Entwicklung kalkulatorischer Kenngrößen zur Gestaltung von Scherschneidprozessen und Bewertung der Bauteilqualität bei Anwendung hoher Schneidgeschwindigkeiten

Forschungsstelle 1:
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU Chemnitz
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Reimund Neugebauer
Dr.-Ing. Verena Kräusel
Dipl.-Ing. Tom Barthel

Forschungsstelle 2:
Technische Universität München
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)
Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann
Dr.-Ing. Roland Golle
Dipl.-Ing. Thomas Kopp

1. Einleitung

Im Zuge der allgemeinen Rezession und der aktuellen wirtschaftlichen Lage des Weltmarktes rücken Schlagwörter wie Energieeffizienz und ressourcensparender Umgang mit Werkstoffen in den Vordergrund. Die Substitution spanender Fertigungsprozesse durch umformende ist aktueller denn je. Auf Grund der ständig steigenden Energiekosten wird sich dieses Verhältnis weiter zugunsten des Umformens bzw. des Trennens entwickeln, so dass Verfahren wie das Scherschneiden zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die heutige Fertigung muss möglichst optimal gestaltet werden, was nur durch ständige Weiterentwicklungen möglich ist. Insbesondere in der Blechbearbeitung ist ein wachsender Trend hin zur Herstellung endkonturnaher Präzisionsteile bzw. nicht weiter nachzubearbeitender Gutteile, auch komplexerer Werkstückgeometrien, zu verzeichnen. Die Anwendung material-, energie- und arbeitszeitsparender Umformverfahren bringt erhebliche volkswirtschaftliche Effekte, wenn entsprechende Vorraussetzungen hinsichtlich Stückzahl, verfahrensgerechter Gestaltung und Tolerierung der Werkstücke erfüllt sind. In der Blech verarbeitenden Industrie spielen Trennverfahren eine wichtige Rolle, da jedes Bauteil während der Fertigung einem oder mehreren Zerteilprozessen ausgesetzt ist. Dieses Forschungsvorhaben befasst sich mit dem Hochgeschwindigkeitsscherschneiden (HGSS), einem Trennverfahren, bei dem ein frühzeitiges Scherversagen im Werkstoff hervorgerufen wird, um gratarme, ebene Trennflächen zu erzeugen. Diese Technologie, die in der Industrie vor allem zum Trennen von Stangenmaterial Anwendung findet, erfährt gegenwärtig einen Bedeutungszuwachs im Blechbereich. Gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse tragen zum besseren Verständnis dieses Verfahrens bei, um dieses künftig gezielter einsetzen zu können. Darüber hinaus lassen sich funktionale Zusammenhänge zwischen den

Einflussparametern und dem Trennergebnis identifizieren. Dies ist Voraussetzung, um Werkzeuge und Einrichtungen zum adiabatischen Trennen zu konzipieren, die erforderlichen Prozessparameter im Vorfeld zu bestimmen und somit energie- als auch ressourceneffizient bereitzustellen.

1.1 Verfahrensprinzip HGSS

Das Fertigungsverfahren HGSS ist normativ nicht erfasst, kann aber der Gruppe der Trennverfahren und darunter der Untergruppe Scherschneiden zugeordnet werden. In der englischsprachigen Fachliteratur wird das HGSS als "high speed impact cutting" (HSIC) bezeichnet. Dieses Trennverfahren provoziert die Entstehung von Scherbändern (siehe Abb. 1), um ein frühzeitiges Scherversagen im Blechwerkstoff hervorzurufen und so qualitativ hochwertige, d.h. besonders gratarme, ebene Trennschnitte zu erzeugen.

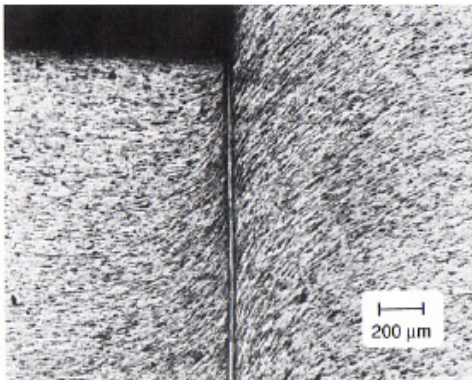

Abb. 1: Scherband in einer Stahlplatte

In der Fachliteratur existieren verschiedene Angaben über den Geschwindigkeitsbereich, in dem die Bewegung des Schneidstempels beim HGSS liegen sollte. Das Schrifttum formuliert den Beginn des Hochgeschwindigkeitsgebietes bei ca. 0,5 m/s Anschneidgeschwindigkeit. Im Bereich zwischen 0,5 m/s und 0,8 m/s wird vom Schneiden mit „erhöhter Anschneidgeschwindigkeit“ gesprochen und ab einer Geschwindigkeit von ca. 0,8 m/s wird das Hochgeschwindigkeitsgebiet erreicht. Adiabatisches Trennen ist ein Bruchmechanismus, der im Allgemeinen bei Werkstoffen zu beobachten ist, die hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Der adiabatische Effekt tritt ab einer Anschneidgeschwindigkeit von 3 m/s auf. Dieses Phänomen ist charakterisiert durch die Lokalisierung von plastischer Deformation in einem sehr engen Bereich, dem sogenannten Scherband. Abhängig vom zu trennenden Werkstoff sind diese Scherbänder sehr schmal, d. h. ca. 10 bis 100 µm, wobei ihre Abmessungen in der Scherebene im Zentimeterbereich liegen können.

Der Entstehungsmechanismus adiabatischer Scherbändern (adiabatic shear bands, ASB) wurde erstmals im Jahre 1944 von Zener und Hollomon entdeckt. Demnach wird bei metallischen Werkstoffen ein Großteil der während der plastischen Verformung eingebrachten Energie in Wärme umgewandelt. Bei sehr schnell ablaufenden Trennvorgängen ist der Wärmeübergang zwischen Schneidzone und umgebenden Werkstoff sehr gering. Daher wird dieser Vorgang als "adiabat" bezeichnet. Folglich steigt

die Temperatur lokal im Bereich des Scherbandes auf einige hundert Grad Celsius an und es kommt zu zwei gegenläufigen Prozessen. Einerseits tritt Verformungsverfestigung ein, andererseits kommt es zu einem temperaturbedingten Fertigkeitsverlust. Falls das summarische Werkstoffverhalten entfestigend ist, kommt es zur Scherbandbildung.

Mikroskopische Schnittflächenanalysen zeigen deutlich die Vorzüge dieser Trenntechnologie, d. h. eine gratfreie und nahezu rechtwinklige Trennfläche. Diese sind grundsätzlich verschieden zu konventionellen Schnittflächen, das heißt, die Trennfläche weist zwar überwiegend Bruchfläche auf, diese ist aber sehr feinkörnig und kann werkstoffabhängig vergleichbare Rauheitswerte wie genaugeschnittene Glattschnittflächen aufweisen. Aufgrund dieser Vorzüge lassen sich in Abhängigkeit von der vorgesehenen späteren Verwendung der Schnittteile häufig Nachbearbeitungsschritte einsparen. Die Ausbildung eines Scherbandes ist stark vom zu schneidenden Werkstoff abhängig. In reinen Metallen wie z. B. Aluminium oder Kupfer kann eine Scherbandbildung nur schwer herbeigeführt werden, Legierungselemente verstärken den Drang zur Scherlokalisierung. Ausschlaggebend für den Gefügezustand nach dem Schneidvorgang ist für viele Metalle die Härte. Mit zunehmender Werkstoffhärte steigt bei Stahlwerkstoffen die Neigung zum Scherversagen.

1.2 Potentiale und Handlungsbedarf HGSS

Die in den letzten Jahren verstärkt durchgeführten Untersuchungen zum HGSS haben den positiven Einfluss des Prozessparameters Geschwindigkeit auf die Erzielung optimaler Schnittflächenqualitäten bestätigt. Gerade für ebene Bauteile, die z.B. als Komponenten in Federpaketen, Schließsystemen oder Sitzverstellungen verbaut werden und in hohen Stückzahlen zu produzieren sind (siehe Abb. 2 und Abb. 3), bietet das HGSS wesentliche Vorteile gegenüber konventionellen Scher- und Genauschneidverfahren.

Abb. 2: Teilespektrum HGSS Quelle: ADIAPRESS®

Dazu zählen:

- Rissarme Scherflächen mit geringen Deformationen, einer gleichmäßigeren Härteverteilung und einer verkleinerten Verformungszone
- Nahezu gratfreie Schnittflächen an flächigen Bauteilen und Hohlprofilen
- Bessere Maß- und Formgenauigkeiten

- Geringere Stegbreiten und damit Reduzierung des Materialeinsatzes
- Reduzierung bzw. Eliminierung des Schmierstoffeinsatzes

Abb. 3: Schnittfläche beim Hochgeschwindigkeitsschneiden (Werkstoff 1.0335, s = 10 mm) Links: Draufsicht, Mitte: Seitenansicht, Rechts: Seitenansicht (REM, 200x)

Ein großer Teil dieses Bauteilspektrums im Blechdickenbereich von 3 bis 10 mm wird durch konventionelles Scherschneiden oder bei erhöhten Genauigkeitsanforderungen durch Feinschneiden hergestellt. Dies gilt auch für flächige Bauteile mit Blechdicken < 0,5 mm aus dem Bereich der Motorenfertigung oder der Elektroindustrie. Während zur Auslegung dieser Schneidprozesse analytische Methoden für die Ermittlung des Kraftbedarfes anwendbar sind und damit die notwendige Anlagenkonfiguration gezielt gewählt werden kann, stehen bei Anwendung des HGSS derartige Berechnungsvorschriften derzeit nicht zur Verfügung. Dies trifft ebenso auf die Definition der technologischen und werkzeugtechnischen Parameter zu, so dass Handlungsbedarf hinsichtlich der Schaffung einer Berechnungsgrundlage zur Ermittlung der benötigten Prozessparameter für das HGSS sowie zur Definition der Regeln zur Auslegung der Werkzeugaktivteile, insbesondere des Schneidspaltes, besteht. Aufgrund des hohen Potenzials der Hochgeschwindigkeitstrennprozesse in Bezug auf die hohe Teileausbringung und die erzielbare Schnittflächenqualität bei gleichzeitiger Eliminierung des Schmierstoffeinsatzes wird seitens der kmU zwangsläufig der direkte Vergleich zum Scherschneiden und zum Feinschneiden gesucht. Die nach VDI 2906 für die Charakteristik der Schnittfläche verwendeten Kenngrößen wie Einzugsrundung, Glattschnitt- und Bruchflächenhöhe lassen sich in dieser Form auf die sehr ebenen und nur gering plastisch verformten Bruchflächen geringer Rauheit der durch das HGSS erzielten Trennflächen nicht übertragen. Ein Hinderungsgrund für eine umfassende Erweiterung des Anwendungsgebietes adiabatischer Trennoperationen besteht derzeit jedoch in der begrenzten Verfügbarkeit von Richtlinien zur Prozessgestaltung. Daher besteht an dieser Stelle der Bedarf zu einer Modifizierung bzw. Neudefinition der Parameter zur Beschreibung der Schnittflächenqualität.

Im Gegensatz zum konventionellen Schneiden ist die anlagenseitige Auslegungsgröße nicht die erforderliche Schneidkraft, sondern die benötigte Energiemenge. Die nutzbare Energie E_{kin} der zur Verfügung stehenden Impulserzeugeranlagen ist von der Geschwindigkeit sowie von den bewegten Massen abhängig und muss die erforderliche Schneidarbeit verrichten. An dieser Stelle fehlen bisher jedoch exakte Berechnungsgrundlagen, die analog zu den vorhandenen Berechnungsmöglichkeiten für die Schneidkraft bei konventionellen Schneidoperationen, eine analytische Bestimmung der benötigten Energiemenge, unter Berücksichtigung des zu schneidenden Blechwerkstoffes sowie der Prozessparameter Schnittlinienlänge und Blechdicke, beim HGSS gestatten. Dass bei Erhöhung der Schergeschwindigkeit eine Reduzierung der zu leistenden Schneidarbeit erreicht wird,

wurde in Vorversuchen bereits aufgezeigt.

Als Basis für die Schaffung von Berechnungsgrundlagen müssen die Prozessgrößen genau und zuverlässig gemessen werden. Dafür sind Randbedingungen einzuhalten, welche hohe Anforderungen an Konzeption, Integrierbarkeit in HGSS Anlagentechnik, Auslegung und Fertigung stellen. Die bisherigen Erfahrungen beziehen sich ausschließlich auf Schneidgeschwindigkeiten im Bereich von unter 300 mm/s. Die damit einhergehenden Beschleunigungen bewegen sich auf niedrigem Niveau. Das System zur Prozesskraftmessung in Werkzeugen ist daher gut beherrschbar. Im Gegensatz dazu stellen beim HGSS hohen Schneidgeschwindigkeiten mit bis 15 m/s, die kurzen Verfahrwege der Aktivelemente und die daraus resultierenden extremen Beschleunigungen, hohe Ansprüche an Kraft- und Wegmesssysteme.

Mit der experimentellen Ermittlung von den relevanten Kraft-Weg- bzw. Kraft-Zeit-Verläufen soll deshalb im geplanten Vorhaben die Basis für einen analytischen Ansatz zur Bestimmung der Schneidenergie geschaffen werden. Parallel erfolgt ein Abgleich mit der durch die FE-Simulation vorher bestimmten, erforderlichen Schneidarbeit.

2. Zielstellung

Im Zuge des Projektes „ Kalkulation HGSS“ wird mit dem konventionellen Scher- und Feinschneidprozess als Referenzverfahren eine Berechnungsvorschrift geschaffen, mit deren Hilfe es in Zukunft möglich sein wird, die erforderliche Mindestschneidenergie bei Anwendung hoher Schneidgeschwindigkeiten im Vorfeld zu berechnen. Durch die neu geschaffenen Kalkulationsgrundlagen werden herkömmliche „Faustformeln“ abgelöst und es werden analytische Ansätze zur Berechnung der tatsächlich Energiemenge, welche notwendig ist, um einen Trennvorgang in Abhängigkeit von:

- Schnittlinienlänge,
- Zu schneidenden Werkstoff,
- Blechdicke und
- Schneidgeschwindigkeit

zu realisieren, geschaffen. Quantitative Aussagen zum Potenzial einer Reduzierung von Schneidkraft und -arbeit durch den Einsatz hoher Geschwindigkeiten werden getroffen. Des Weiteren werden Richtlinien zur Auslegung von HGSS-Schneidwerkzeugen sowie Schneidspaltoptimierung festgelegt. Hochgeschwindigkeitsschneidprozesse werden mit Hilfe der FE-Simulation abgebildet. Zur Verbesserungen der Simulationsergebnisse erfolgt in einem iterativen Prozess ein Abgleich mit den durchgeführten Realversuchen. Auf Fragen nach der Anwendbarkeit herkömmlicher Kraftberechnungsformeln bzw. des Geltungsbereiches von Normen für die Bestimmung der Schnittflächenparameter und deren Übertragbarkeit auf das HGSS werden Antworten gegeben und schließlich modifizierte Kriterien zur Beschreibung der Schnittfläche der durch HGSS hergestellten Bauteile geschaffen.

Die genaue Kenntnis der für das Schneiden mit hohen Geschwindigkeiten tatsächlich benötigten Energiemenge dient sowohl der Schonung der Schneidwerkzeuge als auch der Anlagentechnik, da die überschüssige Energie letztlich im System abgefangen werden muss.

3. Vorgehensweise

Zum Erreichen des Forschungszieles wurde zunächst eine einheitliche Basis in Bezug auf die zu schneidenden Geometrien sowie die zu realisierenden Schneidspalte als Voraussetzungen für den Vergleich der Schneidverfahren geschaffen. Abb. 4 zeigt die für die Versuchsdurchführung zur Verfügung stehende Anlagentechnik. Neben drei Pressen für den Normalgeschwindigkeitsbereich kommen zwei Hochgeschwindigkeitsanlagen für die Hochgeschwindigkeitsschneidversuche zu Einsatz. Des Weiteren wird ergänzend ein Fallturm zur Verifizierung der Versuchsergebnisse genutzt. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Versuchsdurchführung HGSS.

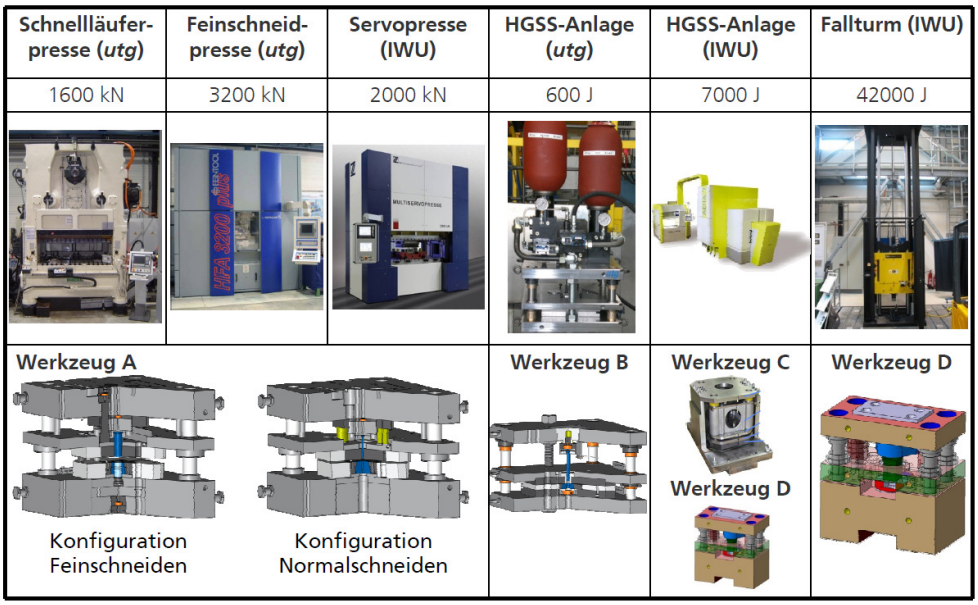

Abb. 4: Anlagentechnik zur Versuchsdurchführung

Weiterhin wurden einheitliche Aktivteilgeometrien mit dem Durchmesser 6, 15 und 30 mm definiert und somit die Vergleichbarkeit der verschiedenen Verfahren sichergestellt. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen kommen folgende Versuchswerkstoffe zum Einsatz:

- 16MnCr5 2, 3 und 5,0 mm
- 16MnCr5+A 5,0 mm
- AlMg3Mn 3,5 und 6,0 mm
- S500MC 2, 3 und 5,0 mm

Die Ermittlung der Werkstoffparameter im Standardzugversuch für die 4 Blechwerkstoffe dauert zurzeit noch an.

3.1 Anlagentechnik HGSS

3.1.1 HGSS Anlage utg-München

Die Anlage zum HGSS des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der TU-München besteht im Wesentlichen aus einem hydraulischen Beschleunigungsaggregat und einem auf Basis eines 4-Säulen-Gestells gebauten Werkzeugs (siehe Abb. 5). Das Werkzeug und die Beschleunigungseinrichtung sind gekoppelt und werden ohne eine Presse betrieben.

Abb. 5: HGSS Anlagentechnik utg München - Aufbau

Der Schneidstempel wird nur über den Blasenspeicher beschleunigt und befindet sich vor den Trennvorgang über dem zu schneidenden Blech. Die maximal zur Verfügung stehende Energie beträgt etwa 600 J, der Geschwindigkeitsbereich erstreckt sich von 5 m/s bis ca. 15 m/s. Die in der Literatur beschriebenen Effekte des HGSS hinsichtlich der Bauteilqualität konnten mit dieser Anlagentechnik bereits bestätigt werden.

3.1.2 HGSS Anlage Fraunhofer IWU

Die französische Firma Adiapress® (Group Meyer France) mit Sitz in Saint-Etienne, entwickelte die erste Maschine zum HGSS von flachen Blechbauteilen und liefert damit die erforderliche Anlagentechnik zur Realisierung der hohen Geschwindigkeiten. Am Fraunhofer IWU steht eine 7 kJ-Anlage dieser Firma, ADIA7® (siehe Abb. 6) zur Verfügung. Die Hochgeschwindigkeitshydraulik dieser Anlage erlaubt Stempelgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s und 120 Hub/min. Derzeit lassen sich mit der Anlage beliebige zweidimensionale Konturen mit Blechdicken bis zu 10 mm ausschneiden.

Abb. 6: HGSS Anlagentechnik Fraunhofer IWU

Die eigentliche Presse ist als Zweiständer-Portalbauweise ausgeführt, in der Mitte befindet sich die Werkzeugaufnahme mit der Werkzeugklemmung und im oberen Teil zwei Druckbehälter. Über die Energiebrücke wird von einem externen Hydraulikaggregat Hydrauliköl in die beiden Druckbehälter geleitet, welche jeweils mittig durch eine Membran in zwei Kammern geteilt sind. Im unteren Teil befindet sich Hydrauliköl, wobei der obere Teil der Druckbehälter mit Stickstoff druckbeaufschlagt wird. Dadurch baut sich ein definierter Öldruck auf. Nach dem Öffnen des Ventils schnellt der Pusher auf einen Bolzen, dieser wiederum beaufschlagt das eigentliche Werkzeug samt Schneidstempel mit einem Impuls. Das eingebrachte Energievermögen wird über den Weg, den der Schlagstempel zurücklegen muss, eingestellt. Je länger dieser Weg ist, umso größer ist die Energie und umso höher auch die erzielte Schnittgeschwindigkeit. Aufgrund der prozessbedingten Lärmentwicklung ist die Kapselung der Hochgeschwindigkeitsanlage in einer Geräuschbox erforderlich. Das Schneidwerkzeug besitzt eine Vier-Säulenführung. Der Schneidstempel ist zwischen Stempeldruck und –führungsplatte über Zuganker verspannt. Eine Besonderheit stellt die Position des Schneidstempels dar. Dieser liegt vor dem Schneidvorgang auf dem Blechstreifen auf.

3.2 Erfassung der Verfahrensparameter

Schwerpunkt des vorliegenden Projektes ist die Auswahl geeigneter Messtechnik zur Erfassung aller Prozesskenngrößen sowie deren Integration in die vorhandene Anlagentechnik. Relevante Prozessparameter sind:

- Weg
- Geschwindigkeit (Aktivteil)
- Schneidkraft
- Temperatur (in der Schneidzone)

Neben dem Schneidstempelweg ist die Kenntnis über die Schneidkraft grundlegend für die Entwicklung kalkulatorischer Kenngrößen zur Schneidenergieberechnung bei Anwendung hoher Schneidgeschwindigkeiten.

Um die Kosten des Forschungsvorhabens im Rahmen zu halten, wurde ein vorhandenes Feinschneidwerkzeug (siehe Werkzeug A; Abb. 4) dahingehend modifiziert, dass es sowohl in der Konfiguration Feinschneiden sowie Scherschneiden auf der Anlagentechnik der Normalschneidgeschwindigkeiten eingesetzt werden kann. Zur Erhöhung der Flexibilität hinsichtlich des Schneidspaltes, wurde ein spezieller Matrizeneinsatz konstruiert und gefertigt. Je nach Konfiguration wird das Werkzeug mit bis zu 6 Piezo-Kraftmessdosen versehen um sämtliche am Schneidprozess beteiligte Kräfte (Schneid-, Niederhalter- und Gegenhalterkraft) erfassen zu können.

Zur Ermittlung der Prozessparameter Weg und Geschwindigkeit wurden mehrere Messkonzepte erarbeitet. Hierbei zeigte sich, dass zur Ermittlung der Schneidstempelgeschwindigkeit der Einsatz von Beschleunigungssensoren, je nach Anlagentechnik, nur im Leerschuss sinnvoll ist. Sobald eine zu trennende Blechprobe eingelegt ist, liefert der Beschleunigungssensor beim Auftreffen des Schneidstempels auf das zu schneidende Blech Signalschwinungen und ein deutliches Signaloffset. Die Integration der Beschleunigungs-Zeit-Kurve zur Ermittlung von Geschwindigkeit bzw. Weg liefert hierbei keine brauchbaren Ergebnisse. Weiterführende Versuche mit Beschleunigungssensoren zeigten, dass diese teilweise einem Energieniveau von über 3.000 J mechanisch nicht gewachsen sind. Gebrochene Gehäuse sowie zerstörte Kontaktierungen traten auf. Aus diesem Grund wurde ein alternatives Geschwindigkeits-Messkonzept mit Hilfe eines Wirbelstromsensors erarbeitet und umgesetzt. Drei um 120° versetzte Wirbelstromsensoren messen indirekt den Schneidstempelweg über die Steigung eines konischen Messtargets, welches an der Kolbenstange befestigt ist (siehe Abb. 7). Daraus kann anschließend die Geschwindigkeit berechnet werden.

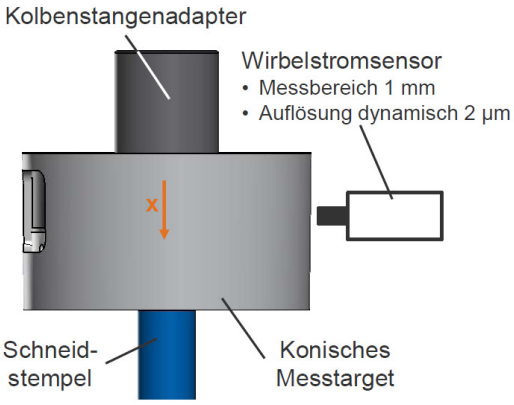

Abb. 7: Wirbelstromsensor zur Wegmessung

Eine dritte Möglichkeit der Geschwindigkeitsmessung stellt die Hochgeschwindigkeitskamera dar. Dazu wird das Objektiv dieser Kamera auf einen im Vorfeld ausgewählten Punkt (Bauteilkante oder aufgeklebtes Messobjekt) des sich schnell bewegenden Körpers ausgerichtet. Pro Sekunde können bis zu 100.000 Bilder aufgenommen. Über den zurückgelegten Weg, in Abhängigkeit der verstrichenen Zeit, wird anschließend die Geschwindigkeit des untersuchten Körpers berechnet. Der Vergleich der drei Messverfahren zeigte im Zuge von Voruntersuchungen sehr gute Übereinstimmungen

und Reproduzierbarkeit.

Als Grundlage für die Durchführung von temperierten Zugversuchen wurde ein Versuchswerkzeug mit offener Schnittlinie konstruiert und gefertigt. Dieses Werkzeug ermöglicht einen direkten Blick in die Schneidzone. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsthermokamera kann die Temperatur in der Umformzone bei Anwendung hoher Schneidgeschwindigkeiten, in Abhängigkeit von Werkstoff, Blechdicke, Geschwindigkeit und Schneidspalt ermittelt werden. Diese Erkenntnisse sind grundlegend für die FE-Simulation von Hochgeschwindigkeitsschneidprozessen. Selbiges Versuchwerkzeug kann sowohl in der HGSS-Anlage „ADIA7®“ als auch im Fallturm eingesetzt werden und ist weiterhin mit einer Quarzmessunterlagscheibe zur gleichzeitigen Messung der Schneidkraft ausgestattet. Durch Wechsel der Aktivelemente kann neben einer offenen auch eine geschlossene Schnittlinie realisiert werden. Parallel hierzu wurden die Prozessparameter Schneidkraft und Schneidstempelgeschwindigkeit, unter Verwendung verschiedener Messkonzepte, in Vorversuchen ermittelt. Problematisch ist auch hier die Standfestigkeit der Messmittel. Insbesondere die Anschlüsse der Quarzmessunterlagscheiben müssen, zur Vermeidung eines Bruches, armiert werden.

4. Erste Ergebnisse der Untersuchungen

Den Kernpunkt dieser Arbeit bildet, insbesondere beim HGSS, die Entwicklung und Umsetzung eines Messkonzeptes zur Ermittlung der tatsächlichen Prozessparameter. Dies umfasst sowohl die Auswahl eines geeigneten Messsystems als auch dessen Integration in die maschinenspezifischen Gegebenheiten. Als ersten Schritt wurden die realen Schneidgeschwindigkeiten, bzw. Anschneidgeschwindigkeiten der einzelnen HGSS Versuchsanlagen ermittelt. Ergebnisse zur Schneidkraftmessung stehen zurzeit noch aus. Im Abschnitt 4 wird die Umsetzung des Messkonzeptes zur Geschwindigkeitsmessung am Beispiel der HGSS Anlage ADIA7® beschrieben. Abb. 8 zeigt die Schnittdarstellung eines Werkzeuges der ADIA7® und zeigt gleichzeitig die Herausforderungen, welche die Integration der zur Geschwindigkeitsmessung erforderlichen Messtechnik.

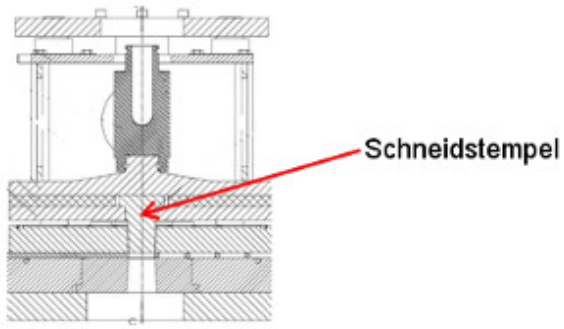

Abb. 8: Schnittdarstellung Werkzeug der ADIA7®

Es ist nicht eindeutig festzustellen, welche Teile in Kombination miteinander einen elastischen oder einen unelastischen Stoß vollziehen. Deshalb ist es wahrscheinlich, dass am Stoß beteiligte Werkzeugelemente eine andere Geschwindigkeit besitzen, als der eigentliche Schneidstempel. Daraus resultiert die Notwendigkeit, die Messmittelintegration

so zu gestalten, dass sich der messtechnische Aufnehmer direkt im bzw. am Schneidstempel befindet. Nur so ist die Ermittlung der wahren Geschwindigkeit des Aktivelementes möglich. Gemäß den getroffenen Festlegungen wurden neue Aktivelemente, d. h. Schneidmatrize sowie Schneidstempel mit zentrischer Gewindebohrung für den Beschleunigungssensor konstruiert und gefertigt. Abb. 9 zeigt das CAD – Modell dieses Stempels sowie die Schnittdarstellung mit dem zentrisch eingeschraubten Messelement (siehe Abb. 9 rechts).

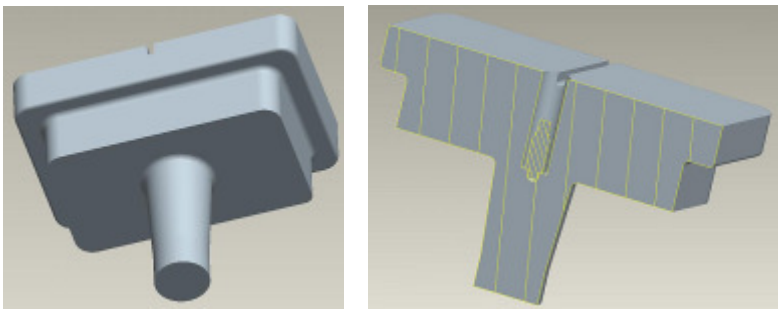

Abb. 9: CAD-Modell des Lochstempels mit Beschleunigungsaufnehmer

Es kamen Beschleunigungssensoren mit einem Messbereich von ±100.000 g der Firma Kistler Instrumente GmbH sowie die zur messtechnischen Erfassung notwendige Soft- und Hardware zum Einsatz.

Die mittels Beschleunigungssensor aufgenommenen Daten wurden mit Hilfe des grafischen Auswertungsprogramms Famos 3.2 der Fa. ADDITIVE GmbH analysiert und visualisiert. Dabei wurden alle aufgenommenen Beschleunigungs-Zeit-Diagramme mit einem Tiefpassfilter 8. Ordnung in verschiedene Frequenzbereiche gefiltert. Als geeignetste Tiefpassfilterfrequenz stellte sich 2.000 Hz heraus. So konnten die Bereiche höherer Frequenzen ausgeblendet und somit die Kurve geglättet dargestellt werden. Durch einen ständigen Vergleich mit der Ursprungskurve konnte gewährleistet werden, dass die für die Versuchsauswertung wichtigen Kurventeile nicht herausgefiltert wurden.

In Abb. 10 ist stellvertretend der Verlauf der Beschleunigung über der Zeit während eines HGSS Schneidvorganges dargestellt. Im Zuge der Versuchdurchführung weiterhin aufgenommene Kurvenverläufe selber Versuchsvariante (Aluminium 3.3345 / EN AW-5082, s = 8 mm bei 2,0 kJ) zeigten einen nahezu identischen Verlauf, was für die Reproduzierbarkeit der Messung spricht. Die Ordinatenachse beschreibt die Beschleunigung in der Einheit m/s², sowohl in positiver als auch in negativer Richtung, und die Abszissenachse die Zeit in Sekunden. Das negative Vorzeichen bei den aufgezeichneten Beschleunigungen findet seine Ursache in der Einbaulage des Sensors. Dieser erfasst sowohl positive, als auch negative Beschleunigungen.

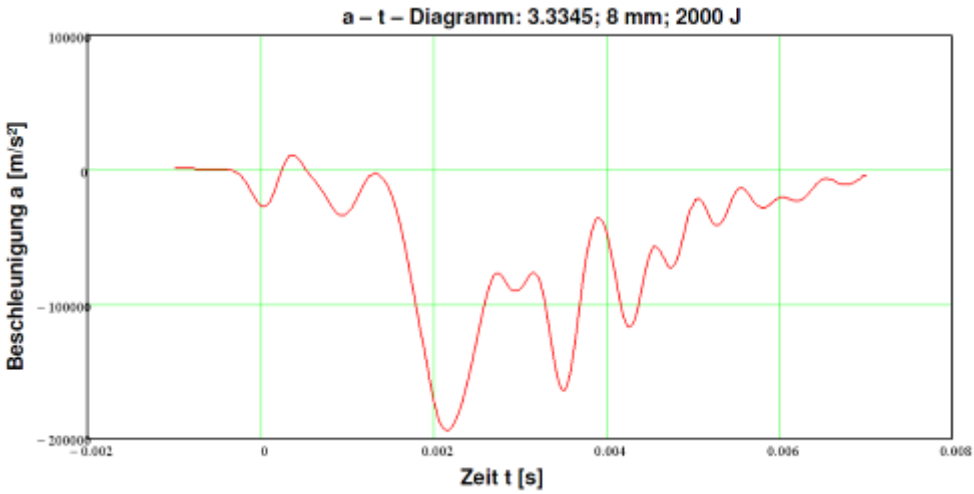

Abb. 10: Beschleunigungs-Zeit-Diagramm - Aluminium 3.3345 / EN AW-5082, s = 8 mm bei 2,0 kJ

Mit Hilfe der Lösungsmethode der numerischen Integration wurden anschließend die Schneidstempelgeschwindigkeiten berechnet. Hierbei handelt es sich um ein mathematisches Näherungsverfahren, welches das Lösen von komplizierten Integralen erlaubt und Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit liefert.

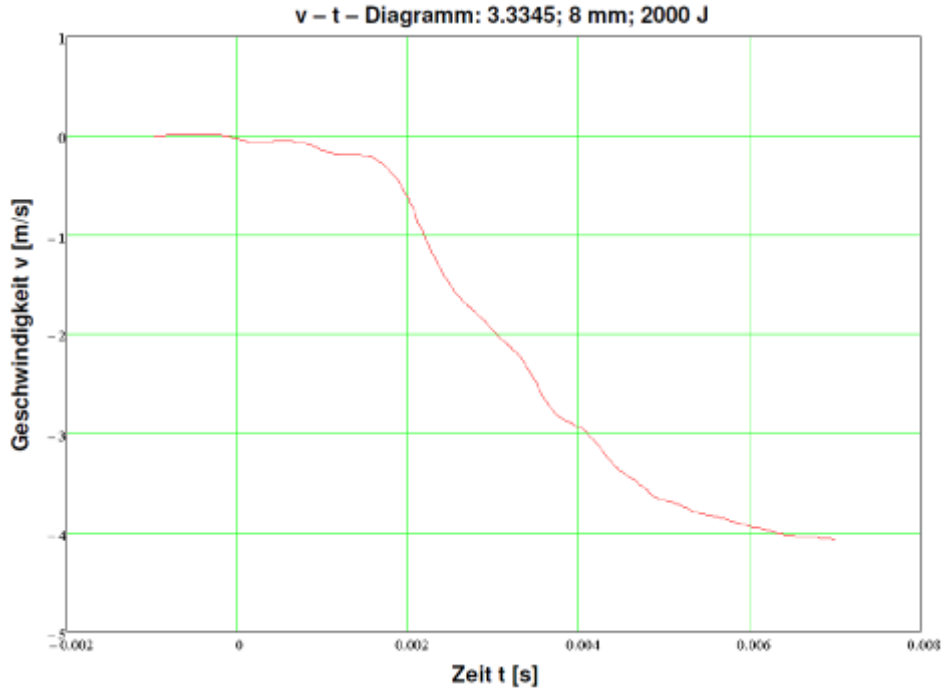

Abb. 11: Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm - Aluminium 3.3345 / EN AW-5082, s = 8 mm bei 2,0 kJ

Abb. 11 zeigt den Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf nach Integration des Beschleunigungs-Zeit-Graphens. Diese Vorgehensweise erfolgte für alle maschinenseitig einzustellenden Energien und lieferte folgende Ergebnisse der mit der ADIA7® zu realisierenden Energien: Beginnend mit der Minimalenergie 1.700 J → 4,1 m/s einen nahezu linearen Anstieg der Schneidstempelgeschwindigkeit bis zu 10 m/s bei Maximalenergie 7.000 J (siehe Abb. 12).

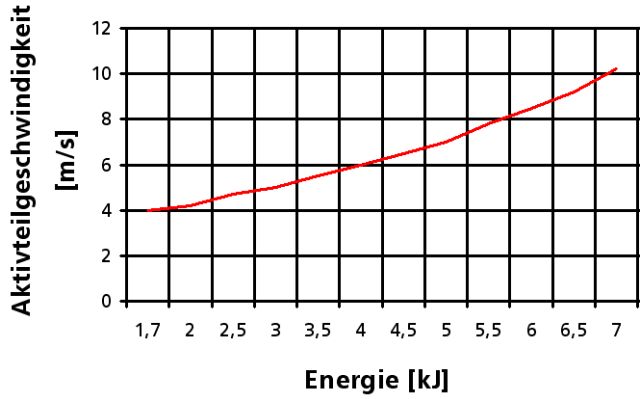

Abb. 12: Aktivteilgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Energie

Diese Ergebnisse gleichen sich mit den Herstellerangaben und wurden weiterhin mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera des Typs „Photron Fastcam SA 1.1“ erfolgreich verifiziert (siehe Abb. 13).

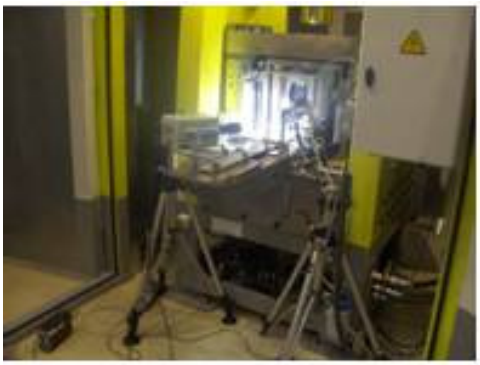

Abb. 13: Versuchsstand Hochgeschwindigkeitskamera Photron Fastcam SA 1.1

Voruntersuchungen zur Bestimmung der wahren Anschnitt- bzw. Schneidstempelgeschwindigkeit wurden in ähnlicher Form an allen im Zuge der Versuchsdurchführung genutzten Hochgeschwindigkeitsschneidanlagen durchgeführt. Des Weiteren wurden von jeder Versuchseinrichtung die sich bewegenden und somit beschleunigten Massen bestimmt. Eine weitere Integration der Geschwindigkeits-Zeit-Kurve liefert jeweils den zurückgelegten Schneidstempelweg.

5. Ausblick

Sämtliche Versuchswerkzeuge sind mit der entsprechenden Messtechnik ausgestattet. Die weiterführende Projektbearbeitung sieht als nächstes die Ermittlung der mechanischen und temperaturabhängigen Werkstoffparameter als Basis für die HGSS FE-Simulation vor. Voraussetzung dafür ist die Bestimmung der Temperatur in der Schneidzone. Dies wird derzeit mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitsthermokamera durchgeführt. Parallel laufen die Versuche zum Verlauf der Schneidkraft in Abhängigkeit von:

- Schnittlinienlänge (offene sowie geschlossene Schnittlinie)
- Schneidgeschwindigkeit
- Werkstoff sowie Blechdicke
- Blechdicke
- Schneidspalt

Während der experimentellen Untersuchungen erfolg stets der Abgleich von Realversuchen mit der FE-Simulation sowie der erzielten Bauteil- bzw. Schnittflächenqualität. Beabsichtigt ist es, mit den generierten Ergebnissen Grundlagen zur Berechnung der minimal notwendigen Schneidenergie zu schaffen. Weiterhin ist eine Neudefinition der Parameter zur Beschreibung der mittels HGSS erzeugten Schnittflächenqualität angestrebt.