechselwirkungsgeometrie, -mechanismus und Schmelzdynamik deutlich vom Prozeß des konventionellen Laserstrahlschneidens unterscheidet.

Das Einsetzen des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses wird durch die Geschwindigkeit charakterisiert, bei der die Schmelze nicht mehr durch einen zum Laserstrahl coaxialen Gasstrahl entlang der Schneidfront ausgetrieben werden kann. Mit wachsender Schneidgeschwindigkeit erhöht sich der abzutragende schmelz- oder dampfförmige Massenstrom. Im Geschwindigkeitsbereich unterhalb der zur Kapillarbildung führenden Geschwindigkeit wird die Erhöhung des Massenstroms durch Zunahme der Schmelzfilmdicke im Bereich der Schneidfront ermöglicht. Die Temperatur an der Schmelzfiltoberfläche, und somit der Temperaturgradient, wächst progressiv mit der Schneidgeschwindigkeit bzw. der Schmelzfilmdicke an. Bei Überschreiten der Siedetemperatur und Beginn der damit einhergehenden Verdampfung setzt die azimutale Schmelzströmung ein. Die Temperaturleitfähigkeit hat hierbei einen wesentlichen Einfluß auf die Schmelzfilmdicke (Gl. 2.12) und bestimmt zusammen mit der dynamischen Viskosität und dem spezifischen Gewicht der Schmelze den Verdampfungsanteil (Gl. 2.24) bei hohen Schneidgeschwindigkeiten. Bei einer niedrigen dynamischen Viskosität sind die zum Transport der Schmelze benötigten Kräfte geringer und der Verdampfungsanteil verringert sich.

Für die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Schneiduntersuchungen mit Kupfer und Aluminium wurden unlegierte Werkstoffe (SF - Cu ; Al 99,5) gewählt.

Bei den Stahlwerkstoffen und bei Kupfer ist die Dichte und die dynamische Viskosität bei Schmelztemperatur in etwa gleich groß, während diese beiden Materialwerte bei Aluminium um den Faktor 3 bis 4 geringer sind (Tabelle 1). Die charakteristischen Merkmale des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses müssen somit bei Kupfer bei etwa der gleichen Geschwindigkeit wie bei Stahl beginnen, während sie bei Aluminium erst bei sehr viel höheren Laserstrahlleistungen bzw. Schneidgeschwindigkeiten zu erwarten sind.

Eine Charakterisierung des Schneidprozesses wird bei den Werkstoffen Kupfer und Aluminium durch die Bestimmung der leistungsabhängigen Schneidgeschwindigkeit, der Schnittfugenbreite und der transmittierten Laserstrahlleistung durchgeführt.

Als Prozeßgas wird bei den Schneiduntersuchungen an Kupfer und Aluminium Sauerstoff eingesetzt. Neben einer durch die Oxidation der Schmelzfilmoberfläche erhöhten Absorption der Laserstrahlung bildet sich ein stabileres Prozeßverhalten aus.

Werkstoff	Schmelztemperatur [°C]	Verdampfungstemperatur [°C]	Dichte bei Schmelztemperatur [kg / dm ³]	dynamische Viskosität bei Schmelztemp. [kg / m s]	Temperaturleitfähigkeit der Schmelze [m ² s ⁻¹]
Fe	1536	2860	7,015	$5,5 \cdot 10^3$	$0,76 \cdot 10^{-5}$
Al	660	2520	2,385	$1,3 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^{-5}$
Cu	1085	2560	8,00	$4 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 1: Werkstoffdaten für Eisen, Aluminium und Kupfer

2.2.1 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Kupfer

Beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Kupfer ist ebenso wie beim Schneiden von Stahl bei einer für den Prozeß signifikanten Geschwindigkeit ein Wechsel des Prozeßverhaltens vom konventionellen Laserstrahlschneiden zum Hochgeschwindigkeitsschneiden festzustellen. Die Kurve der leistungsabhängigen Schneidgeschwindigkeit ist durch einen starken Anstieg gekennzeichnet und die Schnittfugenbreite steigt bei dieser Geschwindigkeit sprunghaft von 60 µm auf 100 µm an (Bild 2.28). In diesem Bereich hat die Kurve der Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung ihre größte Steigung ($\Delta v_s / \Delta P_L$) und somit die größte Schneideffizienzsteigerung.

Ab einer Laserstrahlleistung von 900 W gehen die Meßpunkte der leistungsabhängigen Schneidgeschwindigkeit in einen degressiven Kurvenverlauf über, während die Verbreiterung der Schnittfuge sich einem konstantem Wert (ca. 110 µm) nähert.

Analog zum Schneidprozeßverhalten von Stahl (s.a. Kapitel 2.1.2) steigt das Energievolumen als proportionale Größe für die absorbierte Laserstrahlung ($v_s \cdot s_{Blech} \cdot b_s / P_L$) mit zunehmender Laserstrahlleistung bedingt durch die Kapillarbildung an. Der Übergang zur Kapillarbildung zwischen 800 und 900 W führt zu einer Erhöhung des Energievolumens ($v_s \cdot s_{Blech} \cdot b_s / P_L$).

von $10,5 \text{ mm}^3/\text{kJ}$ auf $21,1 \text{ mm}^3/\text{kJ}$ (Bild 2.29). Bei einer Linearisierung der Meßwerte im Geschwindigkeitsbereich ohne Kapillarbildung ($P_L \leq 900 \text{ W}$) und des Hochgeschwindigkeitsschneidens ($P_L \geq 900 \text{ W}$) ist eine Absorptionserhöhung von 70 % beim Einsetzen des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses festzustellen. Der Anstieg der Geraden im Bereich des konventionellen Schneidprozesses ($P_L \leq 900 \text{ W}$) ist auf eine Absorptionserhöhung der Laserstrahlung auf der Schneidfront durch höhere Oberflächentemperaturen zurückzuführen, die zu einer Steigerung des Schneidwirkungsgrades führt.

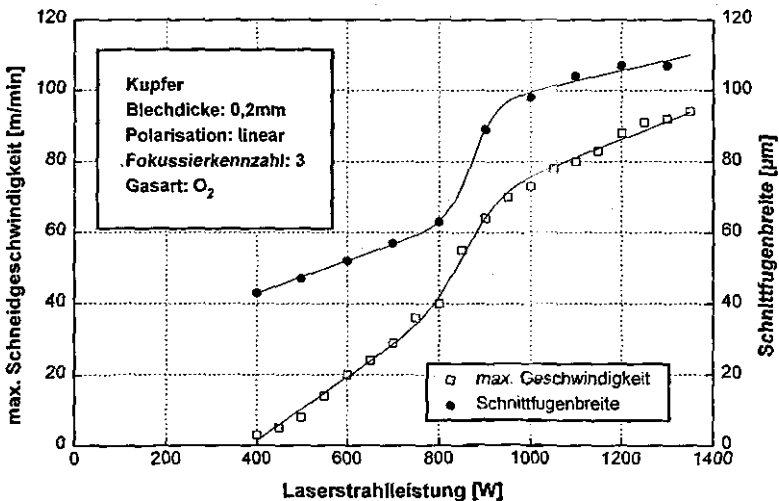


Bild 2.28: Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreite in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung bei Kupfer (SF - Cu)

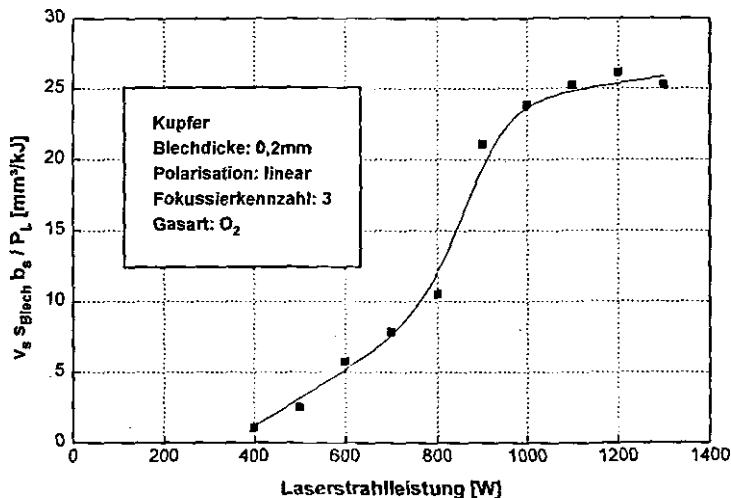


Bild 2.29: Energievolumen in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Kupfer

Die Ausbildung der Dampfkapillare ab einer Laserstrahlleistung von 800 W bzw. einer Schneidgeschwindigkeit von ca. 40 m/min kann auch durch die transmittierte Laserstrahlleistung unterhalb der Wechselwirkungszone diagnostiziert werden (Bild 2.30). Die durch die Schnittfuge transmittierte Laserstrahlleistung verringert sich bei einer Schneidgeschwindigkeit von 40 m/min auf unter 10 % und deutet bei höheren Schneidgeschwindigkeiten wie beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Stahl auf eine nach unten geschlossene Dampfkapillare hin.

Die typischen Merkmale des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses bei Kupfer treten, wie bereits bei der Betrachtung der Werkstoffwerte vermutet, in einem ähnlichen Geschwindigkeitsbereich wie bei Stahl auf.

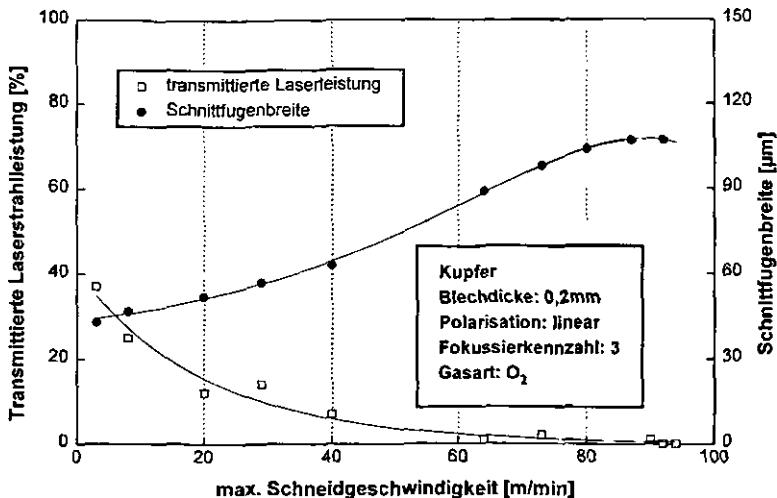


Bild 2.30: Transmittierte Laserstrahlleistung und Schnittfugenbreite als Funktion der Schneidgeschwindigkeit bei Kupfer

2.2.2 Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß bei Aluminium

Sowohl die leistungsabhängige Schneidgeschwindigkeit als auch die Schnittfugenbreite und die transmittierte Laserstrahlleistung zeigen beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Aluminium die charakteristischen Merkmale des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses. Ein wesentlicher Unterschied zu den Untersuchungen mit Stahl und Kupfer ist das erst bei höheren Schneidgeschwindigkeiten einsetzende typische Prozeßverhalten für das Hochgeschwindigkeitsschneiden (Bild 2.31).

Der konventionelle Schneidprozeß wird durch die hohe Temperaturleitfähigkeit, die geringe spezifische Dichte und geringe dynamische Viskosität dieses Werkstoffes bis in einen höheren Geschwindigkeitsbereich hinein aufrechterhalten. Durch die hohe Temperaturleitfähigkeit κ von Aluminium kann sich auch bei hohen Schneidgeschwindigkeiten eine im Vergleich zum Schneiden von Stahl größere Schmelzfilmdicke einstellen (s.a. Gl. 2.12). Desweiteren wird durch die geringe spezifische Dichte (s.a. Gl. 2.18) und dynamische Vis-

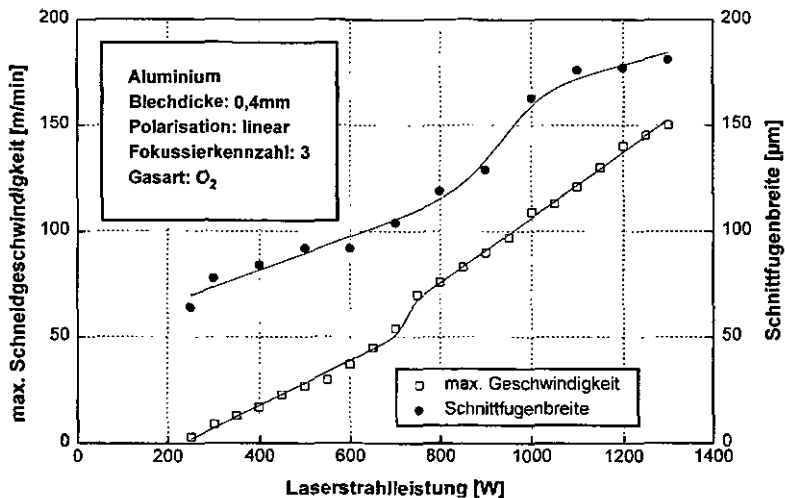


Bild 2.31: Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreite beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Aluminium (Al 99,5)

kosität ein weniger stark ansteigender geschwindigkeitsabhängiger Druckgradient für den Schmelzaustrieb zwischen Schneidfront und Schnittflanke

$$\Delta p = \frac{\rho v^4 b_s^2}{8 \kappa^2} \left(\ln^2 \frac{\frac{H_v}{R} \frac{1}{\ln \frac{p_{max}}{2\Delta p}} + \frac{H_m}{c_p}}{T_m + \frac{H_m}{c_p}} \right)^{-1} \quad (2.18)$$

benötigt. Sowohl die größeren Schmelzfilmdicken als auch die geringeren für den Schmelzaustrieb benötigten Kräfte verschieben den Beginn des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses zu höheren Schneidgeschwindigkeiten mit einem im Vergleich zum Schneiden von Stahl weniger stark ansteigendem Verdampfungsanteil α_v . Der geringere für den Schmelzaustrieb benötigte Verdampfungsanteil führt zu einer weniger starken Beeinflussung der Schneideffizienz.

Der typische Übergang in den degressiven Kurvenverlauf der Schneidgeschwindigkeit mit steigender Laserstrahlleistung beim Schneiden von Stahl und die damit verbundene Verringerung der Schneideffizienzsteigerung durch einen

erhöhten Verdampfungsanteil ist in Bild 2.31 selbst bei einer Schneidgeschwindigkeit von 150 m/min noch nicht zu erkennen.

Die Kapillarbildung und somit die Schnittfugenbreitenzunahme erfolgen bei Aluminium in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 80 und 100 m/min (s.a. Bild 2.31).

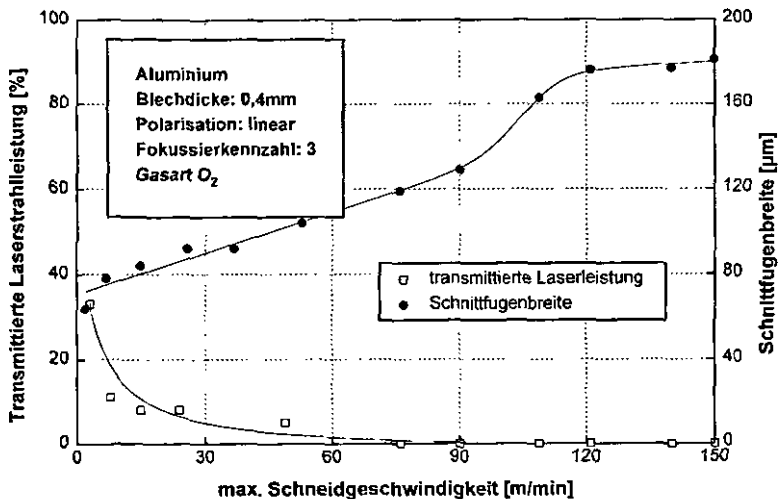


Bild 2.32: Transmitted Laserstrahlleistung und Schnittfugenbreite als Funktion der Schneidgeschwindigkeit bei Aluminium

Dieses Prozeßverhalten wird durch die Bestimmung der transmittierten Laserstrahlleistung bestätigt (Bild 2.32). Ab einer Schneidgeschwindigkeit von ca. 80 m/min ist analog zu den Untersuchungen mit Stahl (Bild 2.11) bei Ausbildung der Dampfkapillare unterhalb der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück keine Laserstrahlleistung zu diagnostizieren. Das Energievolumen ($v_s \cdot s_{Blech} \cdot b_s / P_L$) erhöht sich wie bei den in den vorangegangenen Kapiteln untersuchten Werkstoffen beim Einsetzen des Hochgeschwindigkeitsschneidprozesses und geht bei ca. 120 m/min in einen konstanten Wert von ca. $138 \text{ mm}^3/\text{kJ}$ über (Bild 2.33). Bei Kupfer beträgt das Energievolumen im Hochgeschwindigkeitsschneidbereich (Bild 2.29) ca. $25 \text{ mm}^3/\text{kJ}$ und bei Stahl (Bild 2.19) ca. $55 \text{ mm}^3/\text{kJ}$. Die sprunghafte Erhöhung des Energievolumens bei Ausbildung des Hochgeschwindigkeits-

schneidprozesses ist bei den beiden untersuchten Nicht - Eisen - Metallen stärker ausgeprägt als bei Stahl.

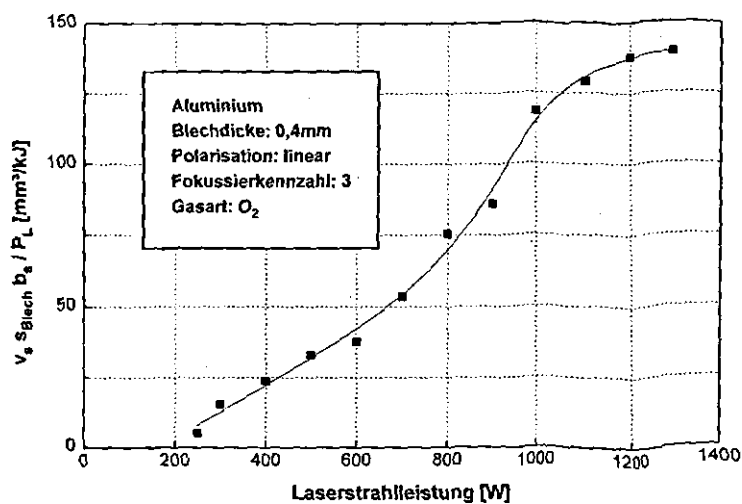


Bild 2.33: Energievolumen in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung bei Aluminium

3. Parametereinfluß beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden

Um den Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß hinsichtlich seiner Eigenschaften voll ausnutzen zu können, müssen die wesentlichen den Prozeß beeinflussenden Größen bezüglich ihrer strömungsdynamischen und plasma-physikalischen Auswirkungen auf den Prozeß optimiert werden. Hierzu gehören:

- die Strahlformung,
- die Art des Prozeßgases,
- die Schneiddüse und
- die Leistungsmodulation.

Dabei können die Einzelmaßnahmen nicht unabhängig voneinander betrachtet werden, da beispielsweise eine alleinige Optimierung des Schmelzaustriebs zu einer erhöhten Plasmabildung und somit zur Laserstrahlabschirmung führen kann. Es müssen gleichzeitig die Energieeinkopplung, der azimutale Schmelztransport im Bereich der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück, der Schmelzaustrieb hinter der Wechselwirkungszone und die Plasmabildung oberhalb der Wechselwirkungszone berücksichtigt werden.

3.1 Strahlformung

Über die Strahlformung mit Standard- bzw. Spezialoptiken wird die Breite der Wechselwirkungszone, die Ausbildung der Absorptionsfront und die Laserstrahlintensität im Fokus beeinflusst. Die Breite der Wechselwirkungszone und die daraus resultierende Schnittfugenbreite hat einen nahezu linearen Einfluß auf die Schneidgeschwindigkeit, während die Ausbildung der Absorptionsfront über den Absorptionswinkel und somit die Änderung des Absorptionsgrades A die Schneidgeschwindigkeit beeinflusst. In den folgenden Kapiteln zur Strahlformung wird der Einfluß unterschiedlichster Fokussierungen auf die Schneidgeschwindigkeit beschrieben. Ausgehend von Fokussierungen, die kreissymmetrische Laserstrahlquerschnitte im Fokus erzeugen, wird der Einfluß einer reduzierten Laserstrahlintensität bei einem elliptischen Fokusquerschnitt mit konstanter Strahlbreite auf die Schneidgeschwindigkeit untersucht.

Als Standardfokussierung werden im folgenden Fokussierungen zur Erzeugung eines kreissymmetrischen Fokusquerschnittes bezeichnet.

3.1.1 Strahlformung mit kreissymmetrischen Fokusquerschnitt

Ausgehend von der hinsichtlich der Rayleighlänge optimierten Fokussierung, deren Dimensionierung in Kapitel 2 beschrieben ist, werden durch Änderung der Fokussierkennzahl F (Gl. 2.3) Untersuchungen zum Einfluß des Fokussdurchmessers bzw. der Laserstrahlintensität bei kreissymmetrischen Fokusquerschnitten durchgeführt. Die Experimente werden an Stahlblechen mit einer Blechdicke von 0,23 mm durchgeführt. Für diese Blechdicke ergibt sich bei korrigierten Optiken eine optimale F - Zahl von 3,5 (Gl. 2.4) und beispielsweise für eine GaAs - Meniskuslinse eine F - Zahl von 3,0.

Zur Vermessung der Strahldurchmesser im freilaufenden und fokussierten Laserstrahl wird ein Strahl Diagnosegerät eingesetzt, das nach dem Prinzip der rotierenden Hohl nadel in Kombination mit einem pyroelektrischen Detektor arbeitet [Kramer 1991]. Die Strahldurchmesser des fokussierten Laserstrahls sind bei einer Fokussierung mit einer Fokussierkennzahl von $F = 3$ ca. $d_{\text{fok}} = 60 \mu\text{m}$ und bei einer von $F = 5$ ca. $d_{\text{fok}} = 100 \mu\text{m}$. Hierbei enthält die zur Bestimmung des Strahldurchmessers gewählte Fläche 86 % der Laserstrahlleistung. Aus diesen beiden Strahldurchmessern ergibt sich ein Verhältnis der mittleren Laserstrahlintensitäten im Fokus von 2,8 : 1 für die " $F = 3$ " - Fokussierung im Vergleich zur " $F = 5$ " - Fokussierung.

Bild 3.1 zeigt die Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit von der Laserstrahlleistung für diese Fokussierkennzahlen. Die Untersuchungen zeigen, daß der Einfluß der Laserstrahlintensität auf die Schneidgeschwindigkeit beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden geringer ist als nach rechnerischen Abschätzungen der Schneidgeschwindigkeit vermutet [Petring 1988]. Bei dieser Abschätzung der Geschwindigkeit wird von Fresnelabsorption auf einer zylinderförmigen Schneidfront mit vorgegebener Schmelzfilmtemperatur ausgegangen, bei der der Strahldurchmesser auf der Werkstückoberseite und die Intensitätsverteilung des Laserstrahls die Geometrie der Wechselwirkungszone bestimmt.

In dem Bild 3.1 ist zu erkennen, daß im Laserstrahlleistungsbereich über 800 W die beiden Kurven gegeneinander konvergieren. Die Ursache hierfür liegt in

dem durch die hohen Intensitäten ausgelösten Verdampfungsprozeß.

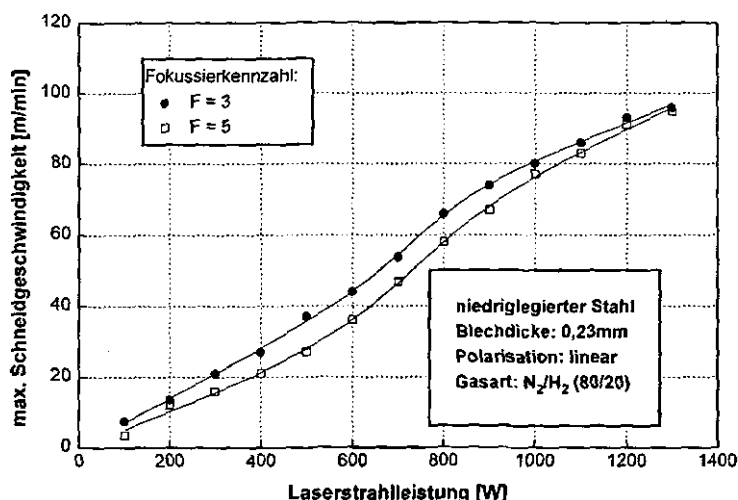


Bild 3.1: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung und der Fokussierkennzahl der Schneidoptik ($F = 3$; $F = 5$)

Ein ähnlicher Effekt ist bei dem Vergleich der Schneidgeschwindigkeiten bei einer Fokussierkennzahl von 2,1 mit einer von 1,67 festzustellen (Bild 3.2). Mit der $F = 2,1$ Fokussierung konnte der Fokusedurchmesser auf $45\text{ }\mu\text{m}$ und mit der $F = 1,67$ auf $36\text{ }\mu\text{m}$ reduziert werden. Durch die Reduzierung der Fokussierzahl kann die maximal erzielbare Schneidgeschwindigkeit nur geringfügig gesteigert werden. Die bei einer Verringerung der F -Zahl vermutete Geschwindigkeitssteigerung durch eine schmalere Wechselwirkungszone wird durch den zur Geschwindigkeitssteigerung benötigten erhöhten Verdampfungsanteil verhindert (s.a. Kapitel 2.1.3).

Ein direkter Vergleich der Ergebnisse aus Bild 3.1 und Bild 3.2 ist aufgrund unterschiedlicher Betriebsarten der Laserstrahlquelle nicht möglich. Die für die in Bild 3.1 dargestellten Versuche gewählte Betriebsart führt bei geringen Laserstrahlleistungen zu einer Verringerung der Strahlqualität der Laserstrahlquelle.

Bei Fokussierkennzahlen $F > 5$ nimmt mit steigender Fokussierkennzahl die Schneidgeschwindigkeit ab. Beispielsweise werden bei einer Fokussierkennzahl von 10 und konstant gehaltenen Verfahrensparametern maximale Schneidgeschwindigkeiten von 35 m/min erreicht.

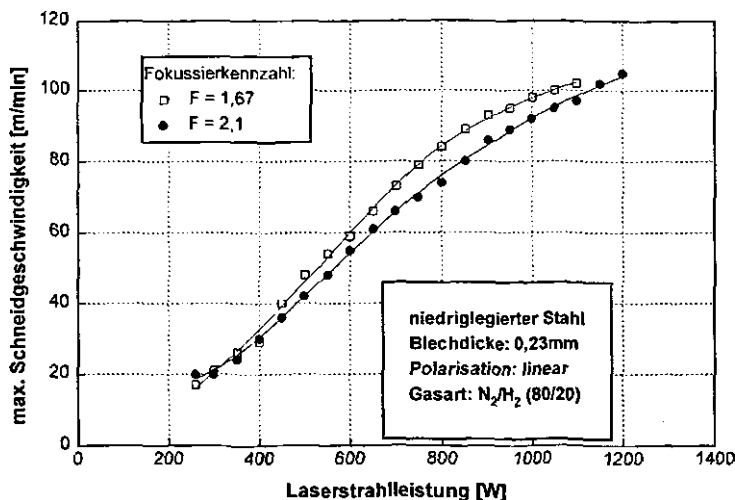


Bild 3.2: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung und der Fokussierkennzahl der Schneidoptik ($F = 1,67$; $F = 2,1$)

3.1.2 Strahlformung mit elliptischen Fokusquerschnitt

Das Schneiden mit einem elliptisch fokussierten Laserstrahl hat den Vorteil, daß die Laserstrahlintensität bei unveränderter Strahlbreite durch eine Aufweitung des fokussierten Laserstrahls in Schneidrichtung reduziert ist. Über eine verringerte Intensität im fokussierten Laserstrahl wird die Plasmabildung reduziert und die abschirmende Wirkung des Plasmas oberhalb des Werkstückes vermieden.

Zur elliptischen Formung des Laserstrahls wird ein Astigmatismus erzeugt, der zwei unterschiedliche Fokusebenen für die beiden senkrecht aufeinander stehenden Strahlachsen hat. Der Astigmatismus wird durch eine in beiden Strahlachsen unterschiedliche Strahldivergenz des freilaufenden Laserstrahls auf der Fokussieroptik erreicht. Hierzu kann sowohl eine Zylinderlinse als auch ein in eine Koordinatenachse fokussierender Umlenkspiegel im Strahlengang vor der Fokussieroptik eingesetzt werden.

Bild 3.3 zeigt die Prinzipskizze eines Fokussiersystems bei dem der Astigmatismus im Fokus flexibel einstellbar ist. Durch die beiden sphärischen Spiegel der

Strahlaufweitung wird eine zylindrische Verformung der Wellenfront des Laserstrahls erreicht. Die Stärke der Verformung und somit der Astigmatismus im Fokus ist über den Winkel γ veränderbar. Die technische Realisierung dieses Systems mit einer 2-fach Aufweitung und einer Fokussierung mit 50 mm Brennweite zeigt Bild 3.4.

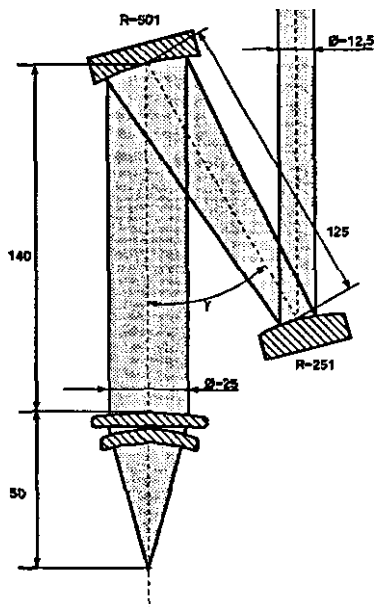


Bild 3.3: Prinzipskizze einer Optik zur Erzeugung eines elliptischen Strahls

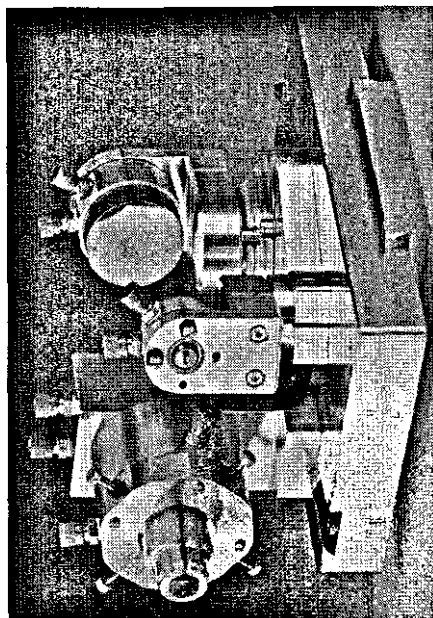


Bild 3.4: Optik zur Erzeugung eines elliptischen Strahlquerschnitts

In Bild 3.5 ist die mit einem Strahldiagnosegerät gemessene Kaustik für die beiden Ellipsenhalbachsen aufgetragen. Für die Anordnung mit einem Winkel γ von 30° wird bei einer Fokussierkannzahl von $F = 2$ eine minimale Fokusbreite von $50 \mu\text{m}$ senkrecht zur Schneidrichtung bei einer Strahllänge parallel zur Schneidrichtung von $180 \mu\text{m}$ erreicht. Die Laserstrahlintensität im Fokus wird, bei konstanter Laserstrahlleistung ($P_L = 1.200 \text{ W}$), durch den elliptischen Fokus von der Laserstrahlintensität $I_F = 4,25 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ bei einem kreisymmetrischen Querschnitt mit einer F -Zahl von 3 (Strahldurchmesser ca. $60 \mu\text{m}$) auf eine Laserstrahlintensität von $I_F = 1,7 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ verringert. Dies ent-

spricht einer Reduzierung der Laserstrahlintensität auf 40 % im Vergleich zu einem Strahl mit kreissymmetrischen Fokus.

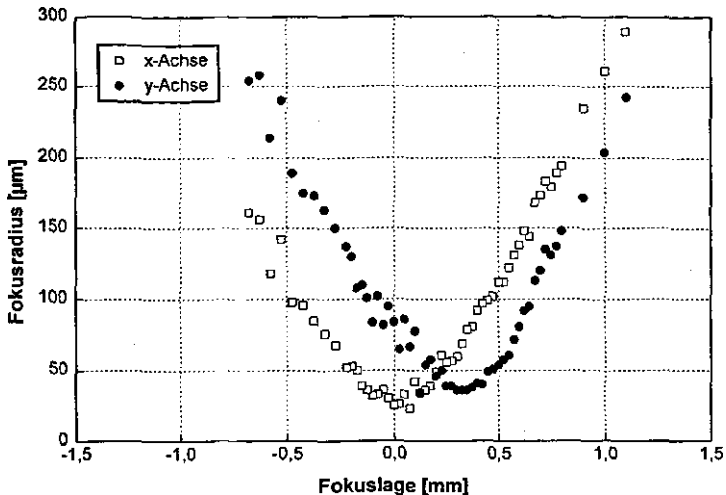


Bild 3.5: Strahlkaustik des mit der Optik zur flexiblen Erzeugung eines elliptischen Laserstrahls fokussierten Laserstrahls ($\gamma = 30^\circ$)

Die leistungsabhängigen Schneidgeschwindigkeiten mit einer kreissymmetrischen ($F = 3$; $d_{\text{fok}} = \varnothing 60 \mu\text{m}$) und einer elliptischen Fokussierung ($F = 2$; $d_{\text{fok}} = 50 \mu\text{m} \times 180 \mu\text{m}$) zeigt Bild 3.6. Aus dem Verlauf der Kurven ergeben sich hinsichtlich des Prozeßverhaltens zwei unterschiedliche Bereiche, die durch den Schnittpunkt der Kurven für den elliptischen und kreissymmetrischen Fokus festgelegt sind. Bei Laserstrahlleistungen unter 900 W werden mit einem kreissymmetrischen Fokus aufgrund des größeren Absorptionsgrades durch den steileren Winkel der Schneidfront höhere Schneidgeschwindigkeiten erreicht. Dieses Verhalten deutet in diesem Bereich auf Fresnelabsorption hin. Die mittlere Schneidfrontneigung, welche aus dem Verhältnis von Strahldurchmesser in Schneidrichtung und Blechdicke bestimmt wird, ist bei dem kreissymmetrischen Fokus ca. 75° und bei dem elliptischen ca. 50° . In dem zweiten Bereich, bei Laserstrahlleistungen über 900 W, werden mit dem elliptischen Fokusquerschnitt höhere Schneidgeschwindigkeiten erreicht. Durch die auf 40 % reduzierte Laserstrahlintensität bei konstanter Laserstrahlleistung und vergleichbaren Strahlbreiten wird die Elektronendichte im laserinduzierten

Plasma im Bereich der Wechselwirkungszone reduziert und somit die abschirmende Wirkung verringert. Als Folge dieses Effektes ist in dem untersuchten Leistungsbereich der degressive Kurvenverlauf bei dem elliptischen Fokus nicht derart signifikant ausgeprägt wie bei dem kreissymmetrischen Fokus.

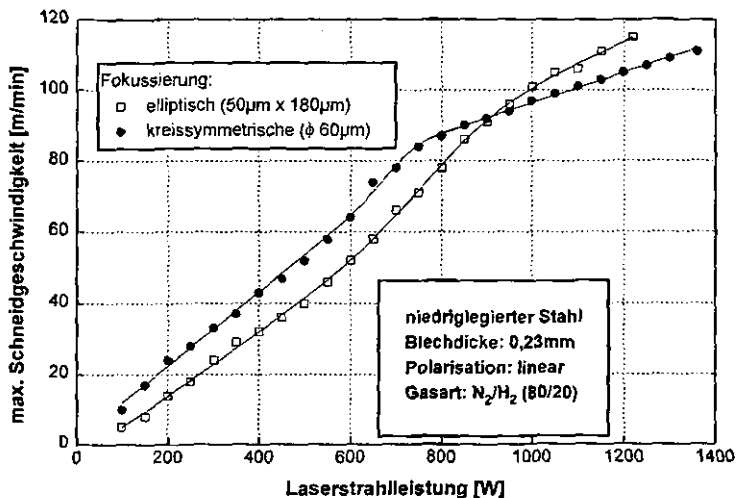


Bild 3.6: Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung für einen kreissymmetrischen und einen elliptischen Fokus ($\gamma = 30^\circ$)

3.2 Fokusslage

Die beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden eingesetzten Fokussierungen mit kleinen Fokussierkennzahlen haben bedingt durch die großen Divergenzwinkel eine Rayleighlänge im Bereich von wenigen 1/10 mm. Mit der Untersuchung des Einflusses einer Fokusslagenänderung auf die Schneidgeschwindigkeit können Regeln und Kriterien über die erforderliche Spanntechnik bei Blechplatten bzw. die Bandlaufgenauigkeit bei Bandmaterial abgeleitet werden. Zusätzlich zu den Justagetoleranzen der Bearbeitungsmaschine treten bei Feinstblechen Ebenheitstoleranzen zwischen den Auflagepunkten durch das Eigengewicht der Bleche auf. Desweiteren neigen Feinstbleche in Bearbeitungssystemen mit bewegten Werkstücken zu Schwingungen.

Die Untersuchungen zum Einfluß der Fokuslage auf die Schneidgeschwindigkeit sind sowohl mit einem kreissymmetrischen (Bild 3.7) als auch mit einem elliptischen Fokusquerschnitt (Bild 3.8) durchgeführt worden. In den Bildern sind ausgehend von einer optimalen Fokuslage bzw. der Fokuslage, bei der die maximale Schneidgeschwindigkeit erreicht wird, die in Strahlausbreitungsrichtung, d.h. in Richtung Blechunterseite verschobenen Fokuslagen als positive Fokuslagenwerte definiert.

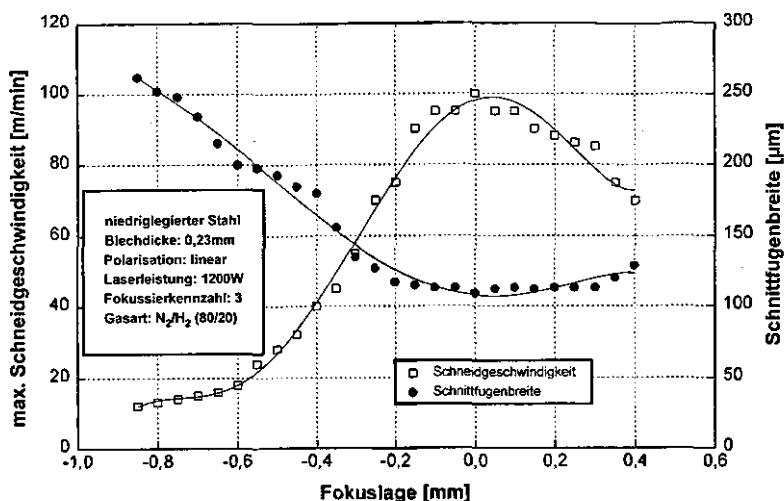


Bild 3.7: Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreite als Funktion der Fokuslage bei einem kreissymmetrischen Fokusquerschnitt
(+ Werte in Strahlausbreitungsrichtung)

Die Untersuchungen mit einem kreissymmetrischen Fokusquerschnitt (Bild 3.7) zeigen, daß eine Fokuslagenänderung in Richtung auf die Blechunterseite weniger kritisch ist als ein Fokuspunkt, der über dem Blech liegt. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei einer Fokuslagenänderung, die größer als die Rayleighlänge (ca. 0,2 mm) ist. Eine Fokuslagenänderung von 0,2 mm in Richtung Blechunterseite hat eine Geschwindigkeitsreduzierung von 12 %, eine in Richtung Blechoberseite von 25 % zur Folge. Für konstant hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten muß der Fokuspunkt bezüglich des Bleches in einem Bereich von kleiner $\pm 0,1$ mm stabil gehalten werden. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit liegt in diesem Bereich ca. 5 % unterhalb der bei dieser

Blechdicke erreichbaren maximal möglichen Schneidgeschwindigkeit. Auf die mittlere Schnittfugenbreite hat die Fokuslagenänderung einen ähnlichen Einfluß. Auch hierbei hat eine Änderung in Richtung auf die Blechunterseite geringere Auswirkungen.

Bild 3.8 zeigt den Einfluß der Fokuslagenverschiebung bei einem elliptischen Fokusquerschnitt (s.a. Kapitel 3.1.2, Bild 3.5). Beim Einsatz des elliptischen Fokusquerschnittes zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie beim kreissymmetrischen Fokusquerschnitt. Eine Fokuspunktverschiebung in Richtung Blechunterseite führt zu einer geringeren Geschwindigkeitsreduzierung und Schnittfugenbreitenänderung. Bedingt durch die im Vergleich zu den Ergebnissen aus Bild 3.7 geringeren Rayleighlänge bei dieser Fokussierung ($z_R = 0,1 \text{ mm}$) sind die Änderungen durch die Fokuslagenänderung extremer. Die maximal mögliche Bearbeitungsgeschwindigkeit liegt bei einer Fokuspunktverschiebung von $\pm 0,1 \text{ mm}$ ca. 9 % unterhalb der maximalen Trenngeschwindigkeit.

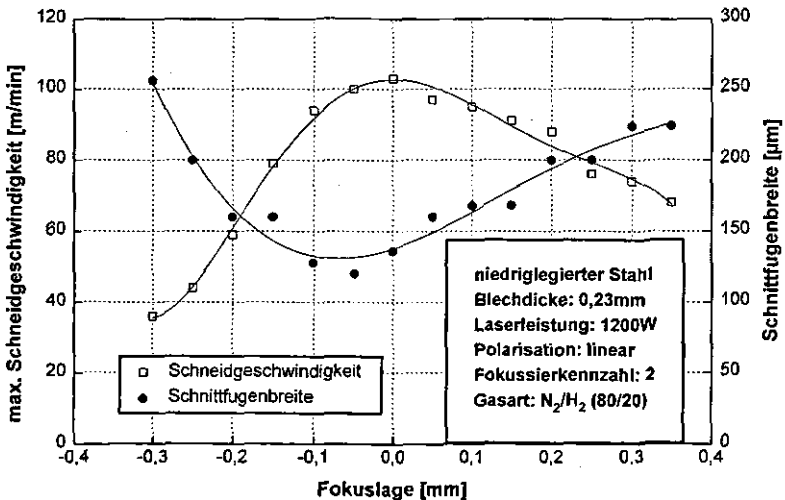


Bild 3.8: Schneidgeschwindigkeit und Schnittfugenbreite als Funktion der Fokuslage bei einem elliptischen Fokusquerschnitt
 (+ Werte in Strahlausbreitungsrichtung)

3.3 Schneidkopfneigung

Eine Schneidkopfneigung bezüglich der Senkrechten des Bearbeitungswerkstücks in bzw. entgegen der Schneidrichtung führt bei dominanter vorliegender Fresnelabsorption zu einer

- Intensitätsänderung auf der Schneidfront
- Änderung des Einfallswinkels und somit zu einer Absorptionsänderung
- Beeinflussung des Schmelzaustriebwinkels.

Eine schleppende Anordnung des Schneidkopfes hat mit zunehmender Schneidkopfneigung eine Erhöhung des Einfallswinkels und eine Vergrößerung der Absorptionsfläche auf der Schneidfront zur Folge. Bei den vorliegenden typischen Parametern für das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden führt eine Schneidkopfneigung von 45° in schleppender Anordnung zu einer Änderung des mittleren Einfallswinkels von 73° auf 80° und eine Vergrößerung der Absorptionsfläche um ca. 65 %. Hierbei wird von einer parallelen Strahlkaustik im Bereich der Wechselwirkungszone ausgegangen, wobei sich der Strahlquerschnitt auf der Schneidfront abbildet. Der Einfallswinkel und die Absorptionsfläche als Funktion der Schneidkopfneigung haben ein Minimum bei stechender Anordnung bei ca. 17° und steigen ab diesem Punkt progressiv an. Im Minimum steht die Absorptionsfront parallel zur Werkstücknormalen. Bei einem Schmelztransport entlang der Schneidfront wird die Schmelze senkrecht zum Blech aus der Schnittfuge durch den Gasstrahl ausgetrieben.

Bild 3.9 zeigt die Trenngeschwindigkeiten als Funktion des Neigungswinkels und der Laserstrahlleistung. Unabhängig von der Laserstrahlleistung werden mit einer senkrecht zum Blech orientierten Strahlachse maximale Schneidgeschwindigkeiten erreicht. Bei reduzierter Laserstrahlleistung nimmt mit Erhöhung des Neigungswinkels sowohl in stechender als auch schleppender Anordnung die Schneidgeschwindigkeit ab.

Abschätzungen des Absorptionsgrades bei einer Änderung des mittleren Einfallswinkels von 73° auf 76° , verursacht durch eine Schneidkopfneigung von 0° auf 25° in schleppender Anordnung, ergeben eine Absorptionserhöhung von 5% [Beyer 1985a]. Diese theoretische Absorptionserhöhung ist bei den experimentellen Ergebnissen nicht festzustellen. Eine Ursache kann z.B. bei schleppender Anordnung ein erschwerter Schmelzaustrieb, Plasmaeffekte und eine geringere Absorption als Folge einer verringerten Mehrfachreflexion sein.

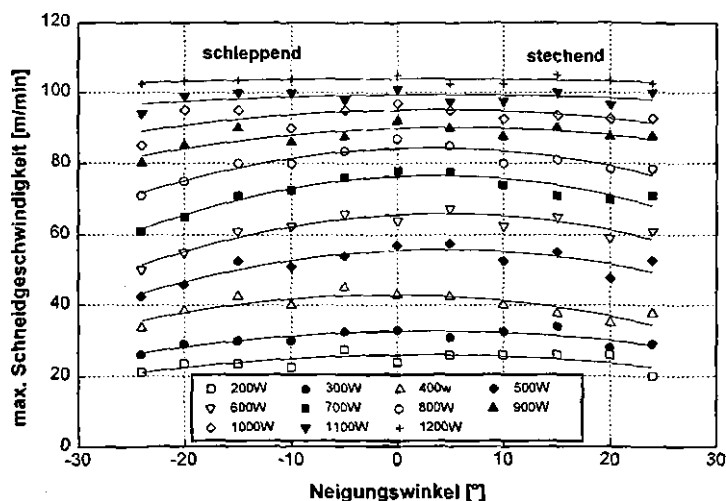


Bild 3.9: Schneidgeschwindigkeit als Funktion des Schneidkopfneigungswinkels und der Laserstrahlleistung bei niedriglegiertem Stahl

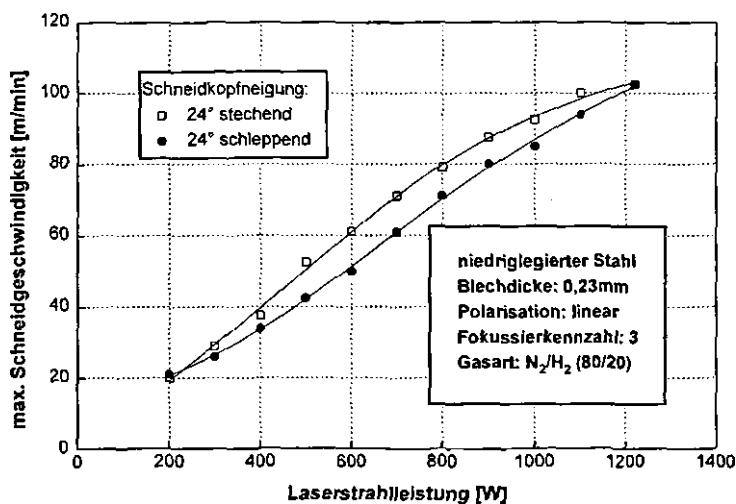


Bild 3.10: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung bei einer Schneidkopfneigung von 24° stechend und schleppend

Ein Vergleich von stechender und schleppender Schneidkopfanordnung ist in Bild 3.10 dargestellt. Die Kurve der Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung hat bei schleppender Anordnung einen nahezu linearen Anstieg, während sie bei stechender Anordnung den für den Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß typischen Verlauf mit einem Übergang von einer progressiven zu einer degressiven Funktion aufweist.

3.4 Prozeßgas

Wie beim konventionellen Laserstrahlschneiden wird beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden das durch die absorbierte Laserstrahlung aufgeschmolzene Material durch einen Gasstrahl aus der Schnittfuge ausgetrieben. Der Schmelzaustrieb aus der Schnittfuge erfolgt im Gegensatz zum konventionellen Schneiden etwa 1/10 mm hinter der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück (s.a Bild 2.7). Die den Materialtransport verursachenden Kräfte werden von dem Gasstrahl als Schubspannungs- und Druckkräfte auf die Schmelze übertragen. Mit der Geschwindigkeit und der Dichte der Gase steigen die auf ein Flächenelement der Schmelze wirkenden Kräfte an. Außerdem kann ein aktives Prozeßgas aufgrund seiner exothermen Reaktion mit der Metallschmelze einen zusätzlichen Energieanteil liefern [Sullivan 1967] [Schmidt 1979] [Nielsen 1987] [Mair 1989] [Winkler 1992]. Neben dem Schmelzaustrieb beeinflußt beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden das Prozeßgas zudem die Absorption auf der Schneidfront und die Plasmabildung im Bereich der Wechselwirkungszone.

Mit der Gasart und mit unterschiedlichen Gasgemischen kann die Anzahl der freien Elektronen im laserinduzierten Plasma variiert werden. Hierzu werden verschiedene Eigenschaften der Gase ausgenutzt:

- Elektronegative Gase haben eine große Affinität zu den freien Elektronen des Plasmas und verringern deren Anzahl durch Bindung an die elektronegativen Atome [Beyer 1989].
- Gase mit einem geringen Atomgewicht fördern die Rekombinationsrate. Aufgrund des erleichterten Impulsübertrages durch Stoßwechselwirkung wird das Gas "gekühlt" [Beyer 1985a].

- Die Schwelle zur Plasmabildung wird bei einem Gas mit einer hohen Ionisierungsenergie zu höheren Laserstrahlintensitäten verschoben [Poprawe 1984].

Die Komplexität der sowohl für den Schmelzaustrieb als auch die Plasmabildung relevanten Wechselwirkungsprozesse, die zum Teil in Bezug auf ihren Einfluß im Widerspruch zueinander stehen, lassen nur eine getrennte theoretische Abschätzung des Gaseinflusses auf die Plasmabildung bzw. auf den Schmelzaustrieb zu. Hier wird die Eignung der unterschiedlichen Gasarten durch Schneidexperimente beurteilt.

Der Einfluß des Prozeßgases auf die leistungsabhängige Schneidgeschwindigkeit ist in Bild 3.11 dargestellt. Über den gesamten Leistungsbereich wird mit Sauerstoff (Reinheit 4.5) die höchste Schneidgeschwindigkeit erreicht. Die im Vergleich zum Stickstoff erzielbare Geschwindigkeitssteigerung mit Sauerstoff verringert sich beim konventionellen Laserstrahlschneiden mit abnehmender Blechdicke. Dieser Effekt verstärkt sich beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden von Feinstblechen, so daß bei Verwendung von Sauerstoff als Prozeßgas nur noch Geschwindigkeitssteigerungen < 10 % erzielt werden. Der Grund für eine Geschwindigkeitssteigerung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden liegt in der exothermen Reaktion des Sauerstoffs mit der Metallschmelze auf der Schneidfront, in der Absorptionserhöhung auf der durch den Sauerstoff oxidierten Schneidfront und der reduzierten Plasmabildung durch die hohe Elektronegativität des Sauerstoffs (3.5).

Ebenso wie Helium ist Wasserstoff als sehr leichtes Gas zum "Kühlen" des laserinduzierten Plasmas durch Stoßwechselwirkung geeignet. Die Untersuchungen zeigen, daß durch Beimischung von Wasserstoff zu den typischen beim Laserstrahlschneiden zum Schmelzaustrieb eingesetzten Gasen eine Geschwindigkeitssteigerung erzielt werden kann. Zu diesen Gasen gehören Argon und Stickstoff. Bei Argon ist der Effekt der Geschwindigkeitssteigerung wegen der geringen Ionisierungsenergie und somit einer niedrigen Intensitätsschwelle, die zur Bildung eines Plasmas führt, stärker ausgeprägt. Desweiteren wirkt sich die Reduktion der Oberflächenspannung durch den Wasserstoff vorteilhaft auf den Schmelztransport aus [Farwer 1983].

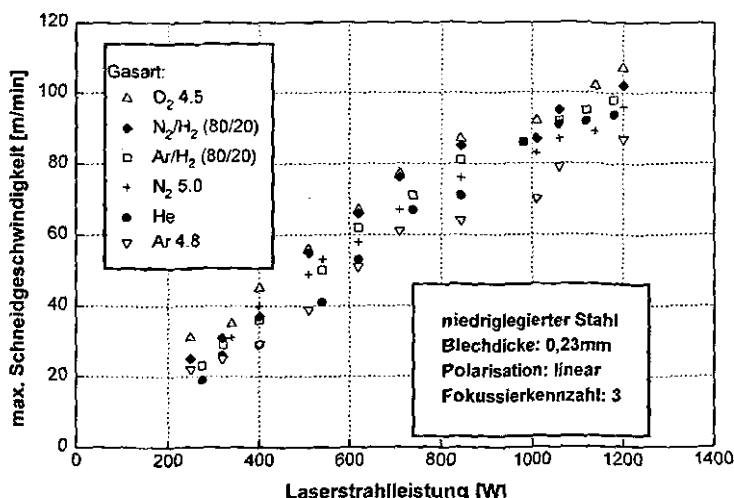


Bild 3.11: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Prozeßgases

Bild 3.12 zeigt die Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit von unterschiedlichen Sauerstoff / Stickstoffgemischen. Die Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse, die sich bereits in Bild 3.11 andeuteten. Eine signifikante Geschwindigkeitssteigerung ist beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Feinstblechen durch Verwendung von Sauerstoff nicht möglich. Nachteilig beim Schneiden unter Verwendung von Sauerstoff ist, daß der Sauerstoff nicht ausschließlich mit der Metallschmelze auf der Schneidfront reagiert. Durch eine unkontrollierte exotherme Reaktion mit der noch heißen Metallschmelze hinter der Schneidfront wird eine im Vergleich zu den inerten Gasen extreme Verschlechterung der Schnittqualität verursacht.

Weiterführende Versuche zum Einfluß der Gasart sind anhand der in Bild 3.13 dokumentierten leistungsabhängigen Schneidgeschwindigkeit bei Stickstoff und einem Stickstoff / Wasserstoff - Gemisch mit einem elliptischen Strahlquerschnitt durchgeführt worden. Auch bei niedrigen Laserstrahlintensitäten durch die elliptische Fokussierung ist eine Erhöhung der absoluten Schneidgeschwindigkeitsdifferenz mit steigender Laserstrahlleistung feststellbar. Dieser Effekt ist bei niedrigeren Intensitäten weniger stark ausgeprägt und setzt im Vergleich zu einem kreissymmetrischen Fokusquerschnitt bei höheren Laserstrahlleistungen (Bild 3.11) ein.

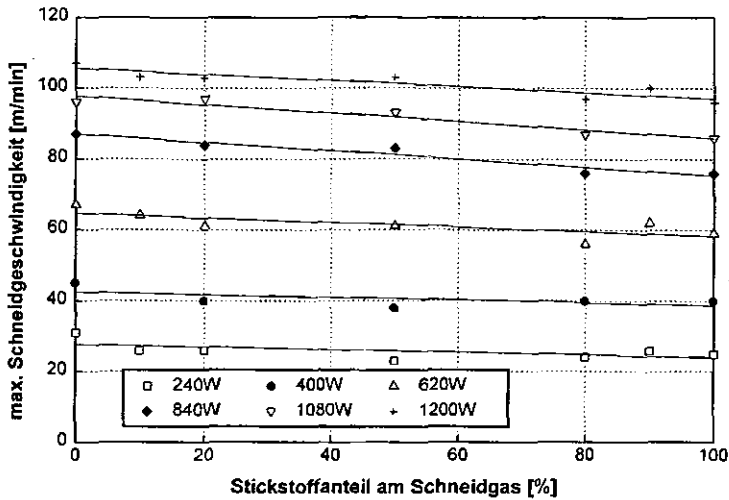


Bild 3.12: Schneidgeschwindigkeit als Funktion des Stickstoffanteils bei einem Sauerstoff / Stickstoff - Gemisch

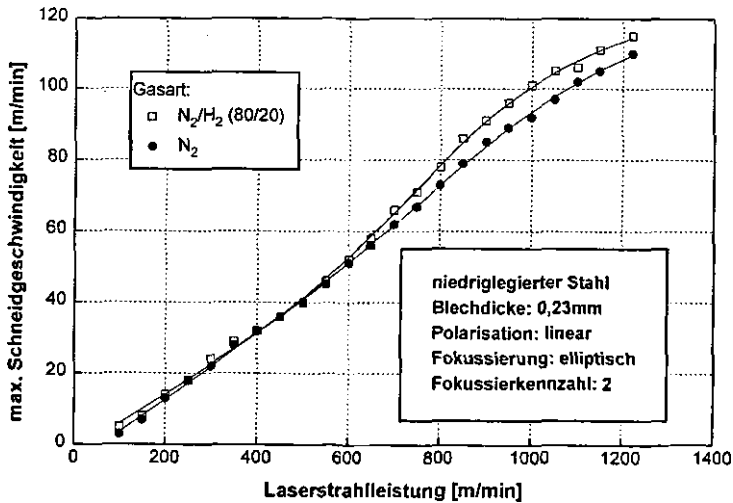


Bild 3.13: Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung bei Stickstoff und einem Stickstoff / Wasserstoff - Gemisch

Eine genauere Analyse des Wasserstoffeinflusses gestattet die in Bild 3.14 aufgetragene maximale Schneidgeschwindigkeit als Funktion des Wasserstoffanteils an dem Prozeßgas. Durch den Zusatz von 30 % Wasserstoff zum Stickstoff kann eine Geschwindigkeitssteigerung bis zu 3 % erzielt werden. Eine Beimischung von Wasserstoff zum Helium hat bis zu einem Volumenanteil von 10 % einen geschwindigkeitssteigernden Einfluß und führt bei höheren Wasserstoffanteilen zu einer Reduzierung der Schneidgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsreduktion bei Helium / Wasserstoff - Gemischen wird durch Prozeßinstabilitäten als Folge von Knallgasreaktionen (H_2 / O_2 - Gemischen) verursacht. Eine Knallgasreaktion bzw. Verpuffungen treten bei den Stickstoff / Wasserstoff - Gemischen ab einem Wasserstoffanteil von ≥ 30 % auf.

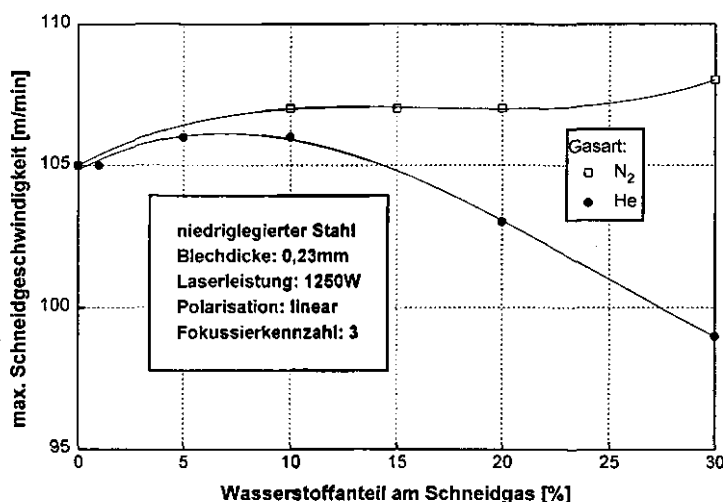


Bild 3.14: Schneidgeschwindigkeit als Funktion des Wasserstoffanteils zu den Prozeßgasen Stickstoff und Helium

Der Vergleich der bezüglich Schneidgeschwindigkeit und Prozeßstabilität optimalen Stickstoff- und Helium / Wasserstoff - Gemische zeigt bei der Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit von der Laserstrahlleistung ein stark unterschiedliches Prozeßverhalten (Bild 3.15). Während das Stickstoff - Gemisch den für das Hochgeschwindigkeitsschneiden typischen Kurvenverlauf mit einem degressiven Verhalten im oberen Geschwindigkeitsbereich aufweist, ist der Kurvenverlauf des Helium - Gemisches bis zu einer Laserstrahlleistung

von ca. 500 W leicht progressiv und in dem darüber liegenden Leistungsbereich nahezu linear. Mit dem Stickstoff / Wasserstoff - Gemisch wird in dem untersuchten Laserstrahlleistungsbereich die höhere Schneidgeschwindigkeit erreicht, wobei die beiden Kurvenverläufe einen Schnittpunkt oder ein Konvergieren der Schneidgeschwindigkeit vermuten lassen.

Die Untersuchungen zum Prozeßgaseinfluß ergaben bezüglich des optimalen Gasdruckes für alle Gasarten bei einer konischen Düse mit einem Düsendurchmesser von 1,0 mm übereinstimmende Ergebnisse. Der optimale Prozeßgasdruck liegt in einem Bereich zwischen 4,5 und 6,0 bar. Geringere Gasdrücke führen zu einer Grat- bzw. Bartbildung, höhere Gasdrücke zu einer stärkeren, die Laserstrahlung absorbierenden Plasmabildung.

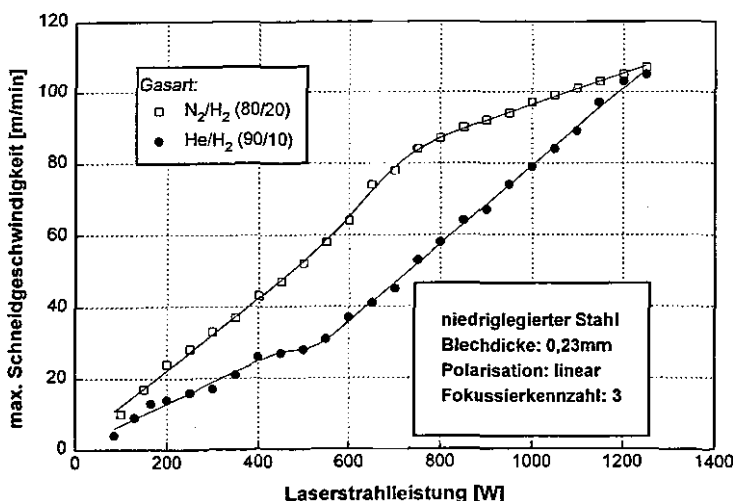


Bild 3.15: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für ein Stickstoff / Wasserstoff - und ein Helium / Wasserstoff- Gemisch

3.5 Schneiddüse

Beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden bilden sich zwei Bereiche aus (s.a. Kapitel 2), für die, optimiert auf den jeweiligen Bereich, unterschiedliche Prozeßgase und Prozeßgasdrücke von Vorteil sind. Im Bereich Laserstrahl / Werkstück ist die Absorption der Laserstrahlung auf der Schneidfront zu optimieren und im Bereich des nachfolgenden Schmelzaustriebs ein effektiver Schmelztransport zu gewährleisten. Mit einem koaxial zum Laserstrahl angeordneten Gasstrahl können durch eine spezielle Düsenjustage für beide Wechselwirkungsbereiche optimale gasdynamische Bedingungen erzeugt werden. Eine exzentrische Anordnung der Düsenachse zur Strahlachse in nachlaufender Anordnung ist zur Optimierung des Schmelzaustriebs beim konventionellen Laserstrahlschneiden bekannt [Petring 1988] [Gabzdyl 1991]. Diese Maßnahme erhöht sowohl die Schneidgeschwindigkeit als auch die Schnittqualität.

Die Justage der Düsenachse zur Laserstrahlachse muß, um beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden maximale Schneidgeschwindigkeiten und gute Schnittqualität zu erreichen, im Gegensatz zum konventionellen Schneiden vorlaufend sein [Beyer 1994]. Hierbei liegt die Düsenachse auf dem noch ungeschnittenen Blech. Bei einer für diese Anordnung typischen Düse mit einem Bohrungsdurchmesser von 1,0 mm ist eine Exzentrizität von ca. 0,2 mm optimal. Durch diese Maßnahme wird der Bereich mit dem erhöhten Staudruck des Prozeßgasstrahls auf das ungeschnittene Blech gelegt. Im Bereich der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück wird der statische Gasdruck und somit die Plasmabildung reduziert und eine Strömungskomponente des Gasstrahls in Richtung auf den offenen Schnittfugenkanal erzeugt. Diese Strömungsrichtung des Gasstrahls führt im Bereich des nachlaufenden Schmelzstaus zu einem verbesserten Materialaustrieb.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse erscheint es sinnvoll, die Prozeßgasströmung in Form von zwei getrennten Gasstrahlen mit einer für das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden konzipierten Düse auszubilden. In Bild 3.16 ist eine Düse für zwei Gasstrahlen dargestellt. Durch schlierenoptische Untersuchungen wurde das senkrechte Austreten der Gasstrahlen aus der Düse überprüft. Ein Beispiel für den Einfluß einer Parameteränderung zur Optimierung des Schmelzaustriebs ist in Bild 3.17 zu sehen. Zur Plasmabeeinflussung wird koaxial zum Laserstrahl Helium in den Bereich der Wechselwirkungszone

optimiert. Bei geringeren Gasdrücken ist ein Trennen des Blechs aufgrund eines ungenügenden Schmelzaustriebs nicht möglich, höhere Gasdrücke führen im Bereich der Wechselwirkungszone zur verstärkten Plasmabildung.

Genauere Untersuchungen des Prozeßgaseinflusses auf die Schneidgeschwindigkeit und Schnittqualität bei der Zweistrahldüse bestätigen die Ergebnisse aus Kapitel 3.4 zum Prozeßgaseinfluß. Die Schneidergebnisse sind bei Verwendung von N_2/H_2 - Gemischen in beiden Düsen optimal.

Bild 3.18 zeigt den Einfluß des Gasdrucks einer vorlaufenden und einer nachlaufenden Zusatzdüse auf die Schneidgeschwindigkeit. Die Düsenöffnung der koaxial zum Laserstrahl angeordneten Düsenmündung hat einen Durchmesser von 0,5 mm. Sowohl mit vorlaufender als auch nachlaufender Zusatzdüse ist bei sehr kleinen zum Laserstrahl koaxialen Düsenöffnungen eine Schneidgeschwindigkeitssteigerung um ca. 10 % möglich. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus Bild 3.19, bei denen mit einem Durchmesser der koaxialen Düse von 0,9 mm geschnitten wurde, deutet auf einen zu geringen Gasvolumenstrom durch die koaxiale Düse hin. Bei einer optimierten koaxialen

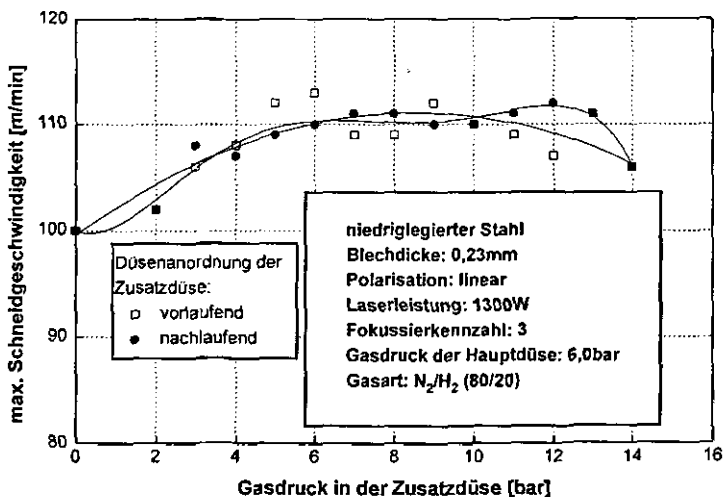


Bild 3.18: Schneidgeschwindigkeit als Funktion des Gasdrucks in der Zusatzdüse bei vorlaufender und nachlaufender Anordnung der Zusatzdüse und einem Hauptdüsendurchmesser von 0,5 mm

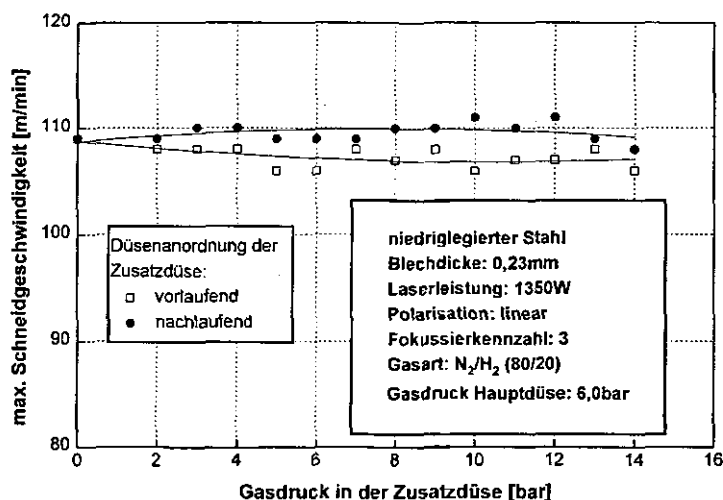


Bild 3.19: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Gasdrucks in der Zusatzdüse bei einem Hauptdüsendurchmesser von 0,9 mm

Düse läßt sich die Schneidgeschwindigkeit durch Einsatz einer Zusatzdüse im oberen Leistungsbereich nur minimal erhöhen. Die Erhöhung des Staudrucks im Bereich der Wechselwirkungszone durch die vorlaufende Düse führt sogar zu einer geringfügigen Geschwindigkeitsreduzierung.

Zur Dimensionierung der Schneiddüse sind in Bild 3.20 die maximalen Trenngeschwindigkeiten als Funktion des Düsendurchmessers der coaxial zum Laserstrahl angeordneten Düse aufgetragen. Dabei ist für jeden Meßpunkt der Gasdruck in der Zusatzdüse und die Düsenjustage optimiert worden. Es zeigt sich, daß beim Schneiden ohne Zusatzdüse eine Düsenöffnung mit einem Durchmesser von ca. 0,9 mm zu maximalen Geschwindigkeiten führt. Bei Verwendung einer zusätzlichen Düse wird das Maximum der Geschwindigkeit zu kleineren Durchmessern verschoben.

Zusätzlich zur Geometrie der Schneiddüse ist besonders bei Überschallgasstrahlen der richtige Abstand der Düse zum Werkstück für die Gaseinkopplung in die Wechselwirkungszone wichtig. In Bild 3.21 ist der Düsenabstand als Funktion der Schneidgeschwindigkeit aufgetragen. Der Toleranzbereich des Düsenabstandes zum Werkstück liegt, um maximale Schneidgeschwindigkeiten

zu erzielen, zwischen 0,3 und 0,8 mm.

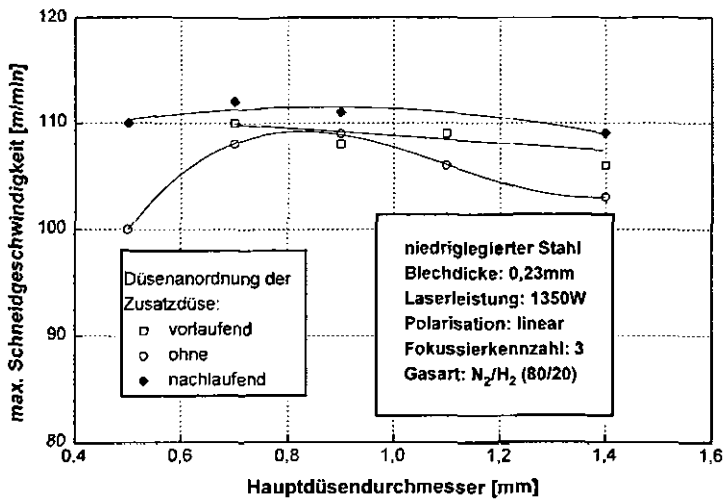


Bild 3.20: Schneidgeschwindigkeit als Funktion des koaxial zum Gasstrahl angeordneten Düsendurchmessers

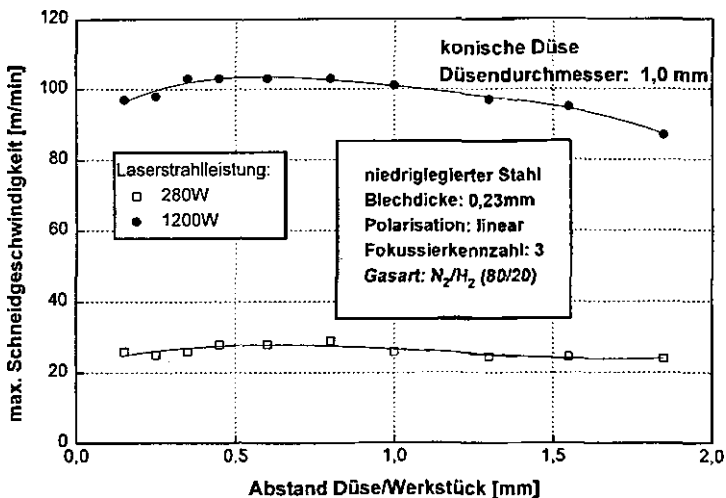


Bild 3.21: Schneidgeschwindigkeit als Funktion des Düsenabstandes

3.6 Leistungsmodulation

Um den Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß in der industriellen Anwendung zu etablieren, reicht es nicht aus, den Prozeß für einen Arbeitspunkt bzw. einen Geschwindigkeitsbereich zu optimieren. Die Schnittqualität muß bei Beschleunigungen und bei geringer Schneidgeschwindigkeit von ähnlich hoher Güte wie bei den mit hoher Geschwindigkeit geschnittenen Blechen sein. In Kapitel 2.1.1 ist bereits die Problematik, die beim Schneiden dünner Bleche mit geringer Geschwindigkeit ($v_s < 25 \text{ m/min}$) auftritt, angesprochen worden. Die Schmelze wird wie beim konventionellen Laserstrahlschneiden entlang der Schneidfront mit Hilfe des Gasstrahls aus der Schnittfuge ausgetrieben und lagert sich aufgrund einer ungenügenden Beschleunigung durch den Gasstrahl und der hohen Oberflächenspannungen der Schmelze bei geringeren Schmelzfilmttemperaturen tropfenförmig mit kleinen Krümmungsradien an der Blechunterseite an [Prandtl 1984]. Sowohl eine an die Geschwindigkeit angepaßte Laserstrahlleistung als auch eine Gasdruckvariation führen zu keiner Verbesserung der Schnittqualität. Durch die Anpassung der Laserstrahlleistung im Dauerstrichbetrieb wird ausschließlich der Neigungswinkel der Schneidfront, nicht aber die absorbierte Laserstrahlintensität und somit der Dampfdruck auf der Schneidfront beeinflußt.

Bild 3.22 zeigt eine typische Schnittkante, die mit den Verfahrensparametern des Hochgeschwindigkeitsschneidens bei geringer Schneidgeschwindigkeit erzeugt wurde.

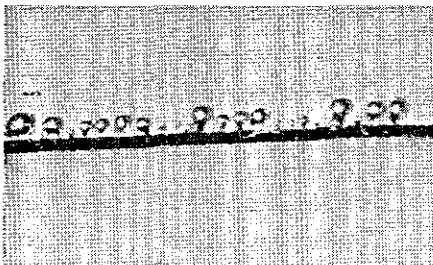


Bild 3.22: Schnittkante mit
Bartanhaftung bei
niedriger Schneidge-
schwindigkeit
($v_s = 10 \text{ m/min}$)

Hohe absorbierte Laserstrahlintensitäten und somit ein zum Beschleunigen der Schmelze auszunutzender Dampfdruck können durch eine Leistungsmodulation (Pulsbetrieb der Laserstrahlquelle) bei maximaler Laserstrahlleistung im Puls

erreicht werden. Die mittlere Laserstahlleistung muß über das Tastverhältnis T.V.

$$T.V. = \frac{t_{an}}{t_{an} + t_{aus}}$$

t_{an} = Pulslänge

t_{aus} = Pulspause

und die Tastfrequenz T.F.

$$T.F. = \frac{1}{t_{an} + t_{aus}}$$

an den zum Trennen des Blechs benötigten Leistungsbedarf und eine genügend hohe Pulsüberlappung angepaßt werden.

Ein Beispiel für die Bestimmung eines Punktes im Parameterfeld "Tastverhältnis - Tastfrequenz" ist für eine Schneidgeschwindigkeit von 1 m/min in Bild 3.23 dargestellt. Die Toleranzbreite in diesem Parameterfeld, bei der eine sehr hohe Schnittqualität möglich ist, wird zu kleineren Schneidgeschwindigkeiten hin geringer. Bei einer Schneidgeschwindigkeit von 1 m/min und einer Tastfrequenz von 750 Hz liegt der Toleranzbereich für das Tastverhältnis zwischen 0,09 und 0,12, wenn Grathöhen unter 10 µm gefordert werden. Tastverhältnisse, die deutlich größer als die Werte im Toleranzbereich sind, nähern das Prozeßverhalten qualitativ dem Verhalten mit kontinuierlicher Laserstrahlung an. Das Material wird kontinuierlich aufgeschmolzen, wird entlang der Schneidfront zur Blechunterseite transportiert und erstarrt dort in Form von Schmelztropfen. Bei einer Reduzierung des Tastverhältnisses unterhalb der optimierten Werte ist die mittlere Laserstrahlleistung zur Aufrechterhaltung des Schneidprozesses zu gering.

Die durch eine Leistungsmodulation erzielte Schnittqualität bzw. Grathöhe ist in Bild 3.24 dargestellt. Im kontinuierlichen Betrieb der Laserstrahlquelle ist bei Schneidgeschwindigkeiten unterhalb von 25 m/min ein starker Anstieg der Grathöhe festzustellen. Durch den Pulsbetrieb wird in diesem Bereich eine konstant gute Schnittqualität ermöglicht.

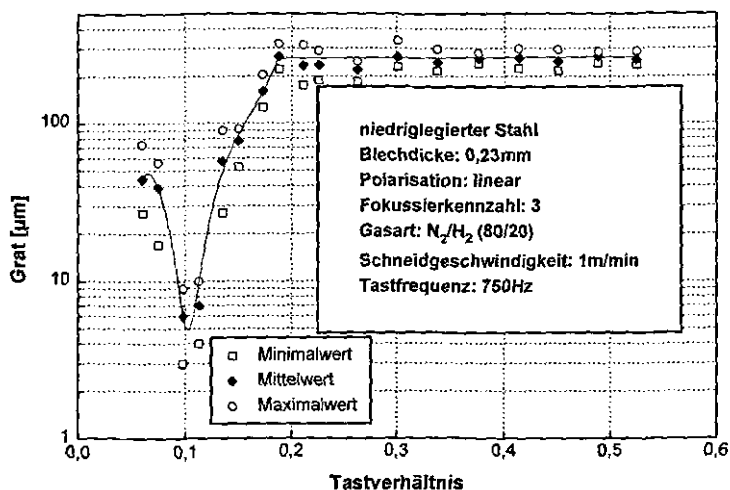


Bild 3.23: Optimierung der Gratbildung - Grathöhe bei unterschiedlichen Tastverhältnissen

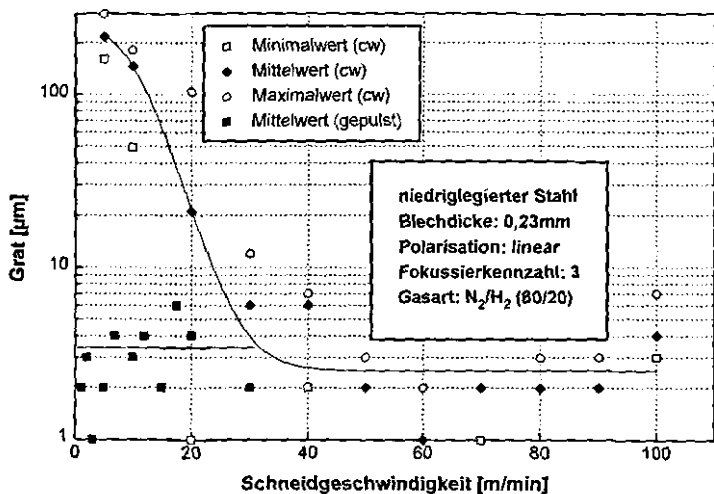


Bild 3.24: Grathöhe in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit im cw - Betrieb und bei einer Leistungsmodulation

Der Einfluß des Pulsbetriebs auf die mittlere Schnittfugenbreite als zweites wesentliches Qualitätskriterium ist in Bild 3.25 dargestellt. Die im Pulsbetrieb ermittelten Schnittfugenbreiten sind annähernd identisch mit dem Kurvenverlauf der sich im kontinuierlichen Betrieb bei einer Laserstrahlleistung von $P_L = 1250 \text{ W}$ einstellt. Sowohl im cw - Betrieb als auch im Puls - Betrieb der Laserstrahlquelle wird mit gleichen Laserstrahlintensitäten geschnitten, woraus die identischen Schnittfugenbreiten bei beiden Betriebsarten resultieren. Im Geschwindigkeitsbereich bis 100 m/min liegt die mittlere Schnittfugenbreite zwischen $75 \mu\text{m}$ und $115 \mu\text{m}$.

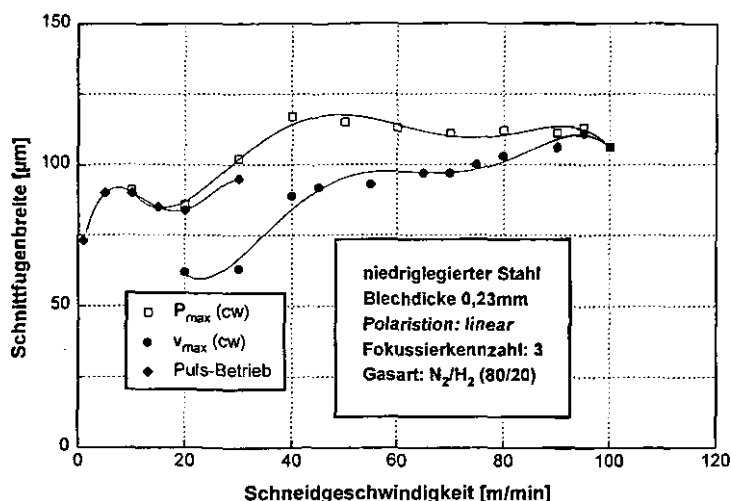


Bild 3.25: Schnittfugenbreite im cw - Betrieb und bei einer Leistungsmodulation der Laserstrahlquelle

4. Laserstrahl - Längsteilanlage

Eine erste Anwendung des Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidens in einer industriell verfügbaren Anlage ist das Laserstrahl-längsteilen [Produktion 1992] [Laser1992] [Reschenberg 1992] [Blech Rohre Profile 1993] [wt Report 1993] [Industrial Laser Review 1993]. Dieses spezielle Verfahren ist sowohl für eine ein- als auch zweidimensionale Bearbeitung einsetzbar. Bis auf die Laserstrahlschneideinheit entspricht die Laserstrahl - Längsteilanlage einer konventionellen Anlage mit Rollenmessern [Hadlington 1980] [Wilson 1974]. Bild 4.1 zeigt eine Laserstrahl - Längsteilanlage in schematischer Darstellung. Wesentliche Komponenten dieser Anlage sind die Abwickelhaspel, das Schneidaggregat auf das im nächsten Abschnitt noch ausführlich eingegangen wird, das Bremsgerüst und die Aufwickelhaspel.

Die Abwickelhaspel, von einem Gleichstrommotor angetrieben, ist mit einem vier Segment - Spreizkopf bestückt. In Bandlaufrichtung befindet sich hinter der Abwickelhaspel eine Schlaufengrube mit einer Schlaufen - Bandsteuerung zum Regeln der Bandlaufgeschwindigkeit. Zum Längenausgleich der geschnittenen Streifen beim Aufwickeln auf nur eine Haspel ist hinter dem Schneidaggregat wiederum eine Schlaufengrube mit Schlaufen - Bandsteuerung eingebaut. Das Bremsaggregat dient zur Führung der Einzelbänder und zur Erzeugung des beim kantengleichen und festen Aufwickeln erforderlichen Bandrückzuges [Bösenberg 1982]. Die Bremspresse setzt sich aus dem Ober- und Unterteil mit dazwischen auf stabilen Führungen gleitend gelagertem Preßbalken zusammen. Zum Aufwickeln der Bänder wird eine Haspel mit spreizbarer Aufwickeltrommel eingesetzt.

Der erste Prototyp dieser Anlage ist für eine Band- bzw. Coilbreite von 500 mm ausgelegt. Das maximale Coilgewicht beträgt 3.000 kg. Die Anlagengeschwindigkeit ist zwischen 0 - 300 m/min stufenlos regelbar. Für einen produktionsnahen Betrieb sind in dieser Anlage zwei Laserstrahlquellen zum gleichzeitigen Trennen mit zwei Schneidköpfen implementiert. Bild 4.2 zeigt den mit zwei Laserstrahlquellen ausgerüsteten Prototyp der Laserstrahl - Längsteilanlage.

Das **Laserstrahl - Schneidaggregat**, welches bei dieser Anlage den Messerbalken mit den Rollenmessern einer konventionellen Anlage ersetzt, enthält folgende Komponenten:

- Bandführung zur Stabilisierung des Abstandes zwischen Schneidkopf und Blech
- Schneidköpfe mit Achsen zur Spurbreiteneinstellung
- Pulsgenerator zur Ansteuerung der Laserstrahlquellen
- Gasdruckregler
- Durchschneidkontrolle.

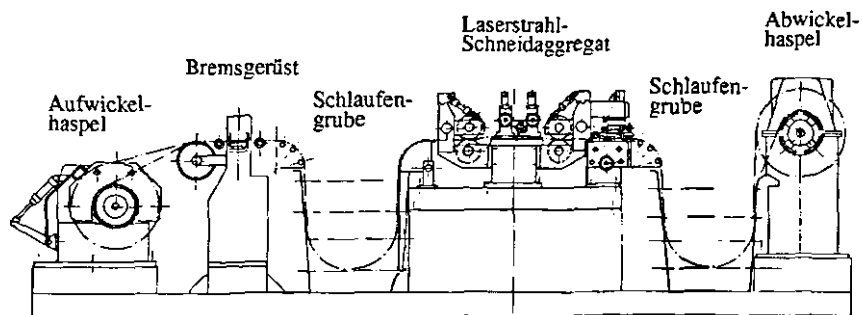


Bild 4.1: Prinzipskizze der Laserstrahl - Längsteilanlage

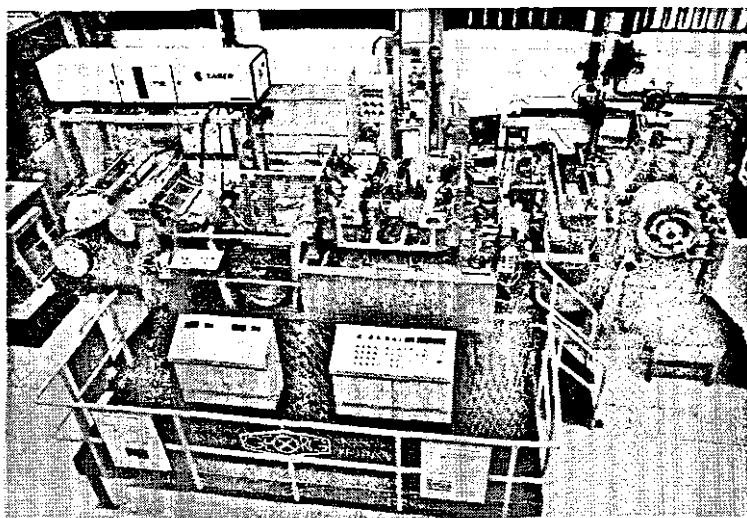
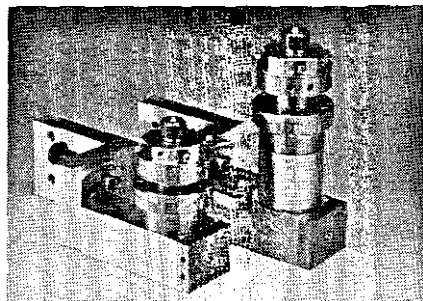


Bild 4.2: Laserstrahl - Längsteilanlage mit zwei Laserstrahlquellen

Die vertikale **Bandführung** ist durch einen konvex gewölbten Führungstisch mit einem in Bandrichtung davor und dahinter angeordneten Transportrollenpaar realisiert. Über die beiden Transportrollenpaare, die jeweils über einen Gleichstrommotor angetrieben werden, wird mittels generatorischer Bremsung der erforderliche Bandzug zur Stabilisierung des Bandes in vertikaler Richtung aufgebracht. Durch dieses Bandführungsprinzip können die Toleranzen des Schneidkopfabstandes zum Blech auf unter $1/100$ mm begrenzt werden. Der konvex gewölbte Führungstisch ist mit quer zur Bandaufrichtung angeordneten, nach unten sich aufweitenden Schlackekanälen zum Abtransport des schmelzflüssigen Materials und zur Absaugung der Gase und Stäube ausgeführt. Der Winkel der Aufweitung im Schlackekanal ist in Schmelzaustriebrichtung größer als der Schmelzaustriebwinkel am Blech von ca. 45° , damit ein Schmelzstau im Schlackekanal vermieden wird.

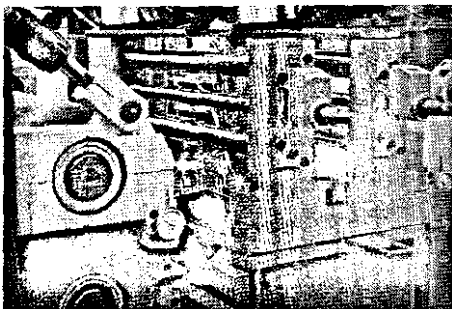
Für den Einsatz in der Laserstrahl - Längsteilanlage müssen die **Schneidköpfe** allen in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungen bzgl. Strahlformung und Düsendesign genügen und sich zusätzlich durch eine geringe Baugröße und eine hohe thermische Stabilität auszeichnen.

Die Baugröße der Schneidköpfe bestimmt die minimale Streifenbreite, die in einer Ebene geschnitten werden kann. Streifenbreiten, die geringer als die Schneidkopfbreite sind, können nur durch eine Versetzung der Köpfe in eine zweite bzw. dritte Ebene erzeugt werden. Mit der Anordnung der Köpfe in mehreren Ebenen können Streifenbreiten unter 1 mm geschnitten werden, während beim Einsatz des mechanischen Verfahrens mit Rollenmessern die Streifenbreite typischerweise auf minimal 4 - 5 mm begrenzt ist. Die Breitentoleranz der lasergeschnittenen Streifen liegt bei unter $5/100$ mm. Bild 4.3 zeigt Schneidköpfe, die durch ihre in der Höhe versetzten Strahleintrittsebenen für den Einsatz in einer Schneidebene geeignet sind. Typische Schneidkopfbreiten liegen bei ca. 60 mm.



*Bild 4.3: Schneidköpfe für die
Laserstrahl -
Längsteilanlage*

Eine thermische Stabilisierung der Schneidköpfe wird durch eine Kühlung der Einzelkomponenten Strahlumlenkung, Fokussierung und Schneiddüse erreicht. Die Strahlumlenkung und die Schneiddüse, die neben der reflektierten Laserstrahlung durch die Plasmastrahlung erwärmt wird, werden direkt wassergekühlt. In Bild 4.4, welches den Schneidprozeß mit zwei Schnitten in einer Ebene zeigt, ist die starke Plasmabildung im Bereich der Wechselwirkungszone zu erkennen.



*Bild 4.4: Schneidaggregat
der Laserstrahl -
Längsteilanlage*

Absorbierte Laserstrahlung in der Fokussierlinse führt zu einem Driften bzw. Verschieben des Fokuspunktes. Der Absorptionsgrad liegt bei neuen Linsen bei ca. 0,12 % und kann sich durch einen Alterungsprozeß auf über 1 % erhöhen. Das thermisch bedingte Driften der Linse wird durch eine thermisch bedingte Formänderung der Linse, eine Brechungsindexänderung in Strahlausbreitungsrichtung und eine Brechungsindexänderung in radialer Richtung verursacht. Von den drei Ursachen ist die zuletzt erwähnte die für die Fokuspunktverschiebung dominante [Beckmann 1994]. Zur Reduzierung der Fokuspunktverschiebung wird die Linse sowohl indirekt mit Wasser als auch direkt mit dem Prozeßgas gekühlt. Die Wasserkühlung führt die Wärme der in der Linse absorbierten Laserstrahlung über die Kontaktflächen zwischen Linsenhalterung und Linse ab. Der theoretisch bestimmte Einfluß der Temperaturdifferenz zwischen Linsenmitte und Linsenrand auf die Fokuspunktverschiebung ist in Bild 4.5 aufgetragen [Beckmann 1994]. Die in die Rechnung eingehenden Parameter entsprechen den Strahlparametern und den in der Laserstrahl - Längsteilanlage eingesetzten Linsenparametern. Der Strahldurchmesser beträgt 13 mm auf der ZnSe - Linse mit einer Brennweite von 1,5" und einem Durchmesser von 1,0". Bei diesem Linsentyp würde eine Temperaturdifferenz zwischen Linsenmitte und Linsenrand von $\Delta T = 20^\circ$ bei einer vorgegebenen Temperatur am Linsenrand von 40°C eine Fokuspunktverschie-

bung von $\Delta f = 0,38 \text{ mm}$ zur Folge haben. Die effektive Brennweite wird um diesen Betrag verringert.

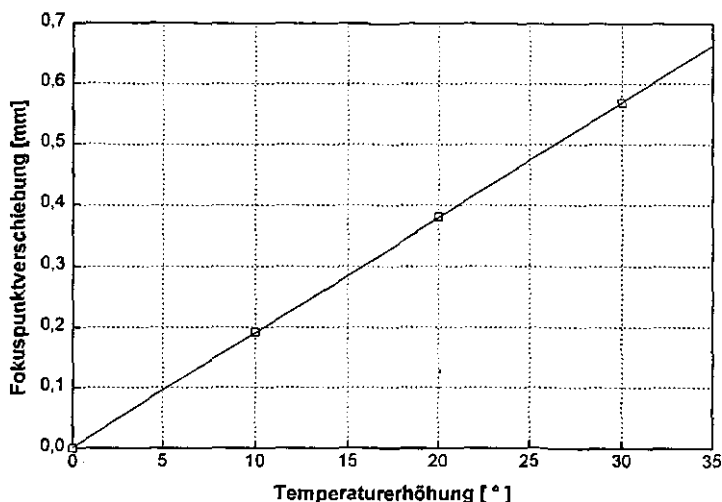


Bild 4.5: Fokuspunktverschiebung als Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Linsenmitte und Linsenrand

Zusätzlich zur Wasserkühlung der Linsenhalterung wird zum Vermeiden von großen Temperaturgradienten und dadurch bedingte Fokuspunktverschiebungen die Linse auf der gesamten Oberfläche durch einen Gasstrahl gekühlt. Hierzu wird das Prozeßgas tangential zur Linse an der Linsenunterseite über kleine Gaskanäle in den Stauraum eingebracht. Durch das Anströmen der Linse an der Linsenoberfläche wird diese zusätzlich konvektiv gekühlt. Die experimentell ermittelte Fokuspunktverschiebung ist bei Ausnutzung dieser Maßnahmen geringer als $\Delta f = f_{\text{kalt}} - f_{\text{warm}} = 0,2 \text{ mm}$ und wird bei der Schneidkopfjustage berücksichtigt. Die Zeit bis zur thermischen Stabilisierung liegt bei weniger als 30 Sekunden. Bei im thermisch stabilen Zustand justierten Schneidköpfen ist ein Einfluß der Fokuspunktverschiebung auf das Schneidverhalten, beim Anfahren mit einer Beschleunigung der Längsteilanlage auf eine Geschwindigkeit, die 5 % unter der Trennbarkeitsgrenze liegt, nicht festzustellen.

Die Spurbreiteneinstellung erfolgt über ein Positionieren der Schneidköpfe auf quer zur Bandlaufrichtung angeordneten Linearführungen.

Aus Kapitel 3.6 ist bereits bekannt, daß bei Einsatz von Komponenten für das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden und bei optimierten Prozeßparametern, bei geringen Schneidgeschwindigkeiten ($v_s < 30 \text{ m/min}$) eine starke Bartbildung einsetzt. Die Bart- bzw. Gratbildung kann durch eine Leistungsmodulierung des Schneidprozesses vermieden werden. Mit niedrigen Geschwindigkeiten wird im Einrichtbetrieb und im Start - und Stop- Zyklus der Anlage geschnitten. Die Leistungssteuerung der Laserstrahlquellen übernimmt in diesem Bereich ein **programmierbarer Pulsgenerator**, der als Eingangssignal die Bandgeschwindigkeit als Tachosignal eines Gleichstrom - Hohlwellen - Tachometerdynamos erhält. Der Pulsgenerator verwendet Timerbausteine zur Erzeugung von Laserpulsen variabler Frequenz und Tastverhältnisse im Bereich von

$$T.V. = 2 * 100 \text{ ns } (5 \text{ MHz}) - 2^{15} * 100 \text{ ns } (300 \text{ Hz}).$$

In dem Rechner des Pulsgenerators sind die Wertetabellen, welche durch die Anlagensteuerung aktivierbar sind, für unterschiedliche Werkstückdicken und Werkstoffe abgelegt. Zwischen den Stützpunkten aus den Wertetabellen werden die Pulsparameter linear interpoliert. Die hohe Rechengeschwindigkeit des Pulsgenerators erlaubt ein "Schnell - Halt", bei dem der Geschwindigkeitsbereich in einer Zeit von unter 200 ms durchfahren wird, ohne Verminderung der Schnittqualität. Voraussetzung für einen qualitätssteigernden Einsatz des Pulsgenerators sind Laserstrahlquellen, die bei einer Tastfrequenz von 5 kHz und einem Tastverhältnis von 0,5 bezüglich der Ausgangsleistung voll durchmoduliert sind.

Eine weitere Maßnahme zur Qualitätssicherung ist die **Regelung des Gasdrucks**. Der in den Stauraum der Düse eingebrachte Druckaufnehmer liefert das Signal für das Druckregel - Proportionalventil mit welchem der Schneidgasdruck konstant gehalten wird. Zusätzlich zur Gasdruckregelung werden zur Anlagenüberwachung Durchflußwächter und auf der Versorgungsseite Druckwächter eingesetzt.

Zur Qualitätsüberwachung und Kontrolle des Schneidprozesses ist der Trennstelle nachlaufend eine **Durchschneidkontrolle** angeordnet. Die Durchschneidkontrolle ist als Reflexionslichtschranke aufgebaut. Mit diesem Verfahren lassen sich Prozeßinstabilitäten, die zu Schneidauszetern mit einer Länge von unter $50 \mu\text{m}$ führen, erkennen. Über die Anlagensteuerung werden bei Schneidauszetern bzw. Instabilitäten die Prozeßparameter nachgestellt.

Die **Vorteile einer Laserstrahl - Längsteilanlage** im Vergleich zu einer konventionellen Längsteilanlage mit Rollenmessern liegen in einer höheren Flexibilität und Schnittqualität. Neben der Möglichkeit, mit dem Laser beliebige Werkstoffe und Werkstoffkombinationen schneiden zu können, entfällt beim Laserstrahl - Längsteilen der Messerbau und die Messeraufbereitung bei einem Wechsel des Schneidprogramms. Die Nebenzeiten, die durch Einsatz des Lasers erheblich reduziert werden, betragen bei konventionellen Anlagen laut Anwender je nach Produktionsprogramm bis zu 80 %. Den Wechsel der Schneidgerüste und der Messer ersetzt ein automatisches Positionieren der Laserschneidköpfe. Messeraufbereitung und Lagerhaltung entfallen. Desweiteren ermöglicht das Verfahren, die Schneidköpfe quer zur Schneidrichtung zu verfahren, um einen frei programmierbaren Konturschnitt am durchlaufenden Band zu erzeugen [Georg 1994] [Bingener 1994].

Eine Qualitätssteigerung des Spaltbandes wird durch die hohe Schnittqualität des mit Laserstrahlung getrennten Bandes und durch die konstant gute Qualität der Schnittkante als Folge des berührungslos und somit verschleißfrei arbeitenden Werkzeuges Laserstrahl erreicht. Zu den qualitätssteigernden Merkmalen gehört:

- ◆ eine Reduzierung der Gratbildung
- ◆ eine Vermeidung der mechanisch induzierten Spannungen und plastischen Deformationen durch den Scherprozeß beim Trennen mit Rollenmessern
- ◆ eine unbeschädigte Haftschrift im Schnittkantenbereich bei beschichteten Blechen [Petring 1994].

Die aufgelisteten Vorteile werden in dem nachfolgendem Kapitel an unterschiedlichen Werkstoffen ausführlich diskutiert.

5. Anwendungsbeispiele

Nachdem in Kapitel 2 der Hochgeschwindigkeitsschneidprozeß beschrieben, in Kapitel 3 das Prozeßparameterfeld eingegrenzt und der Aufbau einer Laserstrahl - Längsteilanlage in Kapitel 4 skizziert ist, werden in diesem Kapitel *Anwendungsbeispiele des Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidens* erläutert. Die Anwendungsbeispiele zeigen Teilbereiche des möglichen Nutzungspotentials dieser Technik auf und beziehen sich auf das Längs- und Querteilen und den zweidimensionalen Konturschnitt.

5.1 Transformatorblech

Elektrobleche, der mengenmäßig bedeutenste weichmagnetische Werkstoff in der Elektrotechnik, werden für elektrische Maschinen und Geräte wie Motoren, Generatoren, Transformatoren, Wandler, Drosselspulen, elektromagnetische Schalter usw. eingesetzt. Den Hauptteil des Elektroblechs stellt das magnetisch weitgehend isotrope nichtkornorientierte Elektroblech, das in Kernen mit veränderlichen magnetischen Flußrichtungen wie rotierenden Maschinen verwendet wird. Neben dem nichtkornorientierten Elektroblech steht das kornorientierte Elektroblech, das hauptsächlich für Kerne von Transformatoren eingesetzt wird. Kornorientiertes Elektroblech zeigt besonders gute weichmagnetische Eigenschaften bei einem magnetischen Fluß, der parallel zur Walzrichtung verläuft [Stahl 1985] [Littmann 1967].

Das Laserstrahlschneiden von nichtkornorientierten Elektroblechen wurde bereits in verschiedenen Veröffentlichungen behandelt [Dickmann 1989] [Dickmann 1989a] [Hasegawa 1992]. Diese Untersuchungen zeigen, daß das Laserstrahlschneiden in Teilbereichen der Fertigung von Rotor- und Statorblechen für elektrische Maschinen eine technologische und wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Trennverfahren bietet.

Schneidexperimente, bei denen kornorientierte Elektrobleche mit dem konventionellen Laserstrahlschneidverfahren getrennt wurden, wiesen erhebliche Schädigungen aller magnetischen Eigenschaften auf [Dickmann 1990]. Aus diesem Grund wurde bislang kornorientiertes Blech für den industriellen Einsatz nicht mit dem Laserstrahl getrennt.

Zur Beurteilung der Schnittqualität werden bei kornorientierten Elektroblechen bzw. Transformatorblechen 3 Kriterien berücksichtigt:

- Grathöhe
- Erhöhung der Ummagnetisierungsverluste durch den Schneidprozeß
- Coatingbeschädigung (Beschädigung der auf das Blech aufgetragenen Isolationsschicht) an den Schnittkanten.

Die Grathbildung [Lange 1993] [Fugger 1985] an der Schnittkante beeinflußt den Stapelfaktor [DIN 46400, Teil 3] der zu einem Transformatorkern geschichteten Bleche und die elektrischen Kurzschlüsse zwischen den Blechen [Merkblatt 401]. Typische Grathöhen bei den mechanisch nur mit erhöhten Aufwand verarbeitbaren Werkstoff mit einem Siliziumanteil von ca. 3 % liegen bei mit Rollenmessern hergestellten Blechen im Bereich zwischen 6 µm und 15 µm [Bingener 1994]. Die Grathöhe wird maßgeblich von dem Schneidkantenverschleiß des tribologisch stark beanspruchten Schneidwerkzeuges bestimmt.

Als zweite wesentliche Grundforderung an den Kernwerkstoff bzw. das Elektroblech dürfen nur niedrige Ummagnetisierungsverluste auftreten. Durch geringe Ummagnetisierungsverluste wird ein hoher Wirkungsgrad des Trafos erreicht, so daß die Wärmeabführung konstruktiv weniger aufwendig ist. Ummagnetisierungsverluste werden unter anderem durch mechanisch, induzierte Spannungen aufgrund des Scherprozesses verursacht [Schmidt 1976]. Der Ummagnetisierungsverlust $P_{Verl.}$ eines Transformatorbleches, das einem 50 Hz Wechselfeld ausgesetzt ist, ist die Summe aus dem Hystereseverlust P_H und dem Wirbelstromverlust P_W .

$$P_{Verl.} = P_H + P_W \quad (5.1)$$

Zur Beurteilung der Verlustleistungserhöhung der Bleche durch den Laserstrahlschneidprozeß werden Messungen im Epsteinrahmen durchgeführt [DIN 50462, Teil 1 - 6] [Euronorm 118 - 87]. Epsteinproben, die mit Rollenmessern getrennt werden, haben, bedingt durch den mechanischen Scherprozeß, eine Erhöhung der Ummagnetisierungsverluste von 25 % bis 30 %.

Um zusätzliche Wirbelströme im Transformator zu unterbinden, werden die Elektrobleche mit einer Oberflächenisolation versehen, welche die Lamellen im Kern elektrisch gegeneinander isolieren. Hauptbestandteil der komplexen Isolationsschicht ist eine Forsteritschicht (Mg_2SiO_4) mit einer Dicke von ca. 3 µm und ein darauf aufgetragener Phosphatfilm. Durch den mechanischen Scherprozeß erfolgt ein Kanteneinzug (Bild 5.1), wodurch die Isolationsschicht

beschädigt wird. Schädigungsbreiten des Coatings bis ca. $100\text{ }\mu\text{m}$ sind tolerierbar, bei größeren Breiten muß die beschädigte Isolationsschicht durch eine organische Beschichtung ausgebessert werden.



Bild 5.1: Schnittkante eines mit Rollenmessern geschnittenen Transformatorbleches

Hochgeschwindigkeitsschneiden von Transformatorblech

Bild 5.2 zeigt die maximale Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Blechdicke und der Laserstrahlleistung für alle verfügbaren Blechdicken kornorientierter Elektrobleche. Bei diesen Schneiduntersuchungen wurde für alle Blechdicken eine Fokussieroptik mit einer F - Zahl von 3 eingesetzt.

Die im folgenden beschriebene Untersuchung der Schnittqualität wurden an $0,23\text{ mm}$ dicken Transformatorblechen, deren maximale Schneidgeschwindigkeit bei einer Laserstrahlleistung von 1.300 W im Bereich von 100 m/min liegt, durchgeführt.

Die Gratbildung kann durch das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden bei Transformatorenblechen auf unter $5\text{ }\mu\text{m}$ (Bild 5.3) reduziert werden. Dieses Ergebnis ist im gesamten Geschwindigkeitsbereich bis 100 m/min gültig. Für Geschwindigkeiten unter 25 m/min wird hierfür der in Kapitel 4 beschriebenen Pulsgenerators eingesetzt (s.a. Kapitel 3.6 bzw. Bild 3.24). Langzeittests mit der Laserstrahl - Längsteilanlage bestätigen die Untersuchungen zur Gratbildung für eine Schnittlänge von ca. 1.000 km .

Eine Beschädigung der Isolationsschicht im Schnittkantenbereich durch das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden ist mit den für die Prüfung der Isolationsschicht üblichen Verfahren [DIN 46400; Teil 3] nicht festzustellen. Somit kann von einer Schädigungsbreite von unter $20\text{ }\mu\text{m}$ ausgegangen werden.

Dieses Ergebnis wird durch REM - Aufnahmen der Schnittkante (Bild 5.4) bestätigt.

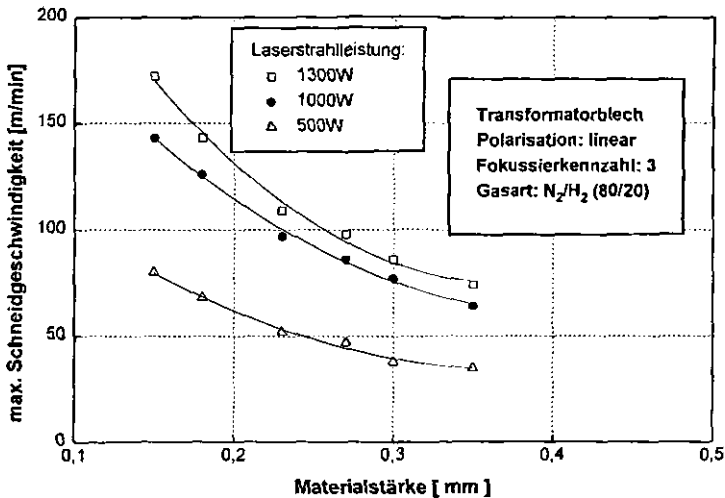


Bild 5.2: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Materialstärke und der Laserstrahlleistung bei Transformatorblechen

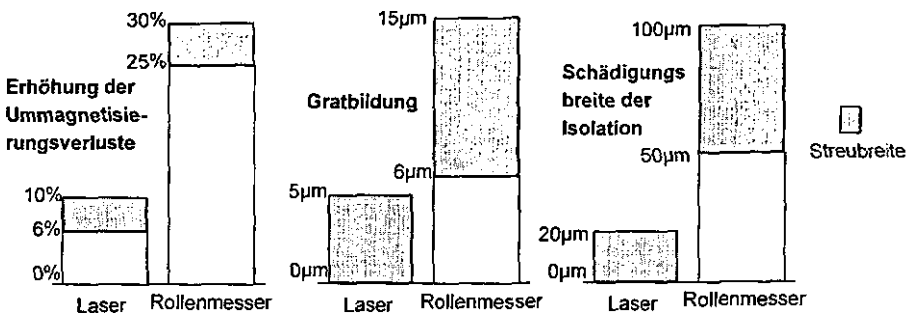


Bild 5.3: Vergleich der Schnittqualität von mit Laserstrahlung und mit Rollenmessern geschnittenen Transformatorblechen

Neben der Reduzierung der Kurzschlußverluste durch eine unbeschädigte Isolationsschicht wird eine weitere Wirkungsgraderhöhung durch die Vermeidung

der mechanisch induzierten Spannungen in das Blech erreicht [Reiplinger 1980]. Bei mit Rollenmessern geschnittenen Blechen ist teilweise eine thermische Nachbehandlung zur Beseitigung der in das Kristallgefüge eingebrachten Spannungen erforderlich [Matthes 1978]. Die durch den Schneidprozeß bedingte Ummagnetisierungsverlustserhöhung wird an 30 mm breiten Blechstreifen nach Messungen im Epsteinrahmen beurteilt. Im Vergleich zum konventionellen Schneiden kann bei dieser Probenform die Ummagnetisierungsverlustserhöhung $\Delta P_{1,7}$ [DIN 50462; Teil 1 - 6] durch Einsatz des Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidens um ca. 70 % reduziert werden (Bild 5.3). Die in Bild 5.5 aufgetragene Verlustserhöhung $\Delta P_{1,7}$ als Funktion der Schneidgeschwindigkeit zeigt, daß auch bei niedrigen Geschwindigkeiten die Verlustserhöhung durch Leistungsmodulation der Laserstrahlquelle (s.a. Kapitel 3.6) geringer ist als beim Trennen mit mechanischen Verfahren.

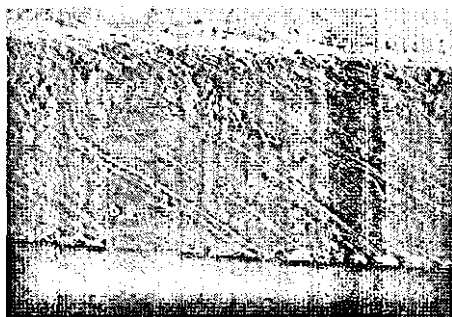


Bild 5.4: Schnittkante eines mit Laserstrahlung geschnittenen Transformatorbleches

Bei der Beurteilung eines unter Verwendung des Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidens hergestellten Trafokerns müssen zusätzlich Umweltaspekte berücksichtigt werden. Die Geräuschemission eines aus lasergeschnittenen Blechen aufgebauten Transformators ist bedingt durch die geringe Spannungsinduzierung in das Blech und der damit verbundenen geringeren Magnetostriktion (Längenänderung eines ferromagnetischen Materials im Magnetfeld) reduziert. Der Zusammenhang zwischen der induzierten Spannung und Geräuschemission wird von [Matthes 1978] beschrieben.

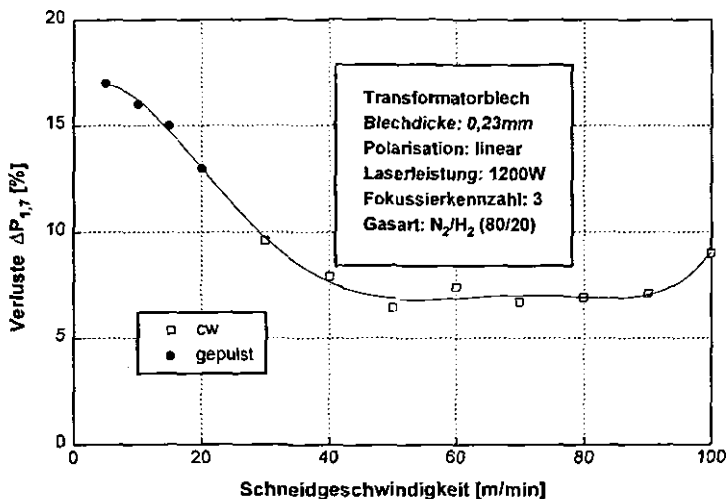


Bild 5.5: Ummagnetisierungsverlusterhöhung $\Delta P_{1,7}$ durch den Schneidprozeß in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit bei Transformatorblech

Neue Entwicklungen bei Werkstoffen für Elektromechanik ermöglichen die Herstellung von metallischen Werkstoffen ohne Kristallgitter, welche auch als metallische Gläser bzw. amorphe Materialien bezeichnet werden. Das amorphe Material besteht aus einer Eisen - Bor - Silizium - Legierung und hat wegen des fehlenden Kristallgitters erheblich geringere Ummagnetisierungsverluste. Die Härte ($HV_{0,2} = 700 - 1.100$) und Zugfestigkeit (bis 2.000 N/mm^2) der metallischen Gläser liegen im Herstellungszustand deutlich über denen kristalliner Werkstoffe mit entsprechender weichmagnetischer Qualität [Stahl 1985]. Dies führt zu erheblichen Problemen bei der Konfektionierung mit mechanischen Verfahren. Durch das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden läßt sich diese Problematik bei der Weiterverarbeitung beseitigen. Amorphe Metalle mit einer Blechdicke von $20 \mu\text{m}$ lassen sich beispielsweise bei einer Laserstrahlleistung von 250 W mit 300 m/min ohne Gratbildung und Werkstoffbeeinflussung schneiden.

5.2 Aluminium

Die Eigenschaften von Aluminium hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab und können an die jeweilige Anwendung angepaßt werden. Dabei spielen insbesondere die zugesetzten Beimengungen von Legierungselementen und die Oberflächenbeschichtung eine wichtige Rolle. Aluminium im Feinstblechbereich kann ein "sehr weicher" Werkstoff sein, bei dem ein berührungslos und somit kräftefrei arbeitendes Trennverfahren erhebliche Vorteile hat, kann aber auch durch z.B. eine gezielt aufgebrachte Oxidationsschicht zu einem "sehr harten" Werkstoff werden, für dessen Konfektionierung ein verschleißfreies Trennwerkzeug von Vorteil ist. Technische Anwendungsbeispiele für die beiden erwähnten Werkstofftypen sind Aluminiumfolien mit einer Dicke unter 50 µm und Werkstoffe mit einem hohen Reflexionsvermögen z.B. für die industrielle Leuchtentechnik, die durch anodische Oxidation nach dem Eloxal - Verfahren gegen Blindwerden geschützt werden [Aluminium 1984]. Die Eloxalschicht des anodisch oxidierten Aluminiums hat eine Härte von etwa 70 Rockwell [Bänder Bleche Rohre 1/2 1995].

Weitere Beispiele sind handbeschichtete Aluminiumbleche für unterschiedlichste Anwendungen [Tölke 1988], die im beschichteten Zustand nur mit erhöhtem Aufwand oder gar nicht schneidbar sind und lithographische Bleche für die Druckindustrie, die eine gratfreie Schnittkante aufweisen müssen, um die Druckwalzen nicht zu beschädigen. Lithographische Bleche werden für den Offsetdruck eingesetzt und bestehen aus einem Aluminiumblech von ca. 0,1 - 0,5 mm Dicke und einer organischen lichtempfindlichen Schicht von weniger als 1 - 5 µm Dicke [Czichon 1983] [Vollmann 1980].

Zudem entstehen beim konventionellen Längsteilen von Aluminium mit Rollenmessern mitunter an den Schnittkanten in einem schmalen Bereich Längswellen [Wetzell 1977].

Die Problematik der Randwelligkeit und der vielfach benötigten hohen Schnittkantenqualität kann durch Einsatz des Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidens in den meisten Fällen gelöst werden. Bild 5.6 zeigt die maximale Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung für unterschiedliche Blechdicken des Werkstoffs Al 99,5. Mit einer Laserstrahlleistung von 1.300 W kann 0,4 mm dickes Aluminiumblech gratfrei mit einer Schneidgeschwindigkeit von 150 m/min getrennt werden. Zur Stabilisierung des Schneidprozesses wird bei diesem Werkstoff Sauerstoff als Prozeßgas eingesetzt. In Bild 5.7 ist die Schnittkante eines lasergeschnittenen Aluminium-

blechs zu sehen. Das obere Photo zeigt die Blechkante mit Blechoberseite und auf dem Unteren ist die Blechkante mit der Blechunterseite zu sehen. Qualitätsmerkmale der Kante sind Rechtwinkeligkeit und Gratfreiheit.

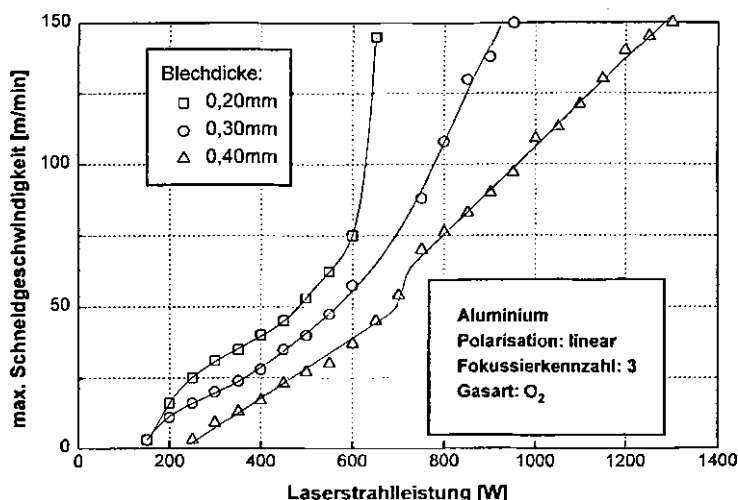
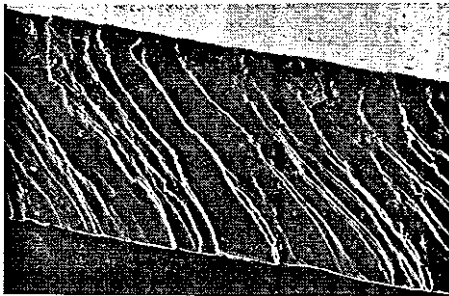


Bild 5.6: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung und der Materialstärke bei Aluminium (Al 99,5)

Einige Beispiele für die Leistungsfähigkeit des Hochgeschwindigkeitsschneidens sind in Bild 5.8 aufgeführt. Neben unterschiedlichen Aluminiumlegierungen kann auch das mit einer sehr harten Schutzschicht versehene anodisch oxidierte Aluminium ohne Gratbildung geschnitten werden. Beim gleichzeitigen Trennen einer als Schutzfolie auf die bei diesem Werkstoff hochglänzende Aluminiumoberfläche aufgebrachte PE - Folie mit einer Dicke von ca. 50 µm verringert sich die Schneidgeschwindigkeit bei z.B. 0,5 mm dicken Blechen von 95 m/min auf 70 m/min.

Zu dem möglichen Anwendungsspektrum des Laserstrahlschneidens gehören desweiteren lithographische Platten für die Druckindustrie, bei denen ein gratfreier Schnitt unerlässlich ist. Bislang wird beim konventionellen Zuschneiden der Druckplatten zwischen zwei Platinen bzw. Bahnen ein Streifen herausgeschnitten, um sicher zu stellen, daß sich der Grat stets auf der der Druckseite abgewandten Kantenoberfläche befindet. Bedingt durch Ober- und Untermesser

befindet sich der Grat an der einen Schnittkante auf der Blechoberseite und an der Gegenüberliegenden auf der Blechunterseite. Bild 5.9 zeigt die leistungsab-



200 μm

Bild 5.7: Schnittkante eines mit Laserstrahlung geschnittenen Aluminiumbleches
Schnittkante von oben



Schnittkante von unten

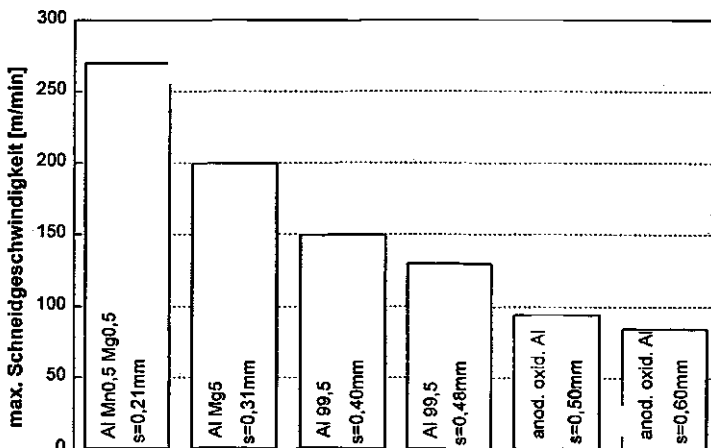


Bild 5.8: Anwendungsspektrum beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden von Aluminium und Aluminium - Legierungen

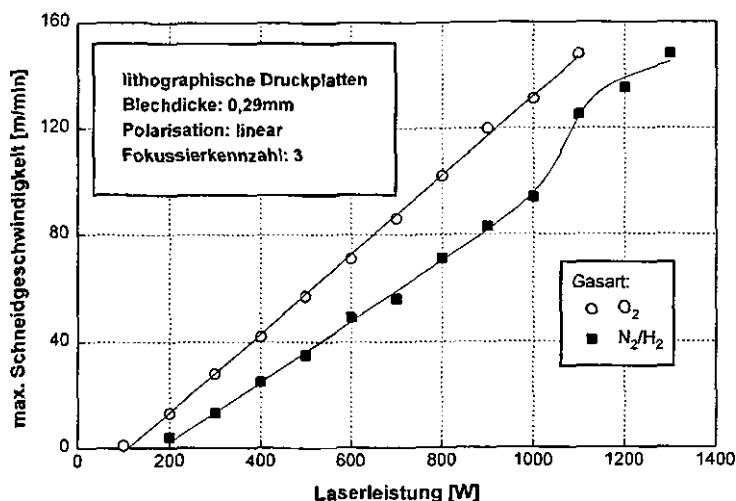


Bild 5.9: Laserstrahlschneiden von lithographischen Blechen; Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung und des Gases

hängige Schneidgeschwindigkeit für lithographischen Bleche, die mit Sauerstoff und einem N₂/H₂ - Gemisch geschnitten wurden.

Wie bei den Eisenwerkstoffen (s.a. Kapitel 3.6) muß bei einer erheblich reduzierten Schneidgeschwindigkeit zu einer Leistungsmodulation der Laserstrahlquelle übergegangen werden, um die Gratbildung zu reduzieren. Diese Maßnahme ermöglicht Schnittkanten im niedrigen Geschwindigkeitsbereich mit einer Grathöhe unter 10 µm.

5.3 Kupfer

Kupfer und Kupferlegierungen haben ihr Haupteinsatzgebiet in der Elektronikindustrie. Bei dünnen Kupferbändern ist der Bereich, in dem Eigenspannungen durch einen mechanischen Trennprozeß verursacht werden, einige Millimeter breit. Dies führt bei der Weiterverarbeitung, insbesondere bei anschließenden Stanz- und Biegevorgängen, zu Störungen in Form von Handhabungs- und Führungsproblemen. Zur Vermeidung der angesprochenen Problematik muß beim Trennen von Kupferbändern die durch den Schneidprozeß induzierte Spannung in der Umgebung der Schnittkante gering gehalten werden. Bei zu

großen Spannungen im Kantenbereich besteht die Möglichkeit, diese durch einen zusätzlichen Arbeitsschritt, das Streckbiegerichten, abzubauen.

Die erzielbaren Schneidgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden von Kupfer (Qualität SFhh) ist in Bild 5.10 dargestellt. Bei diesem Werkstoff kann die Gratbildung auf eine Grathöhe unter $15\text{ }\mu\text{m}$ begrenzt werden. Der wesentliche Vorteil des mit Laserstrahlung erzeugten Schnittes liegt in dem deutlich spannungsärmeren Verhalten des lasergeschnittenen Materials. Spannungstests [s.a. Cüppers 1990] nach der Methode der Texas Instruments Incorporation ergeben eine Reduzierung des Spannungswinkels von ca. 20° auf $0,3^\circ$ bei lasergeschnittenen Proben gegenüber mechanisch geschnittenen. Bei Kupferbändern, die mit dem Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden hergestellt wurden, z.B. für Lead Frames, erübrigt sich der Spannungsabbau durch das Streckbiegerichten.

Die qualitätssteigernden Eigenschaften der Schnittkante sind ebenfalls an unterschiedlichen Kupfer - Legierungen und Bronze festzustellen.

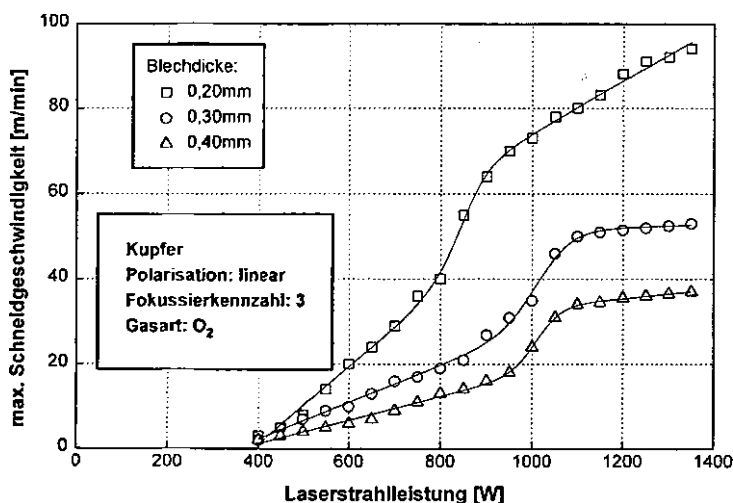


Bild 5.10: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung und der Materialstärke bei Kupfer

5.4 Wolfram

Wolfram ist durch seine speziellen Materialeigenschaften ein für einige technische Anwendungen unverzichtbarer Werkstoff. Durch den hohen Schmelzpunkt von Wolfram ($3410\text{ }^{\circ}\text{C}$) ist dieser Werkstoff hervorragend für Hochtemperatur - Anwendungen geeignet. Desweiteren besitzt Wolfram bei Raumtemperatur eine hohe Passivität gegen die meisten Säuren.

Bei der Verarbeitung von Wolfram bereitet die hohe Dichte ($19,3\text{ g/cm}^3$) und Härte (Rockwellhärte $\text{HRC} = 35$ [Metals Handbook, Volume 3]) erhebliche Probleme. Ein mechanisches Trennen ist aufgrund der Härte und Sprödigkeit sehr schwierig.

In Bild 5.11 ist die leistungsabhängige maximale Schneidgeschwindigkeit für Wolfram mit einer Materialdicke von $0,12\text{ mm}$ aufgetragen. Trotz der hohen Schmelztemperatur und Dichte des Werkstoffs sind Schneidgeschwindigkeiten von über 100 m/min durch das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden möglich. Ein mögliches Einsatzgebiet der Lasertechnik kann bei diesem Werkstoff das Zuschneiden von Platinen analog zum mechanischen Abkanten sein.

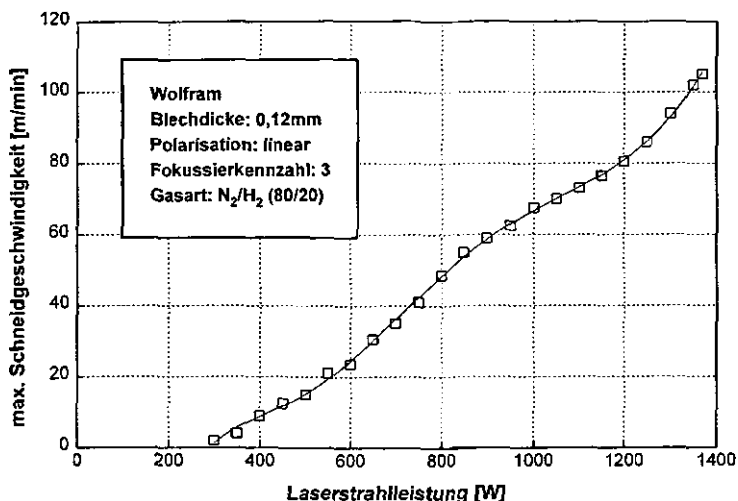


Bild 5.11: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung bei Wolfram

5.5 Zink

Das Hauptanwendungsgebiet von Zink liegt bei Produkten, bei denen ein Werkstoff mit guter Verformbarkeit und guter Korrosionsbeständigkeit benötigt wird [Metals Handbook; Volume 2]. Der gute Verformungsgrad von Zink kommt aufgrund des hexagonalen Gefüges, das sich während der plastischen Verformung wesentlich anders verhält als die kubischen Metalle, zustande. In einer feuchten Atmosphäre bildet Zink eine Schutzschicht aus basischem Zink - Carbonat ($2 \text{ZnCO}_3 \cdot 3 \text{Zn(OH)}_2$).

Zink wird für mechanisch nicht hoch beanspruchte Armaturen und Kleingeräte, wie Uhrengehäuse, Haushaltsgegenstände, Vergasergehäuse und Rohrleitungen eingesetzt [Schuhmann]. Dieser Werkstoff hat eine Dichte von $7,2 \text{ g/cm}^3$ und eine Schmelztemperatur von 418°C .

Zink als sehr weicher Werkstoff (Zugfestigkeit $R_m = 150 \text{ N/mm}^2$; Vickershärte $\text{HV } 3/15 = 40$) neigt beim Trennen mit mechanischen Verfahren zur Gratbildung und zur Kantenformabweichung. Zum Erzeugen qualitativ hochwertiger Schnittkanten kann bei diesem Material das Laserstrahlschneiden eingesetzt werden.

In Bild 5.12 ist die leistungsabhängige Schneidgeschwindigkeit von Feinzink (99,995 %) für eine Blechdicke von 0,4 mm aufgetragen. Hierbei werden Schneidgeschwindigkeiten bis nahezu 150 m/min erreicht. Die Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Werkstückdicke ist in Bild 5.13 dargestellt. Beispielsweise werden bei Materialdicke von 1,0 mm Schneidgeschwindigkeiten von 45 m/min erreicht. Bild 5.14 zeigt eine lasergeschnittene Kante, die sich durch Gratfreiheit und hervorragende Schnittkantenqualität auszeichnet. Die Kantenform ist beim Laserstrahlschneiden nahezu rechtwinklig mit Rauhtiefen von R_z kleiner $15 \mu\text{m}$.

Ein industrieller Einsatz dieses Verfahrens würde neben der Verbesserung der Schnittkantenqualität zu einer Steigerung der Produktivität durch eine Erhöhung der Flexibilität führen.

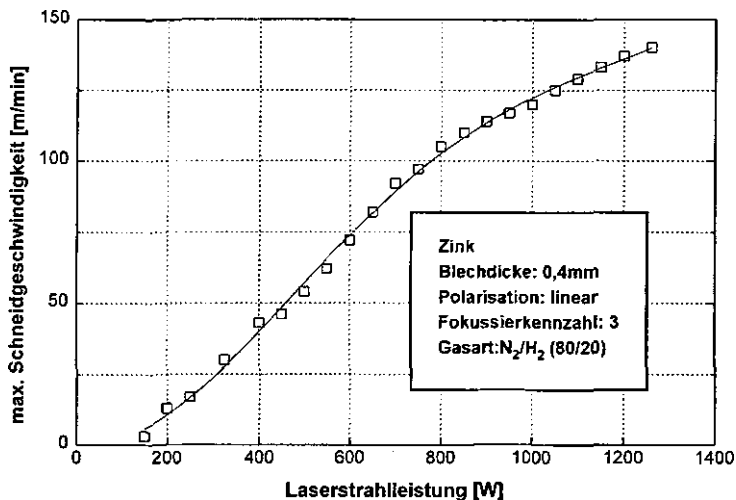


Bild 5.12: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung bei Zink

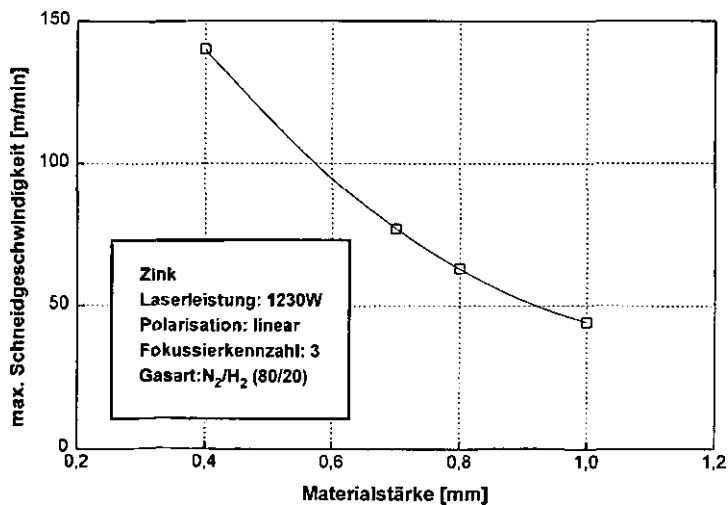
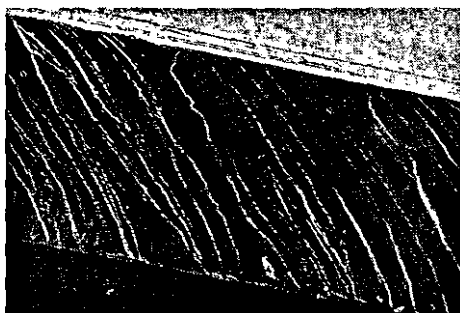


Bild 5.13: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Blechdicke bei Zink



*Bild 5.14: Schnittkante eines mit
Laserstrahlung ge-
schnittenen
Zinkbleches*

5.6 Sonstige metallische Werkstoffe

Neben den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Anwendungsbeispielen für das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden gibt es eine Vielzahl weiterer Werkstoffe bzw. Werkstoffkombinationen, für die beim Einsatz der Lasertechnik eine Steigerung der Schnittqualität und Fertigungsflexibilität möglich ist. Hierzu gehören beispielsweise Kunststoff - Stahl - Schichtverbundwerkstoffe, Dosenbleche, CrNi - Stähle und Bimetalle. In Bild 5.15 ist die Schneidgeschwindigkeit für einige Werkstoffbeispiele bei einer Laserstrahlleistung von 1.000 W aufgetragen.

Bei den organisch beschichteten Stahlblechen gehört die thermische Schädigungsbreite der Schnittflächenrandzone und die Gratbildung zu den Qualitätskriterien des Schnittes. Durch die im Vergleich zum konventionellen Laserstrahlschneiden [Haferkamp 1992] [Haferkamp 1992a] hohen Schneidgeschwindigkeiten beim Einsatz des neuen Schneidverfahrens erfolgt keine Schädigung der Beschichtung. Die Definition einer Schädigung der Beschichtung bezieht sich sowohl auf den Verlust der Beschichtung wie auch auf die Verfärbung. Der an der Blechunterseite anhaftende Grat hat eine Grathöhe von kleiner 5 µm. Bild 5.16 zeigt ein typisches Schneidergebnis eines mit dem Hochgeschwindigkeitsschneidverfahren getrennten organisch beschichteten Bleches anhand einer REM - Aufnahme der Schnittfläche.

Ein weiteres potentiell Anwendungsfeld ist das Zuschneiden von Material für Dosen. Neben der guten Schnittkantenqualität (Bild 5.17) kann die Flexibilität des Laserstrahlverfahrens zu einer nicht unbeträchtlichen Materialeinsparung bei der Dosenherstellung führen. Bild 5.18 zeigt die mögliche Materialeinsparung bei einem mit dem Laserstrahl erzeugten Scrollschnitt im Vergleich zu einer konventionell erzeugten Längsbahn bei der Deckelherstellung für Dosen.

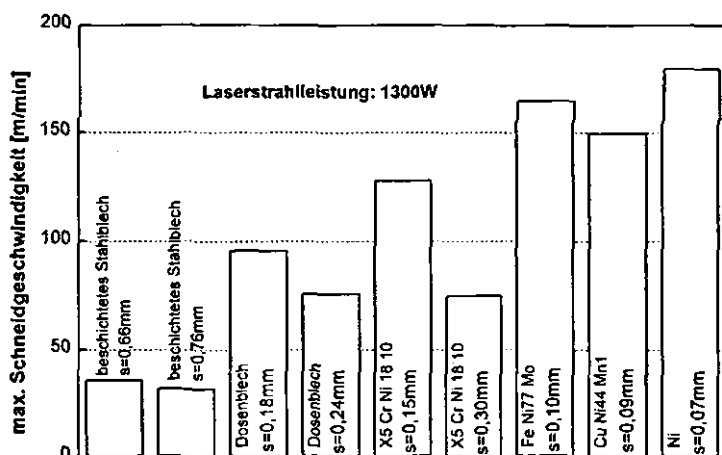
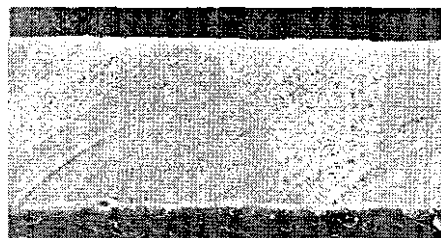


Bild 5.15: Anwendungsspektrum beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden von unterschiedlichsten metallischen Werkstoffen



500 µm

Bild 5.16: Schnittkante eines mit Laserstrahlung geschnittenen beschichteten Stahlbleches



200 µm

Bild 5.17: Schnittkante eines mit Laserstrahlung geschnittenen Dosenbleches

Hierbei liegen die Materialeinsparungen durch den Scrollschnitt zwischen 5 und 10 %.

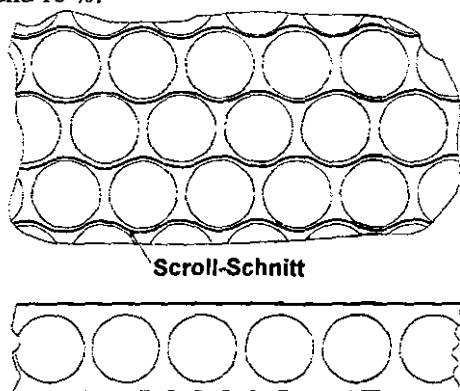
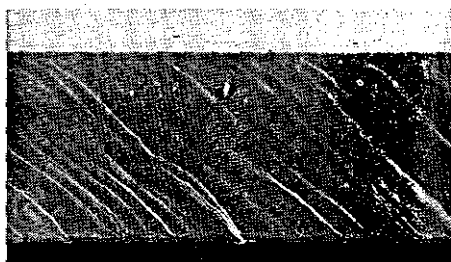


Bild 5.18: Vergleich eines Scroll - Schnittes und eines konventionellen Längsschnittes zur Herstellung von Dosenblechen

Im Gegensatz zu den Dosenblechen und den organisch beschichteten Blechen ist bei sehr hochwertigen Materialien schon ein geringer, durch die Weiterverarbeitung bedingter Ausschuß ein großer Kostenfaktor in der Produktion. Zu dieser Werkstoffgruppe gehören beispielsweise die hochlegierten Stähle und Bimetalle. Zusätzlich zu den bislang angesprochenen Qualitätsmerkmalen ist bei diesen Werkstoffen eine geringe Änderung der Werkstoffeigenschaften durch eine Kaltverfestigung im Schnittkantenbereich wichtig. Mit dem Hochgeschwindigkeitsschneidverfahren können sowohl austenitischer Stahl, wie auch Nickel, Eisen - Nickel - und Kupfer - Nickel - Legierungen (s.a. Bild 5.15) mit sehr guter Schnittkantenqualität und einer für einen Produktionsprozeß wirtschaftlichen Geschwindigkeit geschnitten werden. In Bild 5.19 ist die Schnittkante eines austenitischen Stahls (X 5 CrNi 18 10) zu sehen.



200 µm

Bild 5.19: Schnittkante eines mit Laserstrahlung geschnittenen austenitischen Stahls

Mit den in diesem und den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Anwendungsbeispielen ist das mögliche Nutzungspotential dieser Technik nur

ansatzweise dargestellt. Abhängig vom Werkstoff ist die Schnittqualität oder/und die hohe Flexibilität der Lasertechnik bei der Verarbeitung von dünnen Metallbändern bzw. -platten ein erheblicher fertigungstechnischer und produktspezifischer Vorteil.

5.7 Organische Werkstoffe

Die in dieser Arbeit beschriebenen Vorteile des Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidens dünner Metallbänder sind auch auf organische Werkstoffe übertragbar. Das Prozeßverhalten des Metallschmelzens mit nachfolgendem Schmelzaustrieb wechselt bei organischen Werkstoffen zu einem Sublimationsprozeß, bei dem das Schnittfugenmaterial verdampft. Die mit dem Laserstrahl erzeugten Schnittflanken zeichnen sich durch eine exakte Form [Tönshoff 1992] und durch eine bezüglich Materialablagerungen saubere Schnittkante aus. Durch die gute Leistungsmodulierbarkeit von CO_2 - Laserstrahlquellen (bis ca. 10 kHz) können Perforationen bzw. ein definierter Materialabtrag erzeugt werden. Desweiteren wird auch bei diesen Materialien durch eine programmierbare Schnittbreiteneinstellung beim Längsteilen die Produktivität erhöht. In Bild 5.20 sind einige Beispiele von mit dem Laserstrahl schneidbaren Materialien aufgelistet. Das Diagramm zeigt die benötigte Laserstrahlleistung, um das jeweilige Material mit 150 m/min schneiden zu können. Für alle aufgeführten Materialien hat das Laserstrahlschneiden spezielle produktspezifische Vorteile, auf die im folgenden im einzelnen eingegangen wird.

Verbundverpackungsmaterial, welches aus Pappe beschichtet mit Aluminium und Kunststoff besteht, wird beispielsweise für Getränkeverpackungen (Milchtüten, Safttüten usw.) in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Zu den Forderungen an den Schneidprozeß gehören neben der exakten Schnittkante ohne Ausfaserungen auch die Vermeidung von Staub, der in die gefaltete Tüte gelangen könnte. Bild 5.21 zeigt die Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für zwei unterschiedliche Materialstärken. Geschmackstests mit Tüten, die aus lasergeschnittenem Material gefertigt wurden, ergaben keine Beeinflussung durch den thermischen Schneidprozeß. Ein weiteres Einsatzgebiet des Lasers bei diesem Material ist das Abtragen von Schichten als Reißlinie zum definierten Öffnen einer Verpackung. Hierzu wird die oberste Kunststoffschicht und die Pappe bis zur Aluminiumfolie als Perforationslinie abgetragen. Die im Material zur Vermeidung von O_2 - Diffusion befindliche

Aluminiumfolie mit einer Dicke von ca. 6 μm wird bei dem Perforationsvorgang nicht beschädigt.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel ist das Trennen oder Perforieren von Pappe (s.a. Bild 5.20). Wie bei dem Verbundverpackungsmaterial ist z.B. bei Druckerpapier ein staubfreier Schnitt für den Einsatz in Druckern oder Kopierern erforderlich. In Bild 5.22 ist die Schneidgeschwindigkeit als Funktion der Laserstrahlleistung für ein handelsübliches Druckerpapier mit einem Gewicht von 80 g/m^2 aufgetragen. Schon mit Laserstrahlleistungen von 30 W werden Schneidgeschwindigkeiten von 100 m/min erreicht, so daß für den industriellen Einsatz mit Lasersystemen aus der "Sealed" - Reihe mit Ausgangsleistungen bis 200 W hohe Schneidgeschwindigkeiten erzielt werden können. Beim Perforieren von Papier liegt der Vorteil eines Lasersystems in der konstant guten Perforationsqualität, da dieses System nicht wie die mechanischen Messer einer starken Abnutzung ausgesetzt ist.

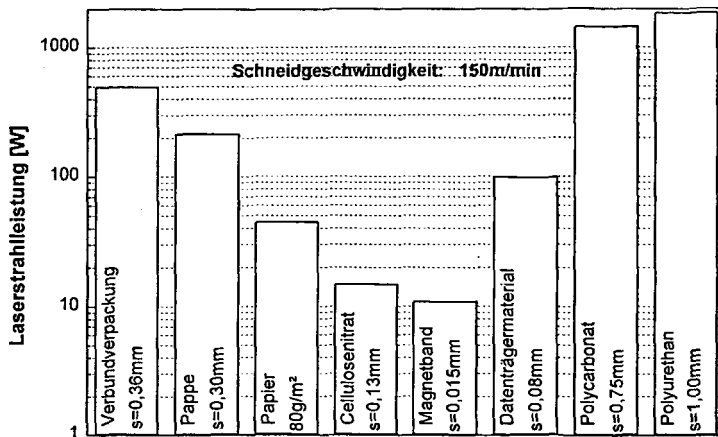


Bild 5.20: Anwendungsbeispiele für das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden von organischen Werkstoffen

Als weiteres Beispiel, bei dem eine staubfreie Schnittkante von übergeordneter Bedeutung ist, dient Cellulosenitrat, das als Blutfilter eingesetzt wird.

Magnetbänder und Datenträgermaterial verursachen durch die "sehr harte" aufgebraute Oxidschicht einen starken Messerverschleiß beim mechanischen

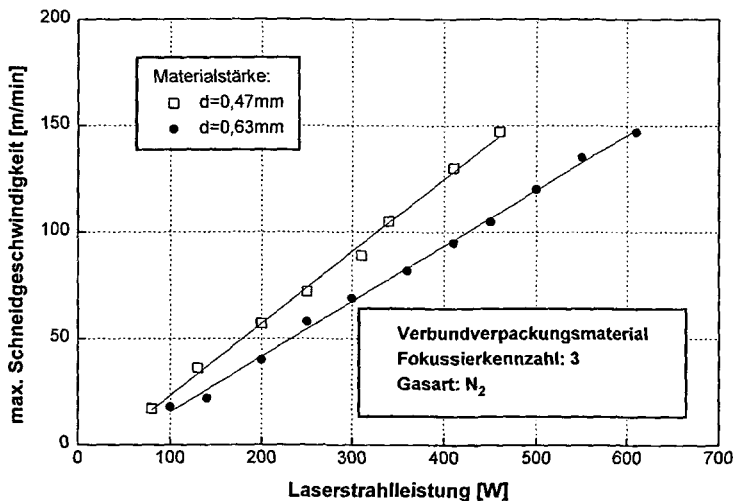


Bild 5.21: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für Verbundverpackungsmaterial

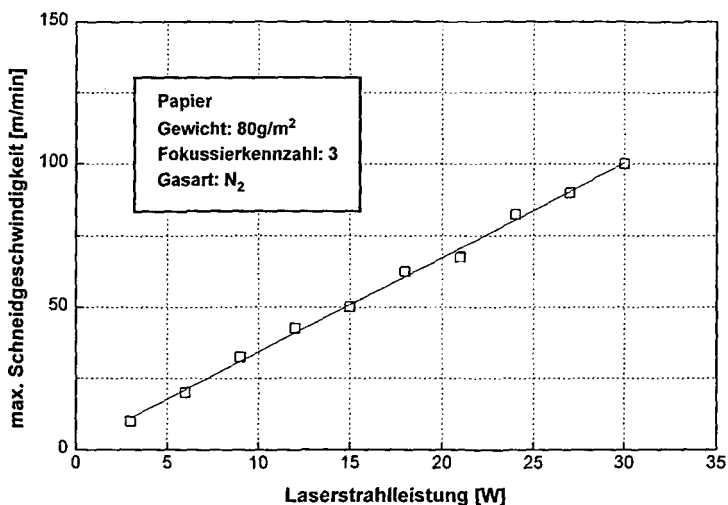


Bild 5.22: Schneidgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Laserstrahlleistung für Papier (80 g/m^2)

Trennen. Aus diesem Grund kann in Teilbereichen eine Substitution des konventionellen Verfahrens durch die Lasertechnik erhebliche Vorteile bringen.

Die Flexibilität und Schnittqualität des Laserstrahlschneidens kann beim Konfektionieren von z.B. Scheckkarten oder Folientastaturen aus Polycarbonat (s.a. Bild 5.23) ausgenutzt werden. Folientastaturen mit einer Materialdicke von ca. 350 μm mit einer selbstklebenden Beschichtung und einem Papierschutz von ca. 80 μm können z.B. bei einer Laserstrahlleistung von 200 W mit 30 m/min getrennt werden.

Polyurethan wird als Zwischenschicht bei Verbundglasscheiben eingesetzt. Die Vorteile des Laserstrahlschneidens sind bei diesem Werkstoff wiederum die Flexibilität und die im Vergleich zum konventionllen Verfahren bessere Schnittqualität.

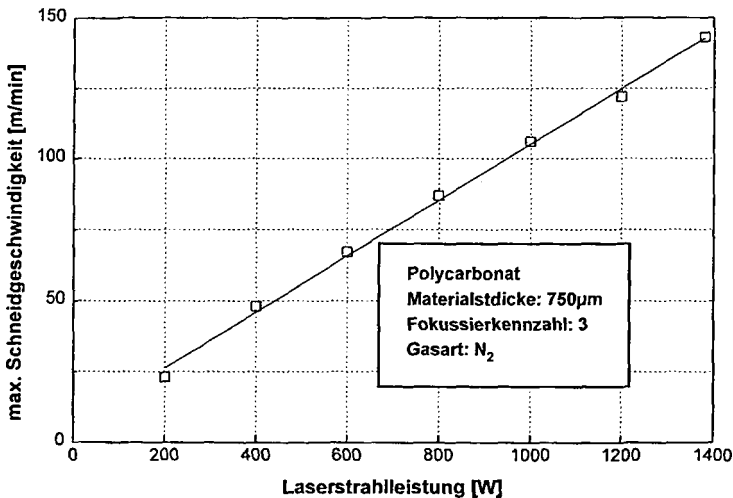


Bild 5.23: Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden von Polycarbonat

Das Anwendungsspektrum für das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden ist beliebig erweiterbar und kann in vielen Fertigungsbereichen eingesetzt werden. In der Textilfertigung könnte es das Zuschneiden von Naturfasergewebe wie z.B. Baumwolle ergänzen oder sogar ersetzen.

6. Zusammenfassung

Der Einsatz der Lasertechnik zum Trennen von Feinstblechen mit wirtschaftlichen Schneidgeschwindigkeiten und im Vergleich zum mechanischen Trennen herausragender Schnittkantenqualität erforderte die Entwicklung eines vollkommen neuen Laserstrahl - Schneidverfahrens. Zu den hohen Schneidgeschwindigkeiten von über 100 m/min ermöglicht dieses Verfahren, alle fertigungstechnischen Vorteile des Laserstrahlschneidens auszunutzen.

Das Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneidverfahren nutzt, verglichen mit dem konventionellen Laserstrahlschneiden, vollkommen neuartige thermo- und hydrodynamische Effekte aus. Die Unterschiede liegen in der Geometrie der Wechselwirkungszone und in den Mechanismen, die für die Energieeinkopplung und den Schmelztransport verantwortlich sind. Für das Hochgeschwindigkeitsschneiden typische Laserstrahlintensitäten von über $5 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ sind die Ursache für ein starkes Überhitzen der Schmelzfilmoberfläche, so daß es zum teilweisen Verdampfen und zur Plasmabildung im Bereich der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück kommt. Der hohe Druckgradient des abströmenden Dampfes auf der Schneidfront transportiert die Schmelze dominant azimuthal in Richtung auf die Schnittflanken, wo sie sich wegen des abnehmenden Dampfdruckes aufstaut. Im Grenzfall schließt dieser Effekt die Schnittfuge hinter der Wechselwirkungszone wieder und führt zur Ausbildung einer Dampfkapillare. Der Effekt der Kapillarbildung wird maßgeblich von der Temperaturleitfähigkeit, der Viskosität und Dichte des Werkstoffes beeinflusst und tritt in Abhängigkeit der Werkstoffeigenschaften bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten auf. Hinter der Wechselwirkungszone Laserstrahl / Werkstück wird die Schmelze durch einen Gasstrahl aus der Schnittfuge ausgetrieben. Die Energieeinkopplung beim Hochgeschwindigkeitsschneiden ist durch die Kapillar- und Dampfbildung geprägt. In der geschlossenen Dampfkapillare koppelt die Laserstrahlung durch Mehrfachreflexion und Plasmaabsorption in das Werkstück ein, was durch die Bestimmung der transmittierten Laserstrahlleistung und der Schnittfugenbreite nachgewiesen wurde. Absorptionsgrade bis zu 100 % sind bei diesen Mechanismen möglich.

Im Hinblick auf die neuen Phänomene müssen die Prozeßparameter an die plasmaphysikalischen und strömungsdynamischen Effekte angepaßt werden. Der Prozeß kann durch Spezialoptiken zur Erzeugung eines z.B. elliptischen Strahl-

querschnittes, durch die Prozeßgasart und das Düsendesign beeinflusst werden. Ein elliptischer Strahlquerschnitt reduziert die Laserstrahlintensität auf der Schneidfront bei gleichbleibender Schnittfugenbreite. Dem Prozeßgas wird ein Wasserstoffanteil beigemengt, welcher das Plasma "kühlt" und den Prozeß stabilisiert. Das Düsendesign und die Düsenjustage reduzieren den Staudruck im Bereich des Laserstrahls und erhöhen die Effizienz des Schmelzaustriebs. Durch eine Leistungsmodulation der Laserstrahlquelle werden die Prozeßparameter im außerhalb des Hochgeschwindigkeitsschneidbereiches liegenden Geschwindigkeitsbereich angepaßt.

Vor dem Hintergrund der Verfahrensentwicklung wurde eine Laserstrahl - Längsteilanlage für eine Anlagengeschwindigkeit bis zu 300 m/min und einem Coilgewicht von maximal 3.000 kg aufgebaut. Die Bandstabilisierung erfolgt über eine Zwangsführung, die Schneidköpfe werden hinsichtlich ihrer thermischen Stabilität optimiert und die Schnittqualität in dem Beschleunigungs- und Abbremszyklus der Anlage mit einem programmierbaren Pulsgenerator konstant gehalten. Zur Qualitätskontrolle wird eine Durchschneidüberwachung eingesetzt.

Die für den industriellen Produktionsprozeß relevanten Vorteile einer Laserstrahl - Längsteilanlage liegen in der Vermeidung von Nebenzeiten, da der Messerbau bei einer Spurbreitenänderung und die Messeraufbereitung entfallen, und in einer durch das verschleißfreie Werkzeug Laserstrahl konstanten Schnittqualität.

In der Fertigung zeichnet sich die Schnittqualität beim Laserstrahl - Hochgeschwindigkeitsschneiden in Abhängigkeit des Werkstoffes durch unterschiedlichste Qualitätskriterien aus. Transformatorbleche weisen geringe Ummagnetisierungsverlustserhöhungen, eine reduzierte Grathbildung und eine unbeschädigte Isolationsschicht auf. Die Schnittkanten von Aluminium und beschichteten Aluminiumblechen haben eine rechtwinklige Kantenkontur und geringe Grathöhen. Bei Kupfer sind die geringen durch den Schneidprozeß in den Kantenbereich induzierten Spannungen ein qualitätssteigerndes Kriterium. Kaltverfestigungen durch den mechanischen Trennprozeß können bei hochlegierten Stählen vermieden werden. Mit dem Laserstrahl ist das Trennen von Werkstoffen möglich, die mit konventionellen Verfahren nicht bearbeitet werden können. Dazu gehören einige Schichtverbundwerkstoffe und extrem harte Werkstoffe, wie beispielsweise Wolfram.

Bei organischen Werkstoffen kann wie bei metallischen Werkstoffen die hohe Flexibilität des Laserstrahlschneidens bei gleichzeitig verbesserter Schnittkantenqualität ausgenutzt werden.

Mit den beschriebenen Anwendungsbeispielen ist das Nutzungspotential dieser Technik nur ansatzweise dargestellt. Das Hochgeschwindigkeitsschneiden kann in vielen Produktionsbereichen die Lösung der Fertigungsprobleme sein.

7. Literaturverzeichnis

[Aluminium 1984]

Aluminium - Taschenbuch, Aluminium - Verlag Düsseldorf, 1984

[Bänder Bleche Rohre 11 - 1993]

N. N.: "Wettbewerb beim Dünnbandgießen erreicht eine neue Dimension", Bänder Bleche Rohre 11- 1993

[Bänder Bleche Rohre 1 / 2 - 1995]

N. N.: "Branchenreport - Eloxiertes Aluband erzeugt Impulse für die industrielle Lichttechnik", Bänder Bleche Rohre 1 / 2 - 1995

[Beck 1989]

M. Beck, F. Dausinger, H. Hügel: "Studie zur Energieeinkopplung beim Tiefschweißen mit Laserstrahlung", Laser und Optoelektronik 21 (3) / 1989

[Beckmann 1994]

L. Beckmann: "Modelling of, and design for, thermal radial gradients in lenses for use with high power laser radiation", Int. Optical Design Conf., Rochester N. Y., June 6 -9, 1994

[Beyer 1985]

E. Beyer, O. Märten, K. Behler, J. M. Weick: "Schneiden mit Laserstrahlung", Laser und Optoelektronik Nr. 3 / 1985

[Beyer 1985a]

E. Beyer: "Einfluß des laserinduzierten Plasmas beim Schweißen mit CO₂ - Lasern", Dissertation TH Darmstadt, 1985

[Beyer 1989]

E. Beyer, G. Herziger, W. Danzer: "Verfahren zum Bearbeiten von Werkstücken mit Laserstrahlung", Deutsche Patentanmeldung DE 37 02 451 C2, 21.12.1989

[Beyer 1994]

E. Beyer, K.-U. Preißig, D. Petring, D. Bingener, H.-D. Riehn: "Verfahren zum Laserstrahlschneiden von band- oder plattenförmigen Werkstücken, insbesondere von Elektroblech", Deutsche Patentanmeldung DE 42 26 620 A1, 17.02.1994

[Bingener 1993]

F. D. Bingener: "Moderne Fertigung von Transformatorenkernen",
Blech Rohre Profile 40, 9 - 1993

[Bingener 1994]

F. D. Bingener: "Cutting and Slitting - coil stock with a high-speed
laser beam", The Fabricator, April 1994

[Blech Rohre Profile 1993]

N.N.: "Schneidmaschinen und -anlagen - Längs- und Querteil-
anlagen", Blech Rohre Profile 40, 1, 1993

[Bösenberg 1982]

K. Bösenberg: "Systematik der Bremssysteme für Längsteilanlagen",
Bänder Bleche Rohre 10 - 1982

[Brockhaus 1970]

J. Brockhaus, H. Goldschmidt: "Ein neues Schneidverfahren zum
Erzielen glatter Schnittflanken und gratfreier Kanten",
Blech Rohre Profile, 8, 1970

[Cüppers 1990]

J. Cüppers: "Meßgeräte zum Erfassen von Eigenspannungen in
längsgeteilten dünnen Bändern", Metall, 44. Jahrgang,
Heft 7, Juli 1990

[Czichon 1983]

H. Czichon, R. Trauzeddel, W. König: "Lichtempfindliche Systeme
der Offsetdruckherstellung", Technische Hochschule Leipzig,
Wissenschaftliche Zeitschrift, Heft 6, Jahrgang 7 / 1983,

[Dausinger 1992]

F. Dausinger, H. Hügel: "Nutzungspotentiale von Lasern in der
Blechverarbeitung",
Bänder Bleche Rohre 7-1992

[Dickmann 1989]

K. Dickmann: "Einfluß des Lasertrennens auf die ferromagnetischen
Eigenschaften silizierter Stahlbleche", Laser und Optoelektronik
21 (3) / 1989

[Dickmann 1989a]

K. Dickmann: "Untersuchungen über den Einsatz von Hochleistungs-lasern zum Trennen von Elektroblech", Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2, Nr. 187, Düsseldorf, VDI - Verlag, 1989

[Dickmann 1990]

K. Dickmann: "Einfluß des Lasertrennens auf die magnetischen Eigenschaften von Elektroblech", Stahl und Eisen 110 (1990), Nr.12, 13, Dezember 1990

[DIN 46 400; Teil 3]

N.N.: "Elektroblech und -band - kornorientiert", Beuth Verlag, August 1988

[DIN 50 460]

N.N.: "Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von weichmagnetischen Werkstoffen", Beuth Verlag, August 1988

[DIN 50 462; Teil 1 - 6]

N.N.: "Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroblech und -band im 25-cm-Epsteinrahmen", Beuth Verlag, August 1986

[Euronorm 118 - 87]

N.N.: "Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektroblech und -band im 25-cm-Epsteinrahmen"

[Farwer 1983]

A. Farwer: "Formiergase - Gase zum Wurzelschutz beim Schutzgas-schweißen", Sonderdruck aus "Der Praktiker", Heft 3/83, Deutscher Verlag für Schweißtechnik

[Fugger 1985]

B. Fugger: "Verschleißvorgänge beim Schneiden von Elektroblech", Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik der Technischen Hochschulen und Universitäten der Bundesrepublik Deutschland, 85 / 31, HGF 131

[Gabzdyl 1991]

J. T. Gabzdyl, W. M. Steen: "Nozzle-beam alignment for laser cutting", Proc. 6th Int. Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO 1991)

[Georg 1992]

N.N.: "Ihr Partner beim Schneiden und Formen von Metall",
Produktübersicht, Fa. Heinrich Georg, Kreuztal, 1992

[Georg 1994]

N.N.: "High speed laser cutting of thin sheet",
Sheet Metal Industries, April 1994

[Hadlington 1980]

T. J. Hadlington: "Design of slitting lines and the importance of
accuracy in the product", Sheet Metal Industries, May 1980

[Haferkamp 1992]

H. Haferkamp, H.-P. Wendorff: "Schneiden von Stahl-Kunststoff-
Verbundsystemen mit einem Kohlendioxidlaser",
Schweißen und Schneiden 44, Heft 9, 1992

[Haferkamp 1992a]

H. Haferkamp, A. Homburg, H. P. Wendorff: "Laserstrahlschneiden
von Kunststoff-Stahl-Schichtverbundwerkstoffen",
Laser Magazin 2 / 92

[Hasegawa 1992]

M. Hasegawa, S. Kakunai, Y. Chiwaki, Y. Konishi, K. Hirai:
"Cutting Characteristics of Non-Oriented Magnetic Steel Sheet by
CO₂ Laser Beam", Proceedings of LAMP '92, Nagaoka, June 1992

[Herziger]

G. Herziger: "Lasertechnik II - Teil B", Vorlesungsmitschrift,
Institut für Lasertechnik, RWTH Aachen

[Herziger 1990]

G. Herziger, R. Wester: "Einführung in die Grundlagen der Laser-
technik", Herausgegeben vom Fraunhofer-Institut für Lasertechnik,
Aachen, Juni 1990

[Industrial Laser Review 1993]

N.N.: "Euro Blech '92 big for lasers", Industrial Laser Review
January 1993

[Jackson 1977]

A. H. Jackson: "Practical advancements in slitting technology - increase profits and minimise payback periods",
Sheet Metal Industrie, August 1977

[Keilmann 1992]

F. Keilmann, R. Hack, F. Dausinger: "Polarisation gives lasers a new cutting edge", Opto & Laser Europe, September 1992

[Kramer 1991]

R. Kramer: "Beschreibung und Messung der Eigenschaften von CO₂ - Strahlung", Dissertation RWTH Aachen, 1991

[Kühne 1985]

H.-J. Kühne, B. Fugger: "Hauptsächliche Einflußgrößen auf den Verschleiß beim Schneiden von Blechen", Maschinenmarkt 91 (1985) 68

[Lange 1993]

K. Lange: "Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall",
Blech Rohre Profile 40 (1993) 3

[Laser 1992]

N.N.: "Trendwende ? - Spürbare Investitionsbereitschaft prägte das Stimmungsbild der Euro Blech", Laser, Dezember 1992

[Littmann 1967]

M. F. Littmann: "Structures and Magnetic Properties of Grain - Oriented 3.2 % Silicon-Iron", Journal of Applied Physics,
Volume 38, Number 3, 1 March 1967

[Mair 1989]

H. Mair, J. Herrmann: "Einfluß der Sauerstoffreinheit auf die Schneidgeschwindigkeit und die Schneidkosten beim Laserstrahl-brennschneiden", DVS - Berichte Band 123

[Makino 1975]

I. Makino: "Push Back Blanking Method", Press Technique, 13, 1975

[Matthes 1978]

W. Matthes: "Einfluß des magnetischen Werkstoffes auf die Konstruktion und die Betriebseigenschaften von Leistungstransformatoren", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 9, 1978

[Merkblatt 401]

N.N.: "Merkblatt 401 - Elektroblech", Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, 3. Auflage, 1983

[Metals Handbook; Volume 2]

Metals Handbook Ninth Edition, American Society for Metals, 1979

[Metals Handbook; Volume 3]

Metals Handbook Ninth Edition, American Society for Metals, 1979

[Murakawa 1979]

M. Murakawa, T. Maeda: "A new method of burr-free slitting", Journal of Mechanical Working Technology, 3, 1979

[Nielsen 1987]

S.-E. Nielsen: "Verfahren zum Laserschneiden metallischer Werkstücke", Deutsche Patentanmeldung DE 36 19 513 A1, 17.12.1987

[Nonn 1989]

H. Nonn, H.-W. Möller, W. Maßberg, M. Möhrle, L. Reckmann: "Automatisierter Messerbau an schweren Warmbandspaltanlagen (Projektstudie)", STEEL & METALS Magazine, Vol 27, No. 11/12, 1989

[Petring 1988]

D. Petring, P. Abels, E. Beyer, G. Herziger: "Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Teil 10: Schneiden von metallischen Werkstoffen mit CO₂-Hochleistungslasern", Feinwerktechnik & Messtechnik, 96, 1988

[Petring 1991]

D. Petring, K.-U. Preißig, H. Zefferer, E. Beyer: "Plasma effects in laser beam cutting", Proc. 3rd Int. "Beam Technology" Conf., Karlsruhe, 13-14 March 1991, DVS-Berichte Bd. 135, Düsseldorf, Deutscher Verband für Schweißtechnik, 1991

[Petring 1994]

D. Petring, K.-U. Preißig, E. Beyer: "Schnell und genau - Laser-Hochgeschwindigkeitsschneiden verbessert Wirtschaftlichkeit beim Längsteilen von Blechbändern", Maschinenmarkt, Würzburg 100, 31/32, 1994

[Petring 1994a]

D. Petring: "Anwendungsorientierte Modellierung des Laserstrahlschneidens zur rechnergestützten Prozeßoptimierung", Dissertation RWTH Aachen, 1994

[Poprawe 1984]

R. Poprawe: "Materialabtragung und Plasmaformation im Strahlungsfeld von UV-Lasern", Dissertation TH Darmstadt, 1984

[Prandtl 1984]

L. Prandtl, K. Oswatitsch, K. Wieghardt: "Führer durch die Strömungslehre", Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig 1984

[Preißig 1992]

K.-U. Preißig, J. Albrecht, D. Bingener, D. Petring, A. Gillner, E. Beyer: "Hochgeschwindigkeitsschneiden von Feinstblechen mit Lasern", Bänder Bleche Rohre 10-1992

[Preißig 1994]

K.-U. Preißig, D. Petring, G. Herziger: "High Speed Laser Cutting of Thin Metal Sheets", Proceedings Europto, Laser Materials Processing: Industrial and Microelectronics Applications, Vienna, 5 - 8 April 1994

[Produktion 1992]

N.N.: "Von zahlreichen Innovationen geprägt - Laser-Neuheiten auf der Euro-Blech 1992", Produktion 19.11.1992, Nr. 47

[Reiplinger 1980]

E. Reiplinger: "Verminderung der Leerlaufverluste bei Transformatoren", Siemens - Energietechnik 2, Heft 7, 1980

[Remirez-Salinas 1989]

F. Remirez-Salinas: "Distanzstücke entfallen - Computergesteuerte Längsteilanlage wechselt die Kreisschermesser automatisch innerhalb weniger Minuten", Maschinenmarkt 95 (1989) 29

[Reschenberg 1992]

H. Reschenberg: "Laser Lichtpunkte", Bänder Bleche Rohre 12/1992

[Ripper 1984]

G. Ripper, G. Herziger: "Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung - Fokussierung von Laserstrahlung am Beispiel des CO₂ - Lasers" Feinwerktechnik & Messtechnik 92 (1984) 6

[Schmidt 1976]

K. H. Schmidt: "Der Einfluß des Stanzens auf die magnetischen Eigenschaften von Elektroblech mit 1 % Silizium", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 2, 1976

[Schmidt 1979]

C. Schmidt: " Verfahren zum Trennen von Elektroblechen", Deutsche Patentanmeldung P 27 43 544.5-34, 29.03.1979

[Schoth 1990]

H.-P. Schoth: "Vielfältige Hilfe - Computerunterstütztes Maschinenbestücken und Einrichten von Längsteilanlagen", Maschinenmarkt 96 (1990) 39

[Schulz 1987]

W. Schulz, G. Simon, M. Vicanek: "Influence of the oxidation process in laser gas cutting", High Power Lasers, The Hague, 31.03. - 3.04.1987, Proc. SPIE, Vol. 801, 1987

[Schumann]

H. Schumann: "Metallographie", VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 11. Auflage

[Schübler 1988]

M. Schübler: "Einfluß der Schneidwerkzeugbeschichtung auf die Standzeit beim Scherschneiden mit hohen Geschwindigkeiten", Stahl u. Eisen 108 (1988) Nr. 4

[Stahl 1985]

N.N.: "Werkstoffkunde Stahl - Band 2: Anwendungen",
Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York Tokyo
Verlag Stahleisen m.b.H. Düsseldorf, 1985

[Sullivan 1967]

A.B.J. Sullivan, P.F. Houldcroft: "Gas-jet laser cutting",
Brit. Weld. J., 46, 1967

[Takaishi 1990]

K. Takaishi: "A new method of burr-free fine slitting", Advanced
Technology of Plasticity, Vol. 3, 1990

[Tölke 1988]

K.-D. Tölke: "Anwendungstechnische Eigenschaften von bandbe-
schichteten Aluminium", Vortrags- und Diskussionstagung - Ent-
wicklungen in der Oberflächenbehandlung von Aluminium,
29.02. - 1.03.1988, Düsseldorf

[Tomizawa 1990]

A. Tomizawa, M. Kojima: "A Study of the Effect of Pass Line
Control in Slitting and Trimming", Advanced Technology of
Plasticity, Vol. 3, 1990

[Tönshoff 1992]

H. K. Tönshoff, J. Mommsen: "Vorteile unverkennbar - Einsatz des
Lasers in der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung dünner Materialien",
Laser, Oktober 1992

[Vollmann 1980]

H. W. Vollmann: "Neue Technologien zur filmlosen Herstellung von
Druckformen", Angew. Chem. 92, Verlag Chemie, 1980

[Wetzel 1977]

S. Wetzel: "Welligkeit von Bändern und Blechen aus Metall, speziell
aus Aluminium", Blech Rohre Profile 9 / 1977

[Wilson 1974]

J. S. Wilson: "High - speed slitting lines improve deliveries",
Sheet Metal Industries, February 1974

[Winkler 1992]

R. Winkler, M. Hanisch: " Kosteneinsparung durch reinen Sauerstoff", Laser, Juni 1992

[Winship 1988]

J. T. Winship: "Preparing for the Best in Coil and Sheet Stock", Metal Stamping, Band 22 (1988), Heft 1

[wt Report 1993]

N.N.: "Highlights auf der Euro-Blech '92", wt Januar 1993
Springer Verlag, 1993

8. Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

A	Absorptionsgrad
A_w	proportionale Größe des Absorptionsgrades
b_s	mittlere Schnittfugenbreite
c_p	spezifische Wärmekapazität
D	Rohstrahldurchmesser auf der Fokussieroptik
f	Brennweite
F	Fokussierkennzahl
$F_{\text{opt.}}$	optimale Fokussierkennzahl
H_m	Schmelzenthalpie
H_v	Verdampfungsenthalpie
k	Boltzmannkonstante
k_0	Aberrationskoeffizient
K	Strahlqualitäts-Kennzahl
m	Teilchenmasse
n_s	Teilchendichte
p_F	statischer Dampfdruck auf der Schneidfront
p_s	Sättigungsdampfdruck
p_w	statischer Dampfdruck auf die Schnittflanken
p_0	Sättigungsdampfdruck bei T_0
P_L	Laserstrahlleistung
$P_{\text{Verl.}}$	Ummagnetisierungsverluste
P_H	Hystereseverlust
P_W	Wirbelstromverlust
r_F	Fokusradius
r_m	Schmelzfilmdicke
R	Gaskonstante
s_{Blech}	Blechdicke
t_{an}	Pulslänge
t_{aus}	Pulspause
T	Temperatur
T_0	Verdampfungstemperatur bei Normaldruck

T_m	Schmelztemperatur
v	Schneidgeschwindigkeit
v_{Schmelze}	Geschwindigkeit der Schmelze
v_D	mittlere Geschwindigkeit des Dampfes
v_{Dx}	Geschwindigkeit des Dampfes in x - Richtung
v_{Dy}	Geschwindigkeit des Dampfes in y - Richtung
v_{Dz}	Geschwindigkeit des Dampfes in z - Richtung
v_s	maximale Schneidgeschwindigkeit
V_D	spezifisches Volumen des Dampfes
V_s	spezifisches Volumen der Schmelze
x	Länge
z_R	Rayleighlänge
α	Absorptionslänge
α_v	Verdampfungsanteil
γ	Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Laserstrahl
Δf	Fokuspunktverschiebung
Δp	Dampfdruckdifferenz zwischen Schneidfront und Schnitt- flanke
$\Delta P_{1,7}$	Ummagnetisierungsverlust bei 1,7 Tesla
κ	Temperaturleitfähigkeit
λ	Wellenlänge
λ_w	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte
ρ_D	Dichte des Dampfes

Lebenslauf

14.03.1963	geboren in Dortmund
1969 - 1973	Besuch der Grundschule in Dortmund - Lichtendorf
1973 - 1982	Besuch des Städtischen Mariengymnasiums in Werl/Westf.
Juni 1982	Abitur
Oktober 1982 - März 1988	Maschinenbaustudium an der Rheinisch - Westfälischen - Technischen - Hochschule in Aachen; 26 Wochen Praktikum in verschiedenen Industriebetrieben
seit April 1988	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer - Institut für Lasertechnik in Aachen
September 1988	Prüfung zum Schweißfachingenieur
Oktober 1993	Verleihung des Joseph-von-Fraunhofer-Preises 1993
Februar 1995	Verleihung des Innovationspreises Nordrhein - Westfalen 1994

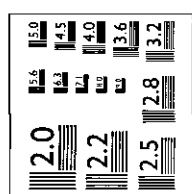
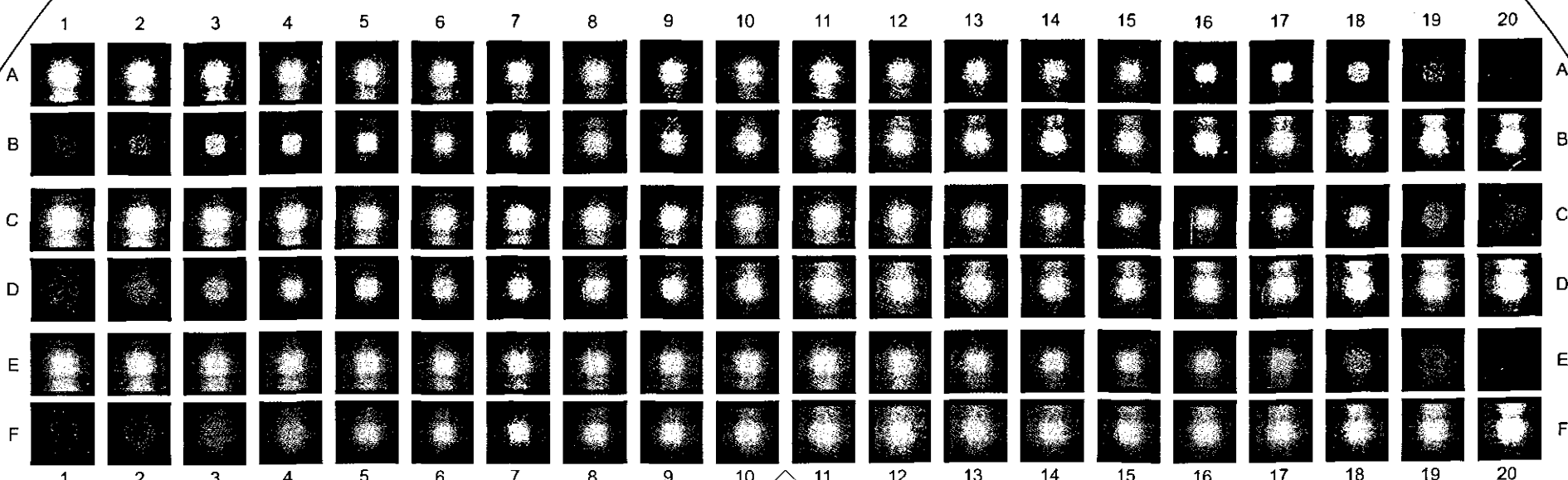
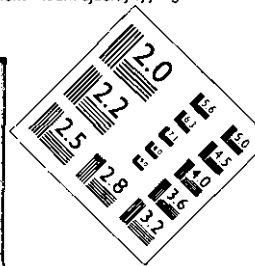
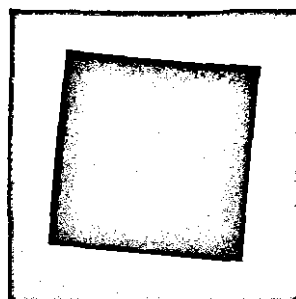
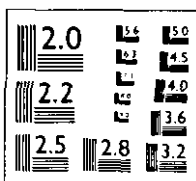
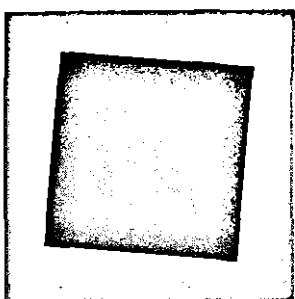
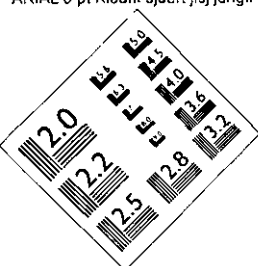
SZ13577=2



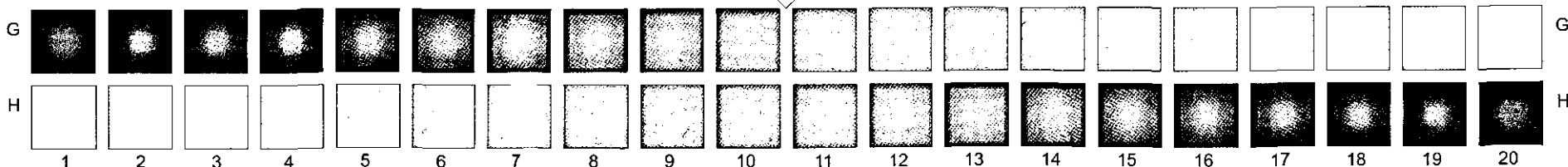
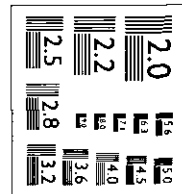
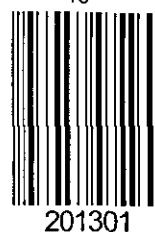
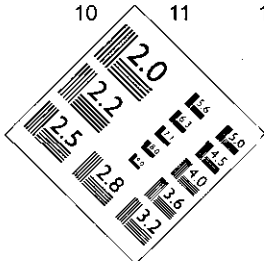
SZ13577=2

ISBN 3-8265-1041-0

ARIAL 4 pt Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf asvoc lexa klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor
 ARIAL 6 pt Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf asvoc lexa klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor



Color Scanner Test Target
 S2N CSTT-2a
 Batch-Nr.: #201301



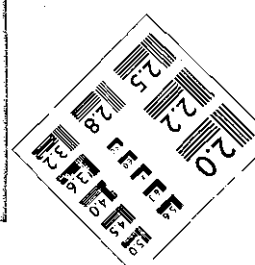
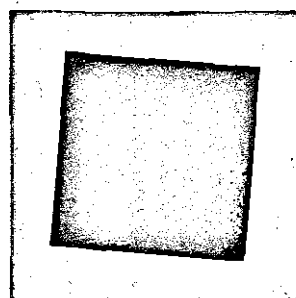
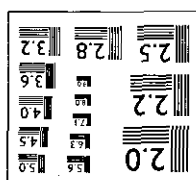
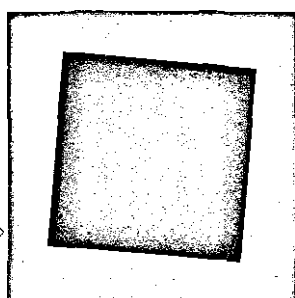
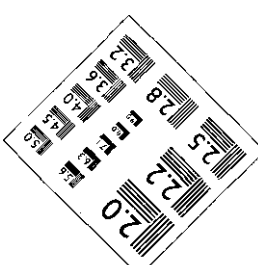
ARIAL 4 pt Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf asvoc lexa klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor
 ARIAL 6 pt Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf asvoc lexa klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor

**Image
Access**

Hatzfelder Strasse 161 - 163
 D-42281 Wuppertal
 Telefon: ++49 (0)202 27058-0
 Telefax: ++49 (0)202 27058-40
 www.imageaccess.de
 www.scan2net.de
 E-Mail: info@imageaccess.de

1 1 1 1
 2 2 2 2
 3 3 3 3
 4 4 4 4
 5 5 5 5
 6 6 6 6
 7 7 7 7
 8 8 8 8
 9 9 9 9
 A A A A
 B B B B
 C C C C

4 p Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf a
 Wju licfc jmv prongs wallusi 94846 393 shd94 hah 43 gnurz sping ukala bonf schvzr saporon
 6 p Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmn
 Wju licfc jmv prongs wallusi 94846 393 shd94 hah 43 gnurz ong
 8 p Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf
 Wju licfc jmv prongs wallusi 94846 393 shd94 h
 10 p Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc
 Wju licfc jmv prongs wallusi 94846 39
 12 p Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur d
 Wju licfc jmv prongs wallusi 948



ARIAL 4 pt Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf asvoc lexa klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor
 ARIAL 6 pt Klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor foxies gmnsschwiz hduenznc xjf vxjdfvdsf asvoc lexa klounf sjdert fjsj jdhgrf saoeur djfkehc shwpüz klgor