



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 007 323.7**  
 (22) Anmeldetag: **08.02.2010**  
 (43) Offenlegungstag: **11.08.2011**

(51) Int Cl.: **B23K 26/42 (2006.01)**  
**B23K 26/38 (2006.01)**

(71) Anmelder:  
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
 angewandten Forschung e.V., 80686, München,  
 DE; RWTH- Rheinisch-Westfälische Technische  
 Hochschule Aachen, 52062, Aachen, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:

**EP 0 929 376 B1**

(74) Vertreter:  
**Grimm, Ekkehard, Dipl.-Phys., 63075, Offenbach,  
 DE**

**SCHULZ,W. [u.a.]: Simulation of Laser Cutting.  
 In: The Theory of Laser Materials Processing.  
 Edited by J. Dowden. Springer Series in Materials  
 Science, 2009, Vol.119, S.21-69, ISBN 13 978-  
 1-4020-9339-5**

(72) Erfinder:  
**Schulz, Wolfgang, Prof. Dr., 52379, Langerwehe,  
 DE; Schüttler, Jens, Dr., 52064, Aachen, DE;  
 Vossen, Georg, Dr., 40215, Düsseldorf, DE;  
 Niessen, Markus, Dr., 52382, Niederzier, DE**

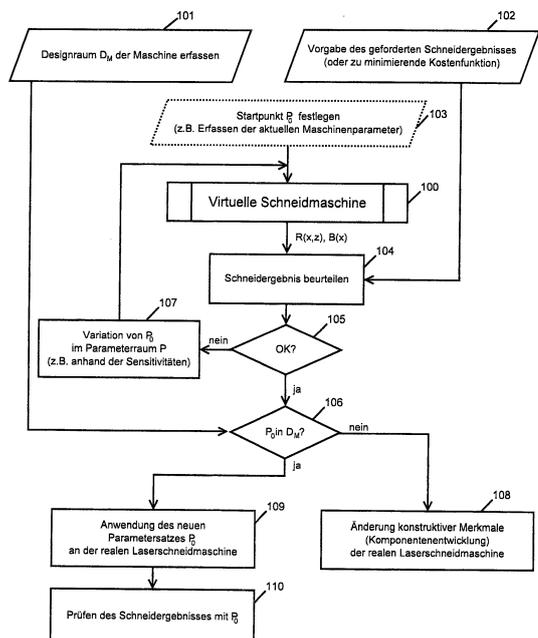
**SCHULZ,W. [u.a.]: Dynamics or ripple  
 formation and melt flow in laser beam cutting. In:  
 J. Phys. D: Appl. Phys., 1999, Vol.32, S.1219-1228**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Bestimmen des Schneidergebnisses eines Laserschneidprozesses**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zum Bestimmen des Schneidergebnisses eines Laserschneidprozesses, das anhand der Ausbildung von Erstarrungsriefen entlang der Schnittfläche und/oder einer Bartbildung an der Unterkante der Schnittfläche beurteilt wird, bei dem in einem Simulations-Programm eine virtuelle Laserschneidmaschine bereitgestellt wird, die mit einem Satz von Werten  $P_0$  aus einem Parameterraum  $P$  virtuell betrieben werden kann. In einem Schritt a) wird der Parametersatz  $P_0$  in die virtuelle Schneidmaschine eingegeben, dann wird im Schritt b) ein Schnitt im virtuellen Werkstück erzeugt, indem die zeitliche Entwicklung der Schmelzfilmdicke und der Position der Schmelzfront am Scheitel der Schneidfront in Abhängigkeit der Schnitttiefe und der Zeit aus partiellen Differentialgleichungen mit Anfangs- und Randwerten berechnet wird, und dann wird im Schritt c) durch eine Projektion des zeitlichen Verlaufs der Absorptionsfront auf die Schnittfläche die räumliche Verteilung der Riefenamplitude auf der Schnittfläche angegeben und/oder aus dem zeitlichen Verlauf der Schmelzfilmdicke und der Ausströmgeschwindigkeit an der Unterkante der Schnittfläche eine räumliche Verteilung des Bartes berechnet, und im Schritt d) wird ein virtuelles Schneidergebnis für eine weitere Auswertung bereitgestellt.



## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Bestimmen des Schneidergebnisses eines Laserschneidprozesses, das anhand der Ausbildung von Erstarrungsriefen entlang der Schnittfläche und/oder einer Bartbildung an der Unterkante der Schnittfläche beurteilt wird, bei dem in einem Simulationsprogramm eine virtuelle Laserschneidmaschine bereitgestellt wird, die mit einem Satz von Werten  $P_0$  aus einem Parameterraum  $P$  virtuell betrieben werden kann.

**[0002]** Das Laserschneiden ist ein etabliertes Trennverfahren. Unter den lasergestützten Fertigungsverfahren nimmt es in der industriellen Anwendung die führende Position ein. Aus Anwendersicht wird für solche Fertigungsverfahren hohe Produktivität bei hoher Qualität gefordert.

**[0003]** Für das Laserschneiden im Bereich der Makro-Anwendung für einen Blechdickenbereich von 1 mm bis 30 mm werden derzeit Hochleistungs-CO<sub>2</sub>-Laser (1  $\mu$ -Strahler) mit einer Wellenlänge der Strahlung von ca. 10  $\mu$ m und mit einer Laserleistung von 1–6 kW industriell eingesetzt. Zusätzlich sind heute neue Strahlquellen, wie Faserlaser und Scheibenlaser (1  $\mu$ -Strahler) mit einer Wellenlänge der Strahlung von ca. 1  $\mu$ m, mit einer Laserleistung von derzeit 1–8 kW und deutlich besserer Strahlqualität als der CO<sub>2</sub>-Laser verfügbar. Solche 1  $\mu$ -Strahler bieten wesentliche wirtschaftliche Vorteile gegenüber den etablierten 10  $\mu$ -Strahlern. Allerdings besitzen 1  $\mu$ -Strahler im Vergleich zu 10  $\mu$ -Strahlern eine schlechtere Schnittqualität, was dem Einsatz dieser 1  $\mu$ -Strahler entgegensteht.

**[0004]** Die Qualität von Schnitten entlang eines Werkstückes kann anhand der Morphologie einer sich auf der Schnittfläche ausbildenden Riefenstruktur und einer Bartbildung durch aufgeschmolzenes Material an der unteren Kante der Schnittfläche beurteilt werden. Gefordert sind neben Ebenheit und Rechtwinkligkeit der Schnittfläche geringe Riefenbildung und Bartbildung.

**[0005]** Die Prozesskette Schneiden-Schweißen ist ein Beispiel, an dem zu erkennen ist, welche Bedeutung die Qualität der Schnittfläche für die Vorbereitung eines Fügespalts hat. Um schlanke Schweißnähte, die keine Nacharbeit durch Schleifen und Richten erfordern, mit dem Laser herstellen zu können, ist ein Zuschnitt der zu fügenden Bauteile mit ebenen, rechtwinkligen sowie glatten Bart- und oxidfreien Schnittflächen erwünscht.

**[0006]** Aus vorstehenden Gründen wurde der Mechanismus, der zu der Bildung von Riefen und Bart sowie Oxidschichten entlang der Schnittfläche und der Schnittkante eines Werkstücks führt, untersucht.

– Auf der Schnittfläche entstehen Riefen, deren Amplitude ab einer bestimmten Schnitttiefe sprunghaft zunimmt, also ein Wechsel von feineren zu größeren Riefen auftritt.

– Die Amplitude der groben Riefen wird mit zunehmender Dicke des zu schneidenden Materials größer.

– Die größeren Riefen sind wiederholt unterbrochen bzw. weisen einen unregelmäßigen Abstand (Anzahl der Riefen in Schnittrichtung wechselt mit der Schnitttiefe) auf.

Diese axiale Struktur bzw. eine Unterbrechung der Riefen erzeugt eine unregelmäßige Struktur der Schnittfläche und ist unerwünscht. Die erreichbare Amplitude der Riefen ist heute für den 10  $\mu$ -Strahler kleiner als für den 1  $\mu$ -Strahler.

– Insbesondere im unteren Teil der Schnittfläche oder bei großen Materialdicken entstehen Riefen mit den größten Amplituden, die durch das Erstarren von schmelzflüssigem Metall auf der Schnittfläche hervorgerufen werden.

– Insbesondere bei großer Vorschubgeschwindigkeit löst die Schmelze nicht vollständig von der Unterkante ab. Die anhaftende und dann erstarrende Schmelze bildet den unerwünschten Bart. Die Mechanismen zur Entstehung von Bart sind nur zu einem Teil verstanden, was dazu führt, dass die möglichen Werte für die Produktivität von Schneidanlagen heute bei weitem nicht ausgenutzt werden.

– Die Bildung von Rissen und Poren in der Schweißnaht kann durch oxidierte Fügekanten verursacht werden, wie sie beim Brennschneiden entstehen. Daher wird das Schmelzschneiden mit inertem Schneidgas durchgeführt, um oxidfreie Schnittflächen zu erhalten.

**[0007]** Das Dokument EP-B1 0929 376 beschreibt ein Verfahren zur Laserstrahlbehandlung, das zum Schneiden großer Materialdicken von 15 mm und mehr besonders geeignet sein soll. Nach diesem Verfahren werden mehrere Foki erzeugt, die in axialer Richtung entlang der Dicke des Materials positioniert werden, um eine große Tiefenwirkung der Laserstrahlung zu erzeugen. Allerdings zeigt sich, dass, ungeachtet der in diesem Dokument empfohlenen Maßnahmen, die Bildung von Riefen und Bart unverändert stark auftreten. Außerdem führen die Anteile der Laserstrahlung mit tiefer liegendem Fokus an der Oberkante des Materials zu einer unerwünschten Aufweitung (Verrundung) der Schnittfuge.

**[0008]** Zur Einführung des Qualitätsschnittes mit dem 1  $\mu$ -Strahler für mehr als 2 mm Blechdicke und zur Erweiterung des Qualitätsschnittes mit dem 10  $\mu$ -Strahler auf Blechdicken größer 15 mm reicht der Stand der Technik heute nicht aus. Die Gründe für diese technischen Grenzen sind, dass

– eine Erweiterung der Grenzen für die Schnittqualität – nach der vorliegenden experimentellen Erfahrung mit 1  $\mu$ -Strahler sowie 10  $\mu$ -Strahlern und mit den heute einstellbaren Werten für die Laser- und Verfahrensparameter – nicht erreichbar ist

– das vorhandene Verständnis über die Entstehung von Riefen und Bart nicht ausreicht, um z. B. die notwendigen, grundlegend neuen Wirkungen einer Strahlformung zu erkennen und nachfolgend Maßnahmen zur Strahlformung angeben zu können.

**[0009]** Aus diesen Gründen werden von Fachleuten heute lediglich Maßnahmen zur Verbesserung des Schneidens mit dem 1  $\mu$ -Strahler vorgeschlagen, die aus den Erfahrungen vom Schneiden mit dem 10  $\mu$ -Strahler bekannt sind. Diese Maßnahmen führten bisher nicht zum Erfolg, so dass der 1  $\mu$ -Strahler die Schnittqualität des 10  $\mu$ -Strahlers noch immer nicht erreichen kann. Darüber hinaus ist keine physikalische Ursache bekannt, mit der die unterschiedliche Schnittqualität erklärt werden könnte.

**[0010]** Nach dem Stand der Technik und Wissenschaft ist nachgewiesen, daß mindestens zwei Arten von Riefen vorliegen, nämlich Schmelzriefen und Erstarrungsriefen, deren Morphologie einen Hinweis auf den zugrunde liegenden Entstehungsmechanismus geben:

Schmelzriefen entstehen an der Oberseite der Schnittfläche allein durch Bewegung der Schmelzfront unter Abwesenheit erstarrter Schmelze und haben eine kleine Amplitude im Vergleich zu den Erstarrungsriefen und sind technisch von untergeordneter Bedeutung.

**[0011]** Erstarrungsriefen entstehen in größerer Schnitttiefe, typischerweise 1 bis 2 mm unterhalb der Oberkante des zu schneidenden Bleches, durch wellenförmige Ausbildung der Schmelzfront und durch wellenförmig erstarrende Schmelze und haben eine große Amplitude im Vergleich zu den Schmelzriefen und sind technisch von großer Bedeutung.

**[0012]** Nach dem Stand der Technik und Wissenschaft ist nicht geklärt, wie die Entstehung von Riefen und Bart mit den Laser-, Maschinen und Materialparametern zusammenhängen. Aus diesem Grund wird auch das Herstellen eines Qualitätsschnittes mit den neuen Laserstrahlquellen (z. B. Faserlaser) noch immer nicht beherrscht, was die weite Anwendung der neuen Strahlquellen verhindert und weltweit Gegenstand der Forschung ist.

**[0013]** Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren anzugeben, mit dem die Schneidergebnisse eines Laserschneidprozesses, unter Einsatz bestimmter Parameter sowohl für eine möglicherweise einzusetzende reale Laser-

schneidmaschine als auch bestimmter Parameter des zu schneidenden Materials sowie erforderliche Prozessparameter bestimmt werden können. Auch soll die Möglichkeit gegeben sein, die Rauheit der Schnittfläche gezielt einstellen zu können.

**[0014]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

**[0015]** Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht das Bestimmen des Schneidergebnisses eines Laserschneidprozesses. Nach diesem Verfahren wird das Ergebnis des Schneidvorgangs, der mit einer bestimmten Laserschneidmaschine durchgeführt werden soll, anhand der Ausbildung von Erstarrungsriefen entlang der Schnittfläche und/oder einer Bartbildung an der Unterkante der Schnittfläche beurteilt. Dieses Verfahren wird nicht an einer realen Laserschneidmaschine durchgeführt. Vielmehr wird in einem Simulations-Programm eine virtuelle Laserschneidmaschine bereitgestellt, die mit einem Satz von Werten  $P_0$  aus einem Parameterraum  $P$  virtuell betrieben werden kann.

**[0016]** Dieser Parameterraum  $P$  ist definiert durch

$$P = (\lambda_{\text{Laser}}, I_0(t), f(x, z, t), \underline{s}(x, z, t), \underline{p}(x, z, t), P_g(x, z, t), \tau_g(x, z, t), v_0(t), d, P_{\text{Material}}),$$

mit

$$P_{\text{Material}} = (\rho_s, c_{ps}, \lambda_s, \rho_l, c_{pl}, \lambda_l, H_m, H_v, T_m, T_v, \eta, \sigma, n_{cs}, n_{cl}),$$

wobei

$\lambda_{\text{Laser}}$  die Wellenlänge der Laserstrahlung,  
 $I_0(t)$  den Maximalwert der Intensität der Laserstrahlung über die Zeit,

$f(x, z, t)$  die räumliche Verteilung der Intensität der Laserstrahlung über die Zeit,

$\underline{s}(x, z, t)$  die räumliche Verteilung der Richtung der Laserstrahlung über die Zeit,

$\underline{p}(x, z, t)$  die räumliche Verteilung des Polarisationszustandes der Laserstrahlung über die Zeit,

$P_g(x, z, t)$  der Druck des Schneidgases über die Zeit,  
 $\tau_g(x, z, t)$  die Scherspannung des Schneidgases über die Zeit,

$v_0(t)$  die Vorschubgeschwindigkeit, definiert als relative Geschwindigkeit zwischen Laserstrahlachse und Werkstück, über die Zeit,

$d$  die Blechdicke des zu schneidenden Materials,  
 $\rho_s$  die Dichte des zu schneidenden Materials im festen Zustand,

$c_{ps}$  die spezifische Wärmekapazität des Materials im festen Zustand,

$\lambda_s$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials im festen Zustand,

$\rho_l$  die Dichte der Schmelze,

$c_{pl}$  die spezifische Wärmekapazität der Schmelze,  
 $\lambda_l$  die Wärmeleitfähigkeit der Schmelze,  
 $H_m$  die Schmelzenthalpie des zu schneidenden Materials,  
 $H_v$  die Verdampfungsenthalpie des zu schneidenden Materials,  
 $T_m$  die Schmelztemperatur des zu schneidenden Materials,  
 $T_v$  die Verdampfungstemperatur des zu schneidenden Materials,  
 $\eta$  die dynamische Viskosität der Schmelze,  
 $\sigma$  die Oberflächenspannung der Schmelze,  
 $n_{cs}$  der komplexe Brechungsindex des Materials im festen Zustand,  
 $n_{cl}$  der komplexe Brechungsindex der Schmelze bezeichnen, und wobei  
 $x$  die Koordinate in Richtung der Relativbewegung zwischen Material und Laserstrahlachse und  
 $z$  die Koordinate senkrecht zur Materialoberseite, sowie  
 $t$  die Zeit bezeichnen.

**[0017]** Verfahrensgemäß werden in einem Schritt a) für den Ablauf des Simulations-Programms der Parametersatz  $P_0$  in die virtuelle Schneidmaschine eingegeben.

**[0018]** Dann wird in einem Schritt b) in einem virtuellen Schneidvorgang mit der virtuellen Schneidmaschine ein Schnitt im virtuellen Werkstück erzeugt, indem die zeitliche Entwicklung der Schmelzfilmdicke  $h = h(z, t)$  und der Position  $M = M(z, t)$  der Schmelzfront am Scheitel der Schneidfront in Abhängigkeit der Schnitttiefe  $z$  ( $0 < z < d$ ,  $d$  Blechdicke) und der Zeit  $t$  aus den partiellen Differentialgleichungen DGL

$$\frac{\partial h}{\partial t} + G(z, t; h, P_0) \frac{\partial h}{\partial z} + D(z, t; h, P_0) = v_p, \quad \frac{\partial M}{\partial t} = v_p - 1$$

mit Anfangs- und Randwerten  
 $h(z, t = 0) = h_0(z)$ ,  $M(z, t = 0) = M_0(z)$   
 $h(z = 0, t) = 0$ ,  $M(z = 0, t) = m_0(t; P_0)$   
 wobei  $h_0(z)$  und  $M_0(z)$  beliebige Anfangsverteilungen,  
 $m_0(t; P_0)$  die Position der Oberkante der Schneidfront,  
 $v_p = v_p(z, t)$  die Geschwindigkeit der Schmelzfront,  
 $v_s = G(z, t; h, P_0)$  die Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche der Schmelze und  $D(z, t; h, P_0)$  eine Dämpfung der Schmelzfilmdynamik bezeichnen, für einen gegebenen Parametersatz  $P_0$  aus  $P$  berechnet wird.

**[0019]** Dann wird in einem Schritt c) durch eine Projektion des zeitlichen Verlaufs der Absorptionsfront, definiert als die Position  $M(z, t) - h(z, t)$ , auf die Schnittfläche mit einer durch die Vorschubgeschwindigkeit  $v_0$  bestimmten Übertragungsfunktion, die  $t$  auf  $x$  abbildet, die räumliche Verteilung der Riefenamplitude  $R(x, z)$  auf der Schnittfläche angegeben. Zusätzlich oder alternativ wird aus dem zeitlichen Verlauf der Schmelzfilmdicke  $h(z = d, t)$  und der Ausström-

geschwindigkeit  $G(z = d, t; h(z = d, t), P_0)$  an der Unterkante der Schnittfläche eine räumliche Verteilung des Bartes  $B(x)$  an der Unterkante der Schnittfläche berechnet.

**[0020]** Schließlich wird in einem Schritt d) ein virtuelles Schneidergebnis, welches  $R(x, z)$  und/oder  $B(x)$  umfasst, für eine weitere Auswertung bereitgestellt.

**[0021]** Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren wird somit eine virtuelle Schneidmaschine genutzt, um die Ausbildung von Erstarrungsriefen an einer virtuellen Schnittfläche und die Ausbildung von Bart an der Unterseite der virtuellen Schnittfläche zu berechnen, wozu die Differentialgleichungen DGL herangezogen werden. Insbesondere kann mit dem Verfahren eine zeitliche Modulation der Parameter des Schneidens angegeben werden, mit der die räumliche Verteilung der Riefenamplitude auf der Schnittfläche eingestellt werden kann.

**[0022]** Diese Möglichkeit, die Riefenamplitude auf der Schnittfläche definiert einstellen zu können, kann nicht nur dazu genutzt werden, die Riefen möglichst klein zu halten, sondern auch dazu, ein Bild oder ein Schriftzug auf der Schnittfläche darzustellen. Ein Anwendungsbereich des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht aber darin, diejenigen Parameter des Schneidens anzugeben, für die die physikalische Grenze einer möglichst kleinen Riefenamplitude erreicht wird. Die Angabe „eine möglichst kleine Riefenamplitude“ bedeutet hierbei, dass trotz einer Optimierung der Schneidbedingungen Riefen unter bestimmten Schneidbedingungen verbleiben, die durch technisch unvermeidbare Schwankungen der Parameter des Schneidens auftreten und daher nicht beseitigt, sondern nur zu kleineren Werten hin begrenzt werden können.

**[0023]** In dem Simulations-Programm, das die Basis des erfindungsgemäßen Verfahrens darstellt, wird die Erkenntnis genutzt, dass Erstarrungsriefen und Bart durch Anfachung von axial laufenden Wellen am Scheitel der Schneidfront, das bedeutet Abtragschwankungen am Scheitel der Schneidfront, entstehen und dass zwei physikalische Ursachen dafür vorliegen.

**[0024]** Es liegt die Erkenntnis vor, dass Riefen und Bart

- aufgrund einer dem Schneiden innewohnenden Instabilität, deren Stabilitätsgrenze angegeben wird,
- und
- aufgrund äußerer Störungen, die
- aus unvermeidbaren Schwankungen von Laser- und Maschinenparametern,
- oder aus räumlichen Schwankungen der Materialeigenschaften (z. B. Korngrenzen),

– oder aus bewusst eingestellten Modulationen der Parameter des Schneidverfahrens (z. B. Modulation der Laserstrahlung oder der Schneidgasströmung),

entstehen.

**[0025]** Dem Simulations-Programm liegt ein physikalisches Riefenmodell zugrunde, mit dem die räumliche Verteilung der Riefenamplitude  $R$  auf der Schnittfläche berechnet werden kann. Die Riefenamplitude  $R = R(x, z)$  hängt von der Schnittposition  $x$  entlang der Schnittfläche und der Schnitttiefe  $z$  sowie von Parametern  $P$  des Schneidens ab.

**[0026]** Der Satz von Werten  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  umfasst Laser-, Maschinen- und Materialparameter und berücksichtigt unter anderem räumlich verteilte Größen wie die Intensität der Laserstrahlung und die antreibenden Kräfte – das sind der räumliche Gradient des Gasdruckes und die Scherspannung des Gases an der Oberfläche des Schmelzfilms – der Schneidgasströmung auf die auszutreibende Schmelze.

**[0027]** Wesentlich ist auch, dass dieser Satz von Parametern neben den Mittelwerten der Parameter auch deren technisch nicht vermeidbaren Schwankungen enthält.

**[0028]** Weiterhin enthält dieser Satz von Parametern neben den Mittelwerten der Parameter und deren technisch nicht vermeidbaren Schwankungen auch bewusst eingestellte zeitliche Modulationen. Durch eine zeitliche Modulation der Parameter kann die Produktivität, z. B. Schneidgeschwindigkeit des Schneidens, vergrößert werden, wobei diese Optimierung durch das Simulations-Programm an einer virtuellen Laserschneidmaschine und damit unter geringem Kostenaufwand vorgenommen werden kann. Diese Optimierungsmöglichkeit ist dadurch gegeben, dass durch eine zeitliche Modulation der Parameter die Riefenmorphologie gezielt eingestellt werden kann, so dass definierte Strukturen der Riefen, bis hin zu einer Minimierung der Riefenstruktur, erzeugt werden können. Diese Modulation kann letztendlich auch dazu genutzt werden, einen Schriftzug oder ein Bild auf der Schnittfläche beim Schneiden auszubilden.

**[0029]** Auch wird in dem Simulations-Programm die Bildung von Bart an der Schnittfläche berücksichtigt, indem die Eigenschaften des entstehenden Bartes unter Ausnutzung des physikalischen Riefenmodells und aus der berechneten Riefenamplitude  $R(x, z)$  an der Unterseite der Schnittfläche berechnet und berücksichtigt werden.

**[0030]** Ein Bart kann durch folgende Größen charakterisiert werden

– die Bartbreite  $b_B$  in Vorschubrichtung und folglich die Strecke, gemessen in Vorschubrichtung, wo die erstarrte Schmelze an der Unterseite des Bleches bzw. an der unteren Kante der Schnittfläche anhaftet,

– das Bartvolumen  $V_B$ ; das Volumen an erstarrter Schmelze, das unterhalb des geschnittenen Bleches, das bedeutet unterhalb der unteren Schnittkante, anhaftet,

– die Barthöhe  $h_B$ ; das ist die Höhe der erstarrten Schmelze, die unterhalb des geschnittenen Bleches anhaftet.

**[0031]** Somit wird in dem Simulations-Programm auch berücksichtigt, ob der Bart aus einer Art Bartperlen oder einer Art Bartfäden besteht. Eine Bartperle entsteht per Definition dort, wo die Barthöhe  $h_B$  kleiner oder gleich der Bartbreite  $b_B$  ist, während ein Bartfaden dann entsteht, wenn die Barthöhe  $h_B$  größer als die Bartbreite  $b_B$  ist.

**[0032]** In dem Satz von Werten  $P_0$  des Parameterraums  $P$  werden auch thermophysikalische Parameter, wie beispielsweise Schmelztemperatur  $T_m$  und Verdampfungstemperatur  $T_v$  der Schmelzfilmoberfläche an der Unterkante, und Materialparameter, wie zum Beispiel die Oberflächenspannung der Schmelze, berücksichtigt.

**[0033]** Das erfindungsgemäße Verfahren ist für das Laserschneiden sowohl mit reaktivem Schneidgasstrahl als auch für das Laserschneiden mit inertem Schneidgasstrahl einsetzbar. In Bezug auf das letztere Verfahren werden die Verfahrensvarianten Laserstrahlschmelzschnitten, Schnellschnitten und Hochgeschwindigkeitsschnitten unterschieden.

**[0034]** Aufgrund des Simulations-Programms und unter Vorgabe einer virtuellen Laserschneidmaschine, die ideale Voraussetzungen erfüllt sowie universell einstellbar ist, können durch Variation der Parameterwerte  $P_0$ , indem die Schritte a) bis d) mit jeweils veränderten Parametern aus dem Parameterraum  $P$  wiederholt werden, die theoretisch optimalen Werte  $P_{opt}$  für die Parameter  $P$  für jeweils eine vordefinierte Riefenmorphologie (z. B. minimale Rauheit) und einen bartfreien Schnitt ermittelt werden.

**[0035]** Die heute verfügbaren Schneidmaschinen sind technisch nicht perfekt und weisen je nach Hersteller einen eingeschränkten Designraum auf. Die sich aus dem erfindungsgemäßen Verfahren in der Anwendung des Simulations-Programms ergebenden theoretisch optimalen Sätze von Parametern aus der virtuellen Schneidmaschine können nicht immer mit einer realen Schneidmaschine umgesetzt werden. Daher können die Ergebnisse, die mit dem Simulations-Programm erhalten werden, dazu verwendet werden, eine reale Laserschneidmaschine in bestimmten Parametern zu verbessern oder auch neu

zu dimensionieren, indem anhand der Ergebnisse aus dem Simulations-Programm die Ursachen bzw. die Parameter ermittelt werden, die zu einer unerwünschten Ausprägung der Riefenamplitude und/oder zu einer unerwünschten Bartbildung führen. Dazu werden die einzelnen Wert  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  betrachtet und analysiert, um dann solche Werte aus dem Parameterraum  $P$  auszuwählen und zu verändern, die zu der besten Annäherung der Werte  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  führen.

**[0036]** Eine solche Annäherung erfolgt somit auf einem virtuellen Weg und kann auch durch iterative Veränderungen der Werte  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  erfolgen. Falls erforderlich können die aufgefundenen, angenäherten Parameter in realen Schneidversuchen überprüft werden. Aus den über das Verfahren gewonnen Erkenntnissen können erforderliche Verfahrensparameter oder auch Randbedingungen für die erforderlichen Komponenten der Laserschneidmaschine abgeleitet werden, die z. B. die Formung von Laserstrahlung und die Schneidgasströmung betreffen.

**[0037]** Ein wesentlicher Schritt des erfindungsgemäßen Verfahrens liegt in der mathematisch-physikalischen Berechnung von Riefen auf der Schnittfläche und der Bartbildung. Diese Berechnung basiert auf einem hochdimensionalen Satz gekoppelter, nichtlinearer, partieller Integro-Differentialgleichungen (Differentialgleichungen, die neben den Ableitungen auch Integrale der dynamischen Variablen enthalten) mindestens fünfter Ordnung, wobei einige der beteiligten partiellen Differentialgleichungen vom bekannten Typ der Kuramoto-Sivashinsky-Gleichung sind. Allerdings basiert das erfindungsgemäße Verfahren, um diese komplexe Aufgabe zu lösen, auf einem durch die Erfinder entwickelten, stark vereinfachten System aus nur zwei partiellen Differentialgleichungen erster Ordnung für nur zwei dynamische Variablen, um die Differentialgleichungen höherer Ordnungen zu ersetzen.

**[0038]** Mit diesen zwei Differentialgleichungen,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + G(z, t; h, P_0) \frac{\partial h}{\partial z} + D(z, t; h, P_0) = v_p, \quad \frac{\partial M}{\partial t} = v_p - 1$$

mit Anfangs- und Randwerten  
 $h(z, t = 0) = h_0(z)$ ,  $M(z, t = 0) = M_0(z)$   
 $h(z = 0, t) = 0$ ,  $M(z = 0, t) = m_0(t; P_0)$   
wobei  $h_0(z)$  und  $M_0(z)$  beliebige Anfangsverteilungen,  $m_0(t; P_0)$  die Position der Oberkante der Schneidfront,  $v_p = v_p(z, t)$  die Geschwindigkeit der Schmelzfront,  $v_s = G(z, t; h, P_0)$  die Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche der Schmelze und  $D(z, t; h, P_0)$  eine Dämpfung der Schmelzfilmdynamik bezeichnen, wird die zeitliche Entwicklung der Schmelzfilmdicke  $h = h(z, t)$  und der Position  $M = M(z, t)$  der Schmelzfront am Scheitel der Schneidfront in Abhängigkeit

der Schnitttiefe  $z(0 < z < d, d$  Blechdicke) und der Zeit  $t$  berechnet.

**[0039]** Für die restlichen Größen, die in das Modell, das dem Simulations-Programm zugrunde liegt, eingehen können und am Scheitel der Schneidfront anzugeben sind, können verschiedene aus der Literatur bekannte physikalische Modelle herangezogen werden, um die Größen

- Position  $m_0(t; P_0)$  der Oberkante der Schneidfront,
- Geschwindigkeit  $v_p = v_p(z, t)$  der Schmelzfront
- Strömungsgeschwindigkeit  $v_s = G(z, t; h, P_0)$  an der Oberfläche der Schmelze
- Dämpfung  $D(z, t; h, P_0)$  der Schmelzfilmdynamik

zu bestimmen.

**[0040]** Zur Berechnung dieser Größen können verschiedene Approximationsstufen angegeben werden.

**[0041]** Es ist zu berücksichtigen, dass die Geschwindigkeit  $v_p$  der Schmelzfront  $v_p = N[M - h, Q_A]$  die beiden Differentialgleichungen nichtlinear miteinander koppelt. Die Geschwindigkeit  $v_p$  der Schmelzfront wird durch einen nichtlinearen Operator  $N$  berechnet, der noch von der absorbierten Energiestromdichte  $Q_A$  abhängt.

**[0042]** Die absorbierte Energiestromdichte  $Q_A$ ,

$$Q_A = \mu A(\mu) I_0 f(x, z; t)|_{x=M-h}, \quad \mu = \cos(\underline{s} \cdot \underline{n}),$$

wird aus dem Kosinus des Einfallswinkels  $\mu$ , dem Absorptionsgrad  $A(\mu)$  der Maximalintensität  $I_0$  und der Verteilung  $f(0 < f < 1)$  der Intensität der Laserstrahlung berechnet. Der Einfallswinkel wird durch den Richtungsvektor  $\underline{s}$  der Energiestromdichte des Lasers und den Normalenvektor  $\underline{n}$  der Oberfläche des Schmelzfilms eingeschlossen. Die Verteilung  $f(0 < f < 1)$  der Intensität hängt von den Raumkoordinaten  $x, z$ , wobei  $x$  die Vorschubrichtung und  $z$  die Ausbreitungsrichtung der Strahlung angibt, und von Parametern  $P_f$ , mit denen die Verteilung  $f$  parametrisiert wird, ab.

**[0043]** Die Strömungsgeschwindigkeit  $v_s = G(z, t; h, P_0)$  an der Oberfläche  $x = M - h$  der Schmelze wird durch eine Funktion  $G$  angegeben, die aus der Strömung des Schneidgases und der Strömung der Schmelze bestimmt wird.

**[0044]** Die Dämpfung  $D(z, t; h, P_0)$  in den Differentialgleichungen DGL kann in bestimmten Modellen auf Null gesetzt werden und bleibt damit unberücksichtigt.

**[0045]** Die Eigenschaften des entstehenden Bartes werden unter Ausnutzung des physikalischen Riefen-

modells und aus der damit berechneten Riefenamplitude  $R(x, z = d)$  an der Unterkante der Schnittfläche erfindungsgemäß wie folgt berechnet:

Die Bartbreite  $b_B$  in Vorschubrichtung – das ist die Strecke in Vorschubrichtung gemessen an der Unterseite des Bleches, wo die erstarrte Schmelze anhaftet – wird durch  $b_B = v_0(t_2 - t_1)$ , berechnet, wobei  $v_0$  die Vorschubgeschwindigkeit ist. Erfindungsgemäß kann die ausströmende Schmelze zwischen den Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  nicht ablösen, haftet deswegen am Blech an und erstarrt. Die Zeit  $t_1$  ist durch die Bedingung

$$We = We(h(z = d, t); P_0) < We_{crit}$$

bestimmt, wobei die Größe  $We$

$$We = (\rho v_s^2)/(\sigma/h_d)$$

als Weberzahl bezeichnet wird, wobei  $h_d$  die dimensionsbehaftete Dicke des Schmelzfilms an der Blechunterseite angibt. Die Zeit  $t_2$  wird durch die Bedingung  $We > We_{crit}$  definiert, die Zeitspanne  $t_2 - t_1$  ist also das Zeitintervall, in dem  $We_{crit}$  unterschritten wird. Für die Größen  $v_s = G(z, t; h, P_0)$  und  $h_d$  ist die Lösung aus dem physikalischen Riefenmodell in den Ausdruck für die Weberzahl einzusetzen. Der Wert  $We_{crit}$  ist gesondert zu bestimmen, wozu physikalische Modelle oder experimentelle Ergebnisse herangezogen werden können.

**[0046]** Bei der Weberzahl  $We$  handelt es sich um eine dimensionslose Kennzahl, die als Maß für eine Tropfenverformung dient. Je größer sie ist, umso größer ist die Deformationswirkung und umso weiter hat sich der Tropfen von der Kugelform entfernt.

**[0047]** Das angesprochene Bartvolumen  $V_B$ , das ist das Volumen an erstarrter Schmelze, das unterhalb des geschnittenen Bleches anhaftet, wird mit dem aufgefundenen Wert für die Bartbreite  $b_B = v_0(t_2 - t_1)$  bestimmt. Mit diesem Wert für die Bartbreite  $b_B = v_0(t_2 - t_1)$ , der Ausströmgeschwindigkeit  $v_s$  und der Bedingung  $V_B = V(t_2 - t_1)$ , wobei das Volumen  $V(t_2 - t_1)$  durch die im Intervall  $t_2 - t_1$  an der Unterseite  $z = d$  ausströmende Schmelze bestimmt ist, folgt der Wert für das Bartvolumen  $V_B$ .

**[0048]** Die Barthöhe  $h_B$ , das ist die Höhe der erstarrten Schmelze, die unterhalb des geschnittenen Bleches anhaftet, wird aus der Lösung  $h(z = d, t)$  der Differentialgleichungen DGL sowie der Werte für die Bartbreite  $b_B$  und das Bartvolumen  $V_B$  berechnet.

**[0049]** Durch eine Projektion des zeitlichen Verlaufs von  $V_B(t)$  mit einer durch die Vorschubgeschwindigkeit  $v_0$  bestimmten Übertragungsfunktion, die  $t$  auf  $x$  abbildet, kann die räumliche Verteilung des Bartvolumens/der Barthöhe entlang der Unterkante der Schnittfläche  $h_B(x)$  angegeben werden.

**[0050]** Weiterhin kann zum Bestimmen der Parameter, bei denen Bartbildung durch Verdampfung einsetzt, die Temperatur  $T_s(t) = T(M(z = d, t) - h(z = d, t), z = d, t)$  an der Oberfläche der Schmelze bestimmt werden, wobei  $T(x, z, t)$  die Temperatur in der Schmelze bezeichnet. Die Temperatur in der Schmelze wird durch Anwenden der Wärmeleitungsgleichung bestimmt. Ist  $T_s > T_v$ , so gibt es eine Bartbildung.

**[0051]** Zur Beurteilung des virtuellen Schneidergebnisses werden aus dem virtuellen Schneidergebnis, bestehend aus  $R(x, z)$  und/oder  $B(x)$ , eine oder mehrere Kenngröße(n)  $K$  der Riefen, z. B. Rauheit der Schnittfläche  $R_z$ , und des Bartes, z. B. des Bartvolumens  $V_B$ , Barthöhe  $h_B$ , Bartbreite  $b_B$ , abgeleitet.

**[0052]** Um das jeweilige Ergebnis eines Verfahrensablaufes noch weiter zu optimieren, werden die Schritte a) bis d) des Verfahrens, wie es in Anspruch 1 angegeben ist, mindestens einmal in einer Umgebung des Parametersatzes  $P_0$  im Parameterraum  $P$  wiederholt. Hierdurch können die Sensitivitäten, definiert als partielle mathematische Ableitungen des Schneidergebnisses oder der Kenngröße(n)  $K$  nach Parametern aus  $P$ , für den Parametersatz  $P_0$  angegeben werden.

**[0053]** Durch eine alternative Verfahrensmaßnahme, und zwar durch mathematische Analyse der Lösungsstruktur der Differentialgleichungen DGL, können diese Sensitivitäten, definiert als partielle mathematische Ableitungen des Schneidergebnisses oder der Kenngröße(n)  $K$  nach Parametern aus  $P$ , der Parameter angegeben werden.

**[0054]** Eine weitere alternative Verfahrensmaßnahme für die Angabe der Sensitivitäten ist diejenige durch automatisches Differenzieren.

**[0055]** Indem die Verfahrensschritte a) bis d) des Verfahrens nach Anspruch 1 mit jeweils veränderten Parametern aus dem Parameterraum  $P$  wiederholt werden, werden Werte der Parameter aus dem Parameterraum  $P$  des Laserschneidprozesses zum Erzielen definierter Schnittflächen und/oder zum Bestimmen der mit einer vorgegebenen Laserschneidmaschine erzielbaren Schnittflächen, und/oder zum Auslegen von Komponenten einer optimierten Laserschneidmaschine, die die Vorgaben bezüglich gestellter Anforderungen an die Schnittflächen erfüllt oder zumindest annähert, bestimmt.

**[0056]** Aus der vorstehenden Verfahrensmaßnahme können Regeln zur Weiter- und/oder Neuentwicklung von Komponenten einer realen Laserschneidmaschine über die Werte der Parameter aus dem Parameterraum  $P$  des Laserschneidprozesses zum Erzielen definierter Schnittflächen, die die Vorgaben bezüglich gestellter Anforderungen an die Schnittflächen

erfüllen oder zumindest annähern, abgeleitet werden, falls die ermittelten Werte nicht auf eine reale Laserschneidmaschine mit maschinenspezifischen Parametern, bezeichnet als maschinenspezifischen Designraum  $D_M$ , übertragbar sind, wobei  $D_M$  die Teilmenge von  $P$  ist, die ohne konstruktive Änderungen an der realen Laserschneidmaschine erreichbar ist.

**[0057]** Um ein Bild oder ein Schriftzug auf die Schnittfläche aufzubringen, werden Werte der Parameter des Schneidens, gegebenenfalls orts- und zeitabhängige Werte, angegeben, mit der die räumliche Verteilung der Riefenamplitude auf der Schnittfläche eingestellt werden soll.

**[0058]** Für einen Spezialfall, bei dem die Vorgabe in einer möglichst geringen Riefenamplitude besteht, werden Parameter des Schneidens angegeben, für die die physikalische Grenze einer möglichst kleinen Riefenamplitude erreicht wird, die z. B. durch technisch unvermeidbare Schwankungen der Parameter des Schneidens begrenzt wird.

**[0059]** Um die Kenngröße(n)  $K$  zu berechnen, die zur Beurteilung des Schneidergebnisses entsprechend der gestellten Anforderungen herangezogen werden, besteht eine vorteilhafte Ausprägung des Verfahrens nach Anspruch 1 darin, unterschiedliche Lösungen der Differentialgleichungen DGL mit mathematischen Methoden auf ihre dynamische Stabilität für unterschiedliche Anfangswerte  $h(z, t = 0) = h_0(z)$  und  $M(z, t = 0) = M_0(z)$  hin zu analysieren. Falls instabile Lösungen existieren, lassen sich aus dem Grad der Instabilität untere Schranken für die Verteilung der Riefenamplitude  $R(x, z)$  angeben und damit die jeweiligen Kenngröße(n)  $K$  berechnen.

**[0060]** Auch können Teilmengen von  $P$  bzw.  $D_M$  angegeben werden, in denen die Vorgaben bezüglich gestellter Anforderungen an die Schnittflächen erfüllt oder zumindest angenähert werden.

**[0061]** Der grundsätzliche Verfahrensablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens wird anhand des schematischen Diagramms nachfolgend kurz erläutert, das in der beigefügten [Fig. 1](#) dargestellt ist.

**[0062]** Das erfindungsgemäße Verfahren, wie es in dem Diagramm dargestellt ist, setzt eine virtuelle Schneidmaschine, die mit dem Bezugszeichen **100** bezeichnet ist, ein. Für die Durchführung des Verfahrens wird zum einen der Designraum  $D_M$ , Schritt **101**, erfasst und zum anderen wird das geforderte Schneidergebnis, Schritt **102**, eingegeben. Im Schritt **102** kann auch eine zu minimierende Kostenfunktion festgelegt werden.

**[0063]** Um die virtuelle Schneidmaschine **100** zu starten, wird im Schritt **103** ein Startpunkt  $P_0$  festgelegt, beispielsweise durch Erfassen der Maschinen-

parameter einer aktuellen, realen Schneidmaschine. Der Satz von Werten  $P_0$  wird aus dem Parameterraum  $P$ , wie er weiter vorstehend definiert ist, ausgewählt.

**[0064]** Das Simulations-Programm wird gestartet, indem ein virtueller Schnitt mit der virtuellen Schneidmaschine, die auf realen Werten basieren kann, erzeugt wird. Das Simulations-Programm gibt ein Schneidergebnis aus, das die räumliche Verteilung der Riefenamplitude  $R(x, z)$  auf der Schnittfläche und die räumliche Verteilung des Bartes  $B(x)$  an der Unterkante der Schnittfläche beinhaltet.

**[0065]** Im Schritt **104** wird das Schneidergebnis beurteilt.

**[0066]** Im Schritt **105** wird eine Entscheidung getroffen, ob das virtuell ermittelte Schneidergebnis der Vorgabe des geforderten Schneidergebnisses (Schritt **102**) entspricht. Falls dies der Fall ist, geht der Verfahrensablauf weiter zu Schritt **106**, an dem geprüft wird, ob der Satz von Werten  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  mit dem Designraum  $D_M$  der Maschine, eingegeben im Schritt **101**, in Einklang steht.

**[0067]** Falls im Schritt **105** entschieden wird, dass das Schneidergebnis nicht dem geforderten Schneidergebnis entspricht, geht der Ablauf zu Schritt **107**, in dem der Satz von Werten  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  variiert wird. Eine solche Variation kann beispielsweise anhand der Sensitivitäten erfolgen, die durch eines der Verfahren gemäß den Ansprüchen 6 bis 8 ermittelt werden. Die variierten Werte  $P_0$  werden dann dazu verwendet, die virtuelle Schneidmaschine **100** zu betreiben.

**[0068]** Die Schleife über die Verfahrensschritte **105**, **107** und **104** wird so lange wiederholt, bis im Schritt **105** das Schneidergebnis den geforderten Schneidergebnissen entspricht.

**[0069]** Falls die Abfrage im Schritt **106** verneint wird, endet das Verfahren im Schritt **108**; in dem Schritt **108** wird die Aussage getroffen, dass eine konstruktive Änderung von Merkmalen der realen Laserschneidmaschine, mit deren Parametern (Designraum  $D_M$ ) das Simulations-Programm abgelaufen ist, erforderlich ist, um die im Schritt **102** angegebene Vorgabe des geforderten Schneidergebnisses zu erfüllen oder zumindest anzunähern.

**[0070]** Falls die Abfrage im Schritt **106** bejaht wird, geht das Verfahren weiter zu Schritt **109**; in dem Schritt **109** wird ein neuer Satz von Werten  $P_0$  aus dem Parameterraum  $P$  an der realen Laserschneidmaschine angewandt, deren Parameter im Schritt **103** oder im Schritt **107** festgelegt wurden.

**[0071]** Im Schritt **110** wird dann ein mit der realen Laserschneidmaschine vorgenommener Schnitt geprüft.

**[0072]** Eine reale Schneidmaschine kann somit eingerichtet werden, indem festgestellt wird, welche Werte der Parameter aus  $P$  des Schneidens zu einer unerwünschten Ausprägung der Riefenamplitude und/oder zu einer unerwünschten Bartbildung führen und was die beste Annäherung  $P_{an}$  der Parameter aus  $P$  an das gewünschte Schneidergebnis, das die theoretisch optimalen Werte  $P_{opt}$  sind, darstellt.

**[0073]** Dazu wird der Designraum der realen Schneidmaschine bestimmt. Der Designraum der realen Schneidmaschine enthält die real einstellbaren Werte  $P_{real}$  der Parameter aus  $P$ . Durch Anwendung der virtuellen Laserschneidmaschine werden die Werte  $P_{an}$  der Parameter aufgefunden, mit denen die beste Annäherung an das gewünschte Schneidergebnis erreicht wird.

**[0074]** Das Ergebnis wird auf der realen Schneidmaschine erprobt. Eine etwa verbleibende Diskrepanz zwischen dem gewünschten und erreichten Schneidergebnis auf der realen Schneidmaschine kann durch iterative Verfeinerung der Bestimmung des Designraums verbessert werden.

**[0075]** Die Erfindung ist immer dann einsetzbar, wenn beim Laserschneiden der überwiegende Anteil der Schmelze vor oder neben dem Laserstrahl angetrieben wird.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- EP 0929376 B1 [[0007](#)]

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen des Schneidergebnisses eines Laserschneidprozesses, das anhand der Ausbildung von Erstarrungsriefen entlang der Schnittfläche und/oder einer Bartbildung an der Unterkante der Schnittfläche beurteilt wird, bei dem in einem Simulations-Programm eine virtuelle Laserschneidmaschine bereitgestellt wird, die mit einem Satz von Werten  $P_0$  aus einem Parameterraum  $P$  virtuell betrieben werden kann, wobei der Parameterraum  $P$  definiert ist durch

$$P = (\lambda_{\text{Laser}}, I_0(t), f(x, z, t), \underline{s}(x, z, t), \underline{p}(x, z, t), P_g(x, z, t), \tau_g(x, z, t), v_0(t), d, P_{\text{Material}}),$$

mit

$$P_{\text{Material}} = (\rho_s, c_{ps}, \lambda_s, \rho_l, c_{pl}, \lambda_l, H_m, H_v, T_m, T_v, \eta, \sigma, n_{cs}),$$

wobei

$\lambda_{\text{Laser}}$  die Wellenlänge der Laserstrahlung,  
 $I_0(t)$  den Maximalwert der Intensität der Laserstrahlung über die Zeit,  
 $f(x, z, t)$  die räumliche Verteilung der Intensität der Laserstrahlung über die Zeit,  
 $\underline{s}(x, z, t)$  die räumliche Verteilung der Richtung der Laserstrahlung über die Zeit,  
 $\underline{p}(x, z, t)$  die räumliche Verteilung des Polarisationszustandes der Laserstrahlung über die Zeit,  
 $P_g(x, z, t)$  der Druck des Schneidgases über die Zeit,  
 $\tau_g(x, z, t)$  die Scherspannung des Schneidgases über die Zeit,  
 $v_0(t)$  die Vorschubgeschwindigkeit, definiert als relative Geschwindigkeit zwischen Laserstrahlachse und Werkstück, über die Zeit,  
 $d$  die Blechdicke des zu schneidenden Materials,  
 $\rho_s$  die Dichte des zu schneidenden Materials im festen Zustand,  
 $c_{ps}$  die spezifische Wärmekapazität des Materials im festen Zustand,  
 $\lambda_s$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials im festen Zustand,  
 $\rho_l$  die Dichte der Schmelze,  
 $c_{pl}$  die spezifische Wärmekapazität der Schmelze,  
 $\lambda_l$  die Wärmeleitfähigkeit der Schmelze,  
 $H_m$  die Schmelzenthalpie des zu schneidenden Materials,  
 $H_v$  die Verdampfungsenthalpie des zu schneidenden Materials,  
 $T_m$  die Schmelztemperatur des zu schneidenden Materials,  
 $T_v$  die Verdampfungstemperatur des zu schneidenden Materials,  
 $\eta$  die dynamische Viskosität der Schmelze,  
 $\sigma$  die Oberflächenspannung der Schmelze,  
 $n_{cs}$  der komplexe Brechungsindex des Materials im festen Zustand,

$n_{cl}$  der komplexe Brechungsindex der Schmelze bezeichnen, und wobei

$x$  die Koordinate in Richtung der Relativbewegung zwischen Material und Laserstrahlachse und  $z$  die Koordinate senkrecht zur Materialoberseite, sowie

$t$  die Zeit

bezeichnen,

und bei dem in einem

Schritt a) für den Ablauf des Simulations-Programms der Parametersatz  $P_0$  in die virtuelle Schneidmaschine eingegeben wird,

und dann in einem

Schritt b) in einem virtuellen Schneidvorgang mit der virtuellen Schneidmaschine ein Schnitt im virtuellen Werkstück erzeugt wird, indem die zeitliche Entwicklung der Schmelzfilmdicke  $h = h(z, t)$  und der Position  $M = M(z, t)$  der Schmelzfront am Scheitel der Schneidfront in Abhängigkeit der Schnitttiefe  $z(0 < z < d, d$  Blechdicke) und der Zeit  $t$  aus den partiellen Differentialgleichungen DGL

$$\frac{\partial h}{\partial t} + G(z, t; h, P_0) \frac{\partial h}{\partial z} + D(z, t; h, P_0) = v_p, \frac{\partial M}{\partial t} = v_p - 1$$

mit Anfangs- und Randwerten

$$h(z, t = 0) = h_0(z), M(z, t = 0) = M_0(z)$$

$$h(z = 0, t) = 0, M(z = 0, t) = m_0(t; P_0)$$

wobei  $h_0(z)$  und  $M_0(z)$  beliebige Anfangsverteilungen,  $m_0(t; P_0)$  die Position der Oberkante der Schneidfront,  $v_p = v_p(z, t)$  die Geschwindigkeit der Schmelzfront,  $v_s = G(z, t; h, P_0)$  die Strömungsgeschwindigkeit an der Oberfläche der Schmelze und

$D(z, t; h, P_0)$  eine Dämpfung der Schmelzfilmdynamik bezeichnen,

für einen gegebenen Parametersatz  $P_0$  aus  $P$  berechnet wird,

und dann in einem

Schritt c) durch eine Projektion des zeitlichen Verlaufs der Absorptionsfront, definiert als die Position  $M(z, t) - h(z, t)$ , auf die Schnittfläche mit einer durch die Vorschubgeschwindigkeit  $v_0$  bestimmten Übertragungsfunktion, die  $t$  auf  $x$  abbildet, die räumliche Verteilung der Riefenamplitude  $R(x, z)$  auf der Schnittfläche angegeben wird

und/oder

aus dem zeitlichen Verlauf der Schmelzfilmdicke  $h(z = d, t)$  und der Ausströmgeschwindigkeit  $G(z = d, t; h(z = d, t), P_0)$  an der Unterkante der Schnittfläche eine räumliche Verteilung des Bartes  $B(x)$  an der Unterkante der Schnittfläche berechnet wird,

und in einem

Schritt d) ein virtuelles Schneidergebnis, welches  $R(x, z)$  und/oder  $B(x)$  umfasst, für eine weitere Auswertung bereitgestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Dämpfung  $D(z, t; h, P_0)$  in den Differentialgleichungen DGL auf Null gesetzt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zum Berechnen der räumlichen Verteilung des Bartes  $B(x)$  an der Unterkante der Schnittfläche die Weberzahl  $We(t)$  als hydrodynamische Kenngröße mit Hilfe von  $h(z = d, t)$ ,  $G(z = d, t; h(z = d, t), P_0)$  und  $P_{\text{Material}}$  bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zum Bestimmen der Parameter, bei denen Bartbildung durch Verdampfung einsetzt, die Temperatur  $T_s(t) = T(M(z = d, t) - h(z = d, t), z = d, t)$  an der Oberfläche der Schmelze bestimmt wird, wobei  $T(x, z, t)$  die Temperatur in der Schmelze bezeichnet.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass aus dem virtuellen Schneidergebnis, bestehend aus  $R(x, z)$  und/oder  $B(x)$ , eine oder mehrere Kenngröße(n)  $K$  der Riefen und des Bartes zur Beurteilung des virtuellen Schneidergebnisses abgeleitet werden.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Schritte a) bis d) mindestens einmal in einer Umgebung des Parametersatzes  $P_0$  im Parameterraum  $P$  wiederholt werden, um die Sensitivitäten, definiert als partielle mathematische Ableitungen des Schneidergebnisses oder der Kenngröße(n)  $K$  nach Parametern aus  $P$ , für den Parametersatz  $P_0$  anzugeben.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass durch mathematische Analyse der Lösungsstruktur der Differentialgleichungen DGL die Sensitivitäten, definiert als partielle mathematische Ableitungen des Schneidergebnisses oder der Kenngröße(n)  $K$  nach Parametern aus  $P$ , für den Parametersatz  $P_0$  angegeben werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass durch automatisches Differenzieren die Sensitivitäten, definiert als partielle mathematische Ableitungen des Schneidergebnisses oder der Kenngröße(n)  $K$  nach Parametern aus  $P$ , für den Parametersatz  $P_0$  angegeben werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass Werte der Parameter aus dem Parameterraum  $P$  des Laserschneidprozesses zum Erzielen definierter Schnittflächen und/oder zum Bestimmen der mit einer vorgegebenen Laserschneidmaschine erzielbaren Schnittflächen und/oder zum Auslegen von Komponenten einer optimierten Laserschneidmaschine, die die Vorgaben bezüglich gestellter Anforderungen an die Schnittflächen erfüllt oder zumindest annähert, bestimmt werden, indem die Schritte a) bis d) mit jeweils veränderten Parametern aus dem Parameterraum  $P$  wiederholt werden.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass Regeln zur Weiter- und/oder Neuentwicklung von Komponenten einer realen Laserschneidmaschine aus den Werten der Parameter aus dem Parameterraum  $P$  des Laserschneidprozesses zum Erzielen definierter Schnittflächen, die die Vorgaben bezüglich gestellter Anforderungen an die Schnittflächen erfüllen oder zumindest annähern, abgeleitet werden, falls die ermittelten Werte nicht auf eine reale Laserschneidmaschine mit maschinenspezifischen Parametern, bezeichnet als maschinenspezifischen Designraum  $D_M$ , übertragbar sind, wobei  $D_M$  die Teilmenge von  $P$  ist, die ohne konstruktive Änderungen an der realen Laserschneidmaschine erreichbar ist.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass Werte der Parameter des Schneidens, mit denen die räumliche Verteilung der Riefenamplitude auf der Schnittfläche eingestellt und damit ein Bild oder ein Schriftzug auf die Schnittfläche aufgebracht wird, angegeben werden.

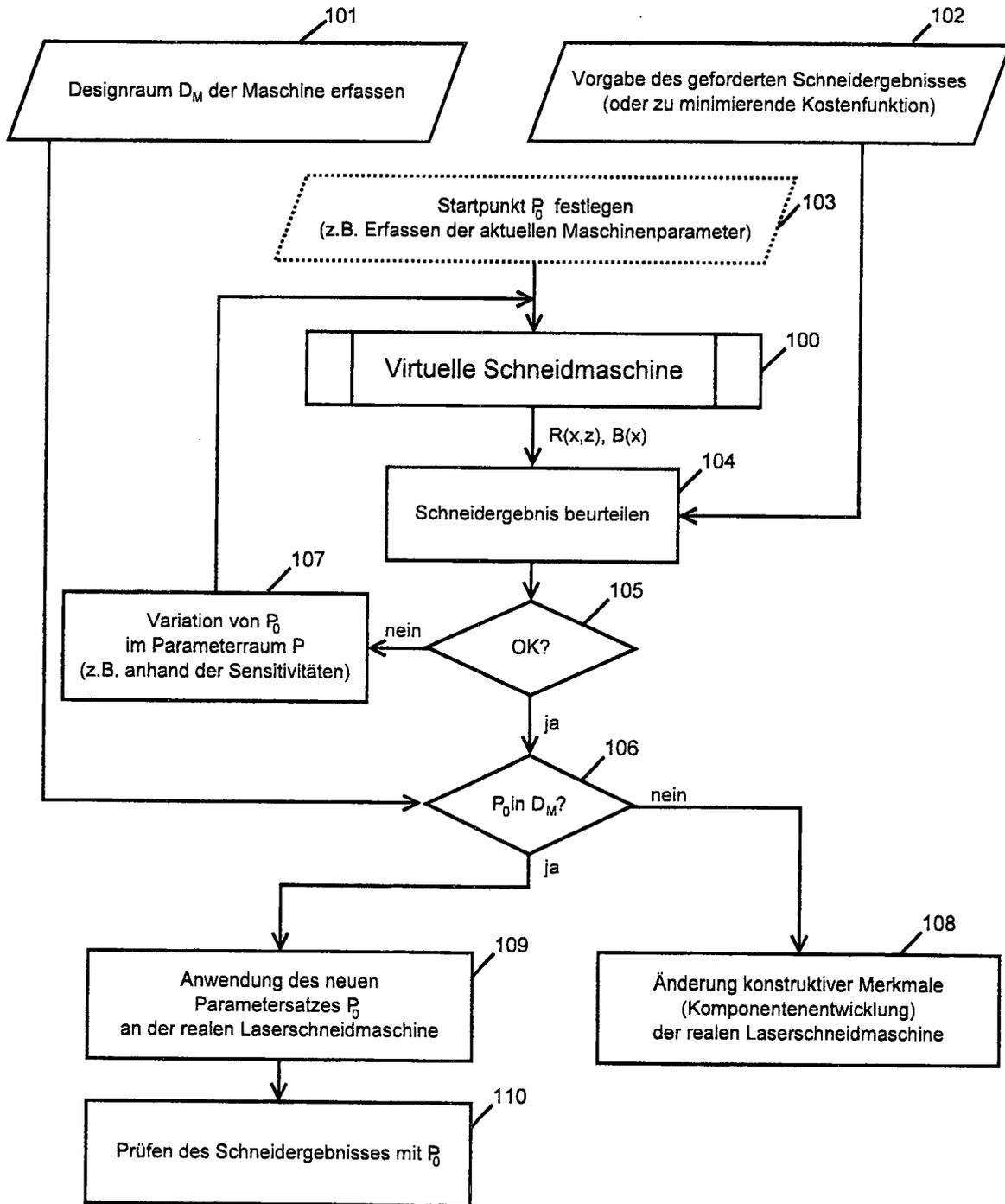
12. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Werte der Parameter des Schneidens angegeben werden, für die die physikalische Grenze einer möglichst kleinen Riefenamplitude erreicht wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass Lösungen der Differentialgleichungen DGL mit mathematischen Methoden auf ihre dynamische Stabilität für unterschiedliche Anfangswerte  $h(z, t = 0) = h_0(z)$  und  $M(z, t = 0) = M_0(z)$  hin analysiert werden, um die Kenngröße(n)  $K$  zu berechnen.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 9 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass Teilmengen von  $P$  und/oder  $D_M$  angegeben werden, in denen die Vorgaben bezüglich gestellter Anforderungen an die Schnittflächen erfüllt oder zumindest angenähert werden.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



Figur 1