

Einflussgrößen bei der umformtechnischen Verarbeitung von Hochleistungs-Kupferwerkstoffen

D. Ringhand, Wieland-Werke AG Ulm

Um die gestiegenen Anforderungen an die Festigkeitseigenschaften von Werkstoffen für Steckverbinder zu erfüllen, wurden ausscheidungshärtbare Kupferlegierungen mit deutlich verbesserten Eigenschaften entwickelt. Die umformtechnische Verarbeitung dieser Hochleistungswerkstoffe durch mehrstufige Stanz-Biegeprozesse erfordert eine angepasste Auslegung der Prozessparameter, um das Potenzial dieser Werkstoffe auszuschöpfen.

Am Beispiel eines Federkontaktes aus der Kommunikationstechnik wird die Berücksichtigung der Eigenschaftsänderung infolge Weiterverarbeitung aufgezeigt. Über eine lokale Betrachtung der Relaxation können kritische Bereiche identifiziert werden. Aus der integrierten Prozess- und Belastungsanalyse lassen sich Hinweise für eine optimale Auslegung von Bauteilgeometrie und Verarbeitungsprozess ableiten.

Der Beitrag beschreibt die Betrachtung des Umformprozesses als System und diskutiert den Einfluss der Systemparameter auf Produkteigenschaften und Prozesssicherheit. Zur systematischen Analyse der Auswirkung der Einflussparameter sind bevorzugt numerische Berechnungsverfahren wie die FEM-Simulation geeignet. Es wird gezeigt, wie mit Hilfe der Prozesssimulation über eine geeignete Anpassung der Systemkomponenten Werkstoffeigenschaften und Prozessparameter Lösungen gefunden werden können, um den Einsatzbereich von Kupferlegierungen auszudehnen und die Wettbewerbsfähigkeit der Werkstoffe zu erhöhen.

Anwendungsorientierte Entwicklung und Auswahl von Kupferwerkstoffen

Bei der Herstellung von Kupfer-Halbzeugen werden entscheidende Eigenschaften der Werkstoffe bereits durch die chemische Zusammensetzung und den Gießprozess festgelegt. Gleichzeitig werden an die Halbzeugindustrie besondere Anforderungen gestellt, um Werkstoffe mit gleich bleibender hoher Qualität für die weiter verarbeitenden Betriebe anzubieten. Einerseits müssen die Prozesse bei der Halbzeugherstellung sicher beherrscht und deren Einflussparameter kontrolliert werden. Andererseits sind die Auswirkungen, z.B. von Variationen der chemischen Zusammensetzung, auf die Weiterverarbeitung abzuschätzen. Dies betrifft umformtechnische und spanabhebende Verfahren in gleicher Weise.

Bei der Entwicklung neuer Legierungen werden Zusammensetzung und Herstellungsprozess auf vorher festgelegte Zieleigenschaften hin ausgewählt. Bild 1 zeigt hierzu den hierarchischen Ablauf bei der Entwicklung und Auswahl geeigneter Anwendung für Werkstoffe nach Olsen /1/.

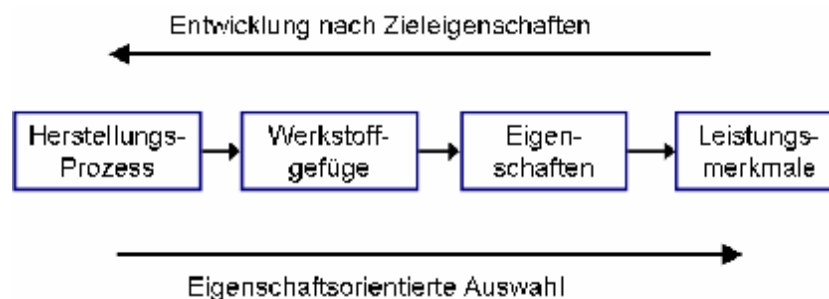


Bild 1: Schematische Darstellung von Entwicklung und Auswahl geeigneter Anwendungen für Werkstoffe in Anlehnung an Olsen /1/

Am Beispiel einer ausscheidungshärtbaren Kupfer-Hochleistungslegierung wurde diese Vorgehensweise exemplarisch aufgezeigt /2/. Hierbei wurde der Werkstoff auf den Einsatz in speziellen Anwendungsgebieten (Steckverbinder mit erhöhter mechanischer Belastung) hin entwickelt. Das Eigenschaftsspektrum der Legierung wird durch die Parameter Festigkeit (Dehngrenze), Leitfähigkeit, Biegsamkeit und Relaxationsbeständigkeit bestimmt. Die Legierungszusammensetzung und der Herstellungsprozess wurden ausgehend von den physikalischen Möglichkeiten des Legierungssystems auf die geforderten Leistungsmerkmale des Werkstoffes eingestellt.

Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Halbzeuge werden aus Gründen der Vergleichbarkeit mit standardisierten Methoden wie dem Zugversuch oder dem Biegeversuch bestimmt /3/. Bei der Weiterverarbeitung wird der Werkstoff häufig stark verformt und die physikalischen Eigenschaften u.U. signifikant beeinflusst. Die Verarbeitungseigenschaften des Halbzeuges sowie die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Bauteils stehen dabei aufgrund mikrostruktureller Parameter und der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes in Wechselwirkung zueinander. Gleichzeitig werden die Kosten des Halbzeugs durch die Legierungszusammensetzung, die erforderlichen Verarbeitungsschritte sowie die erreichbare Ausbringung bestimmt.



Bild 2: Abhängigkeiten zwischen Eigenschaftsspektrum und Zielgrößen bei der Halbzeugentwicklung

Die Entwicklung neuer Kupferwerkstoffe und Legierungen beansprucht in der Regel einen deutlich längeren Zeitraum als die Entwicklung der hieraus herzustellenden Endprodukte. Gleichzeitig kann der Halbzeugprozess hohe Investitionen, z.B. in spezielle Anlagen zur Wärmebehandlung, erforderlich machen. Aus diesem zeitlichen Versatz ergibt sich daher die Aufgabe, den Anwendungsbereich der Werkstoffe auf eine breite Basis auszudehnen. D.h., nach der eigenschaftsorientierten Entwicklung der Werkstoffe folgt eine Phase, in der die Eignung für weitere Anwendungen untersucht wird. Die in diesem Zusammenhang entwickelten Varianten, z.B. Festigkeitsklassen, können in bestimmten Grenzen an die Anforderungen der Endprodukte angepasst werden.

Weiterhin führt die Substitution bisheriger Werkstoffe, z.B. aus Kostengründen oder Umweltschutzaspekten, dazu, dass neue Legierungen auch mit bestehenden Prozessen weiter verarbeitet werden sollen. In diesem Fall sind die Möglichkeiten zur Anpassung der Werkstoffeigenschaften und des Umformprozesses oftmals begrenzt.

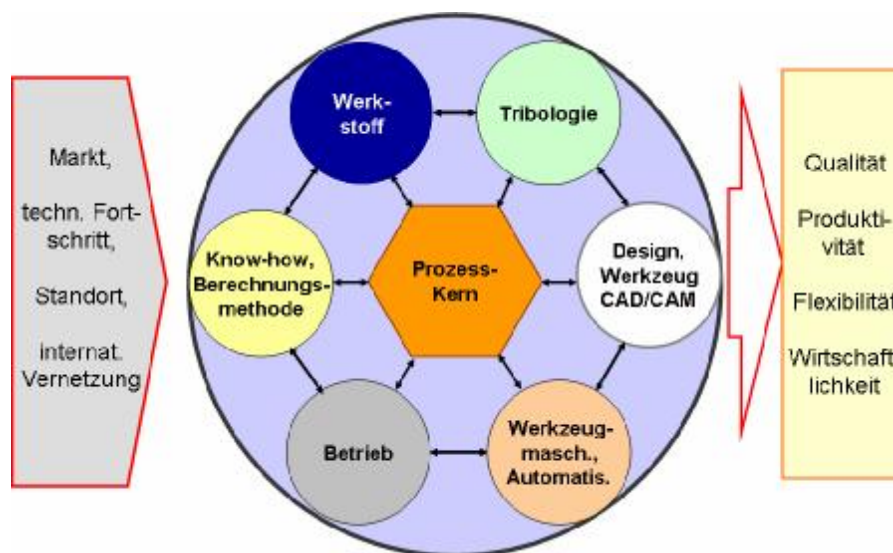
Bei der umformtechnischen Weiterverarbeitung von Kupferhalbzeugen findet eine thermomechanische Behandlung des eingesetzten Werkstoffes statt. Je nach Vorgeschichte des

eingesetzten Materials und den Prozessbedingungen erfolgt hierbei auch eine Veränderung wesentlicher Werkstoffeigenschaften. Die in Bild 1 dargestellte Verknüpfung zwischen Herstellungsprozess und Eigenschaften ist daher um den Prozessschritt der Weiterverarbeitung zu ergänzen, um die Eigenschaften des Bauteils im Einsatz zu charakterisieren. Die Leistungsmerkmale des Bauteils werden neben den werkstofftechnischen Parametern auch durch Effekte, die aus dem Verarbeitungsprozess resultieren, bestimmt. Hierzu zählen z.B. die geometrische Formtreue, Oberflächenbeschaffenheit sowie innere Spannungen.

Die metallurgischen Veränderungen in der Umformzone führen wiederum zu Änderungen der Umformeigenschaften wie der Fließspannung und der erreichbaren Formänderungen.

Systembetrachtung des Umformprozesses

Die Zusammenhänge zwischen Werkstoffentwicklung und Umformprozess lassen sich nach Lange /4/ als Systemverknüpfung beschreiben. Hierbei wird das Ergebnis des Umformprozesses als Resultat unterschiedlicher Einflussgrößen betrachtet. Neben den unmittelbar wirksamen Parametern wie Umformprozess und Werkstoffeigenschaften beeinflussen organisatorische und technologische Rahmenbedingungen sowie das IM Betrieb vorhandene know-how das Prozessergebnis. Dieses wird durch die Qualität des einzelnen Werkstückes, die erreichbare Produktivität und die Prozesssicherheit charakterisiert. Die Wirtschaftlichkeit und Flexibilität des Prozesses werden hierdurch mittelbar beeinflusst. Der Umformprozess wirkt sich auf die Gebrauchseigenschaften der Bauteile und Komponenten aus /5/, /6/. Bild 3 stellt diese Zusammenhänge mit dem Umformprozess als Prozesskern nach Lange /7/ dar. Gleichzeitig stehen die einzelnen Systemkomponenten in Wechselwirkung zueinander und werden selber über die Systemgrenzen hinweg beeinflusst. Die in den letzten Jahren erfolgte internationale Vernetzung von Entwicklungs- und Produktionsprozessen wurde hierbei ergänzt.



Eingangsgrößen

System

Ergebnis

Bild 3: Abbildung der Einflussgrößen bei der Prozesssimulation nach Lange /7/

Bei der Auslegung von Umformprozessen werden die Umformeigenschaften des verwendeten Werkstoffes üblicherweise durch eine repräsentative Fließkurve abgebildet. Je nach Herstellungsverfahren (Walzen, Strangpressen, Ziehen) können die eingesetzten Werkstoffe herstellungsbedingt eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Streubreite der Fließspannung oder der Abmessungstoleranzen aufweisen. So können Durchmesserabweichungen des eingesetzten Drahtes bei der Weiterverarbeitung durch Fließpressen nach dem häufig

eingesetzten Vorzug zu einer unterschiedlich stark ausgeprägten Kaltverformung des Rohteils führen. Ebenso können beispielsweise Schwankungen der Legierungszusätze u.U. zu signifikanten Veränderungen des Umformverhaltens führen. Bei stranggepressten Kupfer-Halbzeugen stellt sich aufgrund der Temperaturänderung während des Pressvorgangs ein unterschiedliches Gefüge am Pressende gegenüber dem Pressanfang ein. Unterschiedliche Korngrößen und variierende Phasenanteile innerhalb des Halbzeugs können sich auf die Verarbeitungseigenschaften des eingesetzten Vormaterials bei nachfolgenden Kaltumformschritten bemerkbar machen. Aufgabe des Halbzeugherstellers ist es daher, diese Schwankungen in einem vorgegebenen Rahmen zu halten und die Auswirkung auf nachfolgende Verarbeitungsschritte abzuschätzen. Die Auswirkung sich veränderter Systemparameter bei der Umformung wird am stärksten deutlich, wenn die hergestellten Bauteile Schäden in Form von Rissen oder Schmiedefehlern aufweisen.

Beim Schmieden von Messing werden die eingesetzten Butzen häufig durch Gasöfen erwärmt, und die Temperatur anschließend über pyrometrische Messungen überwacht. Das Temperaturintervall, in dem eine rissfreie Umformung möglich ist, wird hierbei durch die Legierungszusammensetzung beeinflusst. Bei der pyrometrischen Temperaturmessung wird das Messsignal vom Emissionskoeffizienten der Oberfläche beeinflusst. Je nach Herstellungsprozess oder dem Oberflächenzustand (gezogen, gebeizt) können leichte Änderungen des Emissionskoeffizienten zu Fehlmessungen führen, die zu einer Überhitzung des Werkstückes bzw. der Bildung so genannter Heißrisse führen.

Tribosystem

Bei umformtechnischen Prozessen tritt in der Grenzfläche zwischen Werkstück- und Werkzeuoberfläche sowohl Misch- als auch hydrostatische Reibung bei teilweise extrem hohen Drücken und Temperaturen deutlich oberhalb der Einlegetemperatur auf. Das tribologische System wird durch die Oberfläche von Werkzeug und Werkstück und den Eigenschaften des verwendeten Schmiermittels beeinflusst. Das Schmiermittel soll einerseits eine ausreichende Trennwirkung zwischen Werkstück- und Werkzeuoberfläche gewährleisten. Gleichzeitig sollen die Reibkräfte möglichst gering sein, um z.B. beim Ziehen eine möglichst hohe Querschnittsreduzierung bei der Halbzeugherstellung zu erreichen. Die Wahl des Schmiermittels ist abhängig von den technischen Anforderungen sowie von betrieblichen Rahmenbedingungen. Die Eigenschaften des Schmiermittels können sich auf das Formänderungs- und Eigenspannungsprofil sowie die Oberflächen der Halbzeuge auswirken. Bei der Kalt- und Warmumformung kann das Schmiermittel entscheidend für die Qualität der hergestellten Halbzeuge oder Bauteile sein. Beim Tiefziehen von Blechwerkstoffen werden der Materialfluss unter dem Niederhalter über die Reibung gesteuert und die Verfahrensgrenzen beeinflusst.

Umformsimulation als Werkzeug zur Systemanalyse

Die Auswirkung der Einflussgrößen auf das Ergebnis des Umformprozesses, d.h., auf Form, Integrität, und Eigenschaften des umgeformten Bauteils lässt sich bevorzugt mit Hilfe der Umformsimulation beschreiben /8/. Zur Auslegung der Prozesse wird zunehmend die Finite-Elemente-Analyse durchgeführt. Hierbei wird das Werkstück einzelne Kontinua (Elemente) unterteilt. Bei der numerischen Analyse der Umformprozesse erfolgt stets eine lokale Betrachtung der Zustandsgrößen. Über eine geeignete Variation der Anfangs- und Randbedingungen lässt sich der Einfluss von Werkstoff, Werkzeug, Umformmaschine und Prozessparametern abbilden.

Für die Analyse von Produktionsprozessen werden dabei weiterentwickelte Varianten so genannter multi-physik Anwendungen oder Spezial-Programme eingesetzt. Für die Analyse von Umformprozessen werden besonders hohe Anforderungen an die automatische Neuvernetzung und Kontaktbeschreibung gestellt. Zur Betrachtung von Prozessketten ist die Möglichkeit zur Abbildung mehrstufiger Vorgänge erforderlich. Um einen stationären Zustand des Prozesses abzubilden, kann es ggf. notwendig sein, zunächst eine Abfolge von mehreren Umformprozessen zu berechnen.



Bild 4: Einteilung der Simulationsprogramme für Prozesssimulation

Die Qualität der Simulationsrechnungen hängt im Wesentlichen primär von der Qualität des Modells und der Genauigkeit der Randbedingungen ab. Für die ersten Näherungsrechnungen werden Reibfaktoren, oder thermodynamische Parameter zunächst konstant gehalten. Eine Verbesserung der Genauigkeit ist über die Verwendung temperatur- und druckabhängiger Größen erreichbar. Die Bestimmung dieser Prozessparameter ist in der Regel mit einem hohen experimentellen Aufwand verbunden.

Sind die Toleranzen und Schwankungen prozessrelevanter Einstellgrößen wie z.B. der Fließspannung, der Reibung und der verschleißabhängigen Werkzeuggeometrie unbekannt, lässt sich deren Einfluss auf das Ergebnis des Umformprozesses durch eine virtuelle Variation ermitteln /12/. Zur Abschätzung von Einfluss und Wechselwirkung mehrerer Prozessparameter sind die statistische Versuchsplanung für die Vorbereitung der Berechnungsläufe und die multivariate Datenanalyse bei der Ergebnisauswertung hilfreich.

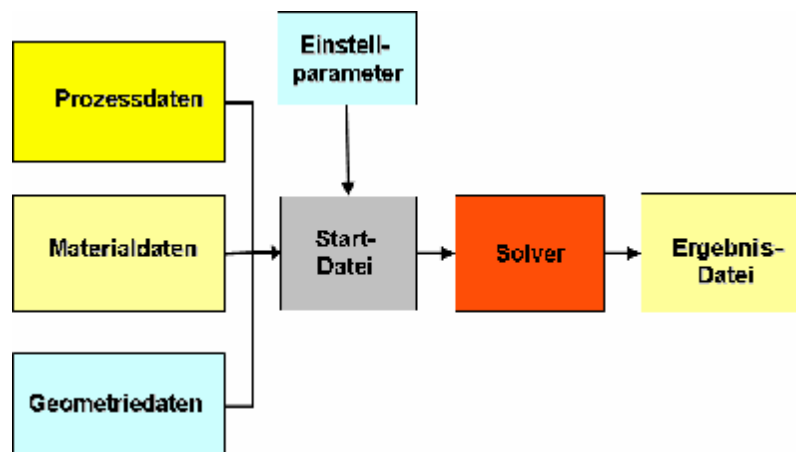


Bild 5: Abbildung der Einflussgrößen bei der Prozesssimulation

Die Umformsimulation liefert hierbei stets eine quantitative Antwort auf die Veränderung prozessbestimmender Einflussparameter. Mit Hilfe der Umformsimulation lassen sich aufwändige Erprobungsreihen auf ein notwendiges Minimum reduzieren. Aus dem

experimentellen "Try-out" wird somit ein gezieltes "Proof-Out" /9/ virtuell entwickelter bzw. optimierter Prozesse.

Zusammenspiel zwischen Werkstoff und Umformprozess

Die Frage nach der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes bzw. Werkstoffzustandes für ein umformtechnisch hergestelltes Bauteil kann entscheidend für den Erfolg eines Produktes sein. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn keine Erfahrungswerte mit ähnlichen Anwendungen vorliegen und eine neue Produktfamilie aus einer neu entwickelten Legierung hergestellt werden soll. Die Prozesssimulation ermöglicht es, neu entwickelte Umformprozesse a priori zu analysieren und mögliche Schwachstellen zu identifizieren bevor teure Werkzeugsätze angefertigt werden. Besonders kritisch sind hierbei Verfahrensgrenzen, wie das Auftreten von Rissen oder mangelnde Formtreue der umgeformten Werkstücke. Können die Schwachstellen des Verfahrens erst in der Erprobungsphase des Werkzeugsatzes erkannt werden, führt dies oft zur Schwierigkeiten bei Lieferterminen und hohen Kosten für ggf. notwendige Abhilfemaßnahmen.

Mit Hilfe der Umformsimulation können kritische Bereiche, in denen Risse entstehen können, erkannt werden und geeignete Maßnahmen bei der Herstellung und Verarbeitung der Halbzeuge abgeleitet werden. Zur Vorhersage des Werkstoffversagens bei der Umformung werden bei der FEM-Simulation unterschiedliche Methoden eingesetzt. Für die Massivumformung, d.h., der Herstellung von Bauteilen mit einem vergleichsweise niedrigen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen des Rohteils werden Berechnungsverfahren auf Basis mikro- und makromechanischer Modelle oder dem Modell der effektiven Spannungen eingesetzt /11/. Bei der Blechumformung (Bauteile aus Zuschnitten mit hohem Oberflächen/Volumen Verhältnis) ist das Konzept des Grenzformänderungsdiagrammes weit verbreitet. Die Anwendbarkeit dieses Konzeptes ist jedoch durch das Verformungsverhalten, d.h. dem Bereich der Gleichmaßdehnung und dem Verlauf der Fließkurve, bestimmt. Die Betrachtungsweise des Grenzformänderungsdiagrammes stößt jedoch bei hochfesten Blechwerkstoffen an Grenzen /6/. Eine weiterführende Betrachtung des Werkstoffversagens für die Blechumformung ist ggf. über den Einsatz von Schädigungsmodellen möglich.

Bei der Berechnung der Verfahrensgrenze wird das Maß, in dem das Formänderungsvermögen ausgeschöpft wird, durch eine Vergleichsgröße, die aus den Spannungs- und Formänderungstensor über der Umformgeschichte integriert wird, beschrieben. Der berechnete Wert ist in der Regel von der Verformungsgeschichte, d.h., dem Verlauf von Spannungen und Formänderungen, abhängig. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, dass die erreichbaren Formänderungen bei Umformprozessen, d.h., die Wahrscheinlichkeit, dass Risse im Bauteil auftreten, als Systemgröße durch Werkstoff-, Geometrie- und Verfahrensparameter beeinflusst werden. Gleichzeitig können sich diese Parameter auch wechselseitig beeinflussen.

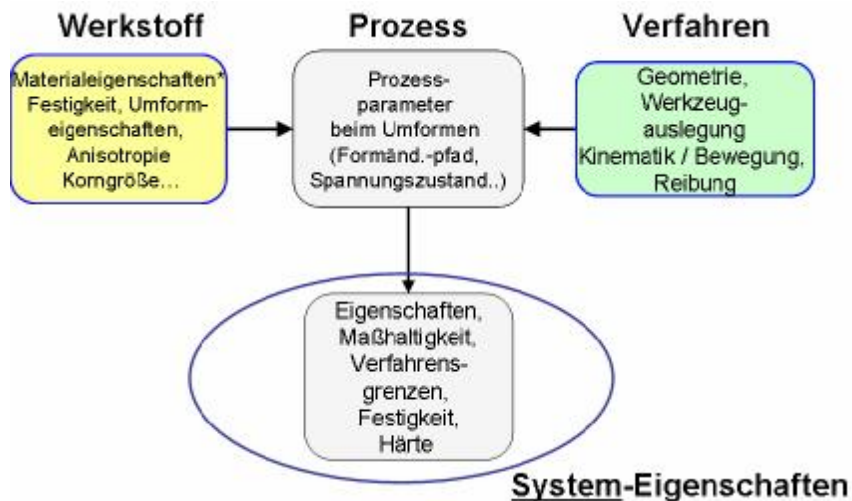


Bild 6: Einfluss von Werkstoff- und Umformverfahren auf das Ergebnis des Umformprozesses

Die Verarbeitungseigenschaften von Halbzeugen sind in den meisten Fällen abhängig von der Orientierung. Bei der Herstellung von Halbzeugen durch Umformverfahren wie Walzen oder Ziehen erfolgt eine Ausrichtung der Kristalle durch die aufgebrachte Verformung. Aus der Textur resultiert besonders bei Bandwerkstoffen ein mehr oder weniger ausgeprägtes anisotropes Umformverhalten. Das richtungsabhängige Fließverhalten des Werkstoffes kann u.U. ein entscheidender Parameter für die Weiterverarbeitung durch Tiefziehen oder Formbiegen sein.

Für die Berechnung der Rückfederung nach dem Umformen spielt die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Richtung und der aufgebrachten Formänderung eine wesentliche Rolle.

Die Möglichkeiten zur Anpassung von Umformprozess und Werkstoffeigenschaften sind in Bild 7 dargestellt. Die Werkstoffeigenschaften können bei gegebener Legierungszusammensetzung über thermo-mechanische Verfahren eingestellt werden. Über die Einstellung der Oberflächenstruktur werden das tribologische System und die Gebrauchseigenschaften beeinflusst.

Der rechte Pfad zeigt die Möglichkeiten der werkstoffgerechten Auslegung des Umformprozesses auf. Durch geeignete Einstellung der Umformparameter, der Rohteilgeometrie und des Stadienganges können Spannungen und Formänderungen gezielt gesteuert werden. Die Prozesssimulation bietet hierbei die Möglichkeit unterschiedliche Prozessvarianten vorab zu analysieren und die Ergebnisse quantitativ zu vergleichen.

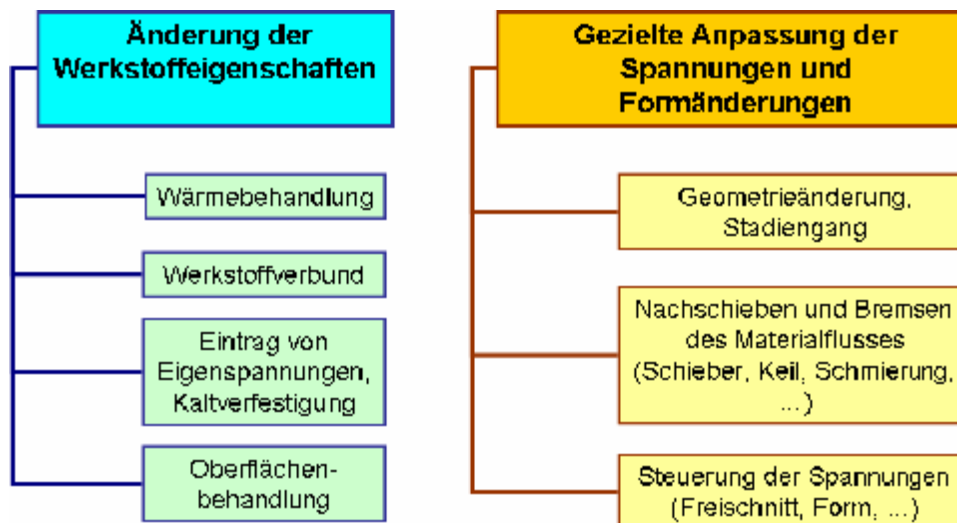


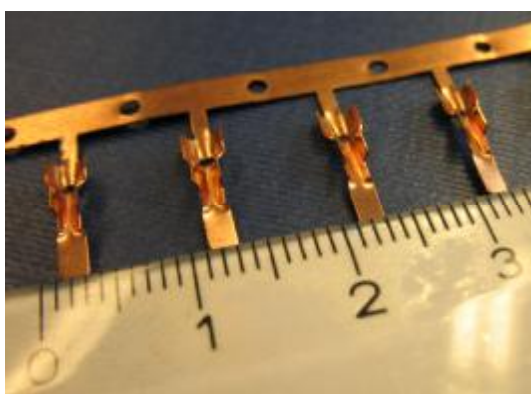
Bild 7: Werkstofftechnische und verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Optimierung von Umformprozessen

Werkstoffgerechte Umformung

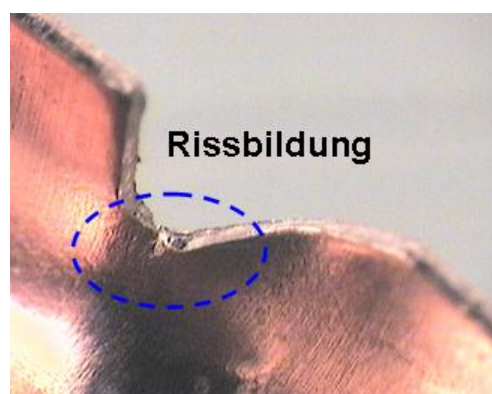
Steckverbinder aus CuNi1Co1Si (C 70350)

Das nachfolgende Beispiel zeigt die verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur Anpassung des Systems Umformprozess anhand eines Steckverbinder-Demonstratorsteils auf. Zur Untersuchung des Umformverhaltens von Hochleistungs-Steckverbinderwerkstoffen wurde ein Versuchswerkzeug konstruiert, mit dem Demonstrator-Bauteile hergestellt werden können. Bei Steckverbindern, die deutlich unterschiedliche Dimensionen im Bereich des Kabelanschlusses und des Isolators haben, wird der Werkstoff am Übergang zwischen beiden Bereichen extrem stark umgeformt, so dass es hier u.U. zur Rissbildung kommen kann.

Mit dem Versuchswerkzeug kann das Umformverhalten unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden. Einschränkungen betreffen im Wesentlichen den Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf das tribologische System sowie dynamische Effekte. Das Werkzeug weist eine Schneid- und eine Biegestation auf. Beide Operationen erfolgen abweichend von Produktionswerkzeugen in zwei separaten Durchläufen des Streifens.



Demonstrator-Bauteil eines Steckverbinders

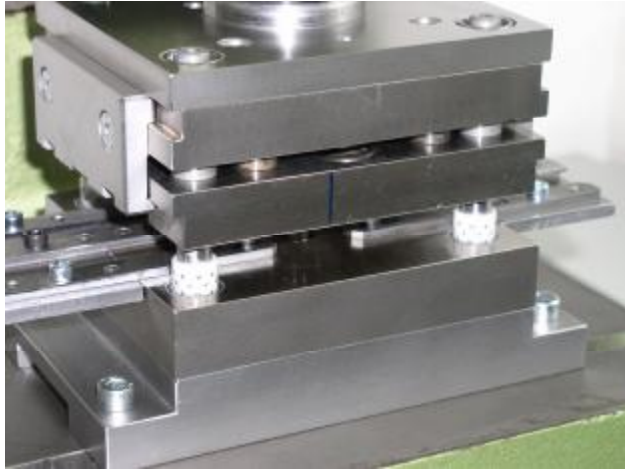


Rissbildung am Übergang von Kabelcrimp zu Isolatorcrimp

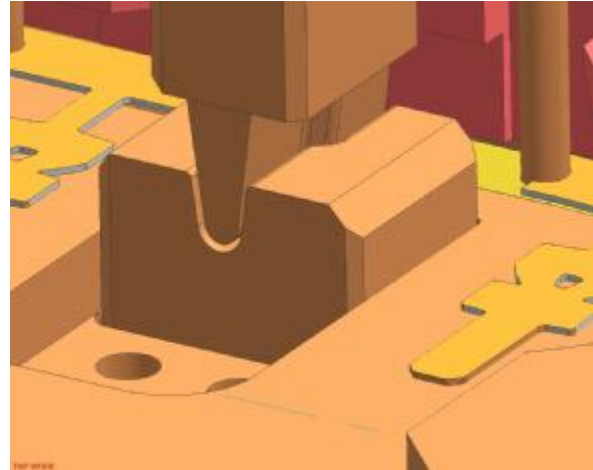
Bild 8: Rissbildung am Steckverbinder-Demonstrator-Bauteil

Die Geometrie des Demonstrator-Bauteils wurde in Anlehnung an vielfach eingesetzte Steckverbinderfamilien aus der Legierung CuNi3Si1 (C70250, Wieland-K55) für Kfz-Anwendungen entwickelt. Das in Bild 9 abgebildete Umformwerkzeug wird für die

praxisnahe Untersuchungen von Legierungs- und Herstellungsvarianten eingesetzt. Hierbei wurden nur die Bereiche des Steckers abgebildet, die für die Versagensanalyse des kritischen Bereiches bei der Umformung von Interesse sind. Das Versagen erfolgt hierbei wie in Bild 8 dargestellt durch Rissbildung am Übergang von Kabelcrimp zu Isolatorcrimp.



Gesamtansicht



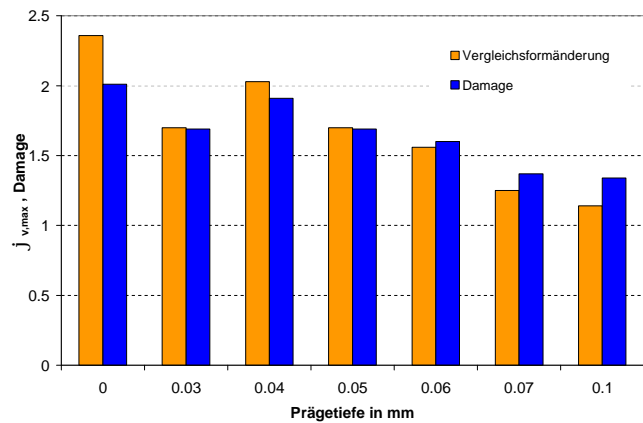
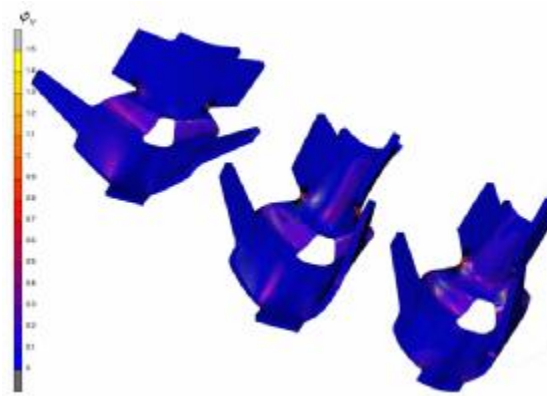
Biegestation (CAD-Modell)

Bild 9: Versuchswerkzeug für Steckverbinder-Demonstrator-Bauteil

Im Bereich der Steckverbinderentwicklung geht die Tendenz hin zu kleineren Bauteile und erhöhten mechanischen Belastungen der Komponenten. Um die geforderten Kontaktnormalkräfte bei weiter fortschreitender Miniaturisierung sicherzustellen, werden Werkstoffe mit erhöhten Festigkeitswerten wie die Legierung C70350 (Wieland-K57) entwickelt. Im Rahmen einer Studie wurde untersucht, ob das Demonstrator-Bauteil auch aus dieser Legierung rissfrei gefertigt werden kann. Die im Zugversuche erreichbaren Dehnungen (K55 Zustand R620: 15%, K57 Zustand TM06: 4%) deuten darauf hin, dass die erreichbaren Formänderungen für den Werkstoff K57 gegenüber K55 deutlich niedriger liegen.

Die Musterteile wurden zunächst mit dem Standard-Umformprozess für Bandmaterial aus dem Werkstoff Wieland-K55 gefertigt. Am Übergang vom Kabelcrimp zum Isolationscrimp traten Risse auf, die eine Ausdehnung von ca. 0.3 mm aufwiesen.

Mit Hilfe von FEM-Simulationsrechnungen wurde der Umformprozess analysiert und die Beanspruchung des Materials über einen skalaren Schädigungsparameter berechnet. Hierbei stellte sich heraus, dass der Rissentstehung eine starke Lokalisierung der Verformung an der kritischen Stelle vorausgeht. Im Rahmen der Prozessoptimierung sollte eine gezielte Entlastung der rissgefährdeten Stelle erfolgen. Hierzu wurden die benachbarten Bereiche des Bauteils durch einen Prägeprozess im Querschnitt partiell reduziert. Ziel der Simulationsrechnungen war die systematische Optimierung des Prägeprozesses in Hinblick auf eine minimale Werkstoffbeanspruchung beim Formbiegen. Bild 10 zeigt den Ablauf des simulierten Formbiegevorgangs und die berechnete Werkstoffbeanspruchung für die rissgefährdete Stelle. Mit zunehmender Prägetiefe wird die Rissstelle beim nachfolgenden Biegevorgang durch entlastet, da die umliegenden Bereiche verstärkt gestreckt werden. Für die praktische Anwendung ist die nutzbare Prägetiefe auf 0.05mm bis max. 0.1mm begrenzt.



FEM-Simulation Formbiegen

Berechnete Werkstoffbeanspruchung (Damage)

Bild 10: FEM-Simulation des Formbiegens und berechneter Einfluss der Prägetiefe auf die Werkstoffbeanspruchung ("Damage")

Das Ergebnis der Umformversuche zeigt, dass das Bauteil mit dem angepassten Prozess rissfrei umgeformt werden kann. Die hierbei auftretenden max. Formänderungen (nach von Mises) liegen mit $\phi_v \sim 1.2$ deutlich höher als die im Zugversuch erreichbaren Werte. Die in Bild 11 abgebildeten Versuchsergebnisse zeigen die Stadienfolge beim modifizierten Biegeprozess und den kritischen Bereich des umgeformten Bauteil ohne Riss.



Stadienfolge

Umgeformter Demonstrator

Bild 11: Stadienfolge beim modifizierten Biegeprozess und umgeformtes Bauteil ohne Riss

Durch den modifizierten Umformprozess wurden die Geometrie und die Bauteileigenschaften in einem Bereich verändert, der die Hauptfunktion nicht beeinträchtigt. Die aus fertigungstechnischer Sicht erforderlichen Modifikationen des Umformprozesses lassen sich von der Simulation in das CAD System zurückführen, um z.B. die Geometrie des Zuschnitts anzupassen. Das Beispiel zeigt, dass die Prozesssimulation ein geeignetes Werkzeug ist, um das Potential dieses hochfesten Werkstoffes durch werkstoffgerechte Umformverfahren auszuschöpfen.

Einfluss der Herstellung auf die Bauteileigenschaften

Das Eigenschaftsprofil umformtechnische hergestellter Bauteile wird neben den Halbzeugeigenschaften auch durch die Weiterverarbeitung beeinflusst. Für die Anwendung besteht das Ziel darin, die Halbzeugeigenschaften in das Bauteil zu übertragen.

Die Simulationsrechnung bietet die Möglichkeit durch eine Vorhersage der finalen Bauteileigenschaften die Vorteile von Kupfer-Hochleistungswerkstoffen im Einsatz zu nutzen. Hierdurch lassen sich Hinweise für eine optimale Auslegung von Bauteilgeometrie und Verarbeitungsprozess ableiten.

Federkontakt aus CuNi3Si1Mg (C 70250)

Am Beispiel eines Federkontaktes aus der Kommunikationstechnik wird die Berücksichtigung der Eigenschaftsänderung infolge Weiterverarbeitung aufgezeigt. Die Federkontakte werden üblicherweise aus ausscheidungshärtbaren CuNiSi-Legierungen wie z.B. C 70250, hergestellt. Im vorliegenden Beispiel wurde die Herstellung und Betriebsbelastung für ein Bauteil aus dem Bandwerkstoff Wieland-K55 (CuNi3Si1Mg) berechnet. Das Bauteil wird durch einen mehrstufigen Biegeprozess gefertigt.

Bild 12 zeigt schematisch die Vorgehensweise bei der gekoppelten Prozess- und Betriebslastensimulation. Von Umformsimulation werden die berechneten Zustandsgrößen in die nachfolgende Belastungsberechnung übernommen. Die thermische Belastung des Federkontaktes wird hierbei über den Larson-Miller-Parameter (LMP) beschrieben. Dieser Wert stellt ein Temperatur-Zeit Äquivalent für unterschiedliche Belastungen dar.

Für die Berechnung der Relaxation stehen je nach eingesetztem Simulationsprogramm unterschiedliche Lösungsansätze zur Verfügung. Bei der Berechnung durch eine Kriechfunktion kann die Auswirkung der Relaxation als Ergebnis in Form reduzierter Spannungen und Kräfte berechnet werden. Problematisch ist hierbei die Koppelung mit dem Materialgesetz für die vorherige Berechnung des Umformprozesses.

Alternativ lässt sich die Relaxation als zusätzliche Ergebnisgröße unter Beibehaltung des Materialgesetzes aus der Umformsimulation berechnen. Hierdurch kann der Einfluss der Formänderungen auf die Relaxation abgebildet werden. Eine Rückkopplung auf die Kontaktkräfte und Spannungen lässt sich ggf. mit Hilfe von Subroutinen erreichen.

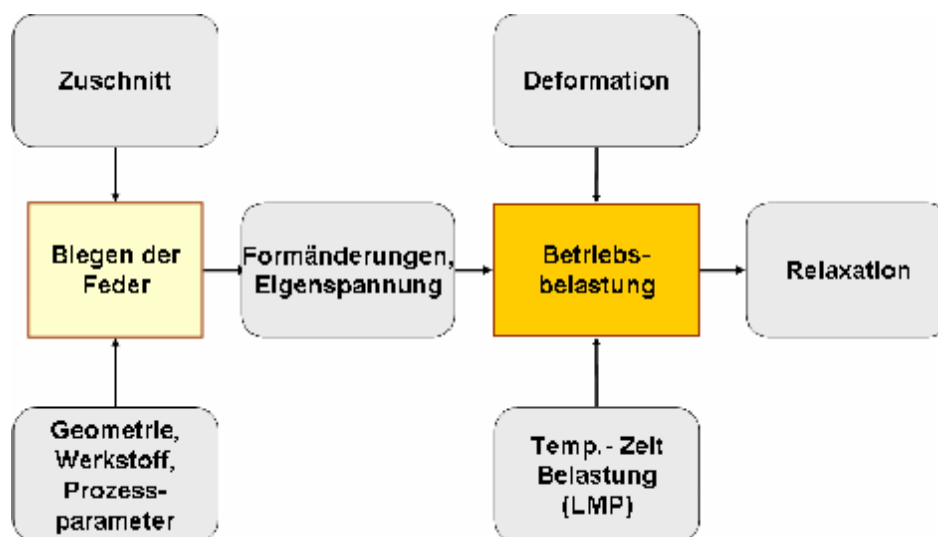
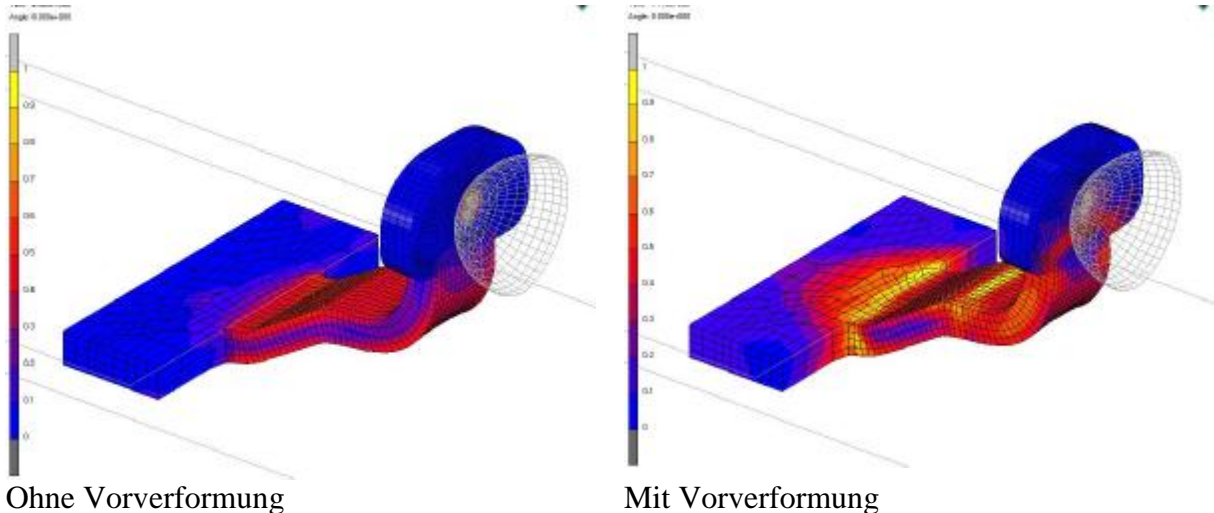


Bild 12: Ablauf der Simulationsrechnung bei der Analyse herstellungsbedingter Bauteileigenschaften am Beispiel der Relaxationsberechnung

Für die Berechnung der Relaxation des Federkontaktes wurden die thermische Relaxation und die Gesamtelaxation aus der Belastung des umgeformten Bauteils unter Einwirkung eines Larson-Miller-Parameters von $LMP = 9$ berechnet. Die mechanische Belastung wird hierbei

üblicherweise durch das Verhältnis von Biegespannung und Dehngrenze beschrieben. Durch die Berücksichtigung des Herstellungsprozesses werden die Erhöhung der Fließgrenze durch Kaltverfestigung und das Spannungsniveau beeinflusst. Bild 13 stellt die berechneten von Mises-Vergleichsspannungen für den Belastungsfall dar. Durch den Biegeprozess wird die Fließgrenze gegenüber dem unverformten Zustand erhöht. Die bezogenen Vergleichsspannungen liegen im Belastungsfall gegenüber dem unverformten Material deutlich höher.

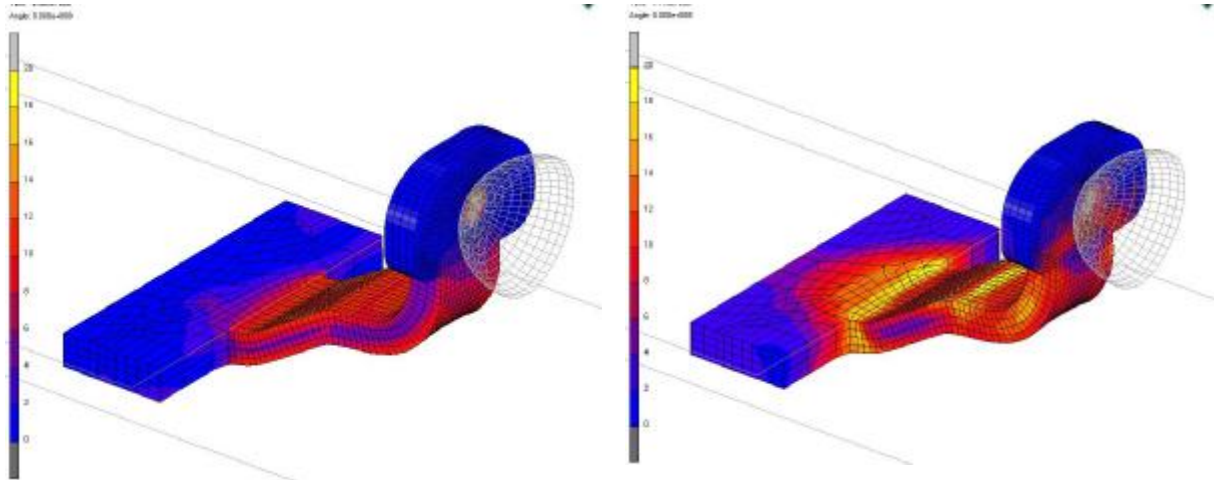


Ohne Vorverformung

Mit Vorverformung

Bild 13: Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Betriebsbelastung (normalisierte Vergleichsspannung) des Federkontaktes für den Werkstoff Wieland-K55 (CuNi3Si1Mg)

Aufgrund der erhöhten mechanischen Belastung wirkt sich die thermische Beanspruchung bei dem Bauteil mit Vorverformung auf die berechnete Relaxation aus. Gegenüber dem unverformten Zustand liegt die berechnete Gesamtrelaxation mit lokalen Höchstwerten von 20% rund 50% höher als für den unverformten Zustand.



Ohne Vorverformung

Mit Vorverformung

Bild 14: Berechnete thermische Gesamtrelaxation in % der Anfangs-Federspannung des Federkontaktes für den Werkstoff Wieland-K55 (CuNi3Si1Mg)

Die Kaltverfestigung des Materials beim Biegeprozess erhöht die relative mechanische Beanspruchung, d.h., das Verhältnis von Vergleichsspannung zu Fließgrenze. Hierdurch wird besonders die so genannte Pseudorelaxation erhöht. Dieser Effekt tritt einmalig bei der ersten mechanischen Belastung im Betriebsfall infolge lokaler plastischer Deformationen auf.

Die thermisch bedingte Relaxation wird durch die Vorverformung dagegen nur geringfügig erhöht.

Die berechneten Werte zeigen, dass die Relaxationseigenschaften umformtechnisch hergestellter Bauteile durch die vorangegangene Kaltumformung beeinflusst werden. Mit Hilfe gekoppelter FEM-Simulationsrechnungen lassen sich die hieraus resultierenden Veränderungen lokal berechnen und ggf. Hinweise für die Optimierung der Geometrie ableiten.

Literatur

- /1/ Olsen, G.B.: Computational Design of Hierarchically Structured Materials. Science, 277 (1997) S. 1237-124
- /2/ Kuhn, H.-A.; Käufler, A.; Ringhand, D.; Theobald, S.: A new high performance copper based alloy for electro-mechanical connectors. Mat.-wiss. und Werkstofftechnik 2007, 38, No.8, S. 624- 634
- /3/ Theobald, S.; Buresch, I.; Hofmann, U.: Technologische Eigenschaften und die Bedeutung der Umformbarkeit von Cu-Werkstoffen für Steckverbinder im Automotive-Bereich. Metall, 60. Jahrgang 11/2006, S. 734-737
- /4/ Lange, K.; Brückner, L.: Systemverknüpfung von Technologie und Werkstoffentwicklung am Beispiel der Blechumformung. Werkstattstechnik 78 (1988) S. 569-573
- /5/ Ringhand, D.: Werkstoff- und Produkteigenschaften am Beispiel der Kupfer-Halbzeugherstellung und -verarbeitung. 2. ICFG Workshop Eigenschaften von kalt umgeformten Bauteilen Dortmund, 10.07.2008
- /6/ Roll, K.: Möglichkeiten der Simulation von Umformvorgängen in der Blechumformung In M. Liewald (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. MatInfo Informationsgesellschaft
- /7/ Lange, K.: Moderne Umformtechnik für die industrielle Produktion. wt-Produktion und Management 85 (1995) S. 285-290
- /8/ Tekkaya, A. E.; Brosius, A.: Simulation in der Umformtechnik: Das Werkzeug für Innovationen. 14. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg, 4., 5. Dezember 2007
- /9/ Chappuis, L.: Die Auswirkung hochfester Stähle und Aluminium bei der Umstellung auf voll digitalisiert Werkzeuge. In M. Liewald (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. MatInfo Informationsgesellschaft
- /10/ Lange, K.; Wilhelm, H.: Interaction between Work-Materials and Formin Process. Annals of the CIRP, Vol. 25/2/1976, S. 531-537
- /11/ Just, H.: Erweiterung der Formgebungsgrenzen von Halbwarm-Massivumformprozessen. Shaker Verlag 2005
- /12/ Rächle, F.: Einsatz der Prozesssimulation in Werkzeugkonstruktion und Fertigung. 6. MSC.RoundTable Simulation in der Massivumformung, Oktober 2004 Bamberg