

# Untersuchung des Kraft- und Energiebedarfs beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA<sup>(1)</sup>, Severin Hönle<sup>(1)</sup>, Dr.-Ing. Manfred Sindel<sup>(2)</sup>

(1) Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart, Germany

(2) Audi AG, Postfach 1144, 74148 Neckarsulm, Germany

## Kurzfassung

*Die Bewertung eines Fertigungsprozesses hinsichtlich des Verbrauchs von Energie, Werkstoff und Hilfsstoffen erfolgt durch den Vergleich des real ausgeführten Prozesses mit dem ideellen, verlustfreien Prozess. Für das Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen ist dieser ideelle Referenzprozess jedoch nicht analytisch bestimmbar. Dieser Beitrag untersucht die zum Maschinenfalzen notwendigen Kraft- und Energieverbrauchswerte anhand einer experimentellen Versuchseinrichtung. Somit wird ein wesentlicher Baustein zur zukünftigen Bilanzierung und Bewertung des Maschinenfalzens geleistet.*

## Einleitung

Der Nachhaltige Umgang mit den natürlichen Ressourcen und die Verringerung der Umweltbelastung durch Schadstoffemissionen zählen zu den wichtigsten wirtschafts-politischen Herausforderungen unserer Zeit. Der Bedarf an fossiler, thermischer und elektrischer Energie ist neben den Personal- und Maschinenkosten ein wesentlicher Produktionsfaktor [01]. Die Produktion von Industriegütern ist ohne die Bereitstellung von Energie nicht möglich. Im Zeitraum von 1995 bis 2005 ist der Bedarf an Energie um 14 % angestiegen [02]. Der größte Anteil entfällt auf die industrielle Nutzung. Auf Basis des derzeitigen Energiemixes ergibt sich somit der Beitrag der Industrie zur gesamten CO<sub>2</sub>-Emission zu circa 38 % [03].

Die Begrenzung der Klimaerwärmung erfordert die drastische Verringerung der Emission von Treibhausgasen. In Deutschland sollen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 um 40 % gegenüber dem Jahr 1990 gesenkt werden. Bei dieser Initiative zum Umweltschutz muss auch der ökonomische Zusammenhang ausreichend berücksichtigt werden [04]. Die ordnungspolitischen Instrumente zur Förderung oder zur steuerlichen Regulierung eignen sich nur bedingt zur Steuerung des Umweltschutzes im industriellen Umfeld. Die ökologischen Entscheidungen während der Entwicklung und Produktion von neuen Erzeugnissen sollten verstärkt auf Basis von technologischen Aspekten, als auf Druck der Gesetzgebung erfolgen [04].

Im immer dynamischeren Wettbewerb hat bereits eine Vielzahl von Unternehmen im Umweltschutz einen zukunftsorientierten Erfolgsfaktor erkannt. Untersuchungen zeigen, dass 60 % der deutschen Unternehmen die Steigerung der Energieeffizienz als Wettbewerbsvorteil bewerten [05]. Die generische Wettbewerbsstrategie nach M. E. Porter [06], welche zur erfolgreichen Positionierung im Wettbewerb die drei Möglichkeiten: Kostenführerschaft, Differenzierung oder Konzentration auf Schwerpunkte nennt, kann somit auf eine ökologieorientierte Basisstrategie angewendet werden. Das Ziel der Kostenführerschaft kann beispielsweise durch eine effizientere Nutzung der eingesetzten Energie erreicht werden [07]. Hierzu sind generell zwei Vorgehensweisen möglich [08, 09, 10]. Zum einen durch die Optimierung des Produktes beispielsweise durch modifizierte Bauteilgeometrie [11, 12]. Zum anderen durch Prozessoptimierung, die den Werkstoffeinsatz oder den Energieaufwand

minimieren [13]. Die Einsparung von Energie und natürlichen Ressourcen führt demnach sowohl zu einem Kostenvorteil für das Unternehmen als auch zu einem nachhaltigen Umweltschutz.

## Problemstellung

Ein wirksames Instrument zur Planung und Umsetzung von Zielen zur Reduktion des Energiebedarfs und der Umweltbelastung stellt die Ermittlung der Energieeffizienz eines Prozesses dar. Dieser Kennwert erlaubt zum einen die Charakterisierung eines bestehenden Prozesses auf Basis der Differenz zwischen Istzustand und optimaler Prozessführung. Zum anderen ist es möglich verschiedene Szenarien während der Produktionsplanung hinsichtlich der zu erwartenden Kostenreduktion zu bewerten [01]. Durch die detaillierte Betrachtung der Prozesskette und die Erfassung aller Energieverbraucher ist auch die Bewertung von effizienzsteigernden Einzelmaßnahmen im bestehenden Prozess möglich.

Die Charakterisierung eines Prozesses mit Hilfe des Kennwerts der Energieeffizienz erfordert sowohl die Messung des Energiebedarfs des bestehenden Prozesses bzw. die Ermittlung des Energiebedarfs in der virtuellen Produktplanung auf Basis eines geplanten Produktionsprozess als auch die Kenntnis über den optimalen Herstellvorgang. Der Wirkungsgrad des Prozesses, d.h. die Effizienz der Energienutzung, ergibt sich aus dem Quotienten des ideellen Energieeinsatzes im optimalen Prozess und dem gesamt zurechenbaren Energieeinsatz des geplanten bzw. umgesetzten Prozesses [01]. Zum gesamt zurechenbaren Energieeinsatz zählen der direkte Einsatz von Energie für Aggregate, Antriebe und Bauteilerwärmung im betrachteten Prozess, externe Prozesse wie beispielsweise die Halbzeug-Konfektionierung sowie der Verbrauch von Hilfs- und Betriebsstoffen. Der optimale Prozess zur Herstellung eines Produktes bzw. eines Zwischenproduktes stellt einen verlustfreien Prozess dar. Die hierfür benötigte Energie basiert auf den physikalischen Eigenschaften des Verfahrens, den Werkstoffeigenschaften des Werkstücks sowie der Ausgangs- und Endgeometrie des Werkstücks [01].

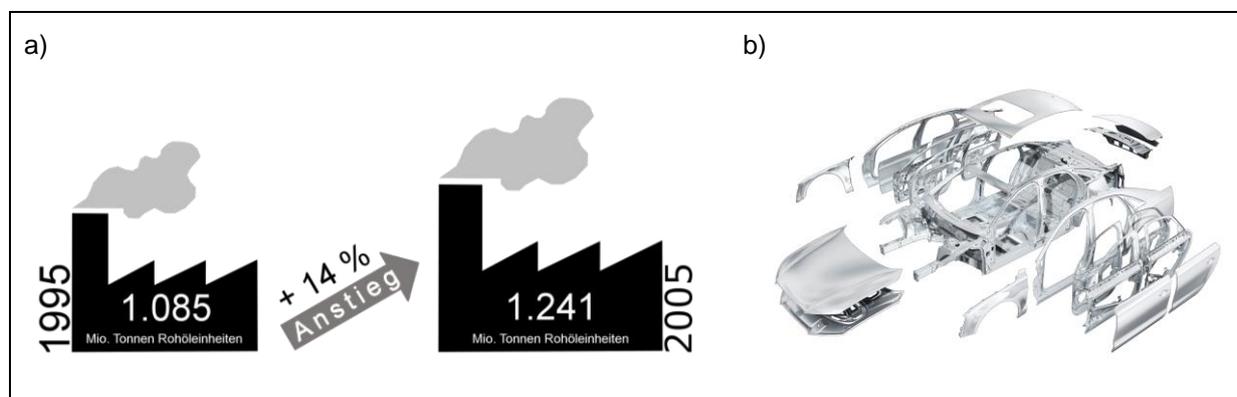


Abbildung 1: a) Entwicklung des Energiebedarfs der europäischen Union im Zeitraum zwischen 1995 und 2005 in Mio. Tonnen Rohöleinheiten nach [02]  
b) Moderne PKW-Karosserie in Mischbauweise [14]

In der Fachliteratur wird für zahlreiche Fertigungsprozesse, die meist auf einfachen Umformvorgängen basieren, die Methode zur Bestimmung der ideellen Energie angegeben. Diese Berechnungsmethoden resultieren aus analytischen Betrachtungen des Umformvorgangs. Für komplexere Herstellprozesse ist eine solch einfache Betrachtung jedoch nicht möglich. Die Bestimmung der ideellen Umformenergie eines komplexen Prozesses, der meist aus mehreren verschiedenen Umformvorgängen besteht, lässt sich durch numerische Untersuchungen mit Hilfe der FE-Simulation durchführen. Hierzu muss der betrachtete Prozess exakt erfasst und modelliert sowie berechnet werden. Problematisch sind hierbei vor allem die Bereitstellung zutreffender Reibungszahlen sowie die Modellierung der Werkstoffverfestigung unter mehrachsiger Belastung in der Simulation. Zur experimentellen Ermittlung der ideellen Energie werden einfache

Vergleichsprozesse betrachtet und analysiert. Diese Vergleichsprozesse erlauben die messtechnische Erfassung des für die Prozessführung zwingend notwendigen Material- und Energieeinsatzes unter Berücksichtigung der realen Reibungszustände und Werkstoffeigenschaften. Auf diese Weise können prozesstypische Kraft-Weg Verläufe bestimmt werden [15].

Während für zahlreiche Herstellprozesse, wie beispielsweise das Stauchen zylindrischer Werkstücke [16, 17], die Ansätze zur Bestimmung des ideellen Energieeinsatzes für einen dezidierten Umformvorgang bekannt sind, lässt sich die Effizienz des Prozesses zur Herstellung eines Karosserieanbauteils z.B. Türen, Frontklappe auf Grund der fehlenden Kenntnis des optimalen Prozesses nicht exakt feststellen. Vor allem das Ende der Prozesskette, bestehend aus dem Abstellen des tiefgezogenen Blechteils und dem anschließenden Falzvorgang zur Verbindung des Außenteils mit dem Strukturteil, ist bisher nicht erfasst.

Dieser Beitrag betrachtet die aus der physikalische Prozesseigenschaft und der Werkstoffeigenschaft resultierende, zwingend erforderliche Energie zur Herstellung von Karosserieanbauteilen aus Aluminium durch den Prozessschritt Falzen. Hierbei wird der Falzprozess mit den einzelnen Umformvorgängen Abstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen untersucht. Zur Ermittlung der ideellen Energie werden experimentelle Untersuchungen an einer am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart zu Verfügung stehenden Falzversuchsvorrichtung durchgeführt. Diese Ergebnisse bilden einen wesentlichen Baustein für die energetische Bilanzierung des kompletten Herstellprozesses von Karosserieanbauteilen aus Aluminium.

## **Stand der Technik**

### *Energetischer Wirkungsgrad von Prozessen*

Die Bewertung von negativen Auswirkungen auf die Umwelt, die in Folge der Produktion, der Nutzung und der Entsorgung eines technischen Produktes bzw. Teilproduktes entstehen, kann durch zahlreiche, von verschiedenen Institutionen entwickelte Methoden erfolgen. Hierzu zählen produktbezogene Ansätze wie der kumulierte Energieaufwand oder die Erstellung der Ökobilanz des hergestellten Produktes. Die Bewertungszahlen dienen als Entscheidungskriterium für die Produktionsplanung hinsichtlich des ökologischen Anspruchs des Produktes während der Auslegung des Herstellprozesses [18, 01].

Der kumulierte Energieaufwand (KEA) ist ein Kennwert für den Energiebedarf eines Produktions- oder Dienstleistungssystems [19]. Der Kennwert ist als die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands der in Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Gutes entsteht. Der KEA eines technischen Produktes ergibt sich somit aus dem kumulierten Aufwand für die Herstellung  $KEA_H$ , für die Nutzung  $KEA_N$  und die Entsorgung  $KEA_E$  zusammen. Der ermittelte Energieaufwand stellt eine quantifizierbare Größe zur energetischen Beurteilung von Produkten bzw. deren Vergleich dar. Eine Aussage über die Effizienz der Herstellprozess kann jedoch nur bedingt getätigt werden [01, 20].

Zur Bewertung der Effizienz von Prozessen und Prozessketten wird in [01] ein ganzheitlicher, produktbezogenen Ansatz vorgestellt. Der Wirkungsgrad von Prozessen orientiert sich dabei am konventionellen Wirkungsgrad von Maschinen, der sich aus dem Quotienten aus Nutzen und Aufwand berechnet. Nach [01] beinhaltet jeder Prozess einen spezifischen notwendigen Energie- und Materialeinsatz. Diese ideale Prozessenergie, die in der physikalischen Gesetzmäßigkeit der Prozess begründet ist, stellt den Nutzen des jeweiligen Prozesses dar. Der Aufwand zur Durchführung des realen Prozesses, der sogenannte gesamt zurechenbare Energieeinsatz, ergibt sich aus dem direkten Energiebedarf, dem Verbrauch von Hilfs- und Betriebsstoffen und dem Energiebedarf von externen, jedoch dem eigentlichen Prozess zuordenbaren, Prozessen. Der Wirkungsgrad eines Prozesses ergibt sich somit zu:

$$\eta_{\text{Prozess}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{ideelle Energieeinsatz}}{\text{gesamter zurechenbarer Energieeinsatz}} = \frac{W_{\text{id,Prozess}}}{KEA_{\text{Prozess}}}$$

Die ideale Energie basiert auf den physikalischen Eigenschaften des Prozesses und des eingesetzten Werkstoffs sowie auf der Prozesstemperatur, chemischen Umwandlungsvorgängen und Ausgangs und Endgeometrie des Werkstücks. Der ideale Prozess selbst wird als verlustfrei hinsichtlich Werkstoff und Energie betrachtet. Die Berechnung der prozessspezifischen idealen Energie erfolgt durch theoretische Ansätze. Zu den bekannten Ansätzen zählen hierbei die Methoden zur Bestimmung der Arbeit beim verlustfreien Umformen eines zylindrischen Werkstücks nach [16] und beim Fließpressen nach [21]. Die Bestimmung der Umformkräfte und der zur Herstellung eines Werkstücks benötigten Umformenergie bei komplexen Herstellverfahren wie beispielsweise Tiefziehoperationen oder Karosserieziehvorgängen, die in der Blechumformung zur Herstellung von PKW-Karosserieteilen angewendet werden, erfolgt durch numerische Betrachtung. Hierzu wird der Prozess in der FE-Simulation modelliert und mit Hilfe der hinterlegten Werkstoffkennwerte und Reibmodelle gelöst. Die Prozessgrößen, maximaler Kraftbedarf und Umformenergie, lassen sich somit bereits während der Planung des Herstellprozesses ermitteln. Prozessketten oder Einzelprozesse, die sich auf Grund ihrer Komplexität und den oftmals messtechnisch nicht bestimmbar Prozessgrößen [22] bzw. deren unzureichende Abbildung in der Umformsimulation weder mit analytischen noch numerischen Methoden berechnen lassen, müssen experimentell analysiert werden. Hierzu wird die Prozesskette zunächst abstrahiert und in einfache Versuchseinrichtungen überführt. Die Versuchseinrichtungen stellen dabei die prozessnahe Abbildung des Umformvorgangs unter definierten, verlustfreien und reproduzierbaren Bedingungen sicher. Dies ermöglicht die verlustfrei Betrachtung des Umformvorgangs und somit die Bestimmung der idealen Umformarbeit.

#### *Prozesskette zur Herstellung eines Karosserieanbauteils*

Im modernen Automobilbau für Großserienfahrzeuge stellt die Blechschalenbauweise die am weitest verbreitete Karosseriebauweise dar. Dabei werden umgeformte Blechteile aus Aluminium oder Stahl zu einer selbsttragenden Struktur gefügt. Auf Grund des hohen Invests in Werkzeuge und Anlagen und den vergleichsweise geringen Werkstoffkosten stellt die Schalenbauweise ein wirtschaftliches Fertigungskonzept für hohe Stückzahlen dar [23].

Eine Fahrzeugkarosserie besteht aus den wesentlichen Komponenten der tragenden Struktur der Rohkarosse und den Anbauteilen wie Türen, Klappen und den Vorderkotflügeln. Die Karosseriestruktur dient der Aufnahme aller Antriebsaggregate und der Achsmodule [24]. Des Weiteren werden alle statischen und dynamischen Kräfte während des Fahrens und beim Fahrzeugcrash von der Struktur aufgenommen. Die sich aus diesen Aufgaben ableitenden Anforderungen an die Strukturfestigkeit, hohe Energieaufnahme und großer Widerstand gegen Torsion und Biegung, stellen einen wesentlichen Aspekt während der Gestaltung des Fahrzeugpackages und der Festlegung der Fahrzeugmaße dar. Bei der Auslegung von Anbauteilen sind zwei wesentliche Aspekte zu beachten. Zum einen leisten die Anbauteile, mit Ausnahme der Türen, nur einen geringen Beitrag zum Crashkonzept des Fahrzeugs. Die Substitution von konventionellen Stahlwerkstoffen durch moderne Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium oder Magnesium, die eine geringere Festigkeit besitzen, scheint somit möglich [24]. Zum anderen bestimmen die Karosserieanbauteile auf Grund ihres hohen Anteils der sichtbaren Fläche des Fahrzeugs die Wahrnehmung des Kunden maßgeblich. Sie sind somit wesentliche Komponenten des Fahrzeugdesigns [25].

Die Anbauteile heutiger PKW-Karosserien sind meistens in Schalenbauweise ausgeführt. Die Struktursteifigkeit wird durch große, hohle Blechquerschnitte erzeugt. Während diese Querschnitte im Bereich der Karosseriestruktur durch Niete, Kleben und Schweißen von zwei geformten Blechbauteilen erzeugt wird, erfolgt das Fügen des bauteilversteifenden Innenblechs mit dem gestrahten Außenblech von Anbauteilen durch Falzen.

Das Falzen gehört zu den Fügeverfahren durch Umformen nach DIN 8593. Es ist als „... Fügen durch Umformen derart, dass an ihren Rändern vorbereitete Blechteile ineinandergelegt ... und durch Umlegen der Ränder einen Formschluss erhalten“. Zur Herstellung der Verbindung wird das tiefgezogene Außenblech während des Abstellens um 90° gebogen. Anschließend wird das Innenblech in das abgestellte Außenblech an eine definierte Position eingelegt. Dieser Vorgang wird als Schachteln bezeichnet. Die formschlüssige Verbindung von Außen- und Innenblech wird durch das Biegen des Bauteilflansches auf das Innenblech hergestellt [26]. Das Umbiegen des Flansches kann in einem oder in mehreren Falzstufen erfolgen. Der prinzipielle Ablauf des Falzens ist in Abbildung 2 dargestellt.

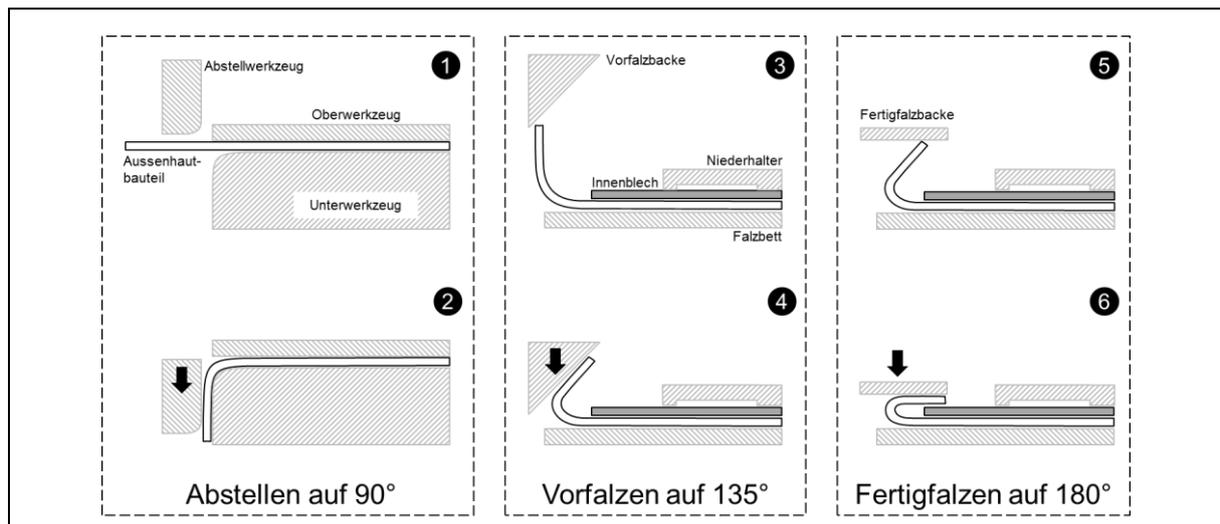


Abbildung 2: Prozessablauf beim Falzen von Karosserieanbauteilen (Zeitphasen 1-6)

Zum Falzen von Karosserieanbauteilen, z. B. Türen, werden Maschinen- oder Rollfalzanlagen eingesetzt [27]. In beiden Prozessvarianten wird das geschachtelte Bauteil durch eine Niederhaltung auf dem Falzbett fixiert. Beim Maschinenfalzen werden zum Vor- und Fertigfalzen starre Werkzeuge verwendet, die auf einer gemeinsamen Vorrichtung oberhalb des Bauteils angeordnet sind. Die Vorrichtung wird zunächst durch den Antrieb in Richtung Falzbett bewegt, wodurch das Außenblech vorgefalzt wird. Nach der Rückbewegung der Vorrichtung in die Ausgangsposition werden die Positionen der Vorfalzbacke und der Fertigfalzbacke automatisch gewechselt, so dass im folgenden Vorrichtungshub das Fertigfalzen stattfinden kann. Beim Vor- und Fertigfalzen wird die Biegung des Flansches durch einen linienförmigen Kontakt zwischen Bauteilflansch und Falzwerkzeug hervorgerufen. Dabei wird der Flansch entlang des gesamten Bauteilumrisses gleichzeitig gebogen. Im Gegensatz hierzu wird beim Rollfalzen das Falzwerkzeug, die sogenannte Falzrolle, durch einen Industrieroboter entlang des Umrisses des Bauteils geführt. Die Umformung erfolgt somit inkrementell. Der Umformvorgang wird durch die Lage der Rolle zum Bauteil gesteuert. Der Prozess lässt sich anhand dieser Stellgrößen und der Anzahl der zu fahrenden Roboterbahnen, meist drei oder vier, ebenfalls in die Einzelschritte Vorfalzen und Fertigfalzen unterteilen.

### Experimentelle Ermittlung des ideellen Energiebedarfs von Maschinenfalzprozessen

#### Zielsetzung

In diesem Beitrag wird der ideelle Energiebedarf beim Maschinenfalzen von Aluminiumblechwerkstoffen experimentell ermittelt. Hierbei werden die Prozessschritte des Maschinenfalzens (Abstellen, Vor- und Fertigfalzen) getrennt untersucht. Aus den gemessenen Kraft-Weg-Kurven der einzelnen Umformschritte wird der gesamte ideelle Energiebedarf berechnet.

## Versuchseinrichtung

Zur Untersuchung von Maschinenfalzprozessen stand im Rahmen dieser Arbeit eine Versuchsvorrichtung zum Abstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen von vorgedehnten Blechproben zur Verfügung. Die Vorrichtung besteht aus einer oberen Werkzeugkomponente, die mit verschiedenen Abstellwerkzeugen, Vor- und Fertigfalzbacken ausgerüstet werden kann, und einer unteren Werkzeugkomponente, die das Falzbett und den Niederhalter trägt. Die Position des Abstellwerkzeuges und der Falzbacken lässt sich sowohl horizontal als auch vertikal anpassen [28]. Somit ist die Untersuchung zahlreicher Prozessführungen möglich. Die Falzversuchseinrichtung ist in Abbildung 3 a) dargestellt.

Beim Abstellen betrug der Radius an der Abstellmatrize 1,0 mm. Der Abstellspalt wurde vor der Versuchsdurchführung manuell auf die Nennblechdicke der Blechprobe eingestellt. Die Länge des Flansches nach dem Abstellen beträgt 8,7 mm. Die Vorrichtung wurde anschließend für den Vorfalzvorgang vorbereitet und mit einer ebenen, um 45 Grad geneigten Vorfalzbacke ausgerüstet. Die abgestellte Probe wurde zusammen mit dem Innenblech in das Falzbett eingelegt und durch den Niederhalter fixiert. Die Geschwindigkeit der Vorfalzbacke während des Experiments wurde auf den konstanten Wert von 100 mm/min festgelegt. Diese Geschwindigkeit ist vergleichbar mit der üblichen Prozessgeschwindigkeit beim industriellen Maschinenfalzen. Der Restschließwinkel der vorgefalteten Probe nach der Rückfederung beträgt 54 Grad. Abschließend wurden die Proben fertiggefalzt. Hierzu wurde die Vorfalzbacke durch eine ebene, zum Innenblech parallele Fertigfalzbacke ersetzt. Die Geschwindigkeit der Backe beim Fertigfalzen beträgt ebenfalls 100 mm/min. Der Fahrweg der Falzbacke endete bei Erreichen des vorgegebenen Kraftmaximums von 6.800 N.

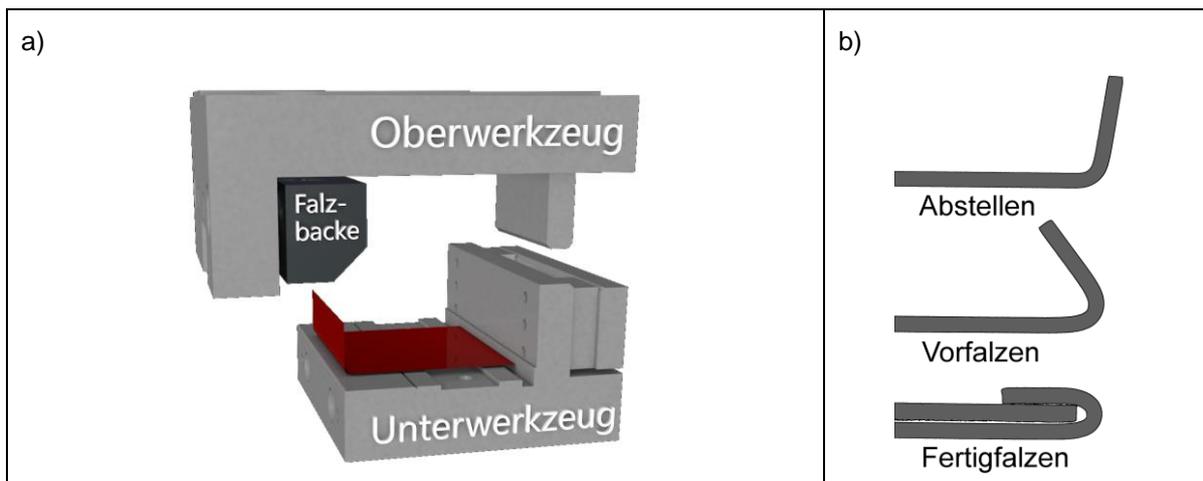


Abbildung 3: a) Falzversuchseinrichtung mit eingebauter Vorfalzbacke  
b) Schilfbilder einer abgestellten, vorgefalteten und fertiggefalteten Blechproben

## Probenpräparation

Die für diese Untersuchung ausgewählte Aluminiumblechlegierung der 6000er Serie stellt eine typische Legierung für Außenhautteile im Automobilbau dar. Es handelt sich dabei um aushärtbare AlMgSi-Legierung mit guter Korrosionsbeständigkeit und guter Umformbarkeit im T4-Zustand [29, 30]. Die wichtigsten technologischen Werkstoffkennwerte sind in Tabelle 1 angegeben.

Die Platinezuschnitte des Außenblechs der Nennblechdicke wurden zunächst um 10% uniaxial mit Hilfe einer Zugprüfmaschine vorgedehnt und anschließend auf definierte Probenmaße (Länge: 88,2 mm, Breite: 40 mm) zugeschnitten. Das eingesetzte Innenblech wurde auf dieselbe Breite, jedoch 12 mm kürzer zugeschnitten.

E-Modul	68,7 GPa
Streckgrenze Rp0,2	129 MPa
Zugfestigkeit Rm	242 MPa
Gleichmaßdehnung	21,7 %
Verfestigungsexponent n <sub>4%-6%</sub>	0,273
Verfestigungsexponent n <sub>10%-15%</sub>	0,249

Tabelle 1: Technologische Werkstoffkennwerte der verwendeten A6016 Legierung

### Experimentelle Ergebnisse – Umformkräfte beim Maschinenfalzen

Während des Abstell- und Falzprozesses werden die jeweiligen Kraft-Weg-Kurven mit Hilfe der Druckprüfmaschine ermittelt und aufgezeichnet. Auf Basis dieser Messkurven kann die zur Umformung der Blechprobe notwendige Umformarbeit nach [31] aus Gleichung 1 bestimmt werden.

$$W_U = \int F_{(s)} ds \quad (1)$$

In Abbildung 4 a) ist die Entwicklung der Abstellkraft in Abhängigkeit des Werkzeugweges dargestellt. Dieser charakteristische Verlauf wird auch in [32, 33, 34] beobachtet. Der Abstellvorgang lässt sich in drei Teilbereiche unterteilen. Der Anstieg der horizontalen Kraft bis zum maximalen Wert  $F_{\max 1}$  stellt den größten Teil der Umformung dar, während dessen die Blechprobe um den Abstellradius gebogen wird. Das Anlegen des Flansches an der Matrize ist durch den Kraftabfall im zweiten Bereich zu erkennen. Liegt der gesamte Flansch an die Matrize an, siehe Bereich 3, ist zur weiteren Bewegung der Abstellbacke nur die Reibungskraft zwischen Abstellbacke und Flansch zu überwinden. Aus diesem Grund sinkt der Kraftbedarf am Ende des Abstellens nicht auf 0 N ab

Der gemessene Verlauf der Umformkraft beim Vorfalzen ist in Abbildung 4 b) dargestellt. Ein ähnlicher Verlauf beim Vorfalzen wurde auch in [35] für Stahlwerkstoffe festgestellt, jedoch auf einem anderen Kraftniveau. Für einen Aluminiumwerkstoff wird der Kraftverlauf in [32] mit nahezu identischem Kraftniveau beobachtet. Der charakteristische Verlauf lässt sich in drei Teilbereiche gliedern. Im ersten Bereich besteht kein Kontakt zwischen abgestelltem Flansch und Werkzeugbacke, die reibungsfreie Bewegung des Werkzeugs erfordert keine Kraft. Im weiteren Verlauf wird der nach dem Abstellen zurückgefederter Bauteilflansch zunächst auf 90 Grad Restschließwinkel zurück gebogen. Im Anschluss wird der Bauteilflansch durch die Bewegung der Vorfalzbacke weiter in Richtung des Innenblechs gebogen. Die Umformung findet dabei in den durch das Abstellen noch nicht kaltverfestigten Bereichen der Probe statt. Der Kraftabfall der Kurve ist auf den geringeren Kraftbedarf in Folge der Verschiebung der Umformzone und den veränderten geometrischen Bedingungen der Krafteinleitung zurück zu führen.

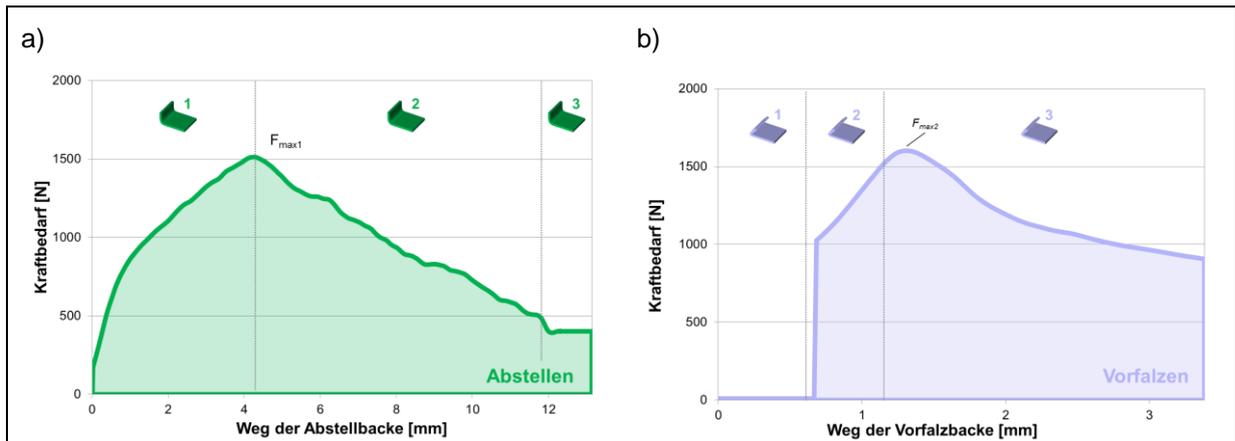


Abbildung 4: a) Gemessener Kraftbedarf zum Abstellen einer 40 mm breiten Aluminiumprobe (A6016, Nennblechdicke: 1,04 mm)  
 b) Gemessener Kraftbedarf zum Vorfalzen ein 40 mm breiten Aluminiumprobe (A6016, Nennblechdicke: 1,04 mm)

Zur Kompensation der Rückfederung wird in [32] die Werkzeugbewegung bei Erreichen des Sollwinkels nicht gestoppt. Dies führt zu hohen Druckkräften im Bereich des umgeformten Radius der Probe. Für den nachfolgenden Schritt des Fertigfalzens ist das exakte Erreichen eines Restschließwinkels von 45 Grad jedoch nicht zwingend notwendig, weshalb hier auf diesen Schritt verzichtet wird. Die in diesem Versuch gewählte Wegstrecke endet bereits vor dem Kontakt von Falzbacke mit dem Bauteilradius.

Den Kraftbedarf zum abschließenden Fertigfalzen der Blechprobe zeigt Abbildung 5. Im ersten Moment des Kontaktes von Bauteilflansch und Falzbacke entsteht am Kontaktpunkt eine hohe Reibung. Die freie Flanschlänge zwischen dem kaltverfestigten Radienbereich und dem Kontaktpunkt an der Falzbacke wird im weiteren Verlauf der Werkzeugbewegung gestaucht und gebogen. Bei Erreichen des Kraftmaximums am Ende der zweiten Phase beginnt der Flansch auf Grund der geometrischen Verhältnisse auf der Fertigfalzbacke zu gleiten. Im weiteren Verlauf nimmt die Distanz zwischen Krafteinleitungsbereich und Umformzone zu, die notwendige Umformkraft sinkt dementsprechend. Am Ende des Fertigfalzens ist das vorgegebene Packmaß erreicht und der Kraftbedarf steigt in Folge der erhöhten Flächenpressung drastisch bis zum durch die Falzvorrichtung definierten Kraftmaximum (6800 N) an.

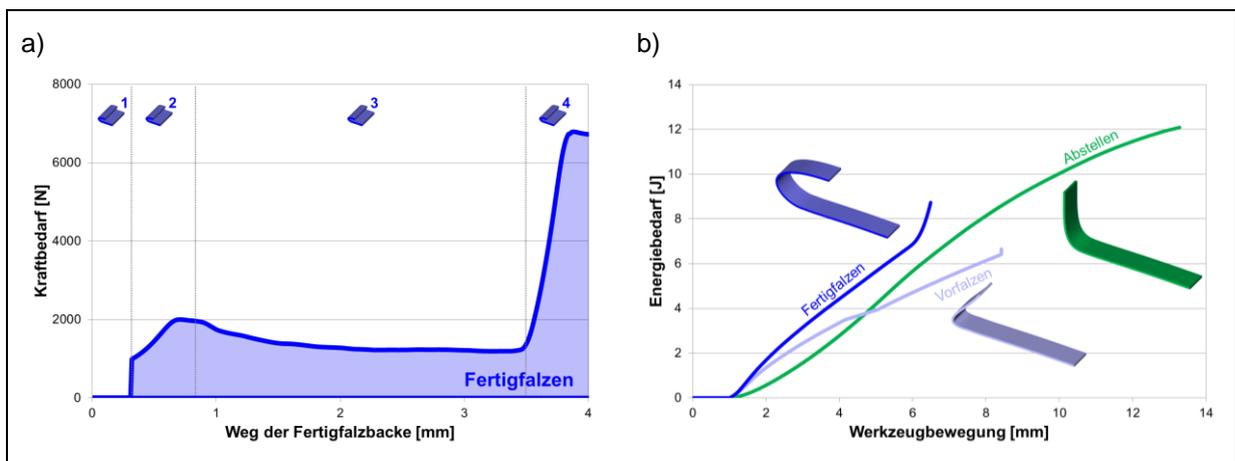


Abbildung 5: a) Gemessener Kraftbedarf zum Fertigfalzen einer 40 mm breiten Aluminiumprobe (A6016, Nennblechdicke: 1,04 mm)  
 b) Experimentell ermittelter Energiebedarf zum Abstellen, Vorfalzen und Fertigfalzen (A6016, Nennblechdicke: 1,04 mm)

## Experimentelle Ergebnisse – Umformarbeit beim Maschinenfalzen

Auf Basis der gemessenen Kraftverläufe beim Abstellen und Falzen kann die ideale Prozessenergie ermittelt werden. Hierzu werden die ermittelten Werte auf die Breite der Blechproben (40 mm) normiert. Auf die Substitution der Maßeinheit J/mm durch mN (Millinewton) wird zur eindeutigen Kennzeichnung des normierten Energiebedarfs verzichtet.

Prozessschritt	Abstellen	Vorfalzen	Fertigfalzen
<b>Biegewinkel</b>	80 °	46 °	54 °
<b>Maximaler Kraftbedarf</b>	1.510 N	1.600 N	6.790 N
<b>Normierter maximaler Kraftbedarf</b>	38 N/mm	40 N/mm	170 N/mm
<b>Energiebedarf</b>	12.090 mJ	6.670 mJ	8.730 mJ
<b>Normierter Energiebedarf</b>	224 mJ/mm	167 mJ/mm	218 mJ/mm
<b>Normierter Energiebedarf / Biegewinkel</b>	2,8 mJ/mm pro Grad	3,6 mJ/mm pro Grad	4,0 mJ/mm pro Grad

Tabelle 2:

Die normierte Arbeit zum Abstellen auf 90 ° bzw. 80 ° nach der Rückfederung beträgt 224 mJ/mm. Die Energieaufnahme steigt zunächst gleichmäßig an. Der Verlauf nähert sich am Ende des Prozesses asymptotisch einem Grenzwert an. Dies ist durch den geringen Kraftbedarf am Prozessende, wie in Abbildung 4 a) dargestellt, und dem damit einhergehenden geringen inkrementellen Energieaufwand zu erklären. Im Vergleich zum Abstellen wird beim Vorfalzen ein deutlich geringerer Biegewinkel erzielt, die benötigte Arbeit ist demnach auch nur halb so groß. Der Energiebedarf beim Vorfalzen steigt über den gesamten Prozess gleichbleibend an. Auf Grund des erhöhten Kraftniveaus beim Fertigfalzen steigt die Energiebedarfskurve in diesem Prozessschritt vergleichsweise stark an. Vor allem zu Prozessende führt die hohe Flächenpressung zwischen Falzwerkzeug und Falzschlaufe zu einem hohen Anstieg. Die normierte Arbeit zum Fertigfalzen der Aluminium Blechproben beträgt 218 mJ/mm.

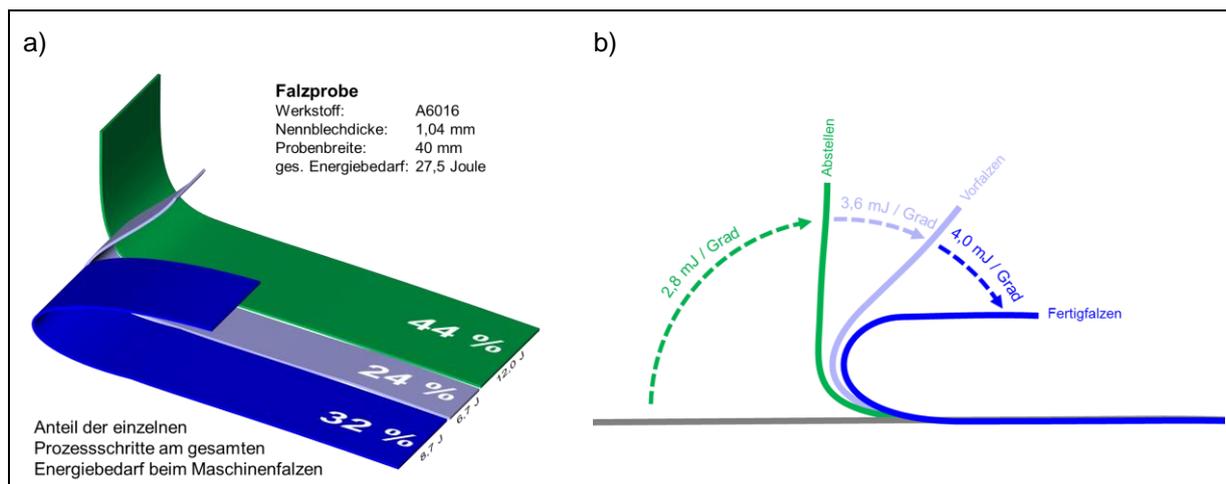


Abbildung 6: a) Prozentualer Anteil der Prozessschritte Abstellen, Vor- und Fertigfalzen am gesamten Energiebedarf beim Maschinenfalzen  
b) Biegearbeit pro Grad Biegung beim Maschinenfalzen der untersuchten Aluminiumproben

## Zusammenfassung

Der heutige Trend in Richtung einer nachhaltigen und gleichzeitig wirtschaftlichen Fertigung von Produkten erfordert zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Effizienz die Erfassung der Energie- und der Werkstoffströme in jedem Fertigungsschritt. Auf Grundlage der so ermittelten Kennwerte kann durch den Vergleich mit einem äquivalenten, verlustfreien Fertigungsprozess der Wirkungsgrad bzw. das Optimierungspotenzial quantifiziert werden. Dieser Wirkungsgrad lässt sich für umformtechnisch hergestellte Produkte wie beispielsweise Türen und Klappen von Kraftfahrzeugen auf Grund der Vielzahl aufeinander folgender Prozessschritte und den komplexen Vorgängen während der Umformung nur näherungsweise bestimmen.

In diesem Beitrag wird eine Methode zur experimentellen Bestimmung des unbedingt erforderlichen Kraft- und Energiebedarfs beim Abstellen und Falzen von Aluminiumblechlegierungen aufgezeigt. Mit Hilfe eines Versuchswerkzeuges, das in eine konventionelle Druckprüfmaschine eingebaut ist, wird der elementare Kraft- und Energieverlauf während des abstrahierten Abstellens und Falzens gemessen sowie charakteristische Zustände beschrieben. Aufbauend auf diesen Kennkurven wird die für den gesamten Falzprozess, beginnend beim Abstellen des Blechbauteils, erforderliche Umformenergie ermittelt. Die Untersuchung zeigt, dass bereits 40 % der gesamten Arbeit beim Abstellen geleistet wird. Auf das Vorfalzen entfallen ca. 30 %, auf das Fertigfalzen noch 25 %. Diese Aufteilung des Energiebedarfs auf die einzelnen Prozessschritte lässt sich durch die gleichzeitige Betrachtung des zugehörigen Biegewinkels erklären. Auf Grund der zunehmenden Kaltverfestigung des Werkstoffs im Bereich des Falzradius steigt der Energiebedarf zum weiteren Biegen der Blechprobe im Verlauf des Prozesses an, siehe Abbildung 6 b). Demnach hat die Verschiebung bzw. die Vergrößerung oder Verkleinerung der Umformzone während des Falzens nur einen geringen Einfluss auf den Kraft- und Energiebedarf.

Der aufgezeigte Energiebedarf kann zur Bewertung jedes vergleichbaren Falzprozesses genutzt werden. Hierzu ist jedoch die im realen Prozess benötigte Energie zunächst messtechnisch zu erfassen. Dann kann das technische Optimierungspotenzial quantifiziert werden.

## Literaturverzeichnis

- [01] Stiens, H.: Ermittlung des gesamtheitlichen Wirkungsgrades als Kennzahl zur rationellen Energienutzung in der Produktionstechnik. Dissertation am IBF, RWTH Aachen, 2000.
- [02] Eurostat: Europa in Zahlen - Eurostat Jahrbuch 2008. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften, Luxemburg, ISBN 9789279066061, 2007.
- [03] International Energy Agency: Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency - Key Insights from IEA Indicator Analysis. Paris, 2008
- [04] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie [Hrsg.]: Wege zu einer wirksamen Klimapolitik. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Stand Februar 2012
- [05] KfW Bankengruppe: KfW-Befragung zu den Hemmnissen und Erfolgsfaktoren von Energieeffizienz in Unternehmen. <https://www.kfw.de/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Sonderpublikationen/Sonderpublikation.pdf>, 2005.
- [06] Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie (Competitive Strategy): Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten. Campus Verlag, Frankfurt, 11. Auflage, ISBN 3593361779, 2008.
- [07] Speis, H.; Czymmek, F.: Die Bedeutung der ökologischen Betroffenheit für die umweltschutzorientierte Wettbewerbsstrategien von Unternehmen. Arbeitsberichte zum Umweltschutz, Arbeitsbericht Nr. 15, Universität Köln, 2003.
- [08] Fraunhofer Gesellschaft: Energieeffizienz in der Produktion – Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf. Abschlussbericht, München, 2008.
- [09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [Hrsg.]: Greentech made in Germany 3.0: Umwelttechnologie-Atlas für Deutschland, Berlin, 2012.
- [10] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer: Deutsche Standards - Green Production Technologies. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1. Auflage, ISBN 978-3834923134, 2010.
- [11] Bolay, C.; Liewald, M.; Wagner, S.; Planck, H.; Stegmaier, T.; Vohrer, A.; Lorenz, I.: Metallverbundblech mit Textileinlage für Leichtbau und Dämpfungsanwendungen, Hochfeste und hybride Materialien. 31. EFB-Kolloquium, Bd Boll, 2011.
- [12] Bolay, C.; Liewald, M.: Design And Formability Of A New Composite Material. The 14th International Conference on Material Forming, Conference Proceedings, ESAFORM 2011, Queen's University, Belfast/Ireland, April 27– 29, 2011
- [13] Papaioanu, A.; Liewald, M.: SCS- Innovativer Herstellungsprozess für Außenhautteile. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag GmbH & Co.KG, München, September 2011.
- [14] Audi media services, <https://www.audi-mediaservices.com>, 2013
- [15] Lange, K. [Hrsg.]: Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft Band 1: Grundlagen. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2. Völlig neubearbeitete Auflage, ISBN 354013249X, 1984.
- [16] Spittel, T. [Hrsg.]; Hensel, A.; Spittel, M.: Rationeller Energieeinsatz bei Umformprozessen. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1983.
- [17] Hensel, A.; Spittel, T.: Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978.
- [18] Westkämper, E.; Warnecke, H.-J.: Einführung in die Fertigungstechnik. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, ISBN 3519563231, 2004.
- [19] Schultz, M. S.: Methode zur integrierten ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen und -technologien. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2002.

- [20] Springer Gabler Verlag (Herausgeber), Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Kumulierter Energieaufwand (KEA), online im Internet: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/222016/kumulierter-energieaufwand-kea-v7.html>, am 09.08.2014.
- [21] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: Fließpressen - Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-30909-3, 2008.
- [22] Erlach, K.: Energy Value Stream: Increasing Energy Efficiency in Production. Proceedings of the First Conference of the German Academic Society for Production Engineering (WPG), Berlin, Germany, 8<sup>th</sup>-9<sup>th</sup> June 2011, Springer Verlag, Heidelberg New York, ISBN 9783642244902, 2013
- [23] Friedrich, H. E.; Treffinger, P.; Kopp, G.; Knäbel, H.: Werkstoffe und Bauweisen ermöglichen neue Fahrzeugkonzepte. Forschung für das Auto von Morgen - Aus Tradition entsteht Zukunft, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 9783540741503, 2008.
- [24] Braess, H. H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 6. Auflage, ISBN 9783834810113, 2011
- [25] Hönle, S.; Liewald, M.: Geometrische Designmerkmale erfassen und bewerten. MM MaschinenMarkt, Vogel Business Media, Heft 22/2013, Würzburg, 2013.
- [25] Hönle, S.; Liewald, M.: Prozesssichere Gestaltung von Maschinenfalzprozessen unter Berücksichtigung der Werkstoffbeanspruchung von Karosseriekomponenten aus Blech. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2013, Tagungsband, Dresden, 2013.
- [26] Doege, E.; Behrens B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Springer Verlag, Berlin, ISBN 3540234411, 2007.
- [27] Neugebauer, R.; Menzel, S.; Meyer, B.; Neumann, I.: Falzklebeprozess im automobilen Rohbau. EFB-Forschungsbericht 320, Hannover, 2010.
- [28] Hönle, S.; Liewald, M.: Beitrag zur Bewertung der Biegebeanspruchungen beim Falzen von Aluminiumblechwerkstoffen. UTF-Science, 2. Ausgabe 2013
- [29] Zhen, L.; Kang, S.B.: The effect of pre-aging on microstructure and tensile properties of Al-Mg-Si alloys. Scripta Materialia, Volume 36 Issue 10, 1997.
- [30] Mücklich, S.: Leichtbaupotentiale durch Einsatz von Leichtmetallen. Habilitationsschrift, TU Chemnitz, 2008.
- [31] Gross, D.; Hauger, W.; Schnell, W.; Schröder, J.: Technische Mechanik Band 1: Statik. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 8. Auflage, ISBN 3540221662, 2004.
- [32] Le Maout, N.; Thullier, S.; Manach, P. Y.: Classical and Roll-hemming Process of Pre-strained Metallic Sheets. Experimental Mechanics, Volume 50 Issue 7, 2010.
- [33] Livatyali, H.; Altan, T.: Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods: Part 1 - Experimental investigations. Journal of Materials Processing Technology, Volume 117 Issues 1-2, 2001.
- [34] Muderrisoglu, A.; Murata, M.; Ahmetoglu, M. A.; Kinzel, G.; Altan, T.: Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet - an experimental study. Journal of Materials Processing Technology, Volume 59 Issues 1-2, 1996.
- [35] Livatyali, H.; Muderrisoglu, A.; Ahmetoglu, M. A.; Akgerman, N.; Kinzel, G. L.; Altan, T.: Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design. Volume 98 Issue 1, 2000.