

Moderne Werkzeuggestaltung zur Bauteilgradierung unter Einbindung von Simulationsmodellen, effizienten Werkzeugkühlkonzepten und Werkzeugbeschichtungssystemen

Schieck, F.; Hochmuth, C.; Polster, S.; Mosel, A.

Abstract

Der vorliegende Beitrag beschreibt die aktuellen Untersuchungen zur optimierten Werkzeugauslegung für das Presshärteverfahren, insbesondere zur Erhöhung der Prozesssicherheit bei der Herstellung von Bauteilen mit gradierten Festigkeitseigenschaften. Die derzeitigen und zukünftigen Ansprüche, welche hierbei an moderne Presshärtewerkzeuge und deren simulative Abbildung gestellt werden, unterscheiden sich erheblich von Werkzeugen für die konventionelle Blechumformung. Speziell das Bestreben, Bauteile mit lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften herzustellen (Tailored Tempering), erfordert ein optimiertes Zusammenspiel zwischen mechanischen und thermischen Werkzeugeigenschaften, insbesondere von Werkzeugwerkstoffen, Beschichtungen, tribologischen Verhältnissen und entsprechend abgestimmten Kühlkonzepten in wesentlicher Abhängigkeit zur Temperatur. Im Folgenden sollen unterschiedliche Lösungsansätze aufgezeigt und diskutiert werden. Für die Bewertung und die ganzheitliche Betrachtung des Systems Presshärtewerkzeug spielen die thermomechanische und die thermofluide Simulation eine entscheidende Rolle. Der Beitrag zeigt hierfür bestehende Möglichkeiten der gekoppelten thermofluiden Simulation auf.

1 Einleitung

Die ersten vier pressgehärteten Serienteile des VW-Golf (B-Säulen und Seitenteile innen vorn) wurden 2003 produziert und im Juli 2004 wurde die

Presshärte-technologie in Deutschland erstmalig durch den Volkswagen Konzern in die konzerneigene Serienproduktion überführt [1]. Das Presshärten von Blechen hat sich seitdem bei Automobilherstellern im serientechnischen Maßstab bewährt und stellt heute eine wesentliche Technologie für crashrelevante Bauteile von Volumenmodellen dar. Maßgeblich für diese Entwicklung sind signifikante Festigkeitseigenschaften der mit diesem Verfahren hergestellten Bauteile. In den letzten Jahren wurde diese Technologie durch Optimierung der einzelnen Prozessschritte sukzessive weiterentwickelt. In diesem Zusammenhang wurde das Bauteilspektrum erweitert und die Bauteileigenschaften optimiert. So waren zu kleine Bruchdehnungen von durchgehärteten Bauteilen und damit ein geringes Energieabsorptionsvermögen von Crashstrukturen der Auslöser für die Entwicklung von Bauteilen mit lokal unterschiedlichen Festigkeitseigenschaften. Es galt nun gerade beim Seitenaufprall, der den Lastfall mit der höchsten Unfall- und Verletzungshäufigkeit darstellt, einen Kompromiss zwischen geringer Verformung und einer ausreichenden Energieabsorption zu finden, um für die Fahrzeuginsassen einen bestmöglichen Schutz zu gewährleisten [2].

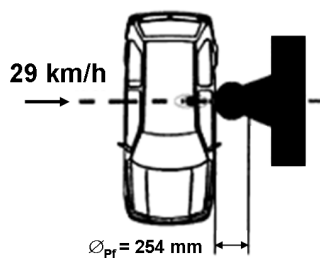


Bild 1: Pfahltest nach EuroNCAP [4]

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, kommen zum einen Tailored Blanks zum Einsatz, welche als Tailored Welded oder Rolled Blanks bereitgestellt werden können. Beide Verfahren haben den Nachteil, dass das Halbzeug vor dem Umformprozess einer zusätzlichen und aufwendigen Bearbeitung unterzogen werden muss. Eine Alternative dazu bietet das Tailored Tempering (Zonenhärten), mit welchem das Einstellen gradiertter Eigenschaften im Bauteil mittels einer der Umformung vor- oder nachgelagerten lokal definierten Wärmebehandlung bezeichnet wird. Während des Erwärmens bzw. zwischen der Erwärmung und der Umformung finden das partielle Aufheizen und Zwischentemperieren als Prozessvarianten des Zonenhärtens statt. Beim anschließenden Härtevorgang im Werkzeug wird in den kühleren Platinenbereichen die kritische Abkühlrate zur Bildung von Martensit nicht mehr erreicht und das fertige Bauteil weist in diesen

Bereichen eine höhere Duktilität aber auch geringere Festigkeit auf. Eine alternative Vorgehensweise des Tailored Tempering ist das Nutzen intelligenter Prozess- und Werkzeugstrategien zur Realisierung lokal unterschiedlich erzwungener Abkühlraten, um im Bauteil gradierte Eigenschaften zu erzielen. Diese Prozessvariante stellt sich momentan als besonders geeignet dar, weil keine zusätzliche Erwärmungsstrecke erforderlich ist und die geometrische Genauigkeit der Eigenschaftsbereiche im Vergleich zu oben genannten Strategien deutlich größer ist. Vor allem aufgrund der am Werkzeug zur Verfügung stehenden Parameter wie Werkstoff, Kühlsystem und Beheizung wird eine hohe Flexibilität des Tailored Tempering Prozesses erreicht (vgl. [3+5]). Die mit dem Einstellen gradierter Bauteileigenschaften ermöglichte Anwendung lokaler Hartbeschneidoperationen oder Fügeoperationen stellt einen großen Schritt in Richtung Energieeffizienz beim Presshärteprozess dar, da zusätzliche Anlagen und zeitaufwendige Prozessschritte eliminiert werden könnten. Aus den genannten Gründen steht das Einstellen von gradierten Bauteileigenschaften im Fokus der Betrachtungen innerhalb des eniPROD-Projektes. Die thermofluide FE-Simulation, als ein bewährtes Instrument, soll im ersten Schritt das Optimierungspotenzial von Kühlsystemen, anhand eines entwickelten Presshärtewerkzeugs aufzeigen und anschließend auch Aufschluss über die Einstellmöglichkeiten spezifischer Bauteileigenschaften mittels Werkzeugkühlung geben. Um mit der Modellbildung eine hohe Realitätsnähe zu ermöglichen, sind experimentell ermittelte Kenngrößen unabdingbar. Dazu werden nähere Ausführungen, speziell zur Ermittlung des Kontaktwärmübergangskoeffizienten, in Kapitel 3 gemacht. Weiteres Potenzial zur Energieeffizienz, welche zurzeit für viele Hersteller im Zuge der stetigen Erhöhung der Energiepreise und der zurückgehenden Ressourcen von hoher Relevanz ist, stellt die Optimierung der Tribologie dar. Die Lösung des in der Praxis häufig auftretenden Problems von Anhaftungen der AlSi-Blechbeschichtung auf der Werkzeugoberfläche spielt dabei die wohl größte Rolle. Ein Ziel der tribologischen Untersuchungen ist das Erreichen einer Standzeitverlängerung der Werkzeuge, um Wartungsintervalle zu vergrößern und damit regelmäßige Produktionsstopps zu vermeiden.

2 Werkzeugtribologie

2.1 Grundlagen

Die Tribologie umfasst die Teilgebiete Reibung, Verschleiß und Schmierung, die aus der Zusammenwirkung der vier Bestandteile eines Tribosystems (Bild 2), nämlich Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsbedingungen, resultieren [6]. Zu den Eingangsgrößen eines tribologischen Systems, welche das Beanspruchungskollektiv bilden, gehören [6]:

- Bewegungsart (Gleiten, Rollen, Wälzen, Bohren)
- Bewegungsablauf (kontinuierlich, intermittierend, oszillierend, reversierend)
- Normalkraft F_N
- Geschwindigkeit v
- Temperatur T
- Beanspruchungsdauer t_B

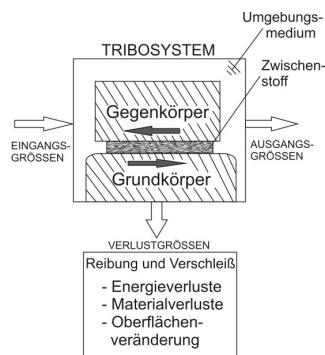


Bild 2: Aufbau eines tribologischen Systems [7]

2.1.1 Reibung

Als unerwünschte Folgen der Reibung treten Materialabtrag, lose Verschleißteilchen, Wärmeentwicklung, Schwingungen oder Geräusche auf [7].

Man unterscheidet allgemein zwischen den Reibungszuständen: Festkörperreibung, Grenzreibung, Mischreibung, Flüssigkeitsreibung und Gasreibung. Für die Blechwarmumformung ist lediglich die Grenzreibung von

Bedeutung, da Festkörperreibung nur auftritt, wenn metallisch reine Kontaktflächen ohne Schmierung einer tribologischen Belastung (durch Kontakt und Relativbewegung charakterisiert) ausgesetzt sind. Anhand der Kinematik, d. h. nach der Art der Relativbewegung der Kontaktpartner, wird Reibung in die Arten Gleit-, Roll- und Bohrreibung unterteilt. Die Gleitreibung ist die für das Presshärten dominierende Reibungsart, und ebenso diejenige, die mit den größten Beanspruchungen verbunden ist.

2.1.2 Verschleiß

Als Verschleiß wird nach DIN 50320 der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers bezeichnet. Als Verschleißmechanismen, in welche auftretende Verschleißvorgänge eingeteilt werden, sind zu nennen: Abrasion, Adhäsion, Oberflächenzerrüttung und tribochemische Reaktionen. Diese Mechanismen können lokal und temporär einzeln, nacheinander oder gleichzeitig auftreten. [8]

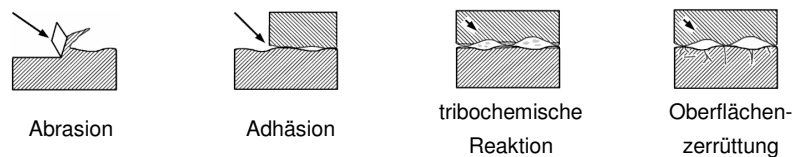


Bild 3: Grundeinteilung der Verschleißmechanismen [9]

Die entscheidenden Verschleißmechanismen beim Presshärten sind zum einen Ermüdungserscheinungen durch thermische Wechselbeanspruchungen, die sich in Ausplatzungen und Rissbildung äußern können. Bei Adhäsionserscheinungen ist zu beobachten, dass sie mit steigenden Prozesstemperaturen zunehmen. Abrasion, durch Verschleißpartikel der Werkstückbeschichtung ausgelöst, kann sowohl vermehrt auftreten, als auch – aufgrund kleinerer Umformkräfte – abnehmen. Des Weiteren bewirken die hohen Temperaturen Gefügeumwandlungen und Diffusionsvorgänge in Werkzeugwerkstoff und Beschichtung. Auswaschungen, die ein Zeichen für die Herabsetzung des Verschleißwiderstands sind, sind Anzeichen einer derartigen lokalen Werkstoffbeeinflussung. [10]

Reibung und Verschleiß aufgrund mechanischer Beanspruchungen beschränken sich auf die Oberfläche von Festkörpern. Eine Abhilfe bieten hier Verfahren der Oberflächentechnik zur Herstellung geeigneter Oberflächenschichten. Im Verlauf des Projektes werden zunächst PVD-Beschichtungen (PVD = „Physical Vapour

Deposition“) näher betrachtet, da diese Technologie in den vergangenen Jahren enorme Fortschritte und Leistungssteigerungen auf Umformwerkzeugen erbracht hat. Beim Schmieden von Stahl wurden beispielsweise dreifache Standzeiten mit durch das PVD-Verfahren abgeschiedenen Schichten erzielt mit zusätzlicher Verbesserung der Bauteilqualität [11]. Vorteil gegenüber der CVD-Technologie (CVD = „Chemical Vapour Deposition“) ist vor allem die deutlich geringere Prozesstemperatur, wodurch eine Nachhärtung der Werkzeuge entfallen kann und somit die Prozesskette der Werkzeugfertigung insgesamt vereinfacht wird.

2.1.3 Beschichtung

Aus den unter 2.1.2 genannten dominierenden Verschleißmechanismen und den Prozessparametern ergeben sich für das Werkstoffsystem Substrat-Beschichtung des Presshärtewerkzeugs folgende Anforderungen:

- Standhalten der durch Kühlung und Vergütung auftretenden thermischen Belastungen
- niedrige Reibungskoeffizienten
- geringer Verschleiß
- reduzierte Adhäsionsneigung zum Blech
- hohe thermochemische Stabilität
- geringer Fertigungsaufwand

Durch eine geeignete Wahl des PVD-Verfahrens, der chemischen Zusammensetzung der Beschichtung und des Schichtdesigns bzw. Schichtaufbaus können Werkzeugoberflächen auf ihren konkreten Anwendungsfall angepasst werden. Exemplarisch sei hier kurz auf zuletzt genannte Möglichkeit, den gezielten Schichtaufbau, eingegangen, durch welchen sich z. B. Schichteigenschaften wie gute Haftfestigkeit, hohe Stützwirkung, hohe Duktilität und reaktionsarme Oberflächen miteinander kombinieren lassen. Bild 4 zeigt einige Aufbauvarianten von Beschichtungen.

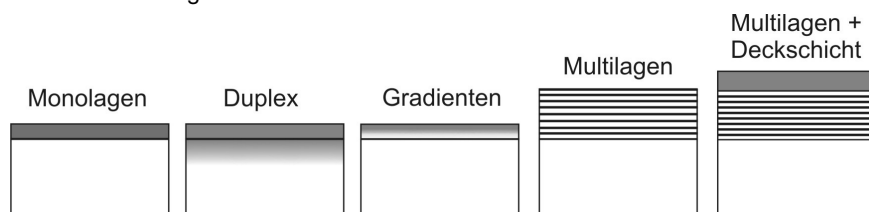


Bild 4: Unterschiedliche Schichtaufbauten von PVD-Beschichtungen [12]

Für die Warmumformung haben sich bisher TiAlN-, borbasierte und CrN-Schichten etabliert. Sie eignen sich alle für den Einsatz bei Temperaturen von über 700 °C, z. T. sogar bis zu Temperaturen von 1200 °C (z. B. γ -Al₂O₃, t-ZrO₂), wie sie beim Schmieden von Stahl üblich sind. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften dieser Beschichtungen. TiAlN als konventionelle Hartstoffschicht ist durch eine sehr gute thermische Beständigkeit und eine sehr hohe Härte charakterisiert. Ein Merkmal dieser Schicht ist die Ausbildung einer sich selbst

Tabelle 1: Ausgewählte PVD-Beschichtungen für die Warmumformung [10]

Beschichtung	TiAlN	CrN	borbasierte Beschichtungen (z. B. TiBN, TiB₂)
Eigenschaft			
Thermische Stabilität	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>	<i>sehr gut</i>
Adhäsionsneigung gegen Aluminium	<i>schlecht</i>	<i>gut</i>	<i>sehr gut</i>
Widerstand gegen Abrasivverschleiß	<i>sehr gut</i>	<i>gut</i>	<i>gut</i>
Reibungskoeffizient ungeschmiert	<i>schlecht</i>	<i>schlecht</i>	<i>gut</i>
Zähigkeit	<i>mäßig</i>	<i>gut</i>	<i>schlecht</i>
Korrosionsbeständigkeit	/	<i>gut</i>	/
Härte	<i>sehr gut</i>	<i>gut</i>	<i>sehr gut</i>

erneuernden Aluminiumoxidschicht, welche oxidations- und verschleißhemmend wirkt [20]. Die CrN-Beschichtung zeigt dabei die ausgewogensten Eigenschaften der betrachteten Schichten. Sie wurde in den letzten Jahren auf vielfältige Weise modifiziert und optimiert, um die Eigenschaften zu verbessern. Es hat sich u. a. gezeigt, dass Al-Zusätze in CrN-Schichten die Oxidationsbeständigkeit der Schichten erhöhen. Es kam weiterhin bereits zu Untersuchungen von (Cr/CrAlN)_{5x} – Multilagenschichten, bei denen sich metallische Cr-Schichten und nitridische CrAlN-Schichten im Nanometerbereich abwechseln. Dabei wurden geringere Reibwerte im Vergleich zu einer (Ti/TiAlN)_{5x} –Schicht bei einer gleichzeitig geringeren Anhaftneigung zu dem auf 1100 °C erhitzten 51CrV4-Blech gemessen. [13] Bei der dritten Schichtart, den borbasierten Schichten, die sich hauptsächlich in der Aluminiumumformung bewährt haben, könnten Nachteile einer teilweise geringen

Zähigkeit und Abrasionsbeständigkeit durch ein Multilagenschichtsystem kompensiert werden.

2.2 Versuche

Je nach Bauteilgeometrie kommt es in Presshärte Werkzeugen zu Relativbewegungen zwischen dem heißen Blech und der Werkzeugoberfläche. Die durch den Prozess festgelegten Randbedingungen bilden das jeweilige Beanspruchungskollektiv des tribologischen Systems, wie es unter 2.1 allgemein beschrieben wurde.

Diese Beanspruchungen sind die Grundlage für die geplante Nachbildung des Prozesses in Modellversuchen mit Hilfe der am Fraunhofer IWU entwickelten Streifenziehanlage (Bild 5).

Versuchsparameter der geplanten Streifenziehversuche:

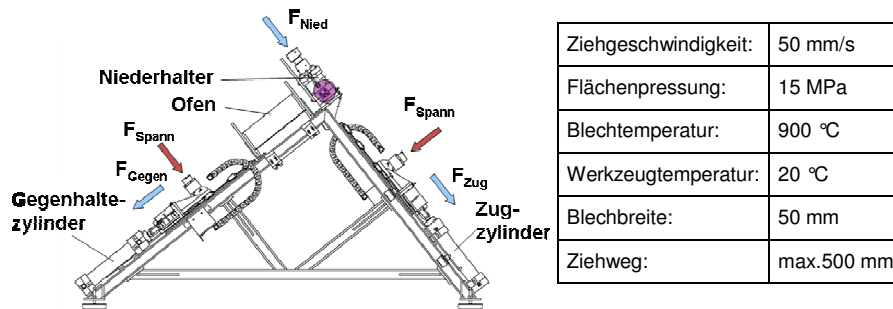


Bild 5: Streifenziehanlage [14]

Geplant sind Versuche mit den Beschichtungen CrVN, TiNbAlN und TiZrCrN. Alle drei Beschichtungen werden als Monolayer-Beschichtungen auf einen Probekörper aus gehärteten Werkzeugstahl (Böhler W360 isobloc, Härte: 56,5 HRC) aufgebracht. Der Probekörper wird in der Anlage eingespannt und ein Blechstreifen des Werkstoffs MBW 1500 (Blechdicke 1,5 mm) – beschichtet und unbeschichtet – wird als Reibpartner über den Probekörper gezogen. In Tabelle 2 sind die geplanten Versuchskombinationen abgebildet.

Tabelle 2: Versuchsplan

Werkzeugwerkstoff	Beschichtung	Anzahl der Blechstreifen aus 22MnB5		
		AlSi	x-tec	ohne Beschichtung
Böhler W360 isobloc	TiNbAlN	5	5	5
	TiZrCrN	5	5	5
	CrVN	5	5	5

Die Beschichtungen sind wie folgt charakterisiert:

- CrVN: Die Additivierung mit 13% Vanadium bewirkt eine Erhöhung der Härte der CrN-Schicht. Bei ca. 800 °C kommt es zudem zur Abscheidung einer Vanadiumoxidschicht, welche sich positiv auf den Reibwert auswirkt. Als Auftragsverfahren wurde das „Reactive DC magnetron sputtering“ gewählt.
- NbTiAlN: Niob, als Zusatz zur herkömmlichen TiAlN-Schicht, verfügt über eine ausgezeichnete chemische Inertheit. Bei bereits für 450 °C durchgeführten Versuchen mit TRIP 700 als Gegenpartner zeigte diese Schicht den mit Abstand geringsten Volumenverschleiß. Dieses Zweischichtsystem wird mit dem Arc-Verfahren abgeschieden.
- TiZrCrN: Diese Schichtzusammensetzung hat sich für die Erhöhung der Standzeit des Werkzeuges bei Adhäsionsverschleiß- und Abrasionsverschleißbedingungen bewährt. Sie verfügt über eine gute Härte und die Auftragung einer Trägerschicht aus Ti erhöht die Adhäsionsfestigkeit. Wie auch die TiNbAlN-Schicht wird diese mit dem Arc-Verfahren aufgebracht.

Die Untersuchungen sollen einer Vorauswahl der Beschichtungen dienen. Es sind weitere Versuche mit in Tabelle 2 dargestelltem Ablauf geplant, bei denen ausgewählte gespritzte und aufgeschweißte Schichten einbezogen werden. Als Auswertegrößen dienen Probekörperverschleiß (qualitativ und quantitativ) und Reibungskoeffizient. Ziel der Betrachtungen ist ein Erkenntnisgewinn über die Tauglichkeit der Beschichtungen für Presshärtewerkzeuge hinsichtlich der Standzeitverlängerung. Zugleich werden der Kontaktwärmübergangskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit im Zuge der Arbeiten für unterschiedliche Schichten gegenübergestellt und für eine Eignung hinsichtlich Bauteilgradierung bewertet.

3 Ermittlung des Kontaktwärmeübergangskoeffizienten

In [15] wird dargestellt, dass neben dem Reibungskoeffizienten und der dehnratenabhängigen Fließspannung der Kontaktwärmeübergangskoeffizient als dominierende Einflussgröße auf die Abbildungsgenauigkeit einer Blechdickensimulation anzusehen ist.

Der Kontaktwärmeübergangskoeffizient ist von folgenden Größen beeinflusst:

- Werkstoff der Kontaktkörper
- Oberflächenrauheit der Kontaktpartner
- enthaltene Zwischenstoffe (Schmierstoff, Verunreinigungen)
- Anpressdruck

Es ergibt sich bei Vorhandensein einer Wärmequelle und einer Wärmesenke ein Wärmestrom an der Kontaktstelle zweier Körper. An der Kontaktstelle ist ein Temperatursprung zu beobachten, welcher zur Definition des Kontaktwärmeübergangskoeffizienten herangezogen wird (Bild 6 und Gleichung (1)).

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \quad (1)$$

Der Kontaktwärmeübergangskoeffizient ist nicht direkt messbar, sondern lässt sich mit Hilfe ausgewählter Messgrößen berechnen. Je nach Wahl und Anzahl der Messgrößen gibt es unterschiedliche Ansätze, den Kontaktwärmeübergangskoeffizienten zu berechnen. Die Ansätze unterscheiden

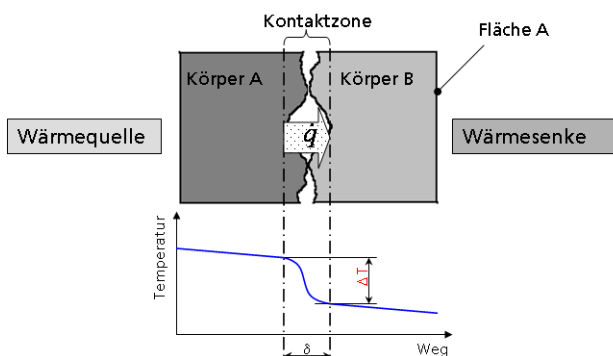


Bild 6: Wärmestrom durch die Kontaktfläche von zwei Körpern

sich in ihrer Genauigkeit, da diverse vereinfachende Annahmen getroffen werden (z. B. temperaturunabhängige Wärmeleitfähigkeit). Je mehr Messgrößen in der Berechnung berücksichtigt werden, umso weniger Vereinfachungen müssen getroffen werden und umso geringer ist dementsprechend der Fehler, den man gegenüber der Realität zulässt. Die am häufigsten anzutreffende Vorgehensweise ist die Ermittlung des Kontaktwärmeübergangskoeffizienten über die Lösung von Differentialgleichungen unter Verwendung des Fourier'schen Gesetzes für Wärmeleitung. Die angewandte inverse Methode beruht auf der Berechnung der Ursache aus der Wirkung, wobei der Wärmestrom als Ursache definiert ist und das Temperaturfeld die Wirkung darstellt. Die Nähe der Temperatursensoren zur Kontaktfläche und die Kenntnis über den voraussichtlichen mathematischen Funktionsverlauf der Temperatur in Abhängigkeit vom Kontaktflächenabstand beeinflusst signifikant die Aussagekraft der Ergebnisse.

Es gibt generell die beiden Alternativen, die Messung stationär oder instationär durchzuführen. Rosochowska et al [16] beschreibt als einen der wenigen Fälle den Kontaktwärmeübergangskoeffizienten stationär. Wie bei nahezu allen anderen vorhandenen Versuchseinrichtungen wird eine Blechrunde zwischen zwei zylindrischen Werkzeugen eingeklemmt und definiert auf Druck beansprucht. Es wird in der Regel auf zylindrische Proben zurückgegriffen, da sich dadurch die Berechnung auf ein eindimensionales Wärmeleitproblem reduzieren lässt. Jeweils vier Thermoelemente in den beiden Werkzeugen zeichnen den Temperaturverlauf am Werkzeug in Abhängigkeit vom Abstand von der Kontaktstelle auf. Durch ein Unterbinden der Wärmeabstrahlung an die Umgebung wird ein nahezu konstanter Wärmestrom herbeigeführt, mit welchem über lineare Beziehungen der Kontaktwärmeübergangskoeffizient berechnet werden kann. In Tabelle 3 sind drei weitere Modellversuche mit einer Auflistung der Charakteristika sowie den Vor- und Nachteilen dargestellt. Bei den betrachteten Versuchen wird jeweils ein instationärer Zustand aufgenommen.

Tabelle 3: Versuchsanordnungen zur Ermittlung des Kontaktwärmeübergangskoeffizienten

Versuchs- anordnung <i>Eigenschaft</i>	I <i>nach [17]</i>	II <i>nach [18]</i>	III <i>nach [19]</i>
Probengeometrie	∅ 50 mm	∅ 40 mm	/
Werkzeug- temperaturen	bis ca. 224 °C (für Magnesiumumformung)	bis ca. 600 °C	bis 280 °C untersucht
Flächenpressungen	bis 6,3 MPa	bis 30 MPa	von 7 bis 85 MPa durchgeführt
Berechnungsansatz	Bilanzierung der Wärmeströme am Blech unter Berücksichtigung des Verlustwärmestroms an Umgebung	Wärmestromdichten- gleichgewicht an Kontaktstelle für Ober- und Unter- werkzeug	Kontaktwärmestrom- dichte über Sequential- Estimation-Methode berechnet
Annahmen	gemittelte Wärmeleit- fähigkeit für Bestimmung des Wärmeübergangs- koeffizienten an Umgebung	gleicher Wärme- übergang an oberer und unterer Kontakt- stelle; gemittelte Wärmeleitfähigkeit für Blechwerkstoff	bis zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Wärmeverluste durch Wärmestrahlung und Konvektion berücksichtigt

Die Besonderheit der Versuchsanordnung III (Tabelle 3) ist zum einen die Temperaturmessung mittels einer Hochgeschwindigkeits-Infrarotkamera und zum anderen der Kontakt lediglich zweier zylindrischer Probekörper ohne Blech. Es kommt bei dieser optischen Messung nach [19] zu keiner Veränderung des thermischen Verhaltens der Werkzeuggestalt wie bei der Einbringung von Thermo-Elementen. Das Verfahren liefert verlässliche Messergebnisse für den Fall, dass ausschließlich für Proben mit identischem Werkstoff, gleichzeitig Temperaturen aufgenommen werden.

Für geplante Versuche zur Gewinnung des Kontaktwärmeübergangskoeffizienten zwischen Werkzeuggestalt und Blech wird am Fraunhofer IWU zur Zeit an der Konzeption eines Versuchsstands gearbeitet. Ausschlaggebend für ein tragfähiges Konzept ist insbesondere die Wahl der Wärmequelle, des Zustands der

Wärmeübertragung (stationär, instationär) und die Wahl des Berechnungsansatzes. Bei Blech- oder Werkzeugtemperaturen von über 600 °C muss außerdem ein Schutz vor Verzunderung eingeplant werden. Wegen Setzungserscheinungen während des Versuchs ist es erforderlich, eine Sollwertnachführung der Flächenpressung vorzusehen. Die bereits am Fraunhofer IWU vorhandene Messausstattung zur Erfassung thermischer Kennwerte, wie eine Laserflashapparatur und ein DSC (Differential Scanning Calorimetry) liefert zum einen Eingangsgrößen für die Kontaktwärmeübergangsberechnung und kann zum anderen zur Kalibrierung des geplanten Versuchsstands herangezogen werden.

4 Werkzeugkühlung für die Warmumformung

4.1 Anforderungen an zukünftige Kühlkonzepte

Im Zusammenspiel mit den tribologischen und thermischen Eigenschaften, der für die Warmumformung eingesetzten Werkzeugstähle und deren Beschichtungen spielt die Form und Auslegung der Werkzeugkühlung eine entscheidende Rolle für den Prozess des Presshärtens [21]. Mit den wachsenden Anforderungen an industriell eingesetzte Bauteile geht eine gleichzeitige Optimierung der vorhandenen Kühlkonzepte einher. Die Herstellung gradiert Bauteile mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften stellt die Werkzeugkühlung ebenfalls vor neue Herausforderungen [22]. Hierbei steht zum Einen die Einstellung crashrelevanter Bauteileigenschaften im Fokus der aktuellen Forschungsaufgaben. Zum Anderen gibt es Bestrebungen die Flanschbereiche der Bauteile prozessbedingt weich zu belassen, um den anschließenden Beschnitt mechanisch durchführen zu können. Die derzeitigen Standzeiten aktueller Hartbeschnittwerkzeuge sind hierbei als unbefriedigend einzustufen. Zur Realisierung weicher Flanschbereiche werden möglichst exakt begrenzte Zonen und Übergänge benötigt, welche mit den aktuell zur Verfügung stehenden Werkzeugkühlkonzepten und Temperiersystemen nicht realisierbar sind. Diese erhöhten Anforderungen gilt es zudem in angepassten thermomechanischen und thermofluiden FE-Simulationen abzubilden und zu validieren. Die simulative Betrachtung soll in diesem Beitrag unter dem Punkt 5 näher betrachtet werden.

Ein weiterer Aspekt ist zudem die energetische und die wirtschaftliche Betrachtung der Kühlkonzepte. Bei den aktuellen Umweltbilanzdiskussionen müssen sich

zukünftige Forschungs- und Entwicklungsergebnisse nicht nur an der Funktionalität und der praktischen Realisierbarkeit, sondern auch an deren Nachhaltigkeit messen lassen. Die komplexen Anforderungen an heutige Presshärte Werkzeuge erfordern ein Zusammenspiel verschiedener Einflussfaktoren, was eine losgelöste Betrachtung der Werkzeugkühlung nicht sinnvoll erscheinen lässt.

4.2 Kühlkonzepte in der Praxis

In der industriellen Praxis werden derzeit folgende drei Kühlkonzepte bevorzugt eingesetzt [23]:

- Einbringen von Kühlbohrungen - Segmentbauweise
- Schalenaufbau
- Eingegossene Kühlrohre

Am Beispiel der beiden Demonstratorwerkzeuge „B-Säulenfuß“ und „Sitzquerträger“ sollen im Folgenden die unterschiedlichen Varianten gegenübergestellt werden.

Kühlbohrungen - Segmentbauweise

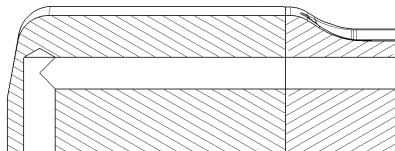


Bild 7: Prinzipdarstellung gebohrter Kühlkanal (Detail Sitzquerträger Werkzeug)

Vorteile:

- langjährig praxiserprobt – z. B. im Bereich Kunststoffspritzguss
- mit unterschiedlichen Werkzeugwerkstoffen kombinierbar
- durch Segmentbauweise bedingte variable Gestaltungsmöglichkeiten
- gute Kühlleistung

Nachteile:

- kostenintensiv durch hohen Fertigungsaufwand
- bei komplizierten Bauteilgeometrien keine gleichmäßigen Abstände von Mantelfläche Bohrung und Werkzeugoberfläche realisierbar [22]
- Schutz gegen Korrosion ist zu gewährleisten
- fertigungsbedingte scharfkantige Eckbereiche - Entstehung von „toten Ecken“ in der Strömung des Kühlmediums
- aufwändige Abdichtung der einzelnen Segmente

Schalenaufbau

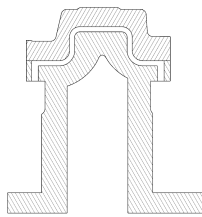


Bild 8: Prinzipdarstellung Schalenaufbau (Detail Stempel B-Säulenfuß Werkzeug)

Vorteile:

- variable Gestaltungsmöglichkeiten der Kühlkanäle
- konturnahe Kühlung auch bei komplizierten Bauteilgeometrien
- gute Kühlleistung
- laminare Strömung – scharfe Ecken können vermieden werden

Nachteile:

- kostenintensiv durch hohen Fertigungsaufwand
- Schutz gegen Oxidation muss erzielt werden
- Steifigkeit der Oberschale konkurriert mit der Konturnähe der Kühlkanäle
- Dichtheitsproblem zwischen Ober- und Unterschale [23]

Eingegossene Kühlrohre

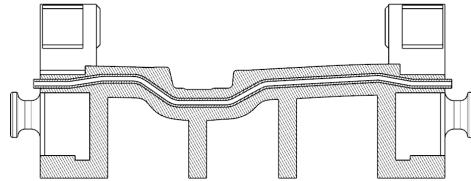


Bild 9: Prinzipdarstellung eingegossene Kühlrohre (Detail Matrize B-Säulenfuß Werkzeug)

Vorteile:

- Herstellung kostengünstig
- konturnahe Kühlung auch bei komplizierten Bauteilgeometrien
- korrosionsbeständige Kühlrohre aus Edelstahl
- Abdichtung unproblematisch

Nachteile:

- werkzeugwerkstoffabhängig – Guss (z.B.: EN-JS2070)
- schlechte Reparaturfähigkeit
- minimale Rohrbiegeradien sind einzuhalten [23]
- Rohrdurchmesser > 20mm weisen Anbindungsfehler an den Guss auf [23]
- geringere Kühlleistung durch zusätzlichen Wärmeübergang: Kühlmedium - Rohrwerkstoff – Werkzeugwerkstoff

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Kühlkonzepte wurden für die Umsetzung im Demonstratorwerkzeug „B-Säulenfuß“ die Varianten „Schalenaufbau“ (Stempel) und „eingegossene Kühlrohre“ (Matrize) ausgewählt.

Die dritte Variante mit gebohrten Kühlkanälen und Segmentbauweise wird in einem separaten Demonstratorwerkzeug („Sitzquerträger“) realisiert und erprobt. Die simulativen Betrachtungen unter Punkt 5 werden ebenfalls für dieses Werkzeug durchgeführt. Somit besteht die Möglichkeit, die theoretischen Ergebnisse der Simulation mit denen der praktischen Versuchsauswertungen abzugleichen.

5 Simulation

5.1 Einführung

Für das Werkzeug „B-Säulenfuß“, in dem zwei unterschiedliche Kühlkonzepte (Stempel, Matrize) umgesetzt wurden, soll durch eine Simulation der Strömungsverhältnisse in den Kühlkanälen die resultierende Temperaturverteilung an den Werkzeugaktivteiflächen ermittelt werden.

Ziel der Simulation ist dabei die Darstellung der räumlichen Verteilung und des zeitlichen Verlaufs des Wärmetransports während des Presshärtevorgangs und die Analyse des Einflusses von Strömungsparametern wie z. B. Fließgeschwindigkeit und -richtung auf die Oberflächentemperaturen der Aktivteile.

Die simulative Untersuchung soll die Grenzen der vorgegebenen Werkzeugkühlung hinsichtlich der Einstellung definierter, lokal variabler Temperaturzonen ermitteln, um durch die daraus resultierenden unterschiedlichen Abkühlgeschwindigkeiten gradierte Bauteileigenschaften zu ermöglichen. Systemgrenzen des untersuchten Bereichs sind dabei die Aktivteile des Werkzeuges. Die Werkzeuggrundgestelle und die Umgebung sind nur über die Definition von entsprechenden Randbedingungen und Ersatzmodellen in den Betrachtungen berücksichtigt.

5.2 Stand der Technik

Der Presshärte-Prozess wurde bisher vor allem in Bezug auf die Umformung des Bauteils simuliert. Die Kühlung der Werkzeuge findet dabei nur am Rande Beachtung und insbesondere die Strömung des Kühlmediums wird oft vereinfacht abgebildet.

Ein derartiges Vorgehen zeigt Shapiro [24], indem das Bulkflow-Modell zur Anwendung kommt. Darin stellt eine Kette von Balkenelementen in der Mitte des Strömungskanals das Fluid dar. Eine turbulente Strömung und ideale Mischung über den Querschnitt werden vorausgesetzt. Die Anbindung an den umgebenden Werkzeugkörper erfolgt durch zylinderförmige Schalenlemente.

Ein weiterer Ansatz zur Darstellung der Werkzeugkühlung findet sich in [25]. Bei der Netzwerk-Analyse wird das System der Kühlkanäle in einfache Segmente zerlegt (Geraden, Rohrbögen). Jedem Segment werden Eigenschaften zugeordnet. Durch die Verknüpfung der Segmente an Knotenpunkten entsteht ein lineares

Gleichungssystem, dessen Lösung das Strömungsverhalten im gesamten Netzwerk liefert.

Typisch für bestehende Simulationen sind weiterhin die Wahl geometrisch einfacher Bauteile und die weitere Vereinfachung der Werkzeuge während der Modellbildung, wie in [26] zu sehen. Das Bauteil stellt im Wesentlichen ein U-Profil dar und das Werkzeug wurde dabei von allen konstruktiven Details bereinigt und in seiner Form vereinfacht.

5.3 Herangehensweise und Fokus der Simulation

Der Schwerpunkt liegt hier auf der Simulation der Werkzeugkühlung.

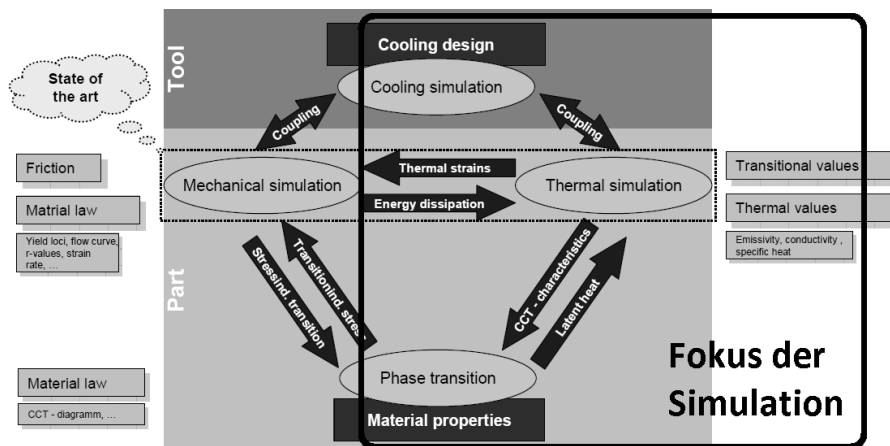


Bild 10: Fokus der Simulation, nach [26]

Die verwendete Geometrie ist vergleichsweise komplex und soll nur wenig vereinfacht werden, um die Auswirkungen der konkreten konstruktiven Gestaltung zeigen zu können.

5.4 Strömungsmechanik/CFD

5.4.1 Einordnung

Das als Kühlmedium eingesetzte Wasser kann mit ausreichender Genauigkeit als inkompressibel angesehen werden.

Bei der betrachteten Strömung handelt es sich um eine klassische Rohrströmung, die – die vollständige Entlüftung des Kühlkreislaufs vorausgesetzt - keine freien Oberflächen besitzt. Charakteristisch ist weiterhin die dominierende Längenausdehnung in Strömungsrichtung und ein weitestgehend konstanter Querschnitt.

Es gilt das Kontinuitätsgesetz

$$\rho \cdot V_m \cdot A = \text{konst.} \quad (1)$$

und die Bernoulli-Gleichung.

$$\rho_1 + \frac{\rho}{2} \cdot V_{m1}^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = \rho_2 + \frac{\rho}{2} \cdot V_{m2}^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \Delta p_V \quad (2)$$

Die wichtigste Größe zur Charakterisierung einer Rohrströmung ist die Reynolds-Zahl.

$$\text{Re} = \frac{V_m \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

Sie bildet das Verhältnis aus Strömungsgeschwindigkeit und kinematischer Zähigkeit des Fluids unter Einbeziehung einer charakteristischen Abmessung. Bei $\text{Re} > 2300$ geht die Strömung vom laminaren in den turbulenten Zustand über.

Im vorliegenden Fall ist von turbulenter Strömung auszugehen.

5.4.2 Turbulenzmodelle

Die Berücksichtigung der Turbulenz ist erforderlich, da sie großen Einfluss auf den Strömungsverlauf und insbesondere den Wärmetransport im Fluid hat.

Theoretisch könnten die turbulenten Bewegungen über die Lösung der Momentengleichungen erfasst werden. Dazu müsste die Vernetzung des Modells jedoch um Größenordnungen feiner sein, was mit der heute verfügbaren Rechenleistung zu extrem aufwändigen Modellen führt. Diese sogenannte „direkte Simulation“ eignet sich daher nur für akademische Grundlagenuntersuchungen.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Nutzung eines Turbulenz-Modells. Seine Aufgabe ist es, den Einfluss der Turbulenz auf Stoff- und Energietransport nachzubilden und der Lösung hinzuzufügen.

Das k-Epsilon-Modell hat sich als Standard für die Berechnung einfacher Rohrströmungen etabliert, da es sich als sehr stabil und für solche Fälle ausreichend genau erwiesen hat. Daher kommt es auch hier zur Anwendung.

5.4.3 Wandgesetz

Zwischen dem strömenden Fluid in der turbulenten Zone und der Rohrwand bildet sich eine Grenzschicht aus. In dieser Grenzschicht existiert zudem eine laminare Unterschicht. Sie ist verantwortlich für die Impuls- und Wärmeübertragung.

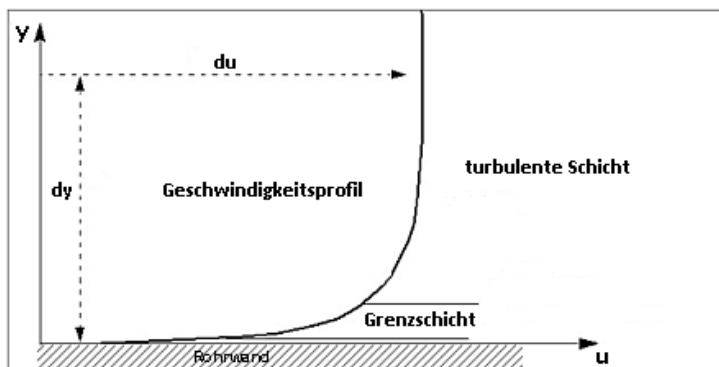


Bild 11: Wandmodell [27]

Die Grenzschicht vollständig mit finiten Elementen aufzulösen ist nur für sehr spezielle Analysen möglich. Deshalb wird das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil in Abhängigkeit vom Wandabstand üblicherweise mit einem empirisch-logarithmischen Wandgesetz dargestellt.

5.5 Simulationsoftware

Das vorliegende Problem wurde mit ANSYS CFX 12 bearbeitet. Neben der Verfügbarkeit und bestehender Erfahrung sprachen diese Eigenschaften für die Auswahl:

- hohe Verbreitung; als Industrie-Standard anerkannt

- Integration in die ANSYS Workbench-Plattform; dadurch Flexibilität im Datenaustausch
- Multi-Physik-Fähigkeit des ANSYS Software-Pakets bietet perspektivisch die Möglichkeit zur Weiterentwicklung

5.6 Modellbildung

Die Vernetzung der Körper erfolgte in ANSYS ICEM CFD. Es wurden ausschließlich Solid-Elemente verwendet und ein möglichst hoher Anteil an Hexaeder-Elementen angestrebt. Diese bieten gegenüber Tetraedern mehrere Vorteile:

- geringerer Speicherverbrauch bei gleicher Knotenanzahl
- bessere numerische Stabilität der Berechnung
- tendenziell höhere Genauigkeit der Lösung bei gleicher Modellgröße

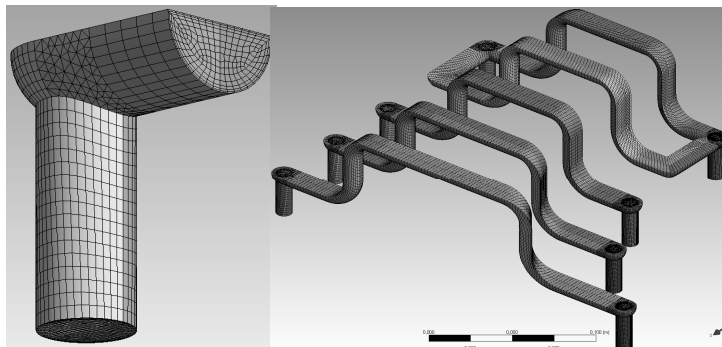


Bild 12: Vernetzung des Fluids im Stempel (Schnitt, Teilansicht)

Die Werkzeuge mussten in der Nähe der Wirkflächen mit Tetraedern vernetzt werden. Weiter entfernte Bereiche wurden abgetrennt, geometrisch vereinfacht und mit einem groben Hexaeder-Netz versehen.

Die Vernetzung des Werkstücks erfolgte mit vier Elementlagen über die Blechdicke. Die Simulation des Presshärtens wird iterativ ausgeführt. Dabei wird das Blech immer in seinem Zustand nach dem Transport zur Presse eingesetzt.

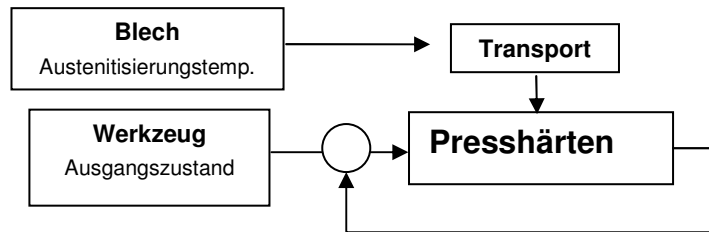


Bild 13: Transientes Modell

Das Werkzeug startet dagegen ab der zweiten Iteration vom Endzustand der vorausgegangenen. Nach einigen Iterationen stellt sich der eingeschwungene Betriebszustand des Werkzeugs ein.

Zur Zeit ist die Modellbildung abgeschlossen und die entsprechende FE-Simulation wird derzeit am Fraunhofer IWU am Standort Chemnitz durchgeführt.

Zusammenfassung

Ein nachhaltiger Energieeinsatz am Presshärte­werkzeug bei gleichzeitiger Umsetzbarkeit des Tailored Tempering ist nur unter einer ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtwerkzeugs erreichbar. Es gilt dabei, das Zusammenspiel von Tribologie, Werkzeugwerkstoff- und Beschichtungsauswahl sowie Kühlsystem zunächst zu erfassen, anschließend zu beschreiben und zuletzt zu optimieren. Eine Simulation, welche möglichst viele dieser Effekte berücksichtigt und die Wirklichkeit sehr genau abbildet, ist gewünscht aber oftmals aufgrund unzureichender Kennwerte und Rechenleistung nicht umsetzbar. Der Artikel stellt Lösungsansätze für genannte Gebiete vor, welche helfen sollen, das komplexe System „Werkzeug“ zu optimieren.

Literaturangaben

- [1] Kögel, G.: Weltmeister im Formhärten. In: Blech-Sonderdruck aus Heft 5, NC Verlag, D, 2006
- [2] Bröckerhoff, M.; Wallentowitz, H.: Strukturverbesserungen für den seitlichen Pfahlaufprall. In: 14. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2005, Aachen, D, 2005

- [3] Feuser, P.; Schweiker, T.: Tailored Tempered Parts - Presshärtebauteile mit maßgeschneiderten Eigenschaften. In: Merklein, M. et al: Tagungsband zum 4. Erlanger Workshop, Meisenbach Bamberg, D, 2009, S. 130
- [4] Kramer, F.: Passive Sicherheit von Fahrzeugen, Vieweg & Teubner Verlag, Wiesbaden, D, 2009, S. 315
- [5] Merklein, M.; Wieland, M.: Beschichtungssysteme auf AlCrN-Basis für das Presshärten – thermische Kennwertermittlung für Werkzeug und Werkstoff. In: Merklein, M. et al: Tagungsband zum 4. Erlanger Workshop, Meisenbach Bamberg, D, 2009, S. 233
- [6] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*, Springer Verlag, Berlin, D, 2007
- [7] Zum Gahr, K. H.: Tribologie: Reibung – Verschleiß – Schmierung. In *Naturwissenschaften*, Heft 72, Springer Verlag, Berlin, D, 1985, S. 260-267
- [8] Matek, W. et al: *Roloff/Matek. Maschinenelemente*, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, D, 2007, S. 71-88
- [9] www.keramverband.de/brevier_dt/5/7/5_7_3.htm (14.4.2010)
- [10] Weber, M.: Neue Schichtsysteme für die Umformtechnik. Werkzeugbeschichtungen für die temperierte Umformung. In: *Workshop Beschichtete Werkzeuge - höhere Wirtschaftlichkeit in der Ur- und Umformtechnik*, Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. – EFDS-, Dresden, D, 2005
- [11] Bobzin, K. et al: PVD-Schichten als innovative Werkzeugbeschichtungen im Druckguss und Thixoforming von Aluminium- und Stahllegierungen. In: *Workshop Beschichtete Werkzeuge - höhere Wirtschaftlichkeit in der Ur- und Umformtechnik*, Europäische Forschungsgesellschaft Dünne Schichten e.V. – EFDS-, Dresden, D, 2005
- [12] Bieler, H.-W.; Kayser, O.: Plasma-Wärmebehandlung plus PVD-Hartstoffbeschichtung. Oberflächentechnik für innovative Umformprozesse. In: *EFB-Kolloquium*, Fellbach, D, 2004
- [13] Tillmann W. et al: Functional wear resistant tool surfaces for hot metal forming processes. In: *Steel Grips. Journal of steel and related materials. Surface Technology*, Grips media GmbH, 2009
- [14] Müller, R.; Lachmann, L.; Jesche, F.: Ermittlung von Reibwerten und Verschleißverhalten bei hohen Temperaturen im Streifenzugversuch. In:

Werkstoffprüfung 2007. »Konstruktion, Qualitätssicherung und Schadensanalyse«, Neu-Ulm, 2007, S. 317-322

- [15] Burkhardt, L.: Eine Methodik zur virtuellen Beherrschung thermo-mechanischer Produktionsprozesse bei der Karosserieherstellung, Dissertation, ETH Zürich, CH, 2008
- [16] Rosochowska, V. et al: A new method of measuring thermal contact conductance. In: Journal of Materials Processing Technology, Heft 145, 2004, S. 207-214
- [17] Meyer, T.: Ein Beitrag zur Auslegung temperierter Tiefziehwerkzeuge für die Umformung von Magnesiumfeinblechen, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2005
- [18] Kolleck, R. et al: Bewertung der Wechselwirkungen zwischen Werkzeug- und Blechwerkstoff beim Presshärten In: Merklein, M. et al: Tagungsband zum 4. Erlanger Workshop, Meisenbach Bamberg, D, 2009, S. 205-215
- [19] Fieberg, C.; Kneer, R.: Determination of thermal contact resistance from transient temperature measurements In: Journal of Heat and Mass, Heft 51, 2008, S. 1017-1023
- [20] Kräusel, V. et al: Vorteile und Grenzen von Aktivteilbeschichtungen auf Umform- und Schneidwerkzeugen. In: EFDS-Workshop. Beschichtete Werkzeuge - höhere Wirtschaftlichkeit in der Ur- und Umformtechnik, Dresden 2005
- [21] Banik, J.; Flehmig, T; Hoffmann, O. et al: Neue Werkstoff- und Technologieentwicklung für modernen Karosseriebau mit Stahl, In: Tagungsband 5. Car Body Colloquium 2008, Chemnitz, D, 2008 S.113-131
- [22] Paar, U.; Prokoph, S.; Sunderkötter, C. et al: Gradierte Eigenschaftseinstellung im Bauteil. In: Tagungsband 16. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz, D, 2009, S.191-200
- [23] Kolleck, R.; Veit, R.; Löscher, H. Optimierung gekühlter Werkzeuge für das Presshärten borlegierter Stahlblech, In: Tagungsband zum 2. Erlanger Workshop Warmblechumformung 2007, Erlangen, 2007, S.93-102
- [24] Shapiro, A.: Using LS-DYNA for Hot Forming. In: 6.LS-DYNA Anwenderforum, Frankenthal, D, 2007, S. 5
- [25] Shapiro, A.: New LS-DYNA Features for Modeling Hot Stamping, S. 14-16

- [26] *Medricky, M. et al: Thermo-mechanical coupled simulation of hot forming processes considering die cooling, Volkswagen AG, D, 2009, S. 15, 20*
- [27] *ANSYS CFX Help, Release 12.1, 2009*