

Dieser Tagungsband enthält die schriftlichen Fassungen der Vorträge des 13. Umformtechnischen Kolloquiums Darmstadt, das am 25. September 2018 in Darmstadt stattfand.

Das 13. Umformtechnische Kolloquium Darmstadt wurde vom Institut für Fertigungsforschung e.V. (IfF) in Verbindung mit dem Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (PtU) der Technischen Universität Darmstadt veranstaltet.

Leiter des Kolloquiums:
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. P. Groche

Organisation:
Arne Mann, M. Sc.
Tilman Traub, M. Sc.

Moderne Umformtechnik – flexibel, wandlungsfähig, resilient
13. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt
Institut für Fertigungsforschung e.V.
Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen
Technische Universität Darmstadt
Hrsg.: Peter Groche
Darmstadt 2018
ISBN 978-3-9819947-1-1

Redaktion und Layout:
A. Philipp, A. Baron, F. Chi, W. Franke

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany
typographics GmbH, 64291 Darmstadt
print@27a.de



Vorwort

Aktuelle Entwicklungstrends in der Elektromobilität, der nachhaltigen Energieversorgung und der Digitalisierung wirken sich erheblich auf produzierende Betriebe und im Speziellen Unternehmen aus der Umformtechnik aus. Sich verändernde Marktanforderungen führen dazu, dass bislang erfolgreiche Geschäftsmodelle überdacht und teilweise neu ausgerichtet werden müssen.



Im Rahmen des 13. Umformtechnischen Kolloquiums Darmstadt (UKD) möchten wir unter der Überschrift „Moderne Umformtechnik – flexibel, wandlungsfähig, resilient“ neueste Entwicklungen im Bereich der Umformtechnik und mögliche Auswirkungen für Betriebe dieser Branche beleuchten.

Mit Vorträgen und Präsentationen aus Forschung und Industrie bietet das 13. UKD einen breiten Einblick in aktuelle Entwicklungen dieser Industriezweige. Im Rahmen von ergänzenden Prozessdemonstrationen werden ausgewählte Lösungen live vorgestellt. Während der Veranstaltung wird auch die Vorstellung der neuartigen 3D-Servo-Pressen stattfinden.

Sie ermöglicht durch zwei zusätzliche Freiheitsgrade des Stößels eine bislang nicht bekannte Flexibilität von Pressen ohne zusätzliche Aktorik im Werkzeug. Dadurch kann mit ihr auf wechselnde Umgebungseinflüsse, Stückzahlanforderungen oder Halbzeugeigenschaften reagiert werden.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P. Groche'. The signature is stylized and cursive.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche



Moderne Umformtechnik – flexibel, wandlungsfähig, resilient

Entwicklung moderner Umformtechnologien am PtU	1
P. Groche, D. Griesel, F. Chi, A. Franceschi, W. Franke, F. Hoppe, T. Kessler, M. Knoll, S. Köhler, M. Krech, F. Kretz, A. Mann, J. Sinz, P. Sticht, T. Suckow, T. Traub, P. Volke, T. Wang, Y. Wu, PtU, TU Darmstadt	
Karosseriebau für die Elektromobilität	19
J. Staeves, BMW Group	
Stegblechumformung - von den wissenschaftlichen Grundlagen in den Karosseriebau	29
M. Heckmann, LÄPPLE Automotive GmbH S. Köhler, J. Mushövel, L. Schell, P. Groche, PtU, TU Darmstadt	
Szenarische Volumenbetrachtungen von Kaltmassivprodukten zwischen Verbrenner und Elektromobilität	41
M. Liewald, A. Weiß, A. Weiß, D. Zinser, A. Biallas, Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart	
Smart Factory	57
H. Gensert, C. Ludwig, KAMAX Tools & Equipment GmbH & Co. KG	
Werkerassistenzsysteme am Beispiel des Profilierens	61
C. Müller, Dreistern GmbH & Co. KG T. Traub, P. Groche, PtU, TU Darmstadt	
Industrie 4.0 und Leichtbau als Innovationstreiber in der Befestigungsindustrie	77
O. Ambros, baier & michels GmbH & Co. KG	
Profilbiegen 4.0 – Roadmap für die Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens	83
D. Huttel, Herkules Wetzlar GmbH T. Kessler, J. Kilz, P. Groche, PtU, TU Darmstadt	
Cyberphysisches Rüsten und smarte Prozesse beim Rotationszugbiegen	93
C. Kuhnhen, L. Schulte, B. Engel, M. Schiller, Institut für Produktionstechnik, Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen	
Edge Computing für Industrie 4.0 Anwendungen in der Umformtechnik	103
J. Viesel, Georg Maschinentechnik GmbH & Co. KG	



Entwicklung moderner Umformtechnologien am PtU

P. Groche, D. Griesel, F. Chi, A. Franceschi, W. Franke, F. Hoppe, T. Kessler,
M. Knoll, S. Köhler, M. Krech, F. Kretz, A. Mann, J. Sinz, P. Sticht, T. Suckow,
T. Traub, P. Volke, T. Wang, Y. Wu
Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, TU Darmstadt.

Die zunehmende Digitalisierung und Automatisierung im Rahmen der vierten industriellen Revolution eröffnet auch der Umformtechnik neue Chancen. Da bei den hochproduktiven Umformprozessen zahlreiche Parameter ineinandergreifen und die Fehlerfreundlichkeit bei Eingriffen in das Prozessgeschehen meist gering ausfällt, ist für eine erfolgreiche Automatisierung besondere Sorgfalt bei dem Entwurf und der Realisierung von Prozessregelungen vonnöten. Dies bedingt insbesondere eine möglichst umfassende Identifikation, Analyse und Modellierung der relevanten Phänomene. In dieser Ausarbeitung werden diesbezüglich laufende Forschungsarbeiten des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen der TU Darmstadt vorgestellt. Die Vorstellung folgt einer Gliederung, die bei den Werkstücken beginnt und schrittweise um Werkzeuge und Maschinen erweitert wird.

Development of modern forming technologies at the PtU

The increasing digitization and automation in the context of the fourth industrial revolution also opens up new opportunities for forming technologies. Since numerous parameters interlock in highly productive forming processes and the error-friendliness of process interventions is usually low, special care is required in the design and implementation of process controls for successful automation. This requires in particular an in-depth identification, analysis and modelling of the relevant phenomena. In this paper current related research work of the Institute for Production Engineering and Forming Machines of the TU Darmstadt is presented. The focus is initially on the workpieces and will be gradually expanded to include tools and machines.

Einleitung

Digitalisierung und Automatisierung halten heutzutage Einzug in alle Bereiche des Lebens und sind aus diesen kaum noch wegzudenken. Angefangen bei Zahlungs- und Kassensystemen, über Cloud-gestützte Sprachassistenten auf Smartphones und Computern, bis hin zum automatisierten Fahren [1] bestimmen und vereinfachen vernetzte Systeme vermehrt den modernen Lebensalltag.

Parallel dazu existiert im Rahmen der vierten industriellen Revolution ein Trend zu zunehmender Automatisierung von Fertigungsprozessen. Die Ziele dieser Entwicklung sind vielfältig und umfassen unter anderem [2]:

- höhere Produktivität
- gesteigerte Prozessstabilität
- engere Toleranzen
- größere Flexibilität
- durchgängige Qualitätskontrolle

Beiden Formen der Automatisierung – sowohl im täglichen Leben als auch im Fertigungsalltag – ist gemein, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren berücksichtigt werden muss, wenn ein hoher

Automatisierungsgrad angestrebt wird. Um die Flexibilität und Robustheit des Systems oder Prozesses zu gewährleisten, muss auf geplante oder ungeplante Veränderungen dieser Einflussfaktoren in geeigneter Art und Weise reagiert werden. So können Störungen ausgeregelt und durchgängig anforderungsgerechte Produkteigenschaften erzielt werden.

In industriellen Umformprozessen erfolgen die notwendigen Anpassungen der Prozesse heute noch überwiegend durch die Anlagenbediener [3]. Nur so kann bislang die insbesondere in der Umformtechnik vorliegende große Bandbreite der veränderlichen Einflussgrößen beherrscht werden. Zu den veränderlichen Einflussgrößen zählen insbesondere toleranzbedingte Schwankungen der Halbzeugeigenschaften, temperaturbedingte Veränderungen der Betriebsmittel, verschleißbedingte Modifikationen der Werkzeuge sowie auch unerwartete Störgrößen, die im Zuge der Prozessqualifikation nicht berücksichtigt wurden. Aufgrund der Vielfalt an Einflussgrößen kann einem Fehlerbild meist nicht eindeutig eine Ursache zugeordnet werden. Daher ist für die Adaption von

Umformprozessen die prozessspezifische Erfahrung des Bedieners in besonderem Maße erfolgsentscheidend [3].

Da Umformprozesse zu den produktivsten industriellen Fertigungsverfahren zählen, ist es wünschenswert, deren Automatisierung unter den vorgenannten Gesichtspunkten zu forcieren. Neben geeigneter Sensorik sind intelligente Auswertungen der gewonnenen Daten und eine robuste Prozessregelung auf Basis dieser erforderlich. Bei Systemen der Umformtechnik sind außerdem ein gutes Verständnis der im System *Werkstück – Werkzeug – Umformmaschine* zur Verfügung stehenden Eingriffsmöglichkeiten und oft auch eine Erweiterung der zur Verfügung stehenden Aktoren erforderlich.

Am PtU laufen spannende Forschungstätigkeiten, in denen eben diese Voraussetzungen zukunftsfähiger Umformprozesse untersucht werden. Inhaltlich umfassen sie vielfältige Themen – von neuartigen Halbzeugen bis hin zu fortschrittlichen Umformanlagen. Ausgewählte Ergebnisse und Forschungsthemen werden im Folgenden vorgestellt.

1 Angepasste Bauteileigenschaften und moderne Halbzeuge

Um die ständig steigenden Leichtbauanforderungen zu erfüllen, existieren unterschiedliche konstruktive Ansätze. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die beanspruchungsgerechte Gestaltung von Bauteilen, bei der der Werkstoff dort angeordnet wird, wo er einen signifikanten Beitrag zur Steifigkeit und/oder Festigkeit des Bauteils liefert. Bei maßgeblich biegebelasteten Komponenten ist hierfür eine Erhöhung des Flächenträgheitsmoments zielführend. Moderne Halbzeuge tragen diesem Ansatz Rechnung. Ihr Einsatz ist allerdings mit neuen Herausforderungen verbunden, weil der veränderte Halbzeugaufbau zu neuen Versagensgrenzen und –formen führt.

1.1 Erweiterung der Grenzen der Stegblechumformung

Eine Möglichkeit zur Erhöhung des Flächenträgheitsmoments besteht im Einsatz von Stegblechen. Dabei handelt es sich um flächige Bauteile, die senkrecht zur Grundblechebene Versteifungsrippen aufweisen. Gegenüber unverzweigten Blechen kann die Biegesteifigkeit so um ein Vielfaches gesteigert werden - in [4] wird eine Versteifung um den Faktor 43 erreicht. Die Herstellung von räumlich gekrümmten Stegblechen findet durch Blechverzweigung im ebenen Zustand

und anschließender Umformung in die Zielgeometrie statt. Die Verzweigung kann beispielsweise durch Spaltbiegen [5] oder Laserschweißen erzeugt werden. Gegenüber konventionellen Fertigungsverfahren wie Fräsen oder Gießen ermöglicht diese Prozesskette deutlich reduzierten Material- bzw. Energieeinsatz.

Jedoch bringen die Verzweigungen neue Prozessgrenzen für den Umformprozess wie Stegabriss, Stegrisse und Stegbeulen mit sich. Im Rahmen des SFB 666 wurden am PtU verschiedene Ansätze zur Erweiterung dieser Grenzen untersucht [6]. Werkstoffe mit geringer Bruchdehnung tendieren an konvexen Krümmungen zu Stegrissen oder -abrissen. Eine lokale Wärmebehandlung mittels Laser bewirkt eine Erhöhung der Umformbarkeit durch Vergrößerung des metallischen Gefüges. Um das Beulen der Stege in konkaven Bereichen zu unterdrücken, können diese im Umformprozess seitlich gestützt werden. Ein an die Pressenbewegung gekoppelter Schiebermechanismus bewirkt, dass die Stege während des Umformprozesses seitlich unterstützt werden und vorher bzw. danach wieder frei sind (vgl. **Bild 1**). Auf diese Weise sind bis zu dreimal höhere Stege beulfrei möglich, sodass eine entsprechend größere Versteifung erreichbar ist.

Umgeformtes Stegblech:

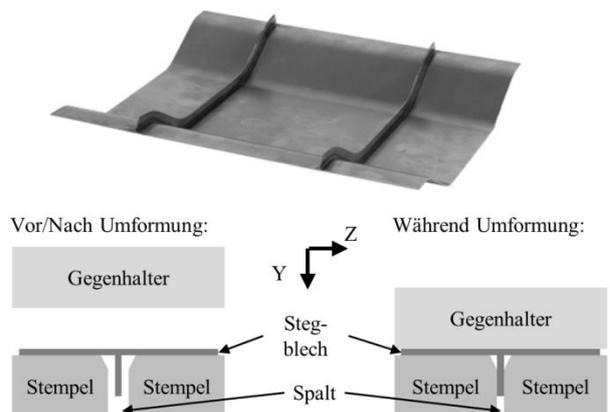


Bild 1: Tiefgezogene Bauteile mit seitlicher Stegunterstützung im Prozess (nach [4])

Weiterhin können die für das Beulversagen verantwortlichen Druckspannungen durch lokale Reduktion der Steghöhe in den konkaven Bereichen vermindert werden.

Sind die Lastfälle im Betrieb vorab detailliert bekannt, kann eine numerische Optimierung der Stegbleche erfolgen [7, 8]. Durch eine optimale Anordnung der Stege auf dem Grundblech lässt sich so die Durchbiegung des Bauteils minimieren.

Weiterhin ermöglicht eine Optimierung der Steghöhenverläufe je nach Optimierungsziel eine Erhöhung der Bauteilsteifigkeit oder eine Gewichtsreduktion bei gleichbleibender Steifigkeit im Vergleich mit nicht optimierten Stegblechen.

1.2 Fügen von Sandwichblechen durch Kragenziehen

Alternativ zur konstruktiven Gestaltung eines Gesamtbauteils kann die Erhöhung des Flächenträgheitsmoments auch auf der Halbzeug-Ebene erfolgen. Die Kombination von steifen, metallischen Deckblechen mit leichten Kernwerkstoffen (häufig Kunststoffen) zu Sandwichblechen ermöglicht bei überwiegend biegebeanspruchten Bauteilen eine deutliche Gewichtsreduktion bei gleichbleibender Steifigkeit.

Die große Bandbreite an unterschiedlichen mechanischen und physikalischen Eigenschaften, die beim Einsatz solcher moderner Verbundwerkstoffe in einem einzigen Halbzeug vereint sind, stellt jedoch neue Herausforderungen für etablierte Fertigungsverfahren dar. Beim Umformen und Scherschneiden von Sandwichblechen treten zusätzliche Versagensmechanismen wie Deckschichtbruch, Kernversagen und Delamination auf. Bei thermischen Verfahren wie Schweißen und Löten ist die Temperaturbeständigkeit der Werkstoffe zu berücksichtigen. Kunststoffe besitzen zudem eine Kriechneigung, die bei kraftschlüssigen Verbindungen zu einem Vorspannkraftverlust führen kann.

Aktuell wird am PtU untersucht, wie das Verfahren des Kragenziehens verwendet werden kann, um in Sandwichblechen versteifte Anbindungsstellen zu schaffen, wie in **Bild 2** am Beispiel einer geklebten Bolzenverbindung dargestellt ist [9].

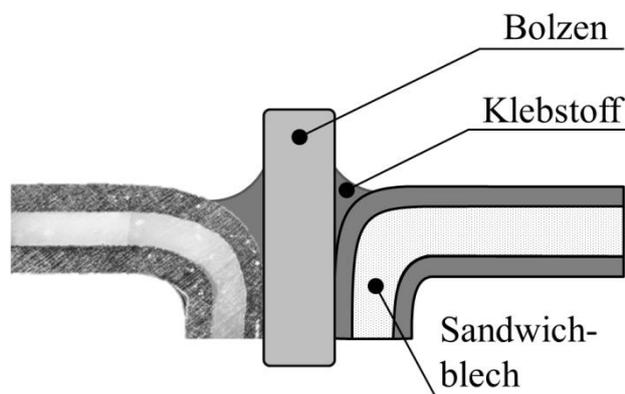


Bild 2: Schnitt durch eine geklebte Bolzenverbindung auf Basis von Sandwichkragen

Gegenüber vergleichbaren monolithischen Blechen sind beim Umformen von Sandwichblechen die

erreichbaren Umformgrade eingeschränkt. Die Ursache hierfür ist in der stark inhomogenen Verteilung der Deformationen über dem Verbundquerschnitt zu suchen. In Folge dessen treten Risse üblicherweise an einem der zwei Deckbleche auf. Zur Ermittlung der Einflussparameter und Prozessgrenzen wird eine breit angelegte Parameterstudie durchgeführt, bei der die wesentlichen Werkzeug-Parameter Ziehspalt, Ziehringkantenradius und Stempelform variiert werden. Es zeigt sich, dass die Beanspruchung der Deckbleche insbesondere durch den Einsatz von Stempeln mit großen Kantenradien reduziert werden kann. Zum Erreichen geringer Ziehspalte kann zudem ein Stempel mit Traktrix-Form verwendet werden, wodurch die Einleitung der Umformkraft in das Blech optimiert und das Prozessfenster erweitert wird. Dieser und weitere Extremfälle, die nahe an der Prozessgrenze liegen, sind in **Bild 3** dargestellt.

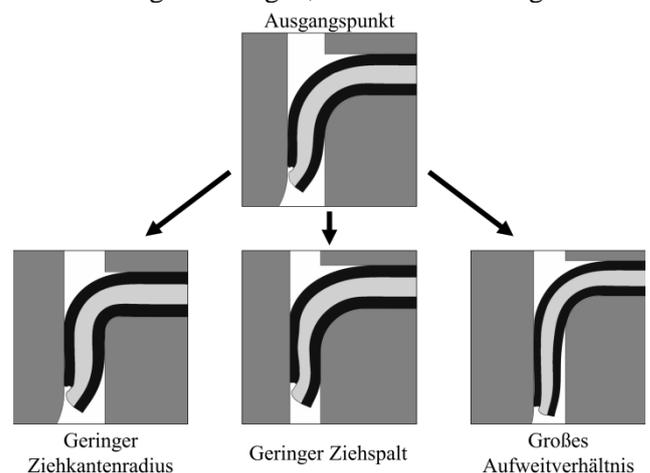


Bild 3: Extremfälle beim Kragenziehen von Sandwichblechen

1.3 Flexible Einstellung gradierter Eigenschaften

Anstelle einer Kombination verschiedener Werkstoffe können unterschiedliche mechanische Eigenschaften in einem Halbzeug auch durch gezielte lokale Wärmebehandlung erzeugt werden. Das Resultat sind lokal unterschiedliche bzw. gradierte Eigenschaften in einem Bauteil, die sich durch eine geeignete Prozessführung an die späteren Beanspruchungen anpassen lassen.

Hierfür eignet sich bspw. die aushärtbare, hochfeste Aluminiumlegierung EN AW-7075. In der geplanten Prozesskette „Warm-Walzprofilieren“ (siehe **Bild 4**) sollen gradierte mechanische Eigenschaften in einem Rohr eingebracht werden. Die Besonderheit dieser Prozesskette liegt in der Integration der Wärmebehandlung in den Umformprozess, sodass

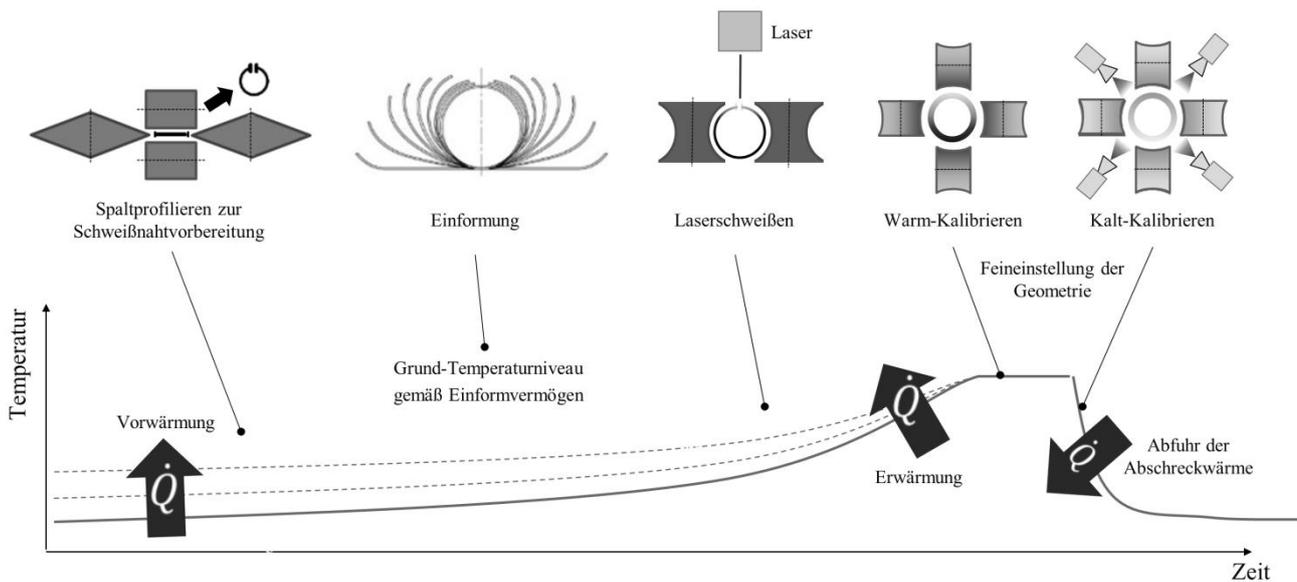


Bild 4: Prozesskette „Warm-Walzprofilieren“

eine Inline-Herstellung von Profilen mit gradierten, flexiblen Eigenschaften möglich ist.

Ausgehend vom Rohmaterial wird das Blech zunächst an der Bandkante durch Spaltprofilieren gestaucht. Dieser Vorgang dient der Vorbereitung für das spätere Verschweißen zum geschlossenen Profil. Anschließend folgen die mehrstufige Einförmung durch Walzprofilieren vom ebenen Blech hin zur Rohrgeometrie sowie eine Laserschweißoperation. Daran schließen sich Prozesse zum Warm- und Kalt-Kalibrieren zur Feineinstellung der Zielgeometrie und zur Einstellung der gewünschten Werkstoffeigenschaften an.

Die Integration des Warm- und Kalt-Kalibrierens in die Prozesskette zur Herstellung von Aluminiumbauteilen durch Walzprofilieren ist neu und erfordert aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums eine detaillierte Prozessauslegung. Beim Warm-Kalibrieren wird die endgültige Form des Rohres erzeugt und das Rohr wird auf Lösungsglühtemperatur von 460 °C erhitzt.

Die Einstellung gradiertter Eigenschaften erfolgt beim anschließenden Kalt-Kalibrieren, wobei das Rohr gezielt abgeschreckt wird. Schnell abgeschreckte Bereiche haben höhere Festigkeitseigenschaften als langsam abgeschreckte Bereiche. Das Auslagern der Bauteile in den T6-Zustand erfolgt aufgrund der langen Auslagerungszeit von mehr als 20 Stunden entkoppelt von der Inline-Prozesskette.

Die Flexibilität im Prozess ergibt sich aus der gezielten Einstellung gradiertter mechanischer Eigenschaften im Bauteil. Zum einen ist es möglich, diese durch gezielt schnelles oder langsames Abschrecken einzustellen, zum anderen sind variable Wanddickenverläufe durch angepasstes Kalibrieren

denkbar. Hierdurch ergeben sich aus einer besseren Schadenstoleranz durch gezielte Duktilität erweiterte Anwendungsszenarien für die hochfeste Aluminiumlegierung EN AW-7075.

1.4 Herstellung von Seltenerdmetallen durch Rundkneten

Abseits mechanischer Eigenschaften lassen sich durch Umformprozesse auch nicht-mechanische Eigenschaften beeinflussen. Am PtU wird diesbezüglich seit einigen Jahren die Einstellung von magnetischen Eigenschaften durch Umformprozesse untersucht [10].

Rundkneten wird industriell beispielsweise in der Fertigung von Wellen und Achsen eingesetzt. Es zeigt sich, dass dieser Prozess ebenfalls für die Herstellung von Nd-Fe-B Seltenerdmetallen geeignet ist. Diese werden bislang nur pulvermetallurgisch hergestellt. Durch Rundkneten erscheint die Realisierung einer schmelzmetallurgischen Herstellungsrouten möglich, bei der die zeit- und energieintensive, konventionelle Prozesskette durch Umformung deutlich verkürzt wird, wie in **Bild 5** dargestellt ist.

Weitere Vorteile dieses Verfahrens liegen darin, dass die Herstellung kontinuierlich und endkonturnah erfolgen kann, sodass auf diese Weise gefertigte Bauteile deutlich weniger Nachbehandlungsschritte bis zum endgültigen Einsatz benötigen. Aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der Verbesserung der Homogenität der Korngrößenverteilung und der Einbringung von Anisotropie in die Mikrostruktur durch Rundkneten, wodurch die magnetischen Eigenschaften von rundgekneteten Nd-Fe-B-

Permanentmagnete konkurrenzfähig mit denen gesinterter Magnete werden.

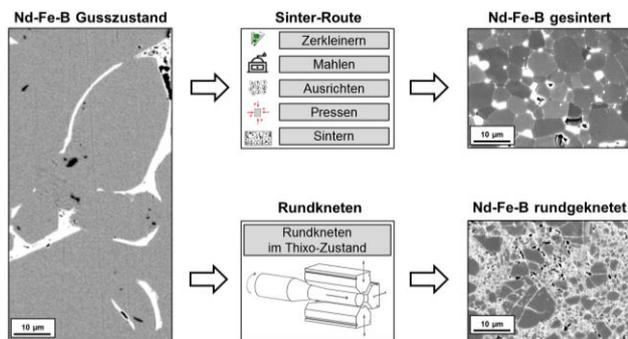


Bild 5: Gegenüberstellung der Prozessketten zur Herstellung von Nd-Fe-B-Permanentmagneten

1.5 Papier als nachhaltiger Werkstoff

Moderne Umformtechnik lediglich auf das Bestreben nach Leichtbau und die Verwendung neuer Werkstoffe zu reduzieren, wird dieser keinesfalls gerecht. Ein wichtiger Aspekt ist darüber hinaus die Erfüllung gesellschaftlicher und legislativer Anforderungen, die ein nachhaltiges und umweltbewusstes Agieren verlangen. In diesem Zusammenhang setzt sich das PtU unter anderem intensiv mit dem Werkstoff Papier (respektive Karton/Pappe) auseinander. Der Ur-Rohstoff für die Papierherstellung ist Holz, welches sich durch nachhaltige Forstwirtschaft umweltgerecht produzieren lässt. Weitere Vorteile von Papier sind die Wiederverwertbarkeit (Recyclingquote in Deutschland ca. 80 %) sowie die Vielseitigkeit des Materials (erkennbar beispielsweise an den unterschiedlichen Eigenschaften von Taschentüchern und Umzugskartons).

Bei der Übertragung typischer Umformverfahren der Metallverarbeitung auf Papier stehen den Vorteilen einige Herausforderungen für Forschung und Entwicklung gegenüber. Durch den fasrigen Aufbau des Materials besitzt Papier ein stark richtungsabhängiges mechanisches Verhalten. Effekte wie Rückfederung und Schrumpfung, die dadurch maßgeblich richtungsabhängig beeinflusst werden, können zu geometrischen Unzulänglichkeiten der Umformprodukte führen. Neue technologische Ansätze zur Überwindung dieser Grenzen sind gefragt. In Forschungsarbeiten konnten durch den gezielten Einsatz von Dampf im Niederhalterbereich eines konventionellen Tiefziehwerkzeugs aussichtsreiche Effekte nachgewiesen werden. Denn mit dem Dampf werden sowohl Wärme als auch Feuchtigkeit in das Material transportiert. Beide

können zu einer Reduzierung der Eigenschaftsdifferenzen in den unterschiedlichen Richtungen (MD – Maschinenrichtung; CD – Querrichtung) genutzt werden.

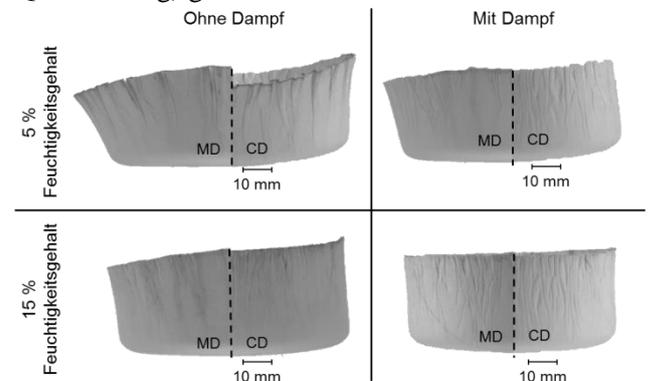


Bild 6: Auswirkungen der Anisotropie auf die Umformergebnisse in Maschinenrichtung (MD) und Querrichtung (CD) eines rotationssymmetrischen Napfwerkzeuges [11]

Der Effekt dieser Behandlung ist in **Bild 6** dargestellt. Deutlich sichtbar sind die Unterschiede in MD und CD ohne Bedampfung. Bei konditionierten Halbzeugen mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 5 % (Gleichgewicht bei Normklima: 23 °C und 50 % rel. Luftfeuchte) erwirkt die Bedampfung eine Angleichung der Wandungen in beiden Richtungen. Dieser Effekt zeigt sich auch bei einem zuvor eingestellten Feuchtigkeitsgehalt von 15 %. Bei diesen Näpfen ist ein annähernd rotationssymmetrisches Bauteil durch die Einbringung von Dampf fertigbar. Dies ist möglich, obwohl sich die mechanischen Eigenschaften des Materials von MD zu CD um einen Faktor von bis zu 4 unterscheiden. Die Abweichung der Wandwinkel eines Tiefziehnapfes können je nach Orientierung der Fasern um bis zu ca. 80 % reduziert werden [11]. Diese Technologie bietet die Basis für den Einsatz in der Verpackungsindustrie, um in Zeiten riesiger Plastikmüllberge eine nachhaltig produzierbare und umweltverträgliche Alternative zu bieten.

Auch in der Bauindustrie – insbesondere wenn es um temporäre Bauten geht - wird der Nachhaltigkeit und damit der Suche nach umweltgerechten und erneuerbaren Baumaterialien eine immer wichtiger werdende Rolle beigemessen. Im Rahmen des hessischen LOEWE Schwerpunktprogramms BAMP! (Bauen mit Papier) hat sich der Einsatz der inkrementellen Umformung von Papier und papierbasierten Sandwichmaterialien als zielführend herausgestellt. Damit kann zum einen

architektonischen Anforderungen nach Gestaltungsfreiheit (z.B. individuelle Freiformflächen) und zum anderen legislativen Anforderungen an Dämmung, Festigkeit und Nachhaltigkeit gerecht werden [12].

2 Tribologisches System an der Schnittstelle Werkstück-Werkzeug

Die Schnittstelle zwischen Werkstück und Werkzeug ist vor allem durch das hier vorliegende tribologische System bestimmt. Durch die Überwachung und Gestaltung dieser Schnittstelle kann maßgeblicher Einfluss auf die resultierende Bauteilqualität genommen werden.

2.1 Sensorische Verschleißdetektion beim Stanzen

Der zunehmende Einsatz hoch- und höchstfester Stähle in der Blechumformung hat anspruchsvolle tribologische Bedingungen während der Umformung zur Folge. Da diese zum frühzeitigen Ausfall der Umformwerkzeuge führen, ist es unerlässlich, sich intensiv mit Werkzeugstandzeiten und der Verschleißentwicklung auseinander zu setzen. Ein typischer Verschleißverlauf eines Stahl-Stahl-Kontakts besteht aus drei Phasen - dem Einlauf, der Beharrung und dem Ausfall [13]. Der Übergang zwischen dem Beharrungs- und dem Ausfallzustand wird als kritischer Verschleißzeitpunkt definiert. Um diesen Zeitpunkt zeitnah zu detektieren, wurden in aktuellen Forschungsarbeiten am PtU unterschiedliche Systeme zur Online-Verschleißdetektion im Streifenziehversuch entwickelt.

Der thermoelektrische Effekt beschreibt das Phänomen, dass in einem Stromkreis aus zwei verschiedenen Leitern bei einer Temperaturdifferenz zwischen den Kontaktstellen eine elektrische Spannung auftritt. Diese Voraussetzung ist beim Kontakt zwischen Werkzeugen und Blech in der Regel gegeben. Durch Messung der Spannung bzw.

des resultierenden thermoelektrischen Stroms und elektrischen Widerstands zwischen Werkzeug und Blech bzw. zwischen Ober- und Unterwerkzeug können Rückschlüsse auf den Verschleißzustand des Blechs gezogen werden, vgl. **Bild 7**. Im Vergleich zu konventionellen Messmethoden wie nachträglicher Rauheitsmessung auf dem Blech kann hierdurch der kritische Zeitpunkt genauer detektiert werden [14]. Darüber hinaus wird ein Kamerasystem entwickelt, um die Verschleißmarken auf dem Blechstreifen während dem Streifenziehversuch zu überwachen. Die Entwicklung der Verschleißmarken wird durch die Anwendung von Bildverarbeitungsmethoden analysiert. Diese Methode bietet eine Möglichkeit zur Prognose des Verschleißverhaltens eines tribologischen Systems und hat ein Potenzial zum Einsatz im realen Umformprozess.

2.2 Sensorische Schmierstoffe

In der Kaltmassivumformung sind für eine fehlerfreie und zuverlässige Produktion komplexe Schmierstoffsysteme notwendig. Etablierte Systeme, oftmals bestehend aus Zinkphosphat und Seife, sind bei ihrer Aufbringung und Reinigung energetisch und ökologisch oft nicht optimal. Eine nachhaltige Alternative stellen Einsicht-Schmierstoffsysteme dar, deren Applikation jedoch an den jeweiligen Prozess angepasst werden muss. Im Speziellen dürfen die maximal auftretenden Prozesstemperaturen die zulässigen Einsatztemperaturen der Schmierstoffe nicht überschreiten. Bei erhöhten Temperaturen ist mit Versagen des Schmierstoffes und infolgedessen mit erhöhter Adhäsion zu rechnen [15]. Eine Prozessüberwachung ist daher unerlässlich, jedoch wird durch konventionelle Sensoren das Prozessgeschehen aus relativ großer Distanz erfasst und ermöglicht keine ausreichend ortsaufgelöste Beobachtung der thermischen Zustände im

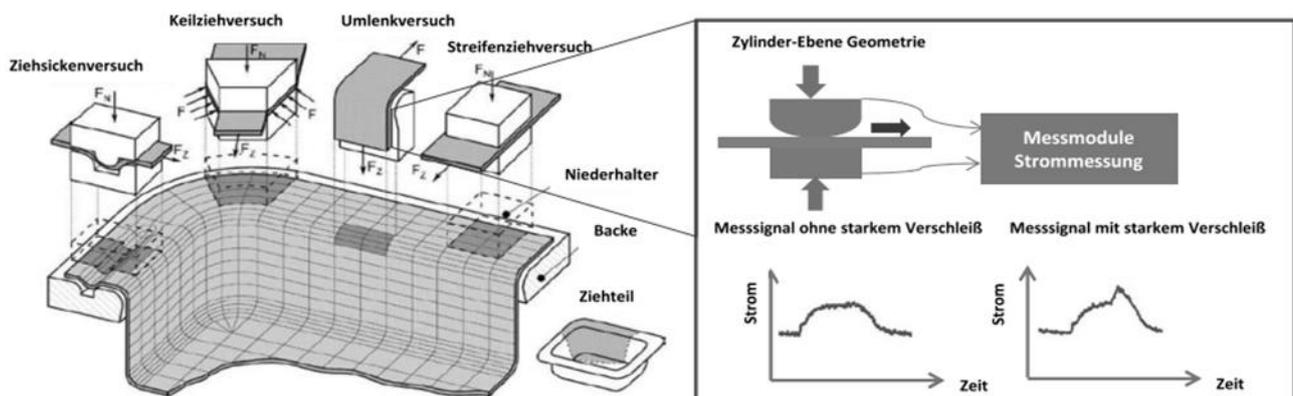


Bild 7: Prinzip der Verschleißdetektion durch Messung des thermoelektrischen Stroms

tribologischen System.

Aktuelle Arbeiten am PtU beschäftigen sich mit der Integration von Indikatoren in ein Einschicht-Schmierstoffsystem [16]. Thermoindikatoren reagieren auf einen Temperaturanstieg mit einer irreversiblen Farbänderung, welche anhand von Referenzdaten bestimmten Temperaturen zugeordnet werden können. So entsteht ein Sensor, welcher direkt an der Schnittstelle von Werkzeug und Werkstück vorliegt. Nach der Umformung werden die Oberflächenfarben der Bauteile erfasst und daraus Temperaturfelder abgeleitet, siehe **Bild 8**. Thermisch hochbelastete Werkzeugbereiche können so inline erkannt werden.

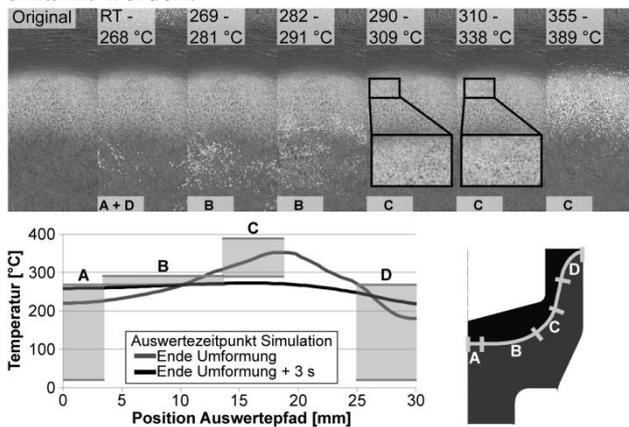


Bild 8: Identifikation hochbelasteter Werkzeugbereiche durch sensorische Schmierstoffe

Weiterhin können Fluoreszenzpartikel in den Schmierstoff integriert werden, die unter Einwirkung von UV-Licht leuchten. Die Intensität des Leuchtens gibt Rückschluss auf die Schmierstoffmenge. Dies ermöglicht nicht nur die Bestimmung von Schmierfilmdicken sondern auch die Detektion von Bauteilrissen, die infolge der Umformung auftreten können und in denen sich größere Mengen an Schmierstoff ansammeln.

2.3 Trockenumformung von Aluminium

Durch einen gänzlichen Verzicht auf Schmierstoffe in Umformprozessen lässt sich deren Umweltverträglichkeit und ggf. Wirtschaftlichkeit weiter steigern. Derartige Trockenumformprozesse zeigen jedoch, warum resiliente Systeme in der Produktionstechnik notwendig sind, um wirtschaftlich und ökologisch zu fertigen. Bereits Rauheitshügel im Mikro- und Nanometerbereich führen dazu, dass werkzeugseitige Schichtsysteme bei der Trockenumformung ausfallen und es zu erheblichem Werkzeugverschleiß kommen kann. Auch blechseitig ist eine geringe Oberflächenrauheit hierfür vorteilhaft.

Insbesondere die Verwendung von Aluminium mit seiner starken Adhäsionsneigung führt bei Trockenumformprozessen zu hohem Adhäsionsverschleiß an Umformwerkzeugen [17] und beeinflusst die Oberflächenqualität von Bauteilen, die Prozessstabilität und die angestrebten Toleranzen. Bisher erfolgt die Herstellung von Aluminiumkomponenten daher in Umformprozessen mit Schmiermitteleinsatz. Um in industriellen Prozessen ein frühzeitiges Werkzeugversagen auszuschließen, ist eine Kontrolle dieser Einflussgrößen während des Prozesses unvermeidbar. Dies ist beispielsweise durch prozessintegrierte Sensorik und Überwachung zu bewerkstelligen.

Am PtU wird in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IST eine Strategie zur Trockenumformung von Aluminium entwickelt, die bereits erfolgreich in Laborversuchen getestet wurde [18]. Dabei werden abgeschiedene a-C:H Schichtsysteme einer Nachbehandlung unterzogen, durch die sie für die Trockenumformung qualifiziert werden konnten. Im aktuellen Projekt ist das Ziel, diese Nachbehandlung durch ein optimiertes

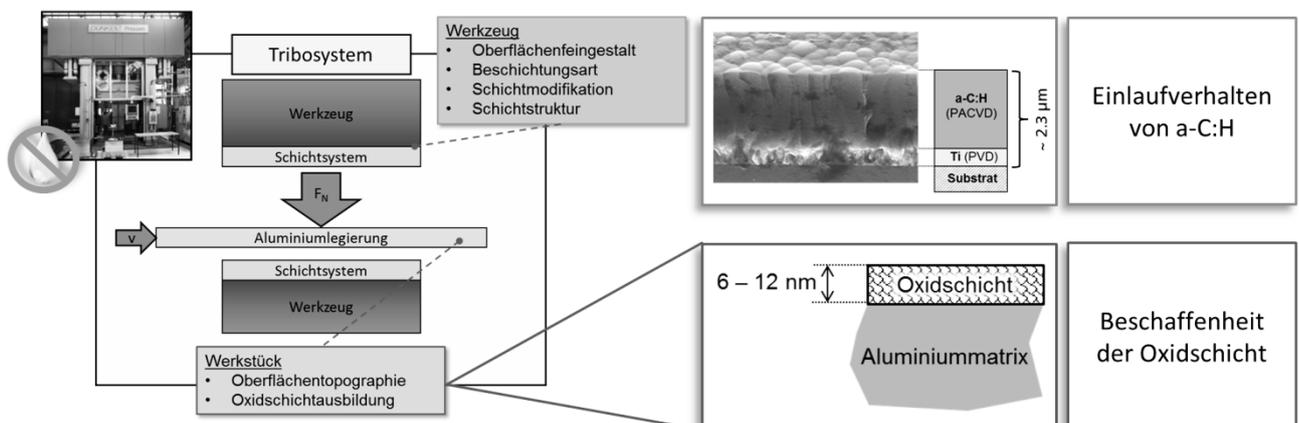


Bild 9: Optimierung des Tribosystems für die Trockenumformung von Aluminium

Abscheiden der Beschichtung gänzlich zu vermeiden oder durch eine industrietaugliche Alternative zu ersetzen. Zusammen mit einer optimierten Blechtopographie zeigt sich hierbei die grundsätzliche Umsetzbarkeit von trockenen Umformversuchen mit Aluminium. Durch eine ganzheitliche Betrachtung des Tribosystems wurden im Rahmen dieses Projektes maßgebliche Einflussgrößen auf die Adhäsionsausbildung identifiziert, vgl. **Bild 9**. Eine weitere Verbesserung des Tribosystems erfolgt zukünftig einerseits durch die optimierte Abscheidung a-C:H-Werkzeugbeschichtungen und andererseits durch die mechanische und chemische Anpassung der Oberflächenbeschaffenheit des Aluminiumblechs.

2.4 Maschinelles Oberflächenhämmern

Um das Tribosystem in der Umformung zu optimieren, ist nicht nur eine halbzeugseitige, sondern auch eine werkzeugseitige, gezielte Einstellung der Oberflächenqualität zielführend. In industriellen Fertigungsprozessen werden viele Bauteile einer abschließenden Oberflächenbehandlung unterzogen, um den gestellten Anforderungen hinsichtlich Lebensdauer, Korrosionsbeständigkeit oder tribologischen Eigenschaften gerecht zu werden.

Ein solches Verfahren zur automatisierten Oberflächenbehandlung ist das maschinelle Oberflächenhämmern (MOH), welches hauptsächlich zur mechanischen Behandlung von Werkstücken aus Eisen- und Nichteisenmetallen eingesetzt wird. Im Fokus der industriellen Anwendung steht aktuell der Einsatz der Technologie zur Einglättung von Oberflächenrauheiten im Werkzeug- und Formenbau. Durch Substitution der manuellen Oberflächennachbearbeitung einer typischen Bearbeitungszeit von 10-30 min/cm² durch den automatisierten Prozess des MOH, ist bei einer Bearbeitungsrate von 0,2 min/cm² eine theoretische Zeitersparnis von 98 % gegenüber dem konventionellen Polieren realisierbar [19].

Charakteristisch für den MOH-Prozess ist der mit Frequenzen von ca. 50-300 Hz linear oszillierende Hammerkopf mit Durchmessern von ca. 2-20 mm. Dieser wird von einem Manipulator in definierten Bahnen über die Werkstückoberfläche geführt, sodass eine deterministische Aneinanderreihung von einzelnen Eindrücken entsteht. Aufgrund der Vielfalt der Bearbeitungsparameter kann bei genauer Kenntnis der Auswirkungen einzelner Parameter auf die Randschichteigenschaften ein Prozess mit hoher Wandlungsfähigkeit implementiert werden, je nachdem welche technischen Eigenschaften während der späteren Verwendung des Bauteils im Vordergrund stehen. Die Wandlungsfähigkeit der

Technologie maschinelles Oberflächenhämmern wird bei einer Betrachtung der vier auftretenden Haupteffekte deutlich.

Unter Verwendung eines vergleichsweise kleinen Hammerkopfes (2-6 mm) und hoher Schlagamplituden wird eine Aufhärtung der Oberfläche beobachtet [20].

Die plastische Umformung der Oberflächentopografie durch MOH zieht eine Einglättung der bearbeiteten Oberfläche nach sich. Hierzu haben sich mittlere Schlagenergien und Hammerköpfe mit Durchmessern von 16-20 mm als zielführend erwiesen.

Bereits nach einmaliger Überdeckung der Oberfläche durch den MOH-Prozess kommt es zu Druckeigenstressungen in der oberflächennahen Randschicht mit einer Gesamteindringtiefe bis zu 5,5 mm unter der Oberfläche [21].

Ein weiterer positiver Effekt des MOH ist die Möglichkeit mit speziell angefertigten Hammerköpfen eine Mikrostrukturierung der Oberflächen vorzunehmen. Der Hammerkopf kann hierbei sowohl als Negativform mit Vertiefungen [22] als auch als Positivform [23] ausgeführt sein. Im letztgenannten Fall dienen die in die Oberfläche der Werkstücke eingebrachten Vertiefungen als Schmierstofftaschen.

Durch eine geeignete Auswahl der Bahnführungsparameter und Kombination mit Mikrostrukturen lassen sich lokal angepasste, maßgeschneiderte Oberflächen schaffen, die maßgeblich das tribologische Verhalten der Werkzeugsysteme bestimmen.

In industriellen Anwendungen werden jedoch meist besondere Kriterien an ein Werkzeugsystem gestellt. Dies betrifft insbesondere die Bearbeitung von Hinterschneidungen, Bohrungen oder engen Radien in Werkzeugen aller Art. Durch eine neuartige Hämmerkinematik, die mit dem konventionellen System verbunden wird, ist die Bearbeitung von Bohrungen mit einem minimalen Durchmesser von 15 mm und Hinterschneidungen von bis zu 5° möglich [24]. Zwar liegt hier die eingebrachte Schlagenergie aufgrund der zusätzlichen Kinematik geringfügig niedriger, jedoch ist nach wie vor eine Einglättung der Oberfläche möglich [25].

3 Sensorische und aktive Werkzeuge

Einer der wichtigsten Bausteine des Umformprozesses ist das Umformwerkzeug selbst. Hier bieten sich zahlreiche Möglichkeiten zur Einflussnahme auf den Prozess und zur Kontrolle dessen.

3.1 In-situ-Messung und –Kalibrierung

Die Integration von Funktionsmaterialien in Tragstrukturen ist seit einiger Zeit Bestandteil der Forschung am PtU. Beispielsweise können durch Rundkneten glatte, dünnwandige Rohre hergestellt werden, die innenliegend mit kraft- und formschlüssig gefügter Sensorik versehen sind. Diese smarten Halbzeuge können dann wiederum durch Schweißen oder Rohrbiegen zu sensorischen Produkten weiterverarbeitet werden, siehe **Bild 10**.

Diese ermöglichen es einerseits, Beanspruchungen und Zustandsänderungen des Bauteils im Betrieb zu überwachen. Andererseits kann die Sensorik bereits während der Herstellung des funktionsintegrierten Verbundes wichtige Informationen zur Prozessüberwachung liefern. Dazu werden die mit Hilfe der im Werkstück integrierten Sensoren aufgenommenen Messsignale für die Kontrolle der im Prozess einzustellenden Eigenschaften genutzt. Fehler des Fügeprozesses werden so direkt erkannt und es kann eine Selektierung nach Gut- und Schlechtteil vorgenommen werden.

Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit der werkzeugseitigen Bereitstellung zusätzlicher Prozessinformationen [26]. Durch den Einsatz einer

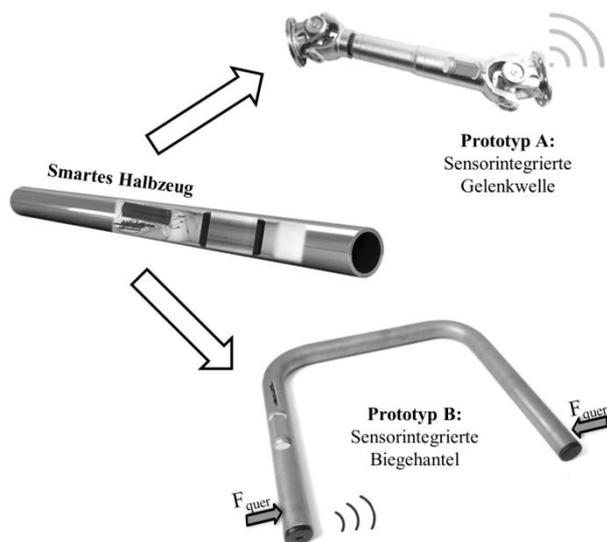


Bild 10: Smartes Halbzeug durch integrierte Kraftsensorik (Mitte), Funktionsdemonstratoren in Form von einer sensorischen Gelenkwelle/Biegehantel (oben/unten)

sensorischen Werkstückaufnahme, die die wirkenden Prozesskräfte misst und den Abgleich dieser Messwerte mit den während der Formgebung aufgenommenen Werkstücksignalen kann die Sensorkalibrierung bereits während der Formgebung stattfinden.

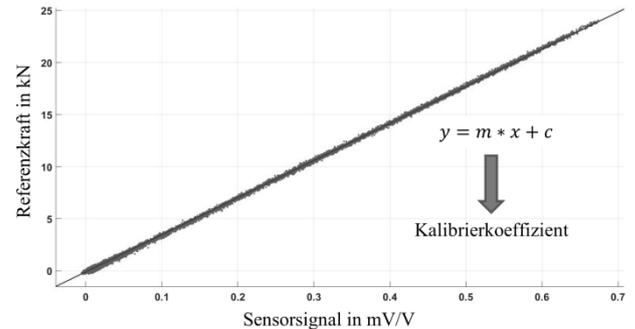


Bild 11: Berechnung des Kalibrierfaktors aus der Geradensteigung

Dieser als In-situ Kalibrierung bezeichnete Ansatz verkürzt die Prozesszeit für die Herstellung sensorintegrierter Strukturen, indem die aufwändige nachgelagerte Kalibrierung auf externen Kalibriereinrichtungen eingespart wird. Notwendige Bedingung ist dafür die simultane Erfassung der Messsignale von Werkstück und Referenzsensor bei gemeinsamer Belastung der Komponenten durch den Rundknetprozess. Aus den Messsignalen lassen sich Kalibriergeraden ableiten (siehe **Bild 11**).

Auftretende Herausforderungen liegen in der hohen Dynamik des Rundknetprozesses und dessen gesteigerten Anforderungen an Messtechnik und Referenzsensorik. Voraussetzung für eine erfolgreiche in-situ Kalibrierung ist zum einen, dass sich die Prozessdynamik unterhalb der Eigenfrequenzen des Referenzsensors befindet. Zum anderen muss ebenfalls die sichere Synchronisation zwischen den Telemetrieinheiten sichergestellt werden. Unter idealen Voraussetzungen können dadurch sensorintegrierte Strukturen der Genauigkeitsklasse 2% kalibriert werden.

3.2 Aktive Werkzeuge für Massivumformprozesse

Als logischen nächsten Schritt auf dem Weg zum intelligenten Umformwerkzeug steht die Integration von Aktivelementen bzw. Aktorik in diese. Durch aktive Verstellung einzelner Werkzeugelemente ist es möglich, Werkzeuge optimal an sich verändernde Prozesszustände anzupassen.

Bei kaltfließgepressten Bauteilen entstehen durch inhomogene Verformungen des Materials hohe Zugspannungen an der Oberfläche. Dieser Endspannungszustand ist bei der Auslegung von zyklisch belasteten Bauteilen nicht erwünscht, da er

die Bildung und das Wachstum von Rissen begünstigt. Dieses Problem gilt insbesondere für Werkstoffe wie z. B. austenitische Stähle, bei denen die Festigkeit nicht durch Wärmebehandlung nach der Bearbeitung, sondern ausschließlich durch die durch Kaltumformung hervorgerufenen Härtungsmechanismen eingestellt wird. Aktive Elemente können während des Prozesses eingesetzt werden, um die Verteilung der Eigenspannungen im fließgepressten Produkt zu verändern und deren Leistung zu verbessern.

Ein Ansatz, der aktuell am PtU untersucht wird, ist der aktive Einsatz des Ausstoßers als Gegenstempel. Dieser Teil ist normalerweise während des Prozesses passiv und wird nur für die Entnahme des extrudierten Produkts aktiviert. Die Anwendung einer Gegenkraft (siehe **Bild 12** links) reduziert jedoch das unterschiedliche Dehnungsverhalten im Bereich des Werkstücks. Form, Geschwindigkeit, Kontaktzeit und Kraft des Stempels sind Parameter, die bei richtiger Steuerung zu einer starken Abnahme der Eigenspannungen führen können. Numerische Simulationen sagen eine Reduktion um bis zu 65 % voraus.

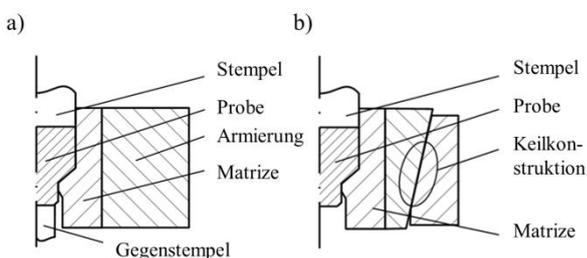


Bild 12: Konzepte zur aktiven Beeinflussung der Eigenspannungen beim Kaltfließpressen: Gegenstempel (links) und aktive Matrize (rechts)

Als weitere Lösung kann ein spezielles Armierungssystem verwendet werden, um die Vorspannung der Matrize zu variieren (**Bild 12** rechts). Die Armierung ist in der Regel fixiert und wird ausschließlich als Verstärkung verwendet, um das Versagen des Werkzeugs aufgrund von tangentialen Zugspannungen zu vermeiden. Durch Variation der Vorspannung während des Prozesses und des Ausstoßens ist es möglich, die Zugeigenspannungen an der Oberfläche der extrudierten Werkstücke zu verringern.

4 Schnittstelle Werkzeug-Maschine

Als weitere Schnittstelle im Produktionssystem besteht die Verbindung von Werkzeug und Maschine. An dieser Schnittstelle wird häufig unbeachteter Einfluss auf die Produktqualität genommen.

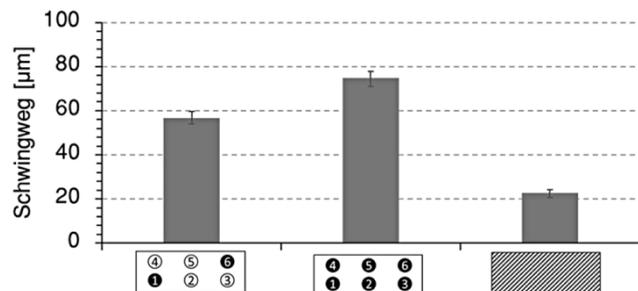


Bild 13: Schwingweg des Unterwerkzeugs beim Scherschneiden mit unterschiedlicher Spannsituation [28]. Weiche Einspannung (links), steife Einspannung (mittig) und Magnetspannplatte (rechts)

4.1 Einfluss von Werkzeugspannmitteln auf die Werkstückqualität

Schwingungen in Umformwerkzeugen und -anlagen führen zu Verschleiß und damit einhergehend zu einer Reduktion der Werkstückqualität. Es hat sich herausgestellt, dass die Werkzeugeinspannung als Schnittstelle beider Systeme einen signifikanten Einfluss auf die Werkzeugschwingung hat. Um darauf im Sinn einer resilienten Fertigung frühzeitig reagieren zu können, müssen Schwingungen im Prozess überwacht und identifiziert werden. Hierzu wurden verschiedene Messmethoden auf ihre Einsatztauglichkeit hin untersucht, darunter Beschleunigungs-, Weg-, Kraftmessung sowie eine optische, stereoskopische Vermessung der Bewegung aller Werkzeugkomponenten.

Untersuchungen von Kraus haben gezeigt, dass durch geeignete Wahl und Anordnung der Spannmittel in Stanz- und Tiefziehprozessen deutlicher Einfluss auf die Werkzeugschwingungen und somit die Produktqualität genommen werden kann. Dies ist am Beispiel eines Unterwerkzeugs beim Scherschneiden in **Bild 13** dargestellt. Zur Reduktion der verschleißrelevanten Werkzeugschwingewege ist einerseits eine steife Spannsituation zielführend. Bei Verwendung konventioneller Spannmittel wie Schnellspanner und Spannschrauben wird dies durch eine Erhöhung der Spannpunktzahl und Verkürzung der Hebelarme zwischen Prozesskraft und Spannpunkt erreicht. Durch den Einsatz von Magnetspannplatten wird die steifste Einspannung erzielt [27]. Bei weniger steifen Verbindungen sind Dämpfungseffekte durch Schmierfilme zwischen Werkzeugen und Maschinen für das Schwingungsverhalten relevant.

4.2 Sensorische Ausstattung von Umformprozessen

Zu einer gezielten Prozessbeeinflussung ist es zunächst erforderlich, den aktuellen Prozesszustand zu erfassen. Um Informationen hierzu in Umformprozessen inline aufzunehmen, sind üblicherweise größere Eingriffe in die Struktur der Anlage nötig – insbesondere wenn es um die Bestimmung von Kräften oder Momenten mit herkömmlicher Sensorik geht. Für eine weitreichende Digitalisierung von Produktionsanlagen bedarf es daher einfacherer Möglichkeiten zur Sensorintegration in Umformprozesse.

Am PtU wird daher ein alternativer Ansatz untersucht, bei dem herkömmliche Maschinenelemente durch sensorische Varianten ersetzt werden, die bei funktionaler Äquivalenz gleichzeitig Aufschluss über den aktuellen Maschinen- und Prozesszustand geben [29]. Dies ermöglicht einerseits, Kraft- und Drehmomentsensoren sehr nah am Ort der eigentlichen Umformung zu platzieren und so ortsaufgelöst Prozessinformationen zu erfassen, die anderweitig verloren gehen. Andererseits wird die einfache Sensorintegration ohne erheblichen Mehraufwand in der Montage oder Konstruktion begünstigt.

Anhand des Prozesses Walzprofilieren werden spezielle sensorische Passfedern untersucht, die eine besonders detaillierte Betrachtung der Prozessbedingungen ermöglichen, da die Drehmomente einzelner Rollen-Segmente aufgelöst werden können [30].

Bei Kombination von zylindrischen mit kegelstumpfförmigen Rollenabschnitten tritt zwangsläufig Schlupf zwischen der Rollenoberfläche

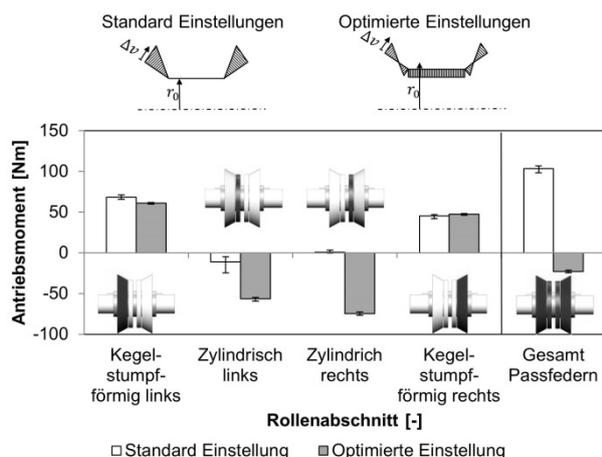


Bild 14: Auswirkung der Wahl des treibenden Durchmessers auf die Schlupfverteilung (oben) und Auswirkung eines geänderten treibenden Durchmessers auf die lokalen Antriebsmomente (unten) [30]

und dem Blech auf. Wird der Vorschub so eingestellt, dass an den zylindrischen Rollenabschnitten kein Schlupf auftritt, wirken die kegelstumpfförmigen Abschnitte aufgrund des größeren Durchmessers antreibend. Durch Optimierung des treibenden Durchmessers kann der Schlupf so eingestellt werden, dass sich antreibende und bremsende Momente im Schnitt ausgleichen, vgl. **Bild 14**. Auf diese Weise ist es möglich, die Antriebsmomente und damit den Energiebedarf einzelner Profilierstufen gezielt zu reduzieren. Jüngere Studien zeigen bereits für vergleichsweise einfache Profilgeometrien ein Energieeinsparpotenzial von 38 % [31] bis 51 % [32] auf.

4.3 Aktive Beeinflussung der Schnittstelle durch Dehnstoffaktoren

Zur Beeinflussung der Schnittstelle zwischen Werkzeug und Maschinen stehen unterschiedliche Aktoren zur Verfügung, die hauptsächlich auf Basis der Servotechnologie ein breites Spektrum an Kraft- und Wegmanipulation bereitstellen. Doch gerade um den weitreichenden Einsatz von Aktorik in Produktionsumgebungen attraktiver zu gestalten, gilt es noch einige Herausforderungen zu lösen. Einerseits muss die Wirtschaftlichkeit der Aktorik sichergestellt bzw. erhöht werden. Andererseits ist es nötig, ihren Bauraum teils drastisch zu reduzieren, um an vielfältigen Schnittstellen Einsatz finden zu können.

Hierfür stellt die Anwendung von Dehnstoffen einen vielversprechenden Ansatz dar, vor allem wenn als Dehnstoff Paraffin eingesetzt wird. Dieser wachsartige Stoff ist ungiftig, günstig, leicht zu verarbeiten und weist eine hohe Energiedichte auf. Wird Paraffin erhitzt, erfährt es einen Volumenzuwachs von bis zu 20 %. In einen festen Behälter eingeschlossen kann die Behinderung dieser Ausdehnung genutzt werden, um bei kleinen Stellwegen erhebliche Stellkräfte zu realisieren. Herkömmliche Paraffinaktoren liefern aufgrund ihres Aufbaus jedoch nur geringe Kräfte. Aus diesem Grund wird am PtU an neuartigen Dehnstoffaktoren geforscht, die bei kleinem Bauraum deutlich größere Stellkräfte bereitstellen können.

Bild 15 zeigt das Aktorkonzept auf Dehnstoffbasis. Das Gehäuse besteht aus zwei tiefgezogenen Näpfen, welche ineinander geführt werden können, um ein abgeschlossenes Gehäuse zu erzeugen. Dabei steht die Zargenspitze des inneren Napfes, die mit einer Fase versehen ist, auf dem Boden des äußeren Napfes. Zwischen beiden ist eine kreisringförmige Messingfolie positioniert. Das Gehäuse wird mittels

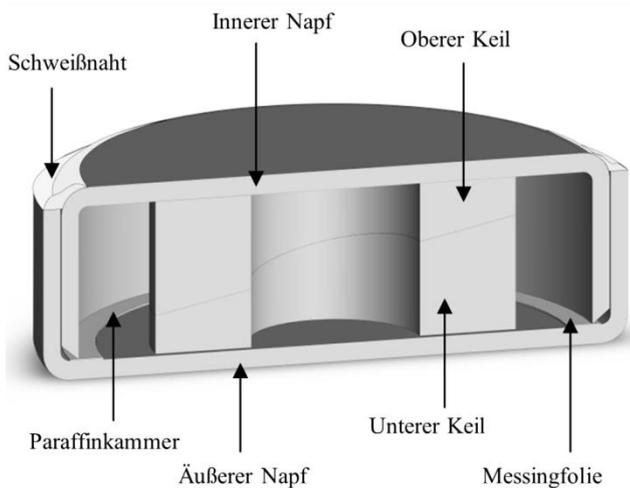


Bild 15: Aktorkonzept mit integriertem Keilsystem

Laserschweißen verschlossen. Die Messingfolie wirkt in Verbindung mit der Fase des inneren Napfes als schneidende Dichtung, damit durch die Erwärmung während des Fügens kein Dehnstoff austritt. Beim Einsatz des Aktors wird dieser über die Mantelfläche erwärmt, sodass sich das im inneren befindliche Paraffin ausdehnt und auf den Stirnseiten des Aktors eine Stellkraft oder einen Stellweg bereitstellt. **Bild 16** zeigt Prüfergebnisse eines Aktorprototypen ohne Keilsystem, bei dem das Gehäuseinnere vollständig mit Paraffin gefüllt ist. Der Aktor hat einen Durchmesser von etwa 30 mm und eine Höhe von 10 mm.

Bei der Prüfung ist der Aktor in einer Zug-Druck-Prüfmaschine zwischen Druckplatten eingespannt. Diese werden durch ein optisches Messsystem in ihrer Position fixiert und die durch die Erwärmung resultierende axiale Kraft F_a wird aufgezeichnet. Der Prüfablauf sieht vor, dass die Temperaturen 50 °C, 60 °C und 70 °C hintereinander jeweils zwei Mal angefahren werden. Zwischen den einzelnen Prüfungen wird das System abgekühlt. Die Ergebnisse zeigen zur jeweiligen Prüftemperatur ein wiederholgenaues Ergebnis und der Aktor kann bei 70 °C eine Druckkraft von etwa 40 kN aufbringen.

Eine weitere Verbesserung stellt das ebenfalls in **Bild 15** gezeigte Keilsystem dar, bestehend aus unterem und oberem Keil. Dieses ermöglicht es, eine Stellaufgabe ohne zusätzliche Wärmezufuhr aufrecht zu erhalten. Durch die Erwärmung des Paraffins in der Paraffinkammer wird über den Umfang ein Druck auf das Keilsystem aufgebracht. Da jeder Keil eine über den Umfang veränderliche Keilfläche aufweist, kommt es zu einer Verschiebung der Keile zueinander und einer axialen Auslenkung.

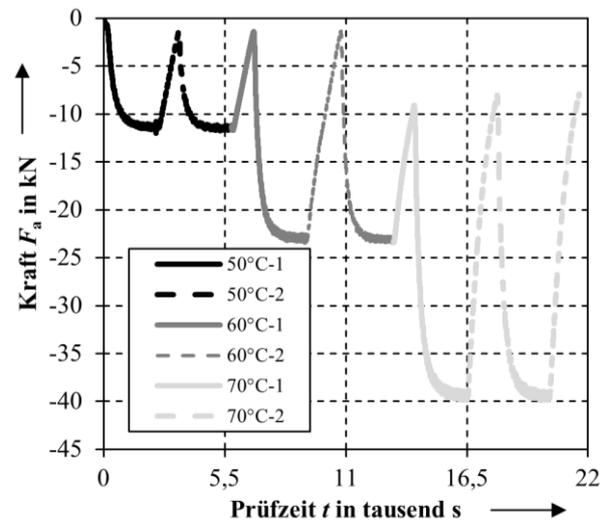


Bild 16: Prüfergebnisse eines Aktor-Prototypen ohne Keilsystem

5 Flexibilität und Resilienz durch moderne Umformmaschinen

Flexibilität kann insbesondere durch ganzheitliche Betrachtung der Umformmaschine erreicht werden. Durch flexible und geregelte Anlagen können maßgeschneiderte Produktgeometrien und -eigenschaften erzeugt und Störgrößen ausgeglichen werden.

5.1 Flexible Herstellung von Profilen mit variierendem Querschnitt

Zwar ermöglichen flexible Walzprofilierprozesse eine deutliche Erweiterung des Formenspektrums in der Gestaltung von Blechprofilen, jedoch wird diese einerseits mit einem erhöhten Bedarf an Profiliergerüsten und andererseits erhöhter Komplexität in nachgeschalteten Umformprozessen erkauft. Insbesondere flexible Profiliergerüste benötigen zusätzliche Freiheitsgrade in den Stellbewegungen mit zugehörigen Antrieben, was mit einem erhöhten finanziellen und steuerungstechnischen Aufwand einhergeht. Ein Ziel sollte daher sein, die Anzahl der nötigen Antriebe zu reduzieren, um die Wirtschaftlichkeit von flexiblen Profilierprozessen zu erhöhen.

Aktuelle Forschungsprojekte des PtU greifen diesen Trend auf und beschäftigen sich mit der Entwicklung eines Prozesses zur schrittweisen Fertigung von Versteifungssicken mit höhenveränderlichem Querschnitt. Diese in Profillängsrichtung variierende Materialverteilung dient einerseits zur belastungsangepassten Profilversteifung sowie andererseits als Materialspeicher für nachgeschaltete

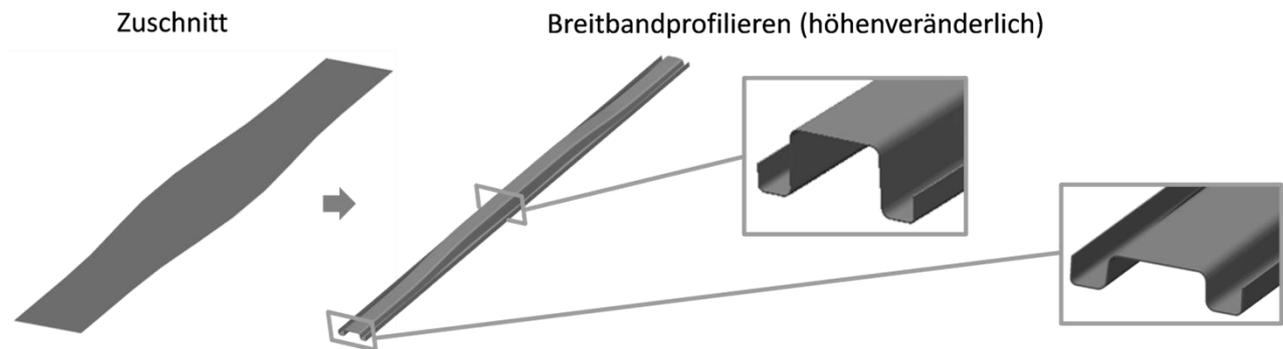


Bild 17: Herstellung höhenveränderlicher Profile mit belastungsangepasster Materialverteilung

Umformprozesse. Die auf diese Weise hergestellten Sicken sind beispielhaft in **Bild 17** dargestellt.

Die kontinuierliche Herstellung solcher höhenveränderlichen Querschnittsverläufe stellt hohe Anforderungen an die Kinematik der Umformrollen. Zur Sicherstellung des ständigen Kontakts zwischen dem Werkstück und der oberen sowie der unteren Umformrolle ist neben den vertikalen Freiheitsgraden der beiden Rollen auch eine horizontale Bewegung der unteren Rolle in den Zonen der Sickenrundsteigungen erforderlich (vgl. **Bild 18**). Entsprechend dieser Anforderungen wurde am Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen ein Werkzeug konstruiert und gefertigt.

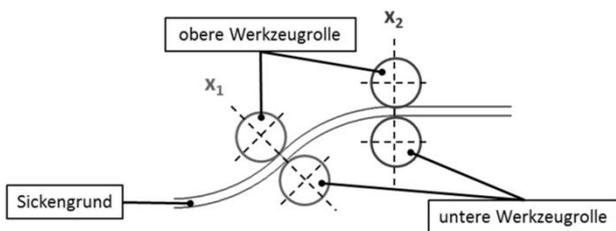


Bild 18: Inkrementelles Einbringen der höhenveränderlichen Sicke in n Umformstichen (oben) und Werkzeugrollenstellungen während des Umformprozesses (unten)

Für eine Nutzung der eingebrachten Sicken in nachgeschalteten Umformprozessen ist es erforderlich, eine Blechdickenminderung bei der Einbringung der Sicken zu vermeiden. FE-Simulationen bestätigen, dass der Materialfluss in Bereichen großer Sicktiefen hauptsächlich aus seitlichem Blecheinzug generiert wird, wodurch die ungewollte Materialausdünnung vermieden wird.

5.2 3D-Servo-Press

Neuartige und flexible Prozesse lassen sich mit der am Institut entwickelten Mehrtechnologiemaschine 3D-Servo-Press ebenso realisieren wie bereits etablierte Verfahren. Durch die einzigartige Kinematik, bestehend aus drei in 120° angeordneten Getrieben,

besitzt die 3D-Servo-Press am Stößel drei voneinander unabhängige Freiheitsgrade, welche durch den Einsatz von Torquemotoren sowohl kraftgebunden als auch weggebunden geregelt werden. Durch die Kinematik ist es möglich, mehrere Technologiestufen auf einer Maschine zu realisieren [33]. Im Vergleich zu konventionellen Pressen können etablierte Prozesse wie beispielsweise das Scherschneiden, Tiefziehen, Biegen ebenso wie das in der Massivumformung eingesetzte Taumelpressen und die inkrementelle Blechumformung auf ein und derselben Maschine ohne zusätzliche Aktorik realisiert werden. Die Freiheitsgrade der Presse eröffnen dabei neue Anwendungsmöglichkeiten wie die Kombination von unterschiedlichen Taumelstrategien, inkrementelle Umformung mit höheren Blechdicken sowie die Integration der Einzelteilrückverfolgung in den eigentlichen Umformprozess.

Die Kopplung von Exzentrern und Spindelantrieben und die damit einhergehenden drei Freiheitsgrade des Stößels ermöglichen eine hohe Anlagen-, Produkt- und Prozessflexibilität und gleichzeitig

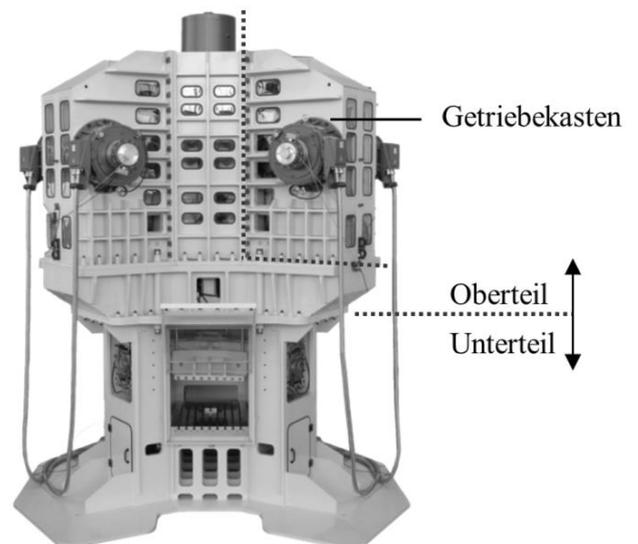


Bild 19: 3D-Servo-Press

eröffnet die Nutzung der 3D-Servo-Pressen im Vollumlaufbetrieb auch die Chance auf unverändert hohe Nachfrageflexibilität [34]. Durch die Regelung der einzelnen Exzenterantriebe ist es desweiteren möglich, bei außermittiger Krafteinleitung die Stößelkipfung zu kompensieren [35] und somit vorhandenen Prozess- und Halbzeugschwankungen gezielt entgegenzuwirken.

5.3 Kombinierte Wälz-Gleit-Lager

Im Betrieb von Servopressen entstehen teilweise herausfordernde Belastungsprofile für die Maschinenelemente, welche vor allem erhöhte Anforderungen an die Lagerstellen mit sich ziehen [36].

Dieses wird in einem am PtU verfolgten Ansatz durch eine redundante Anordnung zweier Wälzlager um eine mittig liegende Gleitlagerschale begegnet. So erhalten die Lagerstellen auch bei Ausfall einer Lagerkomponente ein Mindestmaß der Lagerfunktion. Bei einem Ausfall der Gleitlagerkomponente können weiterhin Umformprozesse mit einer Last entsprechend der Wälzlagerbelastbarkeit durchgeführt werden. Ein Ausfall der Wälzlagerkomponente hingegen führt zwar zur Beeinträchtigung in der Bauteilqualität, jedoch bleibt die grundlegende Funktionsfähigkeit der Maschine erhalten. Das Gleitlager dient zudem als Fanglager und somit als Schutz gegenüber unzulässiger Deformation der Wälzkörper. **Bild 20** zeigt das CAD-Konzept eines sensorisch überwachten Wälz-Gleitlagers.

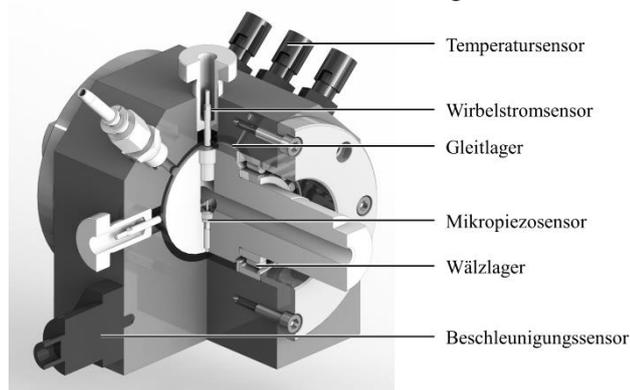


Bild 20: Sensorisch überwachtetes Wälz-Gleitlager

Aktuell wird neben der Gesamtkraft zusätzlich die Wellenverlagerung über zwei Wirbelstromsensoren erfasst. Dies ermöglicht bereits eine Beurteilung des Lagerzustandes, getrennt nach Wälz- und Gleitlagerkomponente (siehe **Bild 21**).

Über ein in der Wellenmitte angebrachtes Mikropiezoelement soll zukünftig zudem der Druckverlauf in der Gleitlagerschale umlaufend gemessen werden. Temperaturmessungen an den drei

Lagerstellen sowie die Aufnahme des Körperschalls am Gesamtlager erweitern die sensorische Überwachung der Lagerkombination. Ziel aktueller Forschungstätigkeiten ist, über die Zustandsüberwachung des kombinierten Lagers Rückschlüsse auf den Zustand der Maschine ziehen zu können und Handlungsempfehlungen zu geben. Weiterführendes Ziel wird sein, den Lager- sowie den Maschinenzustand über die Verwendung geeigneter Aktorik zu regeln.

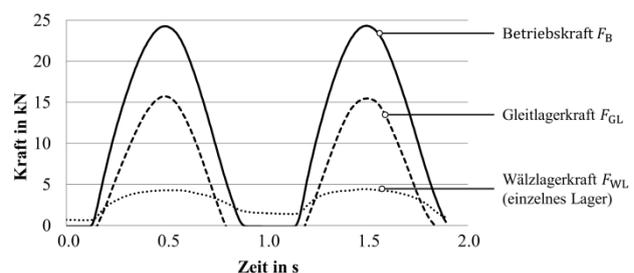


Bild 21: Kraftaufteilung auf Wälz- und Gleitlagerkomponente im Schwenkbetrieb

5.4 Flexible Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens

Neben der Entwicklung neuer flexibler Prozesse und Umformmaschinen ist die Weiterentwicklung von Prozessen, die bereits über eine hohe Flexibilität verfügen, Bestandteil der aktuellen Forschung am PtU. Kinematische Profilbiegeverfahren, wie das Drei-Rollen-Biegen, verfügen durch ihre nicht werkzeuggebundene Formgebung über eine hohe Flexibilität. Zum einen ermöglicht diese, mit einfachen Werkzeugen eine Vielzahl von Profilkonturen zu fertigen und zum anderen auf auftretende Schwankungen der Halbzeugeigenschaften zu reagieren. Dies geht jedoch mit einem hohen Personalaufwand zum Einstellen des Prozesses einher und erlaubt bisher einen nur geringen Automatisierungsgrad.

Ziel der aktuellen Forschung ist eine Automatisierung des Drei-Rollen-Biegens, welche die Flexibilität des Prozesses in vollem Umfang abdeckt und somit die Wirtschaftlichkeit des Prozesses erhöht. Hierzu steht vor allem die Entwicklung von Messtechnik zur Erfassung der Profilkontur und der für eine Regelung erforderlichen Prozessgrößen Vordergrund. Die hierdurch angestrebte Digitalisierung des Prozesses bildet die Grundlage für eine weiterführende Automatisierung.

Aktuell wird unter anderem an der Weiterentwicklung eines optischen Messsystems zur Erfassung der Profilkrümmung in den verschiedenen

Stufen des Prozesses gearbeitet um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Neben der Erfassung der Profilkrümmung ermöglicht das System eine digitale Rekonstruktion der Biegelinie sowie die Bestimmung der Kontaktpunkte des Profils mit den Rollen während des Prozesses [37].

Zusammenfassung

Es bleibt festzuhalten, dass für die erfolgreiche Umsetzung zukunftsfähiger Umformprozesse die robuste Automatisierung ein wesentlicher Bestandteil sein muss. Diese ist nicht nur nötig, um Schwankungen und unerwartete Störgrößen auszugleichen, die bei der Prozessauslegung nicht berücksichtigt wurden – sondern auch, um der Umformtechnik ganz neue Möglichkeiten zu eröffnen. Zu einem solchen automatisierten Prozess gehören drei wichtige Komponenten, die in den hier vorgestellten Forschungsthemen untersucht werden. Zunächst die Sensorik, die abhängig vom überwachten Ausschnitt des umformtechnischen Systems vielfältige Formen annehmen kann – seien es konventionelle Kraftsensoren, sensorische Maschinenelemente oder gar Schmierstoffe. Auf der Sensorik baut die Prozessregelung auf, die für eine hohe Regelungsqualität mit verlässlichen Daten gespeist werden muss. Dabei ist es wünschenswert, die Produkteigenschaften möglichst allumfassend zu kontrollieren. Um eine robuste und gleichzeitig flexible Regelung aufzubauen, ist es sinnvoll, die zugrundeliegenden Sensordaten möglichst nahe an der eigentlichen Umformung aufzunehmen, um eine genaue Kenntnis über den tatsächlichen Prozesszustand zu haben. So wird es ermöglicht, für die Regelung auf das physikalisch begründete Prozessverständnis zurück zu greifen anstatt Informationsverlust durch abstrakte oder empirische Modelle zu riskieren. Die dritte Komponente des automatisierten Prozesses ist die Aktorik, mit der letztlich die aktive Beeinflussung des Prozesses vorgenommen wird. Gerade unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten kommt dieser eine besondere Bedeutung zu. Aktuelle Forschung – wie die hier vorgestellten Arbeiten des PtU – muss daher neben der reinen Umsetzbarkeit auch immer an einer möglichst kostengünstigen Realisierung der erforschten Lösungen interessiert sein.

Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse beruhen auf Ergebnissen mehrerer geförderter Forschungsprojekte.

Die Forschungsarbeiten zu „Kragenziehen von Sandwichblechen“ finden im Rahmen des IGF-Vorhaben 18773 N der Forschungsvereinigung Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB) statt. Dieses wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken außerdem allen am Cornet-HaPTec-Projekt beteiligten Industriepartnern sowie der EFB und AiF für die Unterstützung bei der Durchführung und Finanzierung des Vorhabens „HaPTec – Weiterentwicklung des maschinellen Oberflächenhämmerns zur Ausweitung des industriellen Einsatzgebiets“. Die Forschungsarbeiten zum Warm-Walzprofilieren von Aluminium finden im Rahmen des LOEWE (Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz) Schwerpunkts Allegro (*Hochleistungskomponenten aus Aluminiumlegierungen durch ressourcenoptimierte Prozesstechnologien*) und Hessen Agentur LOEWE 3 Projektes WarmAp (*Warmumformen von Aluminiumblechen für Hochleistungskomponenten zukünftiger Mobilitätskonzepte*) statt.

Ferner danken die Autoren der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung der Teilprojekte B2 „Umformen – Produktionsfamilien bei gleichbleibender Qualität“, B4 „Integration von Funktionsmaterialien“ und T6 „Zustandsbeeinflussung von Wälz-Gleitlagerungen“ im Rahmen des SFB 805 „Beherrschung von Unsicherheit in lasttragenden Systemen des Maschinenbaus“ sowie der Forschungsvorhaben 53-1 „Herstellung mehrdirektional geweiteter Profile“, 59-1 „Optimierung der Werkzeugnutzung in der Blechumformung“, 63-1 „Gezielte Einstellung von Eigenspannungen während der Kaltmassivumformung“ sowie 65-1 „Auslegungsmethoden für neuartige, energieeffiziente, geschlossene Dehnstoffaktoren mit hoher Kraftwirkung“.

Literatur

- [1] Verband der Automobilindustrie e.V.: Automatisierung – Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren. Internet: <https://www.vda.de/dam/vda/publications/2015/automatisierung.pdf>. Zugriff am 21.08.2018
- [2] Groche, P.; Hohmann, J.; Kessler, T. et al.: Industrie 4.0 - Forschung am PtU. In: 12.

-
- Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, S. 27–47
- [3] Groche, P.; Hoppe, F.; Kessler, T. et al.: Industrial Working Environment 2025. In: New Developments in Sheet Metal Forming. Stuttgart: Institute for Metal Forming Technology 2018, S. 125–136
- [4] Köhler, S.; Rohnert, C.; Groche, P.: Extension of geometric limits in drawing of stringer sheets. *Procedia Manufacturing* 15 (2018), pp. 693–700
- [5] Groche, P.; Ringler, J.; Vucic, D. et al.: Branched semi-finished products for a new class of multi-chambered profiles, 2008
- [6] Groche, P.; Köhler, S.; Husmann, H. et al.: Erweiterung von Grenzen der Stegblechumformung. *Wt Werkstattstechnik online* 10 (2017), S. 689–694
- [7] Göllner, T.: Geometry optimization of branched sheet metal structures with a globalization strategy by adaptive cubic regularization. München: Dr. Hut 2014
- [8] Groche, P.; Bäcker, F.: Ein Algorithmus zur Positionierung von Funktions- und Strukturelementen auf Halbzeugen für die Umformtechnik, 2014
- [9] Griesel, D.; Keller, M. C.; Groche, P.: Numerical simulation of the hole-flanging process for steel-polymer sandwich sheets, 2018
- [10] Gröb, T.; Wießner, L.; Bruder, E. et al.: Magnetic hardening of Fe 50 Co 50 by rotary swaging. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 428 (2017), S. 255–259
- [11] Franke, W.; Stein, P.; Dörsam, S. et al.: Formability of paperboard during deep-drawing with local steam application, 2018
- [12] Brabazou, D.; Naher, S.; Stein, P. et al. (Hrsg.): Control of Anisotropic Shape Deviation in Single Point Incremental Forming of Paperboard. 2017 2017
- [13] Habig, K.-H.: Verschleiß und Härte von Werkstoffen. München: Hanser 1980
- [14] Wu, Y.; Chen, C.; Groche, P.: Wear detection through measurement of the thermoelectrical current and electrical resistance. In: 59. Tribologie-Fachtagung 2018, Gesellschaft für Tribologie e.V.
- [15] Hortig, D. M.: Werkzeugbeschichtungen mit Trockenschmierstoffeigenschaften für das Tiefziehen. Aachen: Shaker 2001
- [16] Groche, P.; Volke, P.; Gerlitzky, C. et al.: Adaption von Kaltmassivumformprozessen auf Basis einer Temperaturerfassung, 2017, S. 227–236
- [17] Groche, P.; Resch, F.: Dry forming of aluminum alloys – Wear mechanisms and influencing factors. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 46 8, S. 813–828
- [18] Abraham, T.; Bräuer, G.; Kretz, F. et al.: Observation of the a-C:H run-in behaviour for dry forming applications of aluminium (accepted). In: 5th International Conference on New Forming Technology 2018
- [19] Scheil, J.: Entwicklung von Austenitisch-Ferritischem Gusseisen (ADI) aus EN-JS2070. Mikrostruktur, mechanische Eigenschaften und deren Auswirkung auf die Oberflächenbearbeitung durch das Maschinelle Oberflächenhämmern, Technische Universität Darmstadt, 2016
- [20] Steitz, M. e. a.: Maschinelle Oberflächeneinglättung für den effizienten Werkzeug- und Formenbau. Schlussbericht der AiF, 2014
- [21] Lienert, F.; Hoffmeister, J.; Schulze, V.: Residual stress depth distribution after piezo peening of quenched and tempered AISI 4140, 2012
- [22] Lechner, C.: Oberflächenmodifikation unter Einsatz der Technologie des Schlagverdichtens (Machine Hammer Peenings). Dissertation, TU Wien, 2014
- [23] Steitz, M.; Stein, P.; Groche, P.: Influence of Hammer-Peened Surface Textures on Friction Behavior. *Tribology Letters* 58 (2015) 2, S. 404
- [24] Groche, P.; Sticht, P.: Maschinelles Oberflächenhämmern von Innenkonturen. *Werkstattstechnik online: wt, Springer VDI Verlag, Düsseldorf* 11/12 (2016), S. 830–834
- [25] Sticht, P.; Steitz, M.; Groche, P.: Prediction and Experimental Validation of an Impact Energy Threshold for Mechanical Surface Smoothing. *Procedia CIRP* 45 (2016), S. 159–162
- [26] Krech, M.; Groche, P.: Robust force and torque measurements by integrated sensors in hollow shafts, 2017, S. 511–515
- [27] Kraus, D.; Lieberenz, M.; Groche, P.: Reduction of tool wear by systematic design of the tool clamping situation. *Journal of Manufacturing Processes* (2017)
- [28] Lieberenz, M.: Untersuchung des Einflusses der Werkzeugspansituation auf das dynamische
-

Verhalten eines Scherschneidwerkzeugs,
Technische Universität Darmstadt, 2017

- [29] Groche, P.; Brenneis, M.: Manufacturing and use of novel sensoric fasteners for monitoring forming processes. *Measurement* 53 (2014), S. 136–144
- [30] Traub, T.; Krech, M.; Groche, P.: Profilierprozesse digitalisieren. bbr - Bänder, Bleche, Rohre (2018) Onlineausgabe
- [31] Traub, T.; Gregório, M. G.; Groche, P.: A framework illustrating decision making in operator assistance systems and its application to a roll forming process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97 (9-12) (2018), pp. 3701–3710
- [32] Traub, T.; Groche, P.: Energy efficient roll forming processes through numerical simulations, 2018, p. 12182
- [33] Groche, P.; Kraft, M.; Schmitt, S. O. et al.: Rechnet sich Flexibilität in der Umformtechnik? *wt Werkstattstechnik online, Werkstattstechnik online: wt, Springer VDI Verlag, Düsseldorf* 100 (2010) 10, S. 734–742
- [34] Groche, P.; Scheitza, M.; Schmitt, S. et al.: Increased total flexibility by 3D Servo Presses. *CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, Manchester* 59/1 (2010), S. 267–270
- [35] Groche, P.; Hoppe, F.; Sinz, J.: Stiffness of multipoint servo presses. *Mechanics vs. control. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Elsevier, Manchester* 66 (2017), pp. 373–376
- [36] Groche, P.; Sinz, J.; Felber, P.: Kombinierte Wälz-Gleitlager – Anforderungsgerechter Funktionsübergang. *Konstruktionspraxis: Vogel Verlag Sonderheft SH1/2018* (2018)
- [37] Groche, P.; Kessler, T.; Huttel, D.: Online-Konturvermessung beim Profilbiegen. *Werkstattstechnik online: wt, Springer VDI Verlag, Düsseldorf* 11/12 (2017), S. 804–807



Karosseriebau für die Elektromobilität

Dr.-Ing. Johannes Staeves, München
BMW Group

Elektrisch angetriebene Fahrzeuge erfordern für die Integration der Batteriespeicher neue Karosseriekonzepte. Auch autonomes Fahren und Mobility on Demand werden die Bauweisen zukünftiger Karosseriestrukturen verändern. Die Planung der zukünftigen Produktionsstrukturen muss trotz ungewisser Marktprognosen der Elektromobilität den Übergang von klassischen Karosserien für Verbrennungsmotoren hin zu autonom fahrenden Elektrofahrzeugen wirtschaftlich, flexibel und mit dem Bedarf entsprechenden Stückzahlen ermöglichen. Besondere Herausforderungen liegen hierbei im Karosseriebau und in der Montage, aber auch die Komponentenfertigung hat sich auf neue Anforderungen aus der Systemintegration einzustellen. Selbst die über Jahrzehnte optimierte Blechumformung kann zukünftig noch flexibler auf Volumenschwankungen auch bei kleineren Stückzahlen reagieren. Über mehrere Werke standardisierte Servopressen, die durch mehrachsige Feeder aufwändige Schiebersysteme in Werkzeugen einsparen, sind hierfür ein Beispiel. Neue Werkstoffe, besonders aber neue Werkstoffkombinationen fordern Lösungen in der Produktionstechnik, um das bewährte Motto „Der richtige Werkstoff an der richtigen Stelle“ weiter zu optimieren und innerhalb einzelner Bauteile z.B. lokale Faserverstärkungen nutzen zu können. Langfristig sind neue Verfahren wie die additive Fertigung zu berücksichtigen. Sie ermöglichen es „die richtige Geometrie im richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle“ neu zu denken, da man mit der Wahl dieses Fertigungsverfahrens nicht mehr auf Blech- Profil- oder Gussbauweise festgelegt ist, sondern beliebige Geometrielemente und langfristig auch Werkstoffe in einem Bauteil kombinieren kann.

Body construction for Electromobility

Electrically driven vehicles require new body concepts for the integration of battery storage. Autonomous driving and mobility on demand will also change the design of future body structures. In spite of uncertain market forecasts for electromobility, the planning of future production structures must make it possible to move from classic bodies for internal combustion engines to autonomously driving electric vehicles economically, flexibly and in line with demand. Particular challenges lie in joining technology and assembly, but also component manufacturing has to adapt to new requirements from system integration. Even the optimized sheet metal forming over decades can react even more flexibly to volume fluctuations in the future. An example of this is the standardization of servo presses that save time- and cost-consuming cam units in tools with multi-axis feeders. New materials, but especially new combinations of materials demand solutions in production technology in order to further optimize the proven motto "The right material in the right place" and to be able to use local fiber reinforcements within individual components. In the long term, new processes such as additive manufacturing have to be considered. They make it possible to rethink "the right geometry in the right material in the right place", since with the choice of this production method, it is no longer based on sheet or cast construction, but can combine any geometrical elements and materials in a single component.

Einleitung

Die Automobilindustrie ist mitten in einem globalen Wandel. Elektromobilität, autonomes Fahren und Digitalisierung bieten neue Chancen und Herausforderungen. Auch Entwicklung und Produktion von Karosserien müssen sich darauf vorbereiten. Aus vielfältigen Anforderungen ansprechende, zuverlässige und gesetzeskonforme Produkte zu gestalten und in ein wirtschaftliches

Produktionssystem zu integrieren, erfordert eine komplexe Systemintegration [1].

In der Automobilindustrie hat Systemintegration drei Elemente. Für den Bereich der Karosserie sind zuerst im Entwicklungsprozess Prognosen und verschiedene Szenarien zu zukünftigen Antriebssystemen und Kundenanforderungen bezüglich der Nutzung des Fahrzeugs und des Innenraums in einem stimmigen Karosseriekonzept zu integrieren. Bereits in dieser Phase ist das zweite Element der Systemintegration, das Grundprinzip der Produktion in Taktabschnitten zu berücksichtigen. In

Karosseriebau und Montage sind alle Arbeitsinhalte auch von Elektrofahrzeugen bei größeren Stückzahlen in Takte von 60 Sekunden zu integrieren. Das dritte Element der Systemintegration ist die Integration neuer Produkte in bestehende Produktionsstrukturen. Um langfristig die Reaktionsfähigkeit auf verschiedene Szenarien sicherzustellen, müssen in einem Werk mehrere Produkte integriert werden. Bei der BMW Group bedeutet das am Beispiel der Elektromobilität, dass Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, Hybridantrieb und rein elektrisch angetriebene Fahrzeuge zukünftig über dasselbe Produktionsband laufen. Mit einem starren Produktionskonzept ließe sich die Wirtschaftlichkeit zwar optimal auf ein Produktkonzept ausrichten, auf sich ändernde Marktanforderungen ist damit aber kaum zu reagieren.

1 Karosseriekonzepte für Elektrofahrzeuge

Die offensichtlichsten Änderungen aktueller Karosseriekonzepte sind zur Integration des Batteriespeichers erforderlich. In für kleine elektrische Reichweiten ausgelegten Fahrzeugen, Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen oder sportlich flach zu gestaltenden Elektrofahrzeugen mit kleinerem Batteriespeicher wird meist der Bauraum des bisherigen Tanksystems oder wie beim BMW i8 der Bereich des Tunnels für Batterien genutzt (Bild 1).

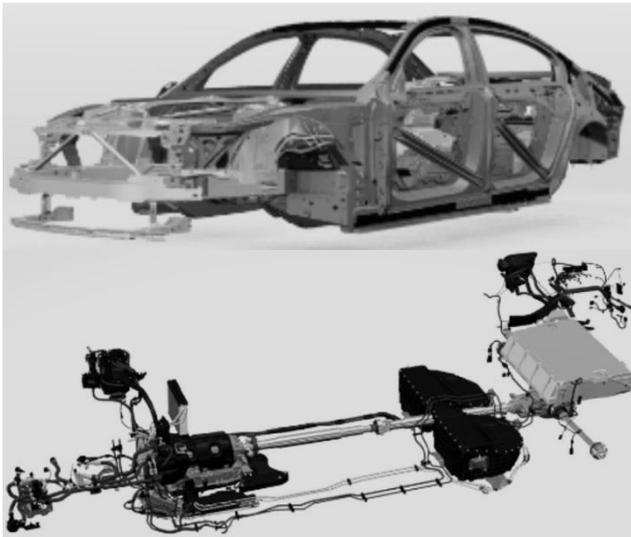


Bild 1: BMW 740e iPerformance, Karosserie und Hybridantrieb mit Sattelspeicher (9,2 kWh)

In höhere Karosseriekonzepte lassen sich bereits heute Flachspeicher im Karosserieboden integrieren.

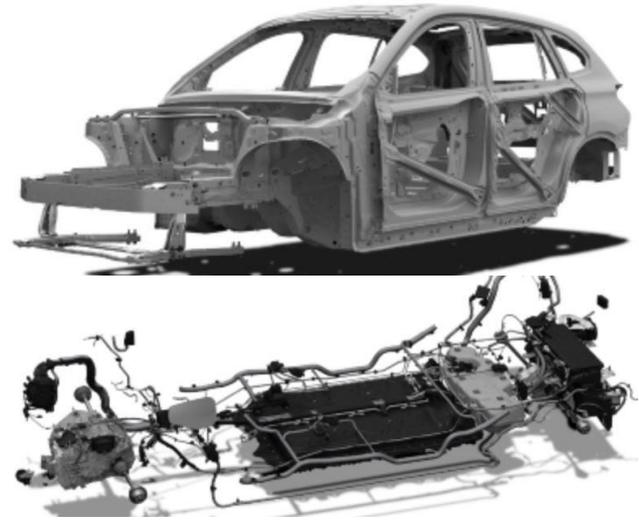


Bild 2: BMW X1 xDrive25Le iPerformance, Karosserie und Hybridantrieb mit Flachspeicher (10,7 kWh)

Für auf größere elektrische Reichweite ausgelegte Fahrzeuge geht der Trend zu großen Flachspeichern im Unterboden (Bild 2).

Gelingt es, die Gehäusestruktur dieser Speicher geschickt in die Karosserie zu integrieren, kann durch Funktionsintegration der Speicher mitttragend gestaltet werden und Funktionen übernehmen, für die bisher andere Bauteile erforderlich waren.

2 Zukünftige elektrische Antriebe

Die Karosseriekonzepte müssen bisher auf Verbrennungsmotoren unterschiedlicher Leistung ausgelegt werden.

Ein einheitliches Konstruktionsprinzip als Baukastenmotoren ist Grundlage für die Fertigung von 3-, 4- und 6-Zylinder Otto- und Dieselmotoren. Daraus ergeben sich Vorteile wie die standortübergreifende Kooperation zwischen den Werken, der internationale Transfer von Mitarbeitern und eine flexible Werkebelegung. Diese sind Basis für die optimale Nutzung der Kapazitäten.

Für die aktuell in Entwicklung befindliche fünfte Generation elektrischer Antriebe bei BMW sind zukünftig wie bei Verbrennungsmotoren verschiedene Größen der Batteriespeicher als auch der Elektromotoren verfügbar [2]. Auch hier bietet sich das Baukastenprinzip an (Bild 3).

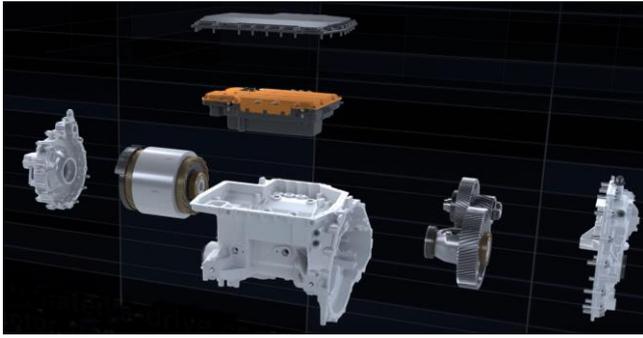


Bild 3: Hochintegrierter E-Antrieb mit E-Motor, Getriebe und Leistungselektronik

Je nach geforderter Leistung oder Drehmoment kann die Länge oder der Durchmesser des Rotors variiert werden. Auch die Leistungselektronik und das Getriebe sind als Baukastenelemente bedarfsgerecht ausgelegt. Die Batteriespeicher werden durch Variation der Zellenhöhe, der Anzahl der Zellen in einem Modul oder durch die Anzahl der Module im Gehäuse skaliert (Bild 4).

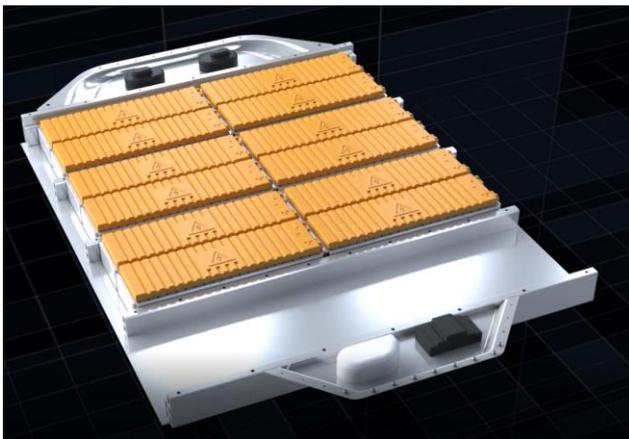


Bild 4: Die Größe der Speicher ist über die Anzahl der Module skalierbar

Zukünftige Karosseriekonzepte müssen die Flexibilität bieten, diese Elemente des Elektroantriebs in unterschiedlicher Größe zu integrieren.

Während für verbrennungsmotorische Antriebe Bodenstrukturen mit komplexen Geometrien für Tunnel, Tank und Sitzanbindungen erforderlich sind, ist die Aufnahme der in Bild 4 dargestellten Batteriemodule mit geraden Profilen möglich. In Serie umsetzbare Lösungen werden gegenüber der Prinzipdarstellung in Bild 4 in Details zusätzliche Lösungen benötigen. Einige davon stehen bereits zur Verfügung, andere werden noch in der Forschung erarbeitet. Im Profilierprozess eingebrachte Löcher oder Wärmebehandlungen, Spaltprofile, zusätzliche Stege, variable Querschnitte, flexible Blechdicke und Konzepte für die Verbindung insbesondere in Knoten sind Beispiele dafür.

3 Komponentenfertigung

Die Auslastung der Werke ist für die Automobilindustrie ein entscheidender Faktor. Die BMW Group wird deshalb das Produktionssystem so gestalten, dass Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb, Hybridantrieb und verbrennungsmotorischem Antrieb auf einem Band gefertigt werden können. Dazu werden zwei flexible Fahrzeugarchitekturen benötigt, in die alle Antriebsformen integrierbar sind. Damit bleibt das Unternehmen handlungsfähig, und kann die Nachfrage nach allen Modellen flexibel bedienen. Im Presswerk und in der Lackiererei ändert sich nicht viel. Im Karosseriebau und in der Montage wird der Produktionsablauf angepasst.

3.1 Umformtechnik

Auch wenn in Karosseriebau und Montage die größeren Änderungen aufgrund der Elektromobilität zu erwarten sind, werden auch im Presswerk kontinuierliche Anpassungen erforderlich. Der bereits durch die steigende Anzahl der Derivate bekannte Trend zu immer mehr Werkzeugen nimmt durch die elektrifizierten Derivate weiter zu, auch wenn ein Teil der Werkzeuge für alle Antriebsformen genutzt werden kann. Damit wird es weiter zunehmend wichtig, zum Beispiel durch automatische Werkzeugwechselsysteme, die Standzeiten der Pressen zu minimieren. Insbesondere den hohen Investitionskosten in die Werkzeuge muss entgegengewirkt werden. Um diese ohne Abstriche an Qualität oder Prozesssicherheit umsetzen zu können, investiert die BMW Group in die Anlagentechnik der Pressen. Dies wird dann wirtschaftlich, wenn Funktionen, die bisher in einzelnen Werkzeugen umgesetzt wurden, durch Funktionen der Presse übernommen werden und dies zu einfacheren und kostengünstigeren Werkzeugen führt. Ein Beispiel hierfür sind moderne Feeder-Systeme, die bei der Übergabe von einer Pressenstufe in die nächste das Bauteil um alle Achsen schwenken können. Komplexe Karosserieteile wie z.B. die Außenhaut von Heckklappen, benötigen mindestens zwei Wirkrichtungen zur Umformung. In der ersten Umformstufe wird das Teil so eingelegt, dass die im Fahrzeug waagrechte Bauteiloberseite und die im Fahrzeug senkrechte Fläche vorgeformt werden können. Die dafür optimale Wirkrichtung der Presse ermöglicht aber nicht das Ausformen der finalen Geometrie in der senkrechten Fläche. Dazu waren bisher Schieber in den Werkzeugen erforderlich, die zu hohen Werkzeugkosten führen. Mit schwenkbaren

Crossbar-Feedern kann das Bauteil zwischen den Pressenstufen in die für die folgende Umformoperation optimale Lage geschwenkt werden. Schieber in mehreren einzelnen Werkzeugsätzen können durch die Investition in das Feedersystem der Presse entfallen.

Die Standardisierung dieses Prinzips für den weltweiten Werkeverbund ermöglicht Flexibilität bei Stückzahlen und macht auch kleinere Produktionsvolumina, insbesondere in der Übergangsphase zur Elektromobilität, wirtschaftlich.

Eine Form der Elektrifizierung setzt sich analog zum Elektrofahrzeug auch bei der Pressentechnologie durch. Bei Servopressen werden moderne Torquemotoren verwendet und mechanische Schwungräder durch elektrische Komponenten ersetzt. Der Kraft-Weg-Geschwindigkeitsverlauf wird durch elektronische Regelsysteme dem jeweiligen Bauteil angepasst. Taktzeit, Bauteilqualität und Prozesssicherheit lassen sich damit verbessern. Dies führt jedoch dazu, dass das versorgende Stromnetz hohen kurzzeitigen Leistungsschwankungen unterliegt. Konnten diese bei älteren Pressensystemen noch durch mechanisch gekoppelte Schwungräder kompensiert werden, sind jetzt große Generatoren neben oder unter der Presse erforderlich, die beim Abbremsen den generierten Strom in Form von Rotationsenergie speichern und bei Energiebedarf der Presse wieder in Form von Strom zur Verfügung stellen.

In der BMW Group werden ältere Pressen konsequent durch Servopressensysteme ersetzt.

Die Digitalisierung, auch in der Umformtechnik bereits seit Jahrzehnten diskutiert, nimmt Fahrt auf. Als Datenquelle werden Sensoren und Anlagen mit einer Internet of Things Plattform vernetzt. Damit werden Smart Data und KI-Anwendungen betrieben und sind für alle Produktionsstandorte verfügbar. Entscheidend für den erfolgreichen Einsatz ist es, nicht wahllos alle technisch möglichen Daten zu sammeln, sondern gezielt dort, wo Verbesserungen erzielt werden sollen. Kein Big Data sondern Smart Data! Die Herausforderung besteht nicht primär im Sammeln der Daten, Technologien dafür sind prinzipiell seit Jahrzehnten bekannt und verfügbar. Die großen Fortschritte, die weltweit jetzt mit der Digitalisierung erreicht werden, beruhen auf der geschickten vernetzten Verarbeitung der Daten mit Algorithmen.

Ein bereits umgesetztes Beispiel im Presswerk ist die Messung der Verteilung der Schmiermittelmenge auf den Platinen, um damit die Parameter der anschließenden Prozesse zu optimieren.

Bereits ohne große Trends wie selbstlernende Systeme oder KI bemühen zu müssen, lassen sich mit der vernetzten Auswertung der Daten Potenziale erschließen. Sie bilden die Basis für zukünftige Systeme, die wir dann wirklich - auch im Presswerk - „intelligent“ nennen dürfen.

3.2 Fügetechnik

Wie die Blechumformung ist auch die im Wesentlichen auf Punktschweißen basierende Fügetechnik im Karosseriebau über Jahrzehnte weiterentwickelt und optimiert worden. Neue Fügeverfahren müssen sich an der Wirtschaftlichkeit des Punktschweißens messen lassen oder damit nicht lösbare Fügeaufgaben wie zum Beispiel einseitige Zugänglichkeit oder die Verbindung von verschiedenen Werkstoffarten ermöglichen. Kleben hat mehr und mehr festigkeitsrelevante Aufgaben übernommen und bietet Möglichkeiten zur Flanschabdichtung und für den Mischbau. Im aktuellen BMW 7er kommen zwar 17 weitere Fügeverfahren zum Einsatz, im Vergleich zu den obengenannten aber in relativ geringem Umfang.

Im Karosseriebau sind bisher im Wesentlichen Fahrzeugvarianten für Rechts-/Linkslenker, Limousine/Touring/Cabrio und verschiedene Dachvarianten zu berücksichtigen. Mit der Systemintegration verschiedener Antriebstopologien kommt jetzt eine deutlich höhere Anzahl von Varianten auf den Karosseriebau zu. Die Hauptlinien des Karosseriebaus sind bereits auf mehrere Karosserievarianten ausgelegt. Zusätzliche Flexibilität wird jetzt in den Fügeanlagen für Unterbaugruppen benötigt. Hier besteht auch die Chance, neue Fügeverfahren zu integrieren, wenn sie wirtschaftlich mehr Flexibilität bei Varianten, Geometrien oder Werkstoffen ermöglichen.

Wie in Abschnitt 3.4 noch beschrieben wird, soll der Mischbau mit verschiedenen Werkstoffen noch gezielter auch innerhalb einzelner Bauteile angewendet werden. Damit werden auch Fügeverfahren benötigt, die schon bei der Bauteilherstellung unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbinden können, um auch innerhalb einzelner Bauteile den für die Funktion optimalen Werkstoff an die richtige Stelle bringen zu können.

3.3 Additive Fertigung

Aufgrund der heutigen Effizienz der Prozesskette Blech und der noch immer vorhandenen Potenziale wird sie noch lange die wirtschaftlichste Option für die meisten metallischen Karosserieteile bleiben. Gussbauteile, Strangpress- und Walzprofile nehmen

weiter zu und ermöglichen Geometrien, die in der klassischen Blechumformung nicht möglich sind. Ein nächster viel diskutierter Schritt ist die additive Fertigung.

Aus fertigungstechnischer Sicht liegt der entscheidende Vorteil additiver Verfahren in der werkzeuglosen Fertigung [3]. Sowohl Werkzeugkosten als auch die Zeit zur Konstruktion und zum Aufbau der Werkzeuge entfallen. Die hohen Einzelteilkosten additiv gefertigter Bauteile führen allerdings dazu, dass sich dieses Verfahren bisher nur bei sehr kleinen Stückzahlen durchsetzt (Bild 5). Im Prototyping und in der Ersatzteilerfertigung hat sich deshalb die additive Fertigung in der Automobilindustrie bereits bewährt. Erste Anwendungen in der Individualisierung wie bei MINI yours customised mit denen sich Kunden eigene Dekorleisten oder Blinkergehäuse gestalten können sind ebenfalls auf dem Markt [4].

Bei den üblichen Serienstückzahlen der Automobilindustrie sind die auf das Bauteil umgelegten Werkzeugkosten so niedrig, dass additive Fertigung bisher nur in wenigen kleinen Bauteilen in kleinen Stückzahlen in Serie umgesetzt wurde [5].



Bild 5: Additiv gefertigtes Metallbauteil im BMW i8 Roadster in Serie

Das Potenzial zur Effizienzsteigerung additiver Verfahren ist aber ungleich höher als bei konventionellen Verfahren. Die Werkstoffkosten für ein Kilogramm AM-Pulver liegen im mittleren zweistelligen Euro-Bereich während die Kosten für ein Kilogramm Stahlblech (beschichtet und Class A-Oberfläche) unter einem Euro liegen. Auch ein Vergleich der für Pulver- oder Blechherstellung erforderlichen Prozessschritte erklärt diese Differenz

in den Marktpreisen nicht. In Zukunft kann deshalb mit einem deutlich niedrigeren Pulverpreis und einem größeren Potenzial für die additive Fertigung gerechnet werden.

Auch bei den Fertigungsverfahren werden disruptive Effizienzsprünge erwartet. Aktuelle Verfahren verwenden Laser, mit denen einzelne Punkte des Pulverbetts aufgeschmolzen werden. Inzwischen werden Verfahren entwickelt, die linienförmig oder sogar flächig arbeitende Prinzipien nutzen und damit das Potenzial bieten, die Effizienz um „Dimensionen“ zu steigern.

Wie schnell diese Sprünge industriell nutzbar gemacht werden können, ist derzeit nicht absehbar. Die BMW Group bereitet sich aber zum Beispiel durch Beteiligungen an Startups mit erfolgversprechenden Technologien und Investitionen in den Additive Manufacturing Campus darauf vor.

Auch die Konstruktion muss umdenken [6]. Für sie liegt ein Vorteil additiver Verfahren in der Gestaltungsfreiheit. Diese ist Chance und zugleich eine Herausforderung für den Konstrukteur. Ist er bisher gewohnt, „in konstanter Blechdicke“, „in konstantem Profilquerschnitt“ oder „in entformbarem Guss“ zu denken, so entfallen diese fertigungstechnischen Restriktionen bei additiven Fertigungsverfahren quasi vollständig. In jedes Bauteil können unterschiedliche Wandstärken, Profilquerschnitte und beliebige Hinterschnitte konstruiert werden. Fügestellen lassen sich vermeiden, indem Bauteile, die bisher in Differenzialbauweise aus vielen Einzelteilen gefügt werden mussten, „in einem Guss“, oder treffender gesagt „in einem Druck“ herstellbar sind.

Plakativer kann man auch formulieren, dass additive Fertigung innerhalb eines Bauteils lokal die richtige Geometrie am richtigen Ort ermöglicht.

Diese Vorteile additiver Fertigungsverfahren sind recht bekannt und verständlich, erschließen aber nur einen Teil des Potenzials. Herausfordernder wird das Umdenken in der Konstruktion, wenn klassische Prinzipien der Konstruktionslehre wie das Spiel mit gezielter Funktionstrennung und Funktionsintegration aufgrund der Möglichkeiten additiver Fertigung neu gedacht werden müssen.

Ein plakatives Beispiel, das Umdenken in der Entwicklung erfordern kann, ist der Motorträger. Bei einem verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeug nimmt dieser Fahrwerkskräfte auf, leitet im Crashfall Kräfte in die Karosseriestruktur und trägt – wie die Bezeichnung sagt – den Verbrennungsmotor. Dieses System ist über Jahrzehnte weiterentwickelt und optimiert worden. Elektromotoren können zukünftig völlig anders integriert werden und ein

Motorträger muss dann evtl. keinen Motor mehr tragen. Damit stellt sich die Frage, ob und wenn ja, wie der Motorträger grundlegend anders zu gestalten ist. Werden andere Lastpfade benötigt und haben diese Auswirkungen auf Bauweise und Fertigungstechnik?

Weitere Beispiele sind die mit dem German Innovation Award 2018 ausgezeichneten Konzeptstudien der Firma csi [7]. In den Strukturbauteilen eines Vorderwagens oder im Instrumententafelträger werden Waschwasserbehälter, Leitungen, Luftführungen und Kühlrippen integriert. Funktionen, für die bisher zusätzliche Bauteile und Geometrien erforderlich waren, werden von vorhandenen Bauteilen mit übernommen. Diese Lösungen werden erst durch die geometrische Gestaltungsfreiheit additiver Fertigungsverfahren möglich.

Die neuen konstruktiven und fertigungstechnischen Möglichkeiten müssen zukünftig mit neuen Anforderungen aus der Elektromobilität zusammengebracht werden, um völlig neue Karosseriekonzepte zu entwickeln. Das zuvor genannte Beispiel des Motorträgers mit geänderten Funktionen, aber auch die Möglichkeit Batterie-, Motor- und Getriebegehäuse mittragend in die Struktur zu integrieren, sind langfristig neu zu bewerten.

3.4 Werkstoffe

Das Motto „Der richtige Werkstoff am richtigen Ort“ hat sich seit langem bewährt und wird auch bei Elektrofahrzeugen angewendet, angefangen bei Stahlwerkstoffen unterschiedlichster Festigkeit und Duktilität über Aluminium, Kunststoffe bis zu Faserverbundwerkstoffen und solchen mit Carbonfasern.

Für Fahrzeuge mit größerer Stückzahl - auch Elektrofahrzeuge - bietet eine stahlintensive Bauweise kosteneffizientes Leichtbaupotenzial. Die verschiedenen Varianten der Warmumformung oder des Presshärtens, aber auch höherfeste kalt umformbare Sorten erschließen weiteres Potenzial.

Bei Aluminium, insbesondere aber bei carbonfaserverstärkten Kunststoffen ist zu beobachten, dass das oben genannte Motto, den richtigen Werkstoff an der richtigen Stelle einzusetzen, immer konsequenter umgesetzt wird. Wurden die ersten Karosserien mit Aluminium noch fast vollständig aus diesem Werkstoff hergestellt, ist jetzt ein zunehmend komplexer Mischbau zu beobachten. Mit der Kohlefaser-Karosserie des BMW i3 konnte das Fahrzeuggewicht gesenkt werden. Anschließend wurde das know how in CFK-Konstruktion und CFK-Fertigung so weiterentwickelt,

dass die Carbonfasern im BMW 7er in intelligentem Mischbau lokal an den Stellen eingebracht werden kann, an denen sie auch in größerer Stückzahl den größten funktionalen Beitrag leistet. Dazu war die Betrachtung der Randbedingungen einer Großserienfertigung wie z.B. hohe Taktzeiten der Fügetechnik und der Temperatureinfluss bei der Lackierung bereits in der Konstruktion erforderlich. Inzwischen liegen Forschungsergebnisse vor, die Carbonfaser noch gezielter einzusetzen und einzelne Bereiche der Bauteile lokal so zu verstärken, dass die anisotropen Eigenschaften der Carbonfasern optimal „zum Tragen“ kommen. Damit kann weiteres Potenzial für wirtschaftlich wettbewerbsfähigen Leichtbau mit Carbonfasern erschlossen werden. Beispiele sind die Projekte im Spitzencluster MAI Carbon [8-11] (Bild 6).

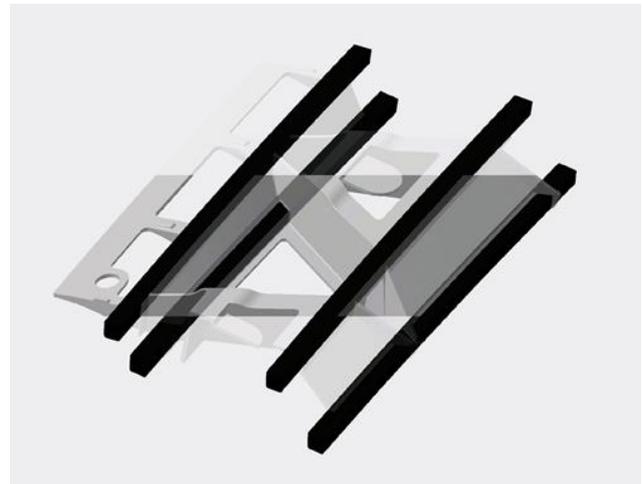


Bild 6: Skelettbauweise mit unidirektional ausgerichteten CFK-Fasern in den lasttragenden Ecken eines Profilbauteils (MAI-Skelett)[8]

Entscheidend für den erfolgreichen Mischbau kann zukünftig sein, noch einen Schritt weiter zu gehen und nicht nur den richtigen Werkstoff an die Stelle zu bringen, an der er seine Eigenschaften am besten einbringen kann, sondern auch dafür zu sorgen, dass die Werkstoffe optimal nach dem Motto „ein Werkstoff hilft dem anderen“ synergetisch zusammenarbeiten. Dies wird möglich, wenn in der Wechselwirkung verschiedener Werkstoffe Mechanismen genutzt werden, die in monolithischen Werkstoffen nicht auftreten.

Ein entsprechender Effekt kann schon bei Stahl-Stahl-Verbunden gezeigt werden. Ein hochfester martensitischer WU-Stahl 22MnB5 mit geringer Bruchdehnung von unter 6% erreicht im Verbund mit einer duktilen Verstärkungskomponente aus manganhaltigem TWIP-Stahl eine Bruchdehnung

über 12% und damit eine Verdoppelung der ursprünglichen Duktilität [12]. Der zugrundeliegende Mechanismus ist eine Lokalisierungsbehinderung bei der der duktile Werkstoff lokal an der beginnenden Einschnürung des Grundwerkstoffs verfestigt, den einschnürenden hochfesten Werkstoff stützt und eine weitere Einschnürung verhindert.

Ein weiteres nutzbares Prinzip kann die gezielte Beeinflussung der Querkontraktion eines metallischen Werkstoffs durch aufgeklebte anisotrope Faserverbundwerkstoffe darstellen. Der Wirkmechanismus der Querkontraktionsbehinderung beruht auf der Idee, den Dehnungspfad im Grenzformänderungsdiagramm durch einen anisotropen Werkstoff gezielt in eine positive Richtung zu lenken und damit das Versagen zu größeren Dehnungen zu verschieben.

Beide hybriden Wirkmechanismen sind bisher nur grundlegend untersucht und erfordern weitere Forschungsarbeiten.

4 Auslegungsmethoden

In den vorangegangenen Abschnitten zu Fertigungsverfahren und Werkstoffen wurde die zunehmende Komplexität im Zusammenspiel von Produktauslegung und Produktion aufgezeigt. Es wurden „der richtige Werkstoff am richtigen Ort“, „Die richtige Geometrie am richtigen Ort“ und „Ein Werkstoff hilft dem anderen“ aufgegriffen.

Zukünftig sollten wir diese Anforderungen kombinieren und „Die richtige Werkstoffkombination in der richtigen Geometrie“ verfolgen.

Alle drei Anforderungen müssen und können durch zukünftige Produktionsverfahren gleichzeitig auch innerhalb einzelner Bauteile zunehmend besser erfüllt werden.

Mit klassischen Auslegungsmethoden werden Konstrukteure diese komplexen Systeme nicht ausreichend optimieren können. Wenn dann noch die Anforderung hinzukommt, Funktionen wie Crash, Steifigkeit, Flüssigkeits-, Luft- und Wärmeleitung, Akustik und Wärmeisolation in einem komplexen Bauteil zu integrieren, wird deutlich, dass zukünftig vernetzte multiphysikalische Optimierungsmethoden erforderlich werden, die den Konstrukteur bei der Berechnung aber auch bei der grundlegenden Konzeption unterstützen.

Die Komplexität in der Auslegung nimmt noch weiter zu, wenn wir berücksichtigen, dass erste 3D-Drucker Endlosfasern verarbeiten und an Gradientenwerkstoffen geforscht wird, die einen kontinuierlichen Werkstoffübergang in einem Bauteil ermöglichen. Gedruckte Strukturen, sogenannte Metamaterialien, können gerichtete, auxetische oder

gezielt einstellbare geschwindigkeitsabhängige Werkstoffeigenschaften aufweisen.

Wenn die Produktionstechnik diese Möglichkeiten in Serie bringt, ist sicherzustellen, dass sie mit völlig neuen Konstruktionsmethoden Hand in Hand gehen. Fertigungsverfahren, für die entweder in der Entwicklung oder in der Produktion keine entsprechenden Methoden und in Zeiten der Digitalisierung keine zunehmend intelligenten IT-Tools zur Verfügung stehen, werden sich nicht durchsetzen.

5 Fazit

Die Erkenntnis der zunehmenden Komplexität und der erforderlichen Digitalisierung ist nicht neu, bereits auf dem Umformtechnischen Kolloquium Darmstadt 1997 betonte Professor Milberg, damaliger Produktionsvorstand, später Vorstands- und Aufsichtsratsvorsitzender der BMW AG: „Die Strukturen und die Produktion der Zukunft müssen Komplexität effizient beherrschen.“ Diese Aussage gilt damals wie heute, und es gilt noch konsequenter daran zu arbeiten.

Literatur

- [1] Zipse, O.
Münchener Management Kolloquium 2018
TU München, 13. März 2018
- [2] BMW AG
Das BMW Concept iX3
www.press.bmwgroup.com
- [3] Staeves, J.
Additive Manufacturing, Challenges and opportunities for suppliers in future car body construction, Generative Fertigungsverfahren für die Karosserie, Bad Nauheim, 21.03.2017
- [4] BMW AG
<https://yours-customised.mini>
- [5] BMW AG
www.bmw.com/de/innovation/3d-druckerei.html
- [6] Schumacher, F.; Richter, T.; Vietor, T.
Rahmenwerk zur Wissensbereitstellung für die Nutzung von Potentialen additiver Fertigung in der Produktentwicklung
KT Kolloquium, Duisburg, 06.10.2017
- [7] Herrmann, S.
Konzept, Simulation und Hardware-Realisierung eines modularen, funktional integrierten Aluminium-Querträgers für den Fahrzeug-Innenraum, Generative Fertigungsverfahren für die Karosserie, Bad

-
- Nauheim, 2018
www.3iprint.de
- [8] Bayerische Motorenwerke AG
Abschlussbericht MAI Skelett
Berichtszeitraum: 01.02.2014-30.06.2015
www.tib.eu
- [9] Bayerische Motorenwerke AG
Abschlussbericht MAI qfast
Berichtszeitraum: 01.11.2012-30.04.2015
www.tib.eu
- [10] Bayerische Motorenwerke AG
Abschlussbericht MAI hiras + handle BMW
Laufzeit (01.10.2014-30.06.2017)
www.tib.eu
- [11] Hogger, T.
Abschlussbericht MAI Multiskelett
Projektlaufzeit: 01.09.2015 bis 30.06.2017
www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:1008798584/
- [12] Hummelberger, D.; Kärger, L.; Weidenmann, K.A.; Staeves, J.; Henning F.
Evaluation of the physical mechanisms of adhesively bonded metal-based hybrid material systems under tensile loading
Materials and Design 132 (217) 215-224





Stegblechumformung - von den wissenschaftlichen Grundlagen in den Karosseriebau

Stefan Köhler¹, Martin Heckmann², Julian Mushövel¹, Lukas Schell¹, Peter Groche¹

¹Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen (TU Darmstadt)

²LÄPPLE AUTOMOTIVE GmbH (Heilbronn)

Die Natur zeigt, dass die Steifigkeit flächiger Strukturen durch Verzweigungen drastisch erhöht werden kann. Denselben Effekt nutzt die Stegblechumformung. Im Rahmen dieser Arbeit wird gezeigt, wie die Prozesskette aus Laserschweißen von Stegblechen und anschließendem Umformen im Karosseriebau industrielle Anwendung finden kann. Signifikante Gewichteinsparungen zu moderaten Leichtbaukosten lassen die Wirtschaftlichkeit bei geeigneten Bauteilen attraktiv erscheinen.

Stringer Sheet Forming - from the scientific basics to car body construction

Nature shows that the bifurcation of flat structures may significantly increase their their stiffness. This principle is used in stringer sheet forming. The paper shows how the process chain of laser welding of stringer sheets and subsequent forming can be used in industrial applications in car body construction. Weight savings at moderate lightweight construction costs attest to the economic viability of suitable components.

Einleitung und Motivation

Die Natur dient oft als Vorbild für technische Lösungen. Einige Initiativen zielen darauf ab, bionisch inspirierte Leichtbau-Prinzipien für den Automobilbau zu nutzen [Köt18]. Eine Strategie zur Erzielung belastbarer Leichtbaustrukturen ist die Verzweigung flächiger Tragstrukturen. Natürliche Gebilde dieser Art sind beispielsweise im Blatt einer Glückskastanie zu finden (siehe Bild 1 links). Die wirtschaftliche Nutzbarmachung dieser Konstruktionsweise in technischen Produkten ist Gegenstand der Forschung am PtU.

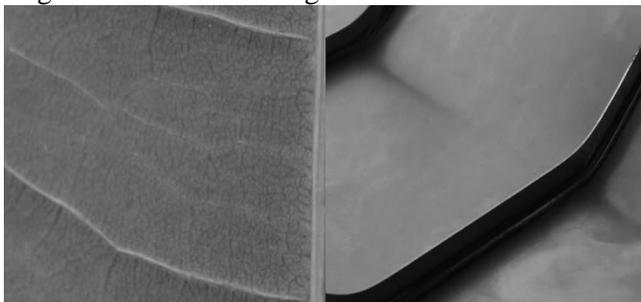


Bild 1: Blattstruktur einer Glückskastanie (links); Stegblech (rechts) [Gro18]

Ein Beispiel für die technische Umsetzung flächiger Verzweigung sind sogenannte Stegbleche (auch: Rippenbleche) (siehe Bild 1 rechts). Diese besitzen senkrecht zur Grundblechebene angebrachte Stege, die das Bauteil versteifen.

Im Rahmen des SFB666¹ wurden Methoden und Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe verzweigte Blechstrukturen in integraler Blechbauweise im Hinblick auf ihre Funktion und Beanspruchung optimiert dargestellt werden können. Die Prozesskette der Stegblechumformung ist eine Entwicklung aus dem SFB666. Der versteifende Effekt von Stegen auf ein Blechteil ist in Bild 2 dargestellt. Hier ist das Ergebnis eines Drucktests zweier Bauteile zu sehen.

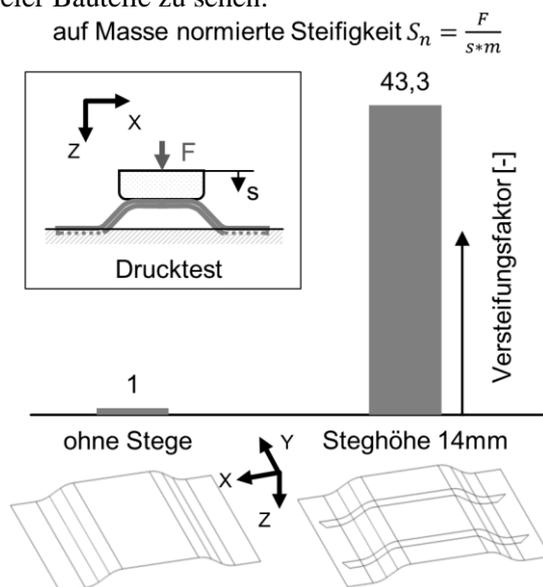


Bild 2: Versteifung durch Stege (nach [Koe18])

¹ Sonderforschungsbereich 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung – Entwicklung, Fertigung und Bewertung“; gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)

Das Referenzbauteil ohne Stege wird mit einem durch zwei 14 mm hohe Stege verstärkten Bauteil verglichen. Bei der Auswertung der Nachgiebigkeit unter Last wird bei dem Bauteil mit Stegen eine bezogen auf seine Masse um den Faktor 43,3 höhere Steifigkeit festgestellt [Koe18]. Diese enorme Steifigkeitssteigerung bietet ein großes Leichtbaupotential beispielsweise für den Karosseriebau.

Im Rahmen dieses Beitrags werden zunächst die Grundlagen der Prozesskette der Stegblechumformung eingeführt. Darauf folgt die Darstellung industrieller Anforderungen an Prozesse im Karosseriebau. Weiterhin werden aktuelle Leichtbauweisen und Trends in diesem Umfeld vorgestellt, um Nutzungsfelder für die Stegblechumformung aufzuzeigen. Im Rahmen des Transferprojekts „Stegblechumformung für den Karosseriebau“ fördert die DFG die Übertragung des grundlagenwissenschaftlichen Ansatzes in die Industrie. Anwendungspartner des PtU ist *LÄPPLE AUTOMOTIVE* als Spezialist für Pressteile, Baugruppen und anspruchsvolle Umformlösungen im Karosseriebau von Premium-Fahrzeugen.

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine Lösung für eine industrielle Prozesskette zur Herstellung flächig verzweigter Karosserieteile. Dabei wird sowohl auf die Herausforderungen und Kosten als auch auf den Nutzen der Technologie anhand eines realen Karosseriebauteils eingegangen.

1 Grundlagen der Stegblechumformung

Die grundsätzliche Idee der neuen Prozesskette ist die Verzweigung von konventionellem Blech im ebenen Zustand und die anschließende Formgebung.

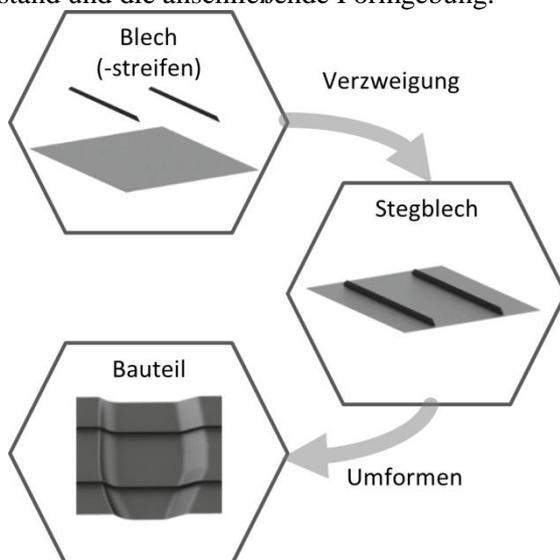


Bild 3: Prozesskette zur Herstellung von umgeformten Stegblechen

Die Verzweigung lässt sich im ebenen Zustand einfacher generieren als beispielsweise durch einen aufwendigen 3D-Fügeprozess in der finalen Bauteilgeometrie. Die Prozesskette ist in Bild 3 dargestellt.

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst die Beschreibung der Verzweigungsgenerierung bevor auf die einzelnen Möglichkeiten der Umformung von Stegblechen eingegangen wird. Weiterhin werden die Herausforderungen beschrieben, die sich entlang der Prozesskette ergeben.

1.1 Herstellung der Verzweigung

Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, verzweigte Strukturen herzustellen. Neben Strangpressen oder urformenden Verfahren wie Druckguss [Klo06], wird auch die spanende Bearbeitung von Blöcken zu verrippten Bauteilen eingesetzt [Den07]. Diese Prozesse gehen mit Einschränkungen bei der Materialauswahl, hohen Energiekosten oder geringer Materialeffizienz einher. Im SFB666 wurde das kontinuierliche Verfahren des Spaltbiegens entwickelt. Bei diesem integralen Prozess wird in einer Rollprofilieranlage inkrementell ein Steg aus der Blechebene ausgeformt [Rin08].

Eine weitere Möglichkeit bietet das Laserstrahlschweißen, wie in Bild 4 im Querschnitt zu sehen. Ein Laserstrahl fügt dabei das Grundblech mit den Stegen im Tiefschweißverfahren, in dem er von der Rückseite durch das Grundblech durchschweißt. Die Klemmkraft F_{Klemm} gewährleistet eine spaltfreie Anlage der Stegkanten am Grundblech. Die Spannplatte ist mit Schlitzen für den Strahldurchgang versehen.

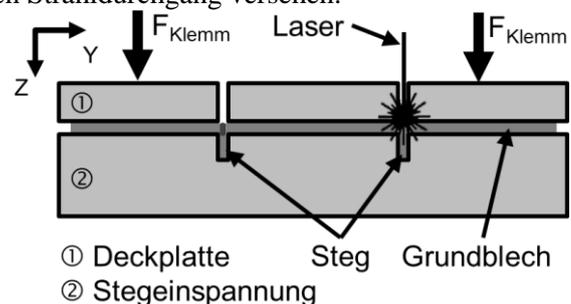


Bild 4: Verzweigungsgenerierung durch Laserstrahlschweißen

Aufgrund der größeren Flexibilität, des größeren geometrischen Halbzeugspektrums und der geringeren Werkzeugkosten ist das Laserstrahlschweißen die favorisierte Art der Verzweigungsgenerierung für Karosserieblechteile.

1.2 Formgebung der Stegbleche

Für die anschließende Formgebung der verzweigten Bleche in die finale Bauteilkontur werden zum einen die Hochdruckblechumformung (HBU) und zum anderen die Umformung mit starren Werkzeugen genutzt. Beide Verfahren werden im Folgenden näher beschrieben. Daneben gibt es auch Ansätze zur inkrementellen Stegblechumformung [Bae10], die aber wegen der geringen industriellen Relevanz hier nicht näher vorgestellt werden.

1.2.1 Hochdruckblechumformung

Aufgrund der großen Flexibilität in Bezug auf den Umgang mit dem Steg im Werkzeug wurde die Umformung von Stegblechen zunächst mittels HBU durchgeführt. [Ert11] Die Formgebung erfolgt durch ein Wirkmedium, welches das ebene Blech in eine Matrize einformt (siehe Bild 5). Die Werkzeugkavität wird dabei durch den Blechhalter, der mit der Blechhalterkraft F_N an die Matrize gepresst wird, verschlossen.

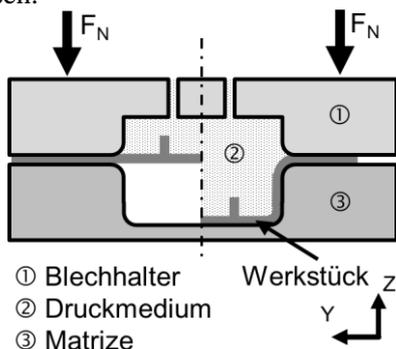


Bild 5: Hochdruckblechumformung von Stegblechen (nach [Ert11])

Dabei können im Flanschbereich keine Stege auf dem Grundblech positioniert werden, da das Werkzeug sonst undicht wird und das Wirkmedium bei entsprechendem Druck aus der Kavität austritt. Die Taktzeiten von Verfahren der Hydro-Umformung wie der HBU liegen laut Neugebauer bei ca. 30 s [Neu07]. Nach der grundlegenden Machbarkeitsanalyse der Stegblechumformung mittels HBU durch Ertugrul [Ert11] hat Bäcker diverse Verfahrenserweiterungen und einen numerischen Auslegungsalgorithmus für das Halbzeug entwickelt [Bae15].

1.2.2 Umformung mit starren Werkzeugen

Aufgrund der erzielbaren höheren Ausbringung und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit wird das Verfahren für starre Werkzeuge weiterentwickelt. Nach Birkert sind für Karosseriepresseile Taktzeiten in der Größenordnung von 3 s Stand der Technik [Bir13]. Zunächst erfolgt die Machbarkeitsanalyse der

Umformung von Stegblechen mit starren Werkzeugen mittels Gesenkbiegen [Koe16]. Die Erkenntnisse daraus werden auf ein starres Tiefziehwerkzeug übertragen, welches in Bild 6 dargestellt ist. Es besteht aus Ziehleisten, Stempel, Blechhalter und Gegenhalter. Die Formelemente sind austauschbar, sodass ein breites Spektrum an Geometrien umgeformt werden kann. Im Stempel und im Blechhalter sind Nuten mit einer Spaltbreite w_s vorgesehen, in denen der Steg während der Umformung geführt ist. Mittels eines abstimmbaren, seitlich am Werkzeug angebrachten und durch den Pressenstößel betätigten Keilschiebermechanismus kann die stempelseitige Nutbreite über dem Hub variabel verändert werden [Koe18]. So kann für den Bestückungs- und Entnahmevorgang der Steg freigegeben und während der Umformung seitlich unterstützt werden (siehe Bild 6 unten).

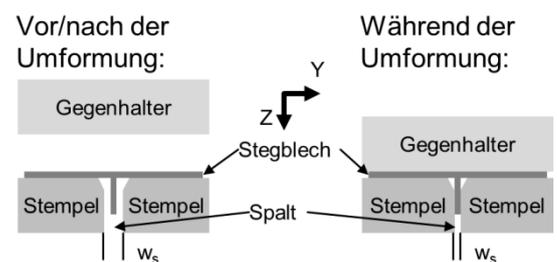
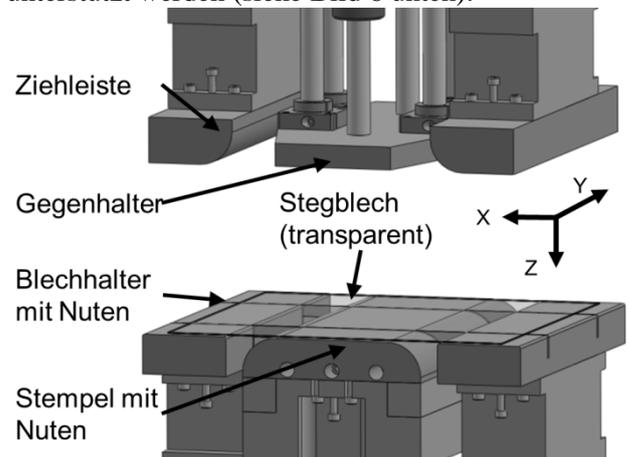


Bild 6: Tiefziehen von Stegblechen mit starren Werkzeugen (nach [Koe18])

Aufgrund dieser seitlichen Unterstützung der Stege bietet die Umformung mit starren Werkzeugen gegenüber der HBU den Vorteil, dass Bauteile mit kleineren Krümmungsradien und mit höheren Stegen – und damit auch höherer Steifigkeit – hergestellt werden können [Koe18].

1.3 Herausforderungen in der Prozesskette

Neben den klassischen Tiefziehfehlern wie Faltenbildung, Einschnürungen und Rissen im Blech ergeben sich bei der Stegblechumformung neue

Herausforderungen, die es zu bewältigen gilt. Bild 7 gibt einen Überblick über Fehlerbilder, die bei der Umformung von Stegblechen mit starren Werkzeugen auftreten können. Zu große Druckspannungen führen zum Beulen des Stegs in konkaven Krümmungen (Bild 7a)), was seine versteifende Wirkung deutlich reduziert [Koe18]. An konvexen Krümmungen kommt es bei zu großer Beanspruchung zum Versagen der Schweißnaht (Bild 7b). Der oben beschriebene Gegenhalter dient dazu, das Auswölben des Grundblechs auf der Rückseite des Stegblechs (Bild 7c) zu verhindern. Bei spröden Blechmaterialien kann es an konvexen Stegkrümmungen auch zum Reißen des Stegs kommen (Bild 7d). Kollisionen mit Werkzeugteilen bewirken die komplette Beschädigung (Bild 7e) oder kleine Deformationen des Stegs (Bild 7f).

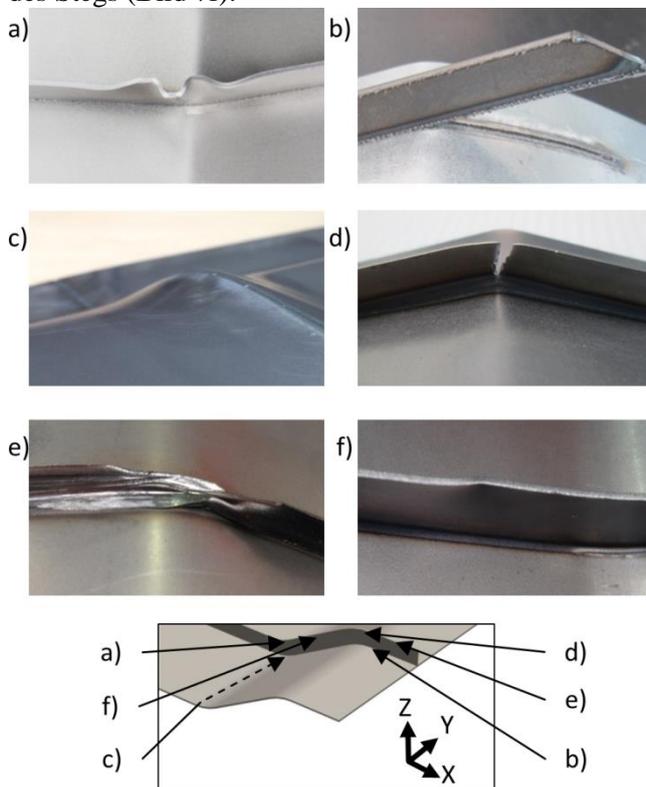


Bild 7: Prozessfehler bei der Stegblechumformung [Gro18]

2 Trends im Karosseriebau und Potenziale der Technologie

Die Karosserie besitzt einen Anteil von ca. 40% am Fahrzeuggesamtgewicht [Fri17]. Eine primäre Gewichtseinsparung an der Karosserie ermöglicht sekundäre Gewichtseinsparungen von zusätzlich bis zu 46% am Gesamtfahrzeug [Eck10]. Daher kommt dem Karosseriebau eine Schlüsselstellung bei der Umkehr der Gewichtsspirale im Automobilbau zu.

Das Primat des Leichtbaus geht einher mit stetig wachsenden Anforderungen an die Karosseriekomponenten, beispielsweise hinsichtlich ihrer Festigkeiten und Steifigkeiten. In Verbindung mit der Kostensensitivität der automobilen Serienproduktion resultiert daraus ein Zielkonflikt, zu dessen Lösung die Stegblechtechnologie zukünftig einen wertvollen Beitrag leisten kann.

Stegverstärkungen ermöglichen eine Reduzierung der Blechdicke und damit des Gewichts von Karosseriekomponenten, ohne dabei die Bauteilperformance unter Betriebslasten oder im Crashfall zu kompromittieren.

Die damit einhergehende Erhöhung der Bauteilsteifigkeit wirkt sich nicht nur positiv auf die Struktur- und Torsionsteifigkeit der Karosserie und damit das Fahrverhalten und den Fahrkomfort aus. Auch wird eine Verbesserung der bauteilinhärenten NVH-Eigenschaften (Noise, Vibration, Harshness) erwartet, wie z.B. eine Verringerung der Flatterneigung bei hohen Fahrtgeschwindigkeiten oder eine Verschiebung der Eigenmodi hin zu höheren Frequenzen, was sich wiederum positiv auf Vibrations- und Dröhnverhalten auswirkt.

In der Folge können vielfältige Kosteneinsparungen am Gesamtfahrzeug realisiert werden, die über den im Forschungsvorhaben untersuchten Rahmen hinausgehen. So kann beispielsweise auf den Einsatz von Dämmmaterialien und Antidröhnmatte verzichtet werden. Die Herstell- und Fügekosten für Verstärkungs- und Versteifungsteile entfallen. Die avisierte Gewichtseinsparung wird mit etablierten Werkstoffen umgesetzt, was neben geringen Materialkosten auch zum Entfall von Sondermaßnahmen z.B. zur Verhinderung von Kontaktkorrosion oder zum Fügen artverschiedener Werkstoffe im Materialmischbau führt.

Das für die Stegblechumformung in Frage kommende Bauteilspektrum in der konventionellen selbsttragenden Karosserie in Schalenbauweise ist begrenzt auf flächige Strukturteile wie Rück- und Schottwände, Bodenbleche oder den nachfolgend beschriebenen Unterfahrschutz. Neue elektrifizierte Fahrzeugkonzepte stellen jedoch zusätzliche Anwendungsfelder dar, u.a. in Batteriegehäusen.

Die Implementierung neuer Technologien im Karosseriebau setzt die Aneignung der erforderlichen Kompetenzen sowie die frühzeitige Entwicklung und Validierung prozesssicherer und effizienter Fertigungskonzepte voraus. Dieses Ziel verfolgt die LÄPPLÉ AUTOMOTIVE als Anwendungspartner in dem Gemeinschaftsprojekt mit dem PtU.

Über den Karosseriebau hinaus besitzen die entwickelten Lösungen substantielle Potenziale zur Übertragung in andere Branchen der blechverarbeitenden Industrie, wie z.B. den Nutzfahrzeugbau, die Luftfahrt, den Gehäusebau, die Weiße Ware oder die Architektur.

3 Zusammenführung von Wissenschaft und Industrie

Im Rahmen des Transferprojekts wird mit Beteiligung von *LÄPPLE AUTOMOTIVE* das gewonnene grundlagenwissenschaftliche Knowhow der Stegblechumformung mit den industriellen Anforderungen verknüpft. Zielsetzung ist dabei die Auslegung und Realisierung einer industrietauglichen Prozesskette anhand eines Realbauteils. Nach der Auswahl und Analyse eines geeigneten Karosserieteils für die Nutzung der Stegblechtechnologie wird daraus ein Prototypenbauteil für die Versuchsdurchführung abgeleitet. Nach experimentellen Voruntersuchungen und der numerischen Bauteil- und Prozessauslegung erfolgt die Konstruktion der Werkzeuge und Vorrichtungen für die Prototypenproduktion entlang der industriellen Prozesskette. Schließlich werden Prototypen gefertigt und charakterisiert, um die entwickelten Bauweisen und Methoden zu validieren und Rückschlüsse auf das Realbauteil zu ziehen.

3.1 Anforderungen und Auswahl eines realen Karosserieteils

Zur Auswahl eines geeigneten Karosserieteils werden zunächst die Anforderungen definiert. Die wichtigsten werden im Folgenden dargelegt. Aufgrund der Schweißnaht auf der Blechrückseite ist ein Strukturteil ohne Sichtfläche gut geeignet. Eine große Blechdicke ($>2\text{ mm}$) des Realbauteils bietet Potential zur Gewichtseinsparung. Eine flache Grundform des Bauteils ist günstig, um die flächige Versteifungswirkung der Stege gut zur Geltung zu bringen. Weiterhin sollte sich die Formänderung der Stege in Grenzen halten. Wichtig ist zudem, dass eine Performanceverbesserung durch die Nutzung der Stegblechtechnologie anschaulich charakterisierbar ist und die Komplexität des Bauteils im Rahmen des Projekts handhabbar bleibt.

Bild 8 zeigt den ausgewählten anonymisierten Unterfahrschutz einer PKW-Karosserie. Das Bauteil wird aus Stahl HC340LA in der Blechdicke 2,7 mm gezogen und schützt sensible Komponenten im Motorraum des Fahrzeugs von unten gegen beispielsweise Aufsetzen bei Unebenheiten des Untergrunds (z.B. hoher Bordstein).



Bild 8: Realteil Unterfahrschutz (anonymisiert)
(Quelle: LÄPPLE AUTOMOTIVE)

Der Unterfahrschutz erfüllt die oben genannten Kriterien und stellt einen aussagekräftigen industriellen Anwendungsfall für die Stegblechumformung dar.

3.2 Prototypen-Design

Aus versuchstechnischen Gründen wird das Realteil abstrahiert und skaliert. Der Skalierungsfaktor ist so gewählt, dass eine Blechdicke des Prototypen von 2 mm erreicht wird. Die Vergleichbarkeit mit dem Realteil und die wesentlichen Bauteileigenschaften bleiben erhalten. Damit kann der Prototyp zum einen herangezogen werden, um die Prozesskette zu validieren. Zum anderen können die numerischen Modelle der Umformung und Lastaufbringung im Experiment verifiziert und kalibriert werden, wodurch ihre Anwendbarkeit auf Realteile abgesichert wird. Für die Auslegung des Stegblechdesigns wird ein bauteiltypisches Lastfallszenario verwendet (siehe Bild 9).

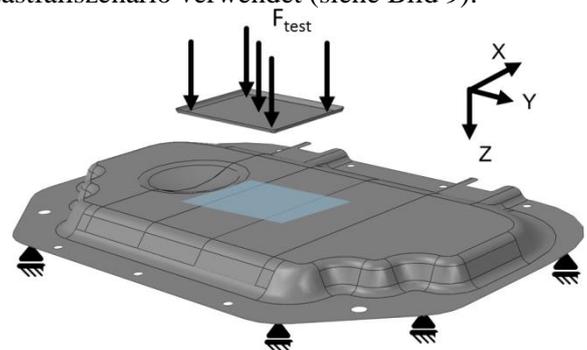


Bild 9: Referenzlastfall

Der Referenzlastfall bildet das Aufsetzen des Fahrzeugs auf einem größeren Stein nach. In einer statischen numerischen Simulation (FE-Software: Abaqus 6.14) wird das Bauteil mit einer Testlast, die der Vorderachslast eines PKW entspricht, mittig belastet. Diese kann in etwa 60 % der Fahrzeugmasse betragen. Skaliert auf den Maßstab des Prototypen bedeutet dies, dass ein starrer Prüfkörper mit einer Fläche von $150 \times 110\text{ mm}$ und einer Kraft von 5.000 N gegen die Rückseite des Bauteils drückt. Es darf sich dabei nicht plastisch

verformen und die maximal zulässige Durchbiegung, die durch dahinterliegende Komponenten im Motorraum bestimmt wird, darf 10,8 mm nicht überschreiten. Das Bauteil ist als FE-Modell mit S4R-Schalenelementen (Kantenlänge 5 mm) vernetzt und der Flanschbereich ist in z-Richtung fixiert.

Ziel der Prototypenauslegung ist die Bestimmung einer geeigneten Steganzahl, -höhe und -position. Damit wird einerseits untersucht, wie weit sich die Steifigkeit des Bauteils bei in etwa gleichbleibender Masse erhöhen lässt (gleichbedeutend mit geringerer Durchbiegung) und andererseits, wie weit sich die Masse bei gleichbleibender Steifigkeit (Durchbiegung) reduzieren lässt. Bild 10 zeigt die entwickelte Prototypengeometrie mit vier parallel verlaufenden Stegen. Die runde Auswölbung im Ziehteilboden stellt eine Abstraktion des rechteckigen Lufteinlass im Ausgangsbauteil (siehe Bild 8) dar und zeigt, dass auch konvexe Krümmungen mit Stegen versehen werden können.

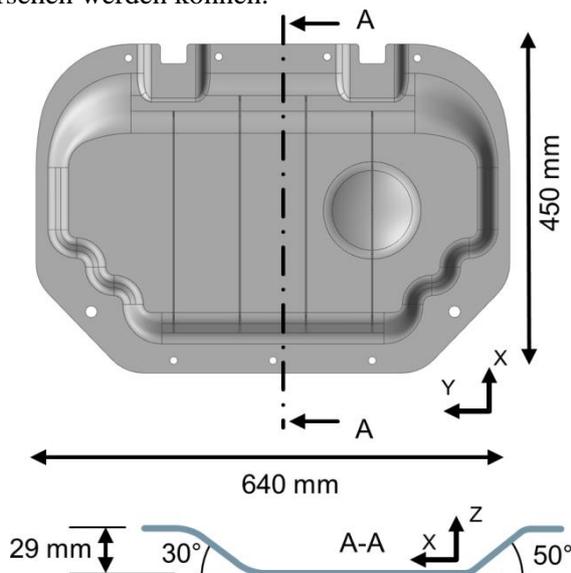


Bild 10: Stegblech-Prototyp

Der Querschnitt dieser Geometrie wird mit dem in Bild 6 gezeigten Werkzeug in Ersatzversuchen zur Formgebung experimentell untersucht [Gro18]. Dabei zeigt sich, dass bei einer Blechdicke von 2 mm eine Steghöhe von bis zu 14 mm umformbar ist.

3.3 Prozesskettenentwicklung

Für die Prozesskette zur Herstellung stegverstärkter Blechteile ergeben sich zusätzliche Herausforderungen im Vergleich zu konventionellen Prozessketten des Karosseriebaus:

- Prozessfehler der Stegblechumformung (siehe Bild 7)
- Stegpositionierung und Halbzeugtoleranzen für den Umformprozess
- Umgang mit dem Steg bei der Handhabung vor, nach und im Prozess
- Umgang mit der Schweißnaht auf der Blechrückseite (Werkzeugverschleiß)
- Platinenlogistik/-handling
- Nachgelagerte Schneid-/Lochoperationen

Während die Herausforderungen im Platinenhandling und in nachgelagerten Prozessen durch geschickte Steganordnung und Adaption konventioneller Vorgehensweisen lösbar sind, stellen vor allem der Schweiß- und der Umformprozess mit entsprechenden industrietauglichen Werkzeuglösungen die Kernentwicklungsarbeit dar. Auf diese wird in den nächsten beiden Abschnitten näher eingegangen.

3.3.1 Laserschweißvorrichtung

Zu Beginn der Entwicklung stand die Definition der Anforderungen an die Laserschweißvorrichtung. Neben funktionellen und geometrischen Anforderungen, sind die folgenden vier Kriterien als Kernfunktionen der Schweißvorrichtung zu nennen:

- Gewährleistung eines „Nullspalts“ zwischen Grundblech und Stegen für prozesssicheres Fügen
- Verhinderung von Stegverkippungen während des Fügeprozesses
- Möglichkeit zur Verschweißung unterschiedlicher Steghöhen und flexibler Steghöhenverläufe
- Zuverlässigkeit und Wiederholgenauigkeit der Stegpositionierung

Die Lösungen für die einzelnen Funktionen sind in Bild 11 dargestellt. Hier ist in der Mitte skizzenhaft das Funktionsprinzip und rechts eine 3D-Ansicht der konstruierten Unterbaugruppen zu sehen. Eine Spannplatte mit Hochhaltefedern, welche durch manuelle Schnellspanner eine Spannkraft F_{Klemm} auf das Grundblech ausübt, gewährleistet den Nullspalt zwischen den beiden Fügepartnern. Die Federn ermöglichen ein einfaches Öffnen der Vorrichtung. Zum Bestücken der Vorrichtung und zur Entnahme

Funktion	Prinzip	Konstruierte Unterbaugruppe
Vorrichtung verschließen/ „Nullspalt“ zwischen Steg und Grundblech		
Stegklemmung		
Höhenverstellung		
Stegpositionierung		

Bild 11: Kernfunktionen der Laserschweißvorrichtung

des Stegblechs wird die Spannplatte auf Linearführungen zur Seite geschoben. Das Verkippen der Stege während des Fügens wird durch einen ebenfalls gefederten Klemmmechanismus verhindert. Eine Verriegelung durch einen Schnellspanner sorgt für die gleichzeitige seitliche Klemmung aller Stege. Die Stege liegen auf jeweils sieben gefederten Druckstücken auf. Der Federweg dieser Auflagepunkte ermöglicht die einfache Variation der Steghöhe und die Fertigung von Stegblechen mit flexiblem Steghöhenverlauf. Das Anpressen der Stege zum Grundblech erfolgt durch die Druckstücke. Geöffnet:

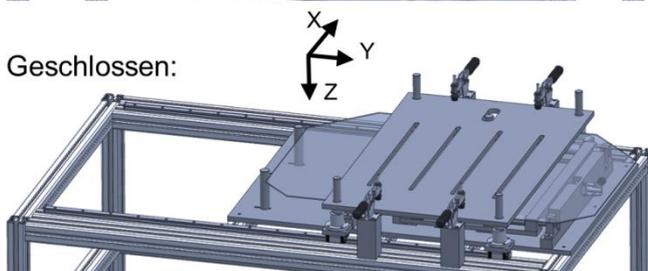
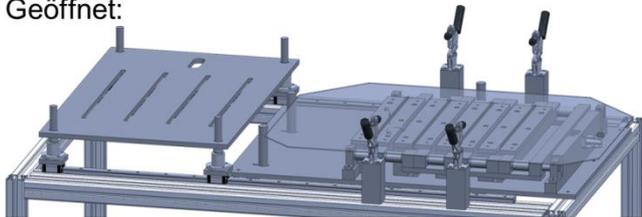


Bild 12: Laserschweißvorrichtung

in z- und durch den Klemmmechanismus in y-Richtung. Anschläge gewährleisten die präzise Positionierung der Stege in x- und y-Richtung. Die Vorrichtung ist zunächst für manuelles Handling ausgelegt. Alle Funktionen lassen sich allerdings auch durch Erweiterung mit Standardaktuatorik, wie Pneumatikzylindern, automatisiert realisieren. Die gesamte Vorrichtung ist sowohl im geöffneten als auch im geschlossenen Zustand in Bild 12 zu sehen. Der Schweißprozess gliedert sich in die nachfolgend beschriebenen Schritte. Bei geöffneter Vorrichtung werden zunächst die Stege und dann das Grundblech an den entsprechenden Anschlägen eingelegt. Danach wird die Spannplatte durch die vier Schnellspanner verriegelt, bevor der Stegklemmmechanismus mittels des seitlichen Schnellspanners schließt. Nach erfolgtem Schweißprozess gemäß Bild 4 kann die Vorrichtung wieder geöffnet und das Stegblech entnommen werden.

3.3.2 Umformwerkzeug

Auch für das Umformwerkzeug des Prototypen entsteht eine umfangreiche Anforderungsliste. Neben den üblichen Anforderungen an Werkzeuge im Presswerk gilt es vor allem, die Prozessfehler der Stegblechumformung (siehe Bild 7) zu verhindern. Für die Auslegung von Werkzeug und Prozess wird eine FE-Simulation aufgebaut, aus der sich iterativ

auch die Platinenaußenkontur für das Halbzeug sowie weitere Prozessparameter ergeben.

In Vorversuchen an einer ähnlichen Blechgeometrie [Gro18] haben sich Nuten im Stempel mit konstanter Spaltbreite für die seitliche Stegunterstützung bewährt. Eine 2 mm breite 45°-Einführschräge in Kombination mit einer Spaltbreite w_s im unteren Teil, die der 1,05-fachen Blechdicke entspricht, gewährleistet ein kollisionsfreies, reibungsarmes Stegeintauchen in die Nut. Weiterhin ist die seitliche Unterstützung des Stegs während der Umformung zur Vermeidung von Stegbeulen in konkaven Krümmungen gegeben. Die Versuche haben auch gezeigt, dass Auswölbungen auf der Blechrückseite durch Anlegen des Stegbleches an einer vollflächigen Ziehmatrize am Ende des Ziehprozesses vermieden werden.

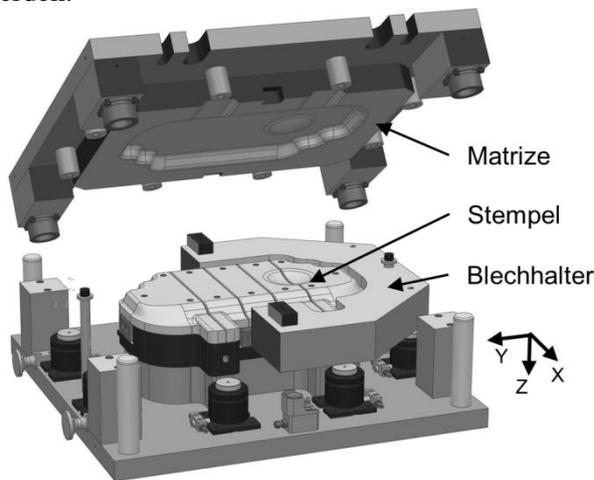


Bild 13: Umformwerkzeug

Eine Darstellung des konstruierten Umformwerkzeugs ist in Bild 13 zu finden. Es besteht im Wesentlichen aus einem an der Grundplatte fixierten Stempel mit den Nuten für die Stege, einer Matrize an der Kopfplatte und einem Blechhalter, der sich über acht Gasdruckfedern gegen die Grundplatte abstützt. Die

Umformsimulation ergibt eine notwendige Blechhalterkraft von 400 kN. Weitere Funktionselemente sind Platinenanschlüsse, Ziehhilfen, Werkzeugsicherungen, Führungsplatten zwischen Blechhalter und Stempel, Säulenführungen und Tragzapfen für die Beförderung mit einem Kran. Im Rahmen des Transferprojekts ist sowohl die manuelle Versuchsdurchführung am PtU als auch die automatisierte Abpressung unter seriennahen Bedingungen bei LÄPPLE AUTOMOTIVE geplant. Abweichend vom Serienkonzept werden die Beschnitt- und Lochoperationen am Prototypen aus Kostengründen jedoch nicht werkzeuggebunden, sondern durch Laserschneiden realisiert.

4 Ergebnisse und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die mit der Stegblechtechnologie an der Prototypengeometrie erzielbaren Ergebnisse werden anhand des Vergleichs von drei Bauteilkonfigurationen dargestellt. Bild 14 zeigt links als Referenz den Prototypen mit Blechdicke 2,0 mm, versehen mit vier dem Realteil nachempfundenen Sicken. Mittig abgebildet ist das Bauteil in derselben Blechdicke, jedoch weist es anstelle der Sicken vier Stege auf. Im Bild rechts ist das mit Stegen verstärkte Bauteil in reduzierter Blechdicke 1,5 mm dargestellt.

Für den beschriebenen Lastfall zeigen die Berechnungen, dass das Stegbauteil mit 2,0 mm Blechdicke bei nahezu gleicher Masse eine mehr als dreifach höhere Steifigkeit aufweist als die Referenzkonfiguration. Bei verringerter Blechdicke hat es noch immer eine zum Referenzteil vergleichbare Steifigkeit, wobei gegenüber diesem ein Gewichtsvorteil von ca. 20% erzielt wird. In allen drei untersuchten Fällen treten keine nennenswerten plastischen Dehnungen im Blech auf.

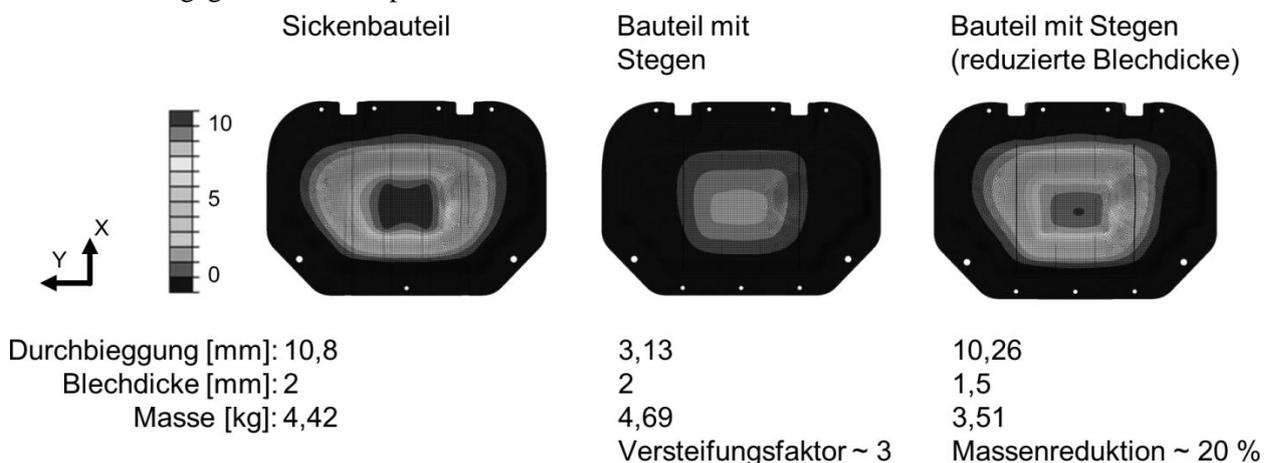


Bild 14: Leichtbaunutzen der Stegblechtechnologie

Die gewonnenen Erkenntnisse werden wiederum auf das Realbauteil Unterfahrschutz übertragen und in einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung aufbereitet. Durch die Einbringung von vier je 14 mm hohen und 450 mm langen Stegen kann trotz der auf 2,0 mm reduzierten Blechdicke eine vergleichbare Bauteilperformance erzielt werden. Das Gewicht verringert sich dadurch um 24,9%² von 9,61 kg auf 7,22 kg.

Die Teilpreise werden für drei Szenarien mit den Produktionsvolumina von 5.000, 25.000 und 120.000 Stück pro Jahr kalkuliert. Zur Sicherstellung einer hinreichenden Vergleichbarkeit mussten einige vereinheitlichte Annahmen über alle drei Stückzahlenszenarien getroffen werden. So wird für die Herstellung der Stegblechplatte in einem Zyklus von 52 s eine vorbestehende, flexible 6 kW-Laserzelle angesetzt, für die Abpressung durchgängig eine Transferpresse mit 14 (herkömmlich) bzw. 9 Hub (Stegblech) pro Minute. Die Kalkulation bezieht sich allein auf das verkaufsfähige Pressteil. Das heißt, dass eine mögliche Beschichtung durch kathodische Tauchlackierung, Rohbauoperationen etc. nicht betrachtet werden. Der verminderten Stapelbarkeit der Stegplatten wird hingegen in Form höherer Logistikkosten Rechnung getragen.

Tabelle 1 zeigt den stückzahlabhängigen Kostenvergleich. Für das konventionell gefertigte Pressteil ergeben sich einschließlich Investitionsumlagen, Zuschlägen, Gemeinkosten etc. Teilpreise von 25,99 € (5.000 p.a.), 15,54 € (25.000 p.a.) und 13,16 € (120.000 p.a.). Die Teilpreise des Stegblechbauteils liegen bei 31,43 € und 18,09 € bzw. 14,73 €. Die Preisdifferenz bezogen auf die Gewichtseinsparung ergeben letztlich mit der Stückzahl abnehmende Leichtbaukosten von 2,28 €/kg, 1,07 €/kg und 0,66 €/kg.

Je nach Fahrzeugklasse und Modellstückzahl werden in der Automobilindustrie Kosten von 5...12 €/kg Gewichtseinsparung toleriert [Fri17]. Damit ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens für konstruktiv geeignete Bauteile nachgewiesen.

Tabelle 1: Stückzahlabhängiger Kostenvergleich

Stückzahl p.a.	Preis konv. Bauteil	Preis Stegblech	Preis-differenz	Leichtbaukosten
5.000	25,99 €	31,43 €	5,44 €	2,28 €/kg
25.000	15,54 €	18,09 €	2,55 €	1,07 €/kg
120.000	13,16 €	14,73 €	1,57 €	0,66 €/kg

² Die prozentuale Gewichtsreduktion fällt im größeren Realbauteil etwas höher aus als im Prototypbauteil, weil das Zusatzgewicht der verwendeten Stege im Vergleich zur Gesamtmasse weniger zu Buche schlägt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Transfer des Grundlagenwissens der Prozesskette der Stegblechumformung in den Karosseriebau. Die vorgestellten Untersuchungen anhand eines Strukturteils aus einer PKW-Karosserie zeigen, dass mit der Stegblechtechnologie Karosserieteile um mehr als 20 % leichter bei gleicher Steifigkeit oder mit dreifach höherer Steifigkeit bei gleichem Gewicht hergestellt werden können. Weiterhin wird die Konstruktion der industriellen Schweißvorrichtung und des Umformwerkzeugs vorgestellt. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bescheinigt der Technologie moderate Leichtbaukosten in Höhe von 0,66 € bis 2,28 € pro eingespartem Kilogramm Bauteilmasse.

Aktuell erfolgt die Anfertigung der Schweißvorrichtung (am PtU) und des Umformwerkzeugs (bei LÄPPLE AUTOMOTIVE). Nach erfolgreicher Fertigung von Prototypen wird ihr Verhalten unter Last experimentell charakterisiert und die numerischen Simulationen validiert.

Zukünftig gilt es, industriell nutzbare Auslegungsmodelle zu generieren, die es Konstrukteuren ermöglichen, mit geringem Aufwand realisierbare Stegblechbauteile zu gestalten. Eine weitere Aufgabe liegt in der Verbesserung der Rückseitenoptik der Stegblechbauteile, um diese auch für den Einsatz als Sichtteile zu qualifizieren. Darüber hinaus wird die Technologie auf andere Materialien wie Aluminium erweitert, um zusätzliche Anwendungsfelder wie z.B. die Luftfahrt zu erschließen.

6 Dank

Die hier dargestellten Forschungsarbeiten fanden im Transferprojekt T7 „Stegblechumformung für den Karosseriebau“ im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 666 „Integrale Blechbauweisen höherer Verzweigungsordnung – Entwicklung, Fertigung und Bewertung“ statt. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung dieses Projekts. Weiterhin danken die Autoren für die großzügige Unterstützung durch die FIBRO GmbH.

Literatur

- [Bae10] **Bäcker, F.; Ertuğrul, M.; Groche, P.:** *A new process chain for forming individually curved sheet stringers*; In: International Journal of Material Forming 3 (2010), S. 837-840
- [Bae15] **Bäcker, F.:** *Formgebung mehrachsiger stark gekrümmter Stahlbleche mit lastangepassten Versteifungsrippen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt (Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen), 2015
- [Bir13] **Birkert, A.; Haage, S.; Straub, M.:** *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2013
- [Den07] **Denkena, B.; Schmidt, C.:** *Experimental investigation and simulation of machining thin-walled workpieces*; In: Production Engineering 1 (2007), S. 343-350
- [Eck10] **Eckstein, L.; Göbbels, R.; Biermann, J. et al.:** *Analyse der sekundären Gewichtseinsparung*; In: FAT-Schriftenreihe 230 (2010)
- [Ert11] **Ertuğrul, M.:** *Wirkmedienbasiertes Tiefziehen von verrippten Blechen*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt (Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen), 2011
- [Fri17] **H. E. Friedrich (Hrsg.):** *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, Springer-Verlag, 2017
- [Gro18] **Groche, P.; Köhler, S.:** *Blick in die Natur: Natürlicher Leichtbau in der Karosserie*; In: Blechnet 4 (2018)
- [Gro18] **Groche, P.; Köhler, S.; Kern, S.:** *Stamping of stringer sheets (eingereicht)*; In: Journal of Manufacturing Processes (2018)
- [Klo06] **Klocke, F.; König, W.:** *Fertigungsverfahren 4 - Umformen*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2006
- [Koe16] **Köhler, S.; Groche, P.; Baron, A. et al.:** *Forming of stringer sheets with solid tools*; In: Advanced Materials Research 1140 (2016), S. 3-10
- [Koe18] **Köhler, S.; Rohnert, C.; Groche, P.:** *Extension of geometric limits in drawing of stringer sheets*; In: Procedia Manufacturing 15 (2018), S. 693-700
- [Köt18] **Köth, C.-P.:** *Leichtbau lohnt sich sehr wohl*; In: Automobil Industrie 6 (63. Jahrgang) (2018)
- [Neu07] **R. Neugebauer (Hrsg.):** *Hydro-Umformung*, Berlin Heidelberg New York, Springer, 2007
- [Rin08] **Ringler, J.; Groche, P.:** *Spaltbiegen – Ein neues Verfahren für integrale Verzweigungen aus der Blechmitte*; In: Zwischenkolloquium SFB 666 (2008), TU Darmstadt, Meisenbach Verlag GmbH





Szenarische Volumenbetrachtungen von Kaltmassivprodukten zwischen Verbrenner und Elektromobilität

Mathias Liewald, André Weiß, Alexander Weiß, Daniel Zinser, Alina Biallas
Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart

Mit dem zunehmenden Einzug der Elektromobilität steigt in einigen Marktsegmenten der Massivumformung das Planungsrisiko zukünftiger Marktbedarfe. Immer stärker stellt sich die Frage, wie sich die Antriebstechnologien von Fahrzeugen zukünftig verändern und welche Konzepte sich am Ende durchsetzen werden. In dieser Hinsicht gibt es seitens der Fertigungstechnik viele offene Fragen, wie einzelne Fertigungsverfahren in Zukunft weiterhin eingesetzt werden könnten. Insbesondere die Kaltmassivumformung zählt heute zu den wichtigen Technologien für die Herstellung konventioneller, an den Verbrennungsmotor angepassten Antriebsstränge. In dieser wissenschaftlichen Arbeit sollen einerseits aktuelle Entwicklungen und Trends im Bereich der Elektromobilität objektiv dargestellt werden und andererseits die daraus resultierenden potentiellen Auswirkungen auf die Kaltmassivumformung aufgezeigt werden.

Scenario volume studies of cold formed components between combustion engine and electric mobility

The increasing trend towards electric mobility leads to a great uncertainty concerning the transition of drive train systems in the future. There are many unanswered questions with respect to future manufacturing technologies and importance of individual production processes for drive train components. In particular, cold forging is one of the most important technologies in the manufacturing of conventional internal combustion engine drive trains today. In this scientific work, current developments and trends in the field of electric mobility are presented. Furthermore, possible impacts on future cold forming production volumes were elaborated in this paper as well as potential opportunities to produce new components.

Einleitung

In Zeiten des Dieselskandals und der immer strenger werdenden Umweltvorschriften steht die Entwicklung von sparsamen und energieeffizienten Antrieben aktuell im Mittelpunkt aller Fahrzeughersteller. Momentan ist jedoch noch nicht abzusehen, welche Antriebsvarianten sich etablieren werden und welche Auswirkungen dies auf die gesamte Wertschöpfungskette der zukünftigen Fahrzeugproduktion haben wird. Dieser aktuell starke Umbruch im Mobilitätssektor hat dazu geführt, dass in vielen Unternehmen aus dem Bereich der Fertigung eine Unsicherheit vorliegt, welche Entwicklungen es im Antriebsbereich von Fahrzeugen zukünftig geben wird und welche aktuellen Geschäftsfelder entfallen werden bzw. welche potentielle neue Geschäftsfelder sich daraus ergeben können. Insbesondere der Bereich der Umformtechnik scheint von Elektromobilität stark betroffen zu sein. Aus Sicht der Blechumformung werden sich die Veränderungen voraussichtlich nicht eklatant auswirken, da auch zukünftig Karosserien und Strukturbauteile eine wichtige Rolle spielen werden. Aufgrund der hohen Anzahl von massivum-

geformten Komponenten in konventionellen Antriebssträngen, wird sich der zunehmende Einzug der Elektromobilität jedoch stark auf den Bereich der Massivumformung auswirken.

Im Folgenden wird zunächst ein allgemeiner Überblick der zukünftigen Trends im Mobilitätssektor gegeben und insbesondere die potentiellen Auswirkungen auf den Bereich der Massivumformung beleuchtet. Weiterführend werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie aus Sicht der Massivumformung auf diese grundlegenden Veränderungen reagiert werden kann, um auch in Zukunft einen wesentlichen Anteil der Wertschöpfung in der Antriebsstrangfertigung durch umformtechnische Fertigungsverfahren zu generieren.

1 Aktuelle Fahrzeug- und Antriebskonzepte

Im ersten Kapitel wird zunächst ein Überblick über die Elektromobilität sowie zu aktuellen Konzepten und Entwicklungen aus der Automobilbranche gegeben.

1.1 Aktuelle Entwicklungen in der Automobilbranche

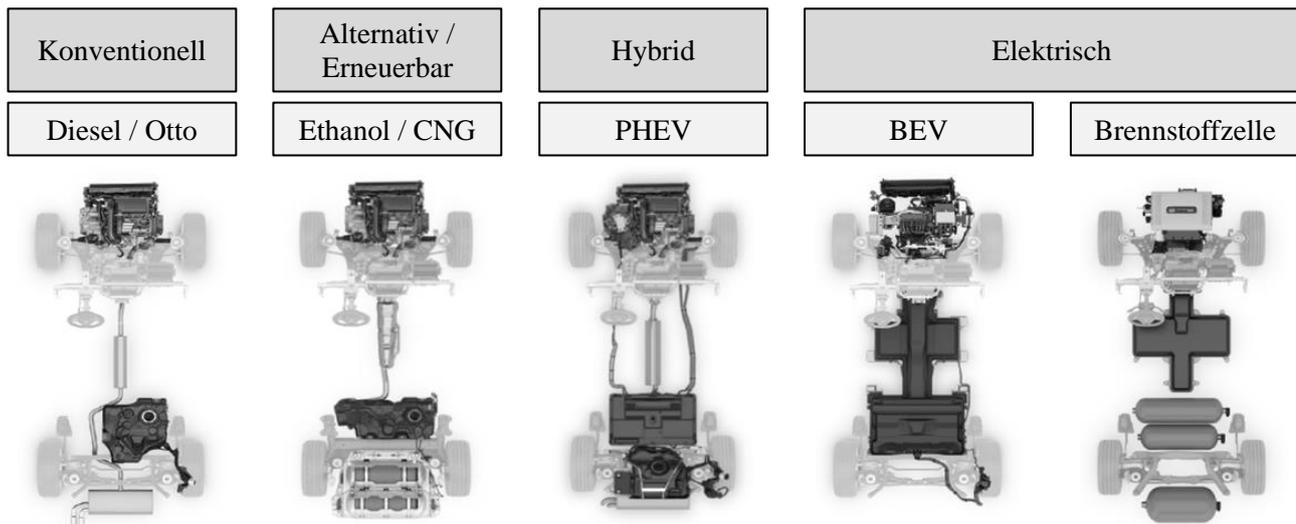


Bild 1.1: Übersicht verschiedener Antriebskonzepte für PKW, Quelle: VWAG

Die Antriebstechnik von Fahrzeugen ist ein derzeit gesellschaftlich und politisch stark diskutiertes Thema. Insbesondere in Bezug auf die Emissionswerte und die dadurch bedingten drohenden Fahrverbote, welche zum Teil bereits umgesetzt wurden, stehen alternative Antriebsarten im Fokus. [1, 2]

Eine Übersicht aktueller Antriebskonzepte ist in Bild 1.1 dargestellt. Neben den konventionellen Diesel- und Ottomotoren gibt es alternative verbrennungsmotorische Antriebe mit beispielsweise Ethanol oder CNG. Weiterhin werden Konzepte für Hybridfahrzeuge, die teilweise elektrisch und teilweise verbrennungsmotorisch bzw. kombiniert angetrieben sind, vorgestellt. Bei den Elektroantrieben kann die notwendige Energie einerseits mittels Batterien zur Verfügung gestellt werden bzw. auf eine Stromerzeugung aus Wasserstoff durch die Verwendung von Brennstoffzellen zurückgegriffen werden. Je nach Antriebskonzept entfallen diverse Bauteile aus dem Antriebsstrang bzw. es sind zusätzliche Komponenten erforderlich. Dadurch variieren die Bauraumanforderungen für solche Antriebskomponenten und – aggregate von Konzept zu Konzept merklich. [3]

Laut einer Studie der Boston Consulting Group (BCG) soll der Verbrennungsmotor bis 2025 zwar das bevorzugte Antriebsmittel in Europa bleiben, aber der elektrische Antrieb wird im Laufe der kommenden Jahre einen immer größeren Anteil einnehmen, was nicht zuletzt durch Umweltprämien der Politik gefördert wird. Viele OEM und Institute nennen dabei das Jahr 2030 als das Zeitalter der neuen Antriebe. [4] Bild 1.2 zeigt die von der BCG prognostizierte Entwicklung der jährlichen Autoverkäufe in Abhängigkeit der Antriebsvariante von 2017 bis 2030. Die (teil-)elektrisch angetriebenen PKW sollen demnach 2030 bereits ca. 53 % aller Fahrzeuge auf den Straßen

ausmachen. Ein besonders großes Wachstum verzeichnen dabei die rein elektrisch angetriebenen PKW mit Batterie (BEV), welche 2017 global noch bei unter 1 % lagen und 2030 bereits 14 % erreichen sollen. Es wird jedoch auch deutlich, dass sich in Zukunft nicht eine einzelne Antriebsvariante durchsetzen wird, sondern dass es eine breite Verteilung von mehreren Antriebskonzepten im Markt zu finden sein wird. Die maximale Produktionsmenge von PKW mit Verbrennungsmotor ist derzeit noch nicht erreicht. Somit werden nach dieser Studie zwar prozentual weniger PKW mit Verbrennungsmotoren hergestellt, absolut nimmt die Anzahl an Personenkraftwagen mit Verbrennungsmotor in den nächsten Jahren jedoch noch weiter zu. [4]

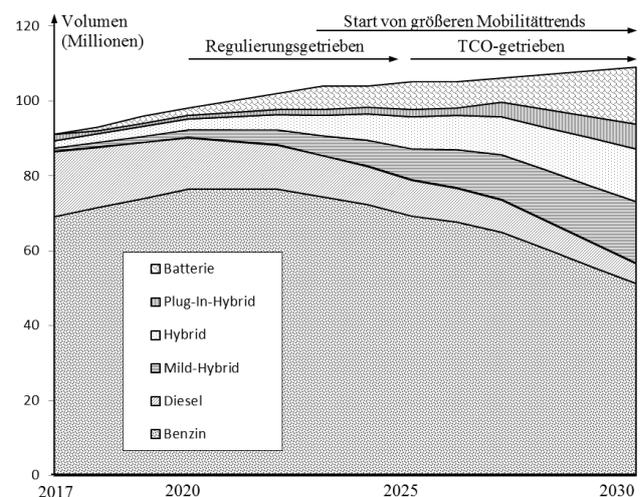


Bild 1.2: Globale Entwicklung der Antriebsvarianten, Quelle: [4]

Mit dem zunehmenden Umstieg auf elektrifizierte Antriebe - seien es rein elektrisch betriebene Fahrzeuge oder Hybridfahrzeuge - spielt ebenso die

Art der Stromerzeugung eine wesentliche Rolle. Aktuell weisen rein elektrische Fahrzeuge lediglich eine lokale Emissionsfreiheit auf. Die Elektromobilität würde in der Gesamtheit betrachtet erst eine emissionsarme Alternative zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor darstellen, wenn der Strom für den Antrieb überwiegend oder ausschließlich aus erneuerbaren Energien gewonnen wird (vgl. Bild 1.3). Für letzteren Fall könnte sich die Elektromobilität zukünftig nicht nur lokal emissionsfrei, sondern auch gesamtheitlich betrachtet emissionsarm nennen. Diesbezüglich sind zukünftig aber auch Alternativen wie die Brennstoffzelle oder sogenannte E-Fuels interessant, welche „grünen“ Strom speichern könnten. [2]

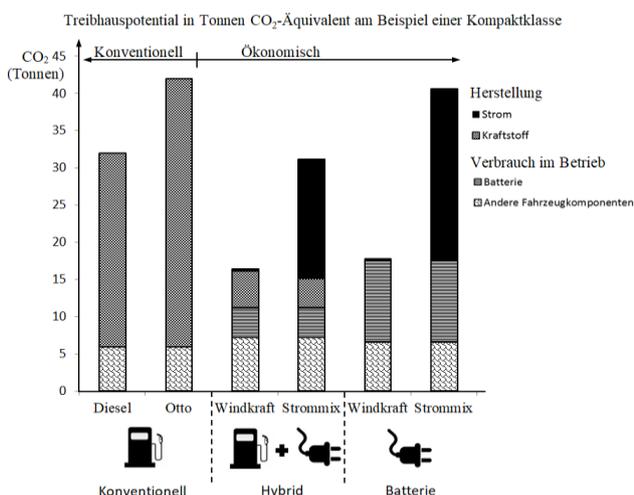


Bild 1.3: Treibhauspotenzial verschiedener Antriebskonzepte, Quelle: [2]

Aktuell sind die auf Europas Straßen bewegten Elektrofahrzeuge meist nicht direkt als solche zu erkennen. Dies ist darin begründet, dass die ersten Fahrzeuge mit solchen Antrieben im „Conversial based Design“ entworfen wurden. Diese PKW-Modelle basieren auf Karosserien von etablierten, konventionell angetriebenen PKW, bei denen lediglich der konventionelle Antriebsstrang durch einen elektrischen Antriebsstrang substituiert wurde. Die Auswirkungen auf den Karosseriebau sind in diesem Fall eher gering. [5, 6]

Entgegen dem „Conversial based Design“ steht das sogenannte „Purpose Design“. Dieses basiert nicht mehr vollständig auf einem etablierten, konventionell angetriebenen Modell, sondern ist gänzlich auf den neuen Antriebsstrang und die Anforderungen an ein elektrifiziertes Fahrzeug ausgelegt. Folglich ergeben sich hierdurch auch strukturelle Änderungen und entsprechende Auswirkungen auf den Karosseriebau bzw. auf die Umformtechnik. Der Fahrzeugunterbau kann beispielsweise für die Unterbringung des

Batteriepakets ausgelegt werden, was neue Anforderungen an die Crashesicherheit bzw. Crash-Konzepte der Karosserie erforderlich macht. Weiterhin entstehen durch den Entfall des Mitteltunnels des Fahrzeugunterbaus gänzlich neue Auslegungsmöglichkeiten im Innenraum des Fahrzeugs. [5, 6] Fahrzeuge auf Basis des „Purpose Design“ sind insbesondere in vielen Mobilitätskonzepten der Zukunft zu erkennen. Ein Beispiel hierfür ist das für ein urbanes Umfeld konzipierte flexible „Urban Modular Vehicle“ (UMV, siehe Bild 1.4). Die flexible Fahrzeugplattform bietet dabei die Möglichkeit, unterschiedliche Aufbauten aufzunehmen. [7]

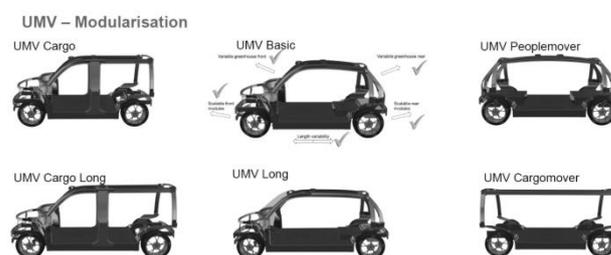


Bild 1.4: Varianten des Urban Modular Vehicle (UMV), Quelle: [7]

Kombiniert mit der Möglichkeit des autonomen Fahrens ergeben sich im urbanen Umfeld neue Mobilitätskonzepte, die das UMV mit seinem modularen Aufbau und der somit flexiblen Anpassung an seinen Gebrauch gut darstellt. Die Modularisierung des Fahrzeugs und die somit vollständige Flexibilität und Anpassbarkeit des Fahrzeugs an dessen Einsatz stellt einen weiteren Trend des urbanen Mobilitätskonzepts dar. [7]

Die Modularisierung und Flexibilität der zukünftigen Fahrzeuge geht einher mit der notwendigen Flexibilität der OEM sowie der Zulieferer. Diese wird mit Hilfe innovativer Fertigungsprozesse und der digitalen Fertigung (siehe Kapitel 3) zu gewährleisten sein. Auch das autonome Fahren wird zukünftig eine wichtige Rolle im Fahrzeugverkehr einnehmen. Viele bereits existierende Studien zeigen, dass der Level 5 des autonomen Fahrens (vgl. Bild 1.5) unter besonderen Bedingungen bereits erreicht werden kann, wobei es derzeit noch an gesetzlichen Regulierungen fehlt.

Mit zunehmendem Level steigen die Anforderungen an das Fahrzeug, seine Steuerung, sein fail-safe-Verhalten und auch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der es umgebenden Infrastruktur. Während bei Level 2 beispielsweise Assistenzsysteme die Lenkung des Fahrzeugs kurzzeitig übernehmen können, stellt Level 5 das vollautonome Fahren dar, bei dem auch die entsprechende Bedienperipherie nicht mehr vorhanden ist [8].

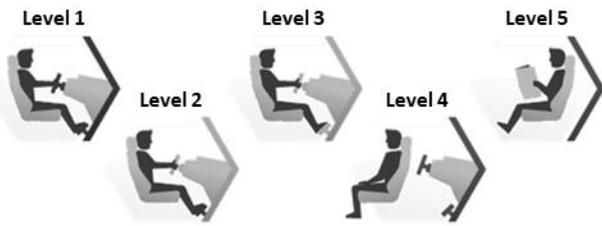


Bild 1.5: Die 5 Stufen der Autonomisierung des Fahrzeuges, Quelle: VWAG

Sobald der Einsatz autonomer Fahrzeuge durch die Gesetzgebung erlaubt wird, rechnen Experten insbesondere im urbanen Umfeld mit einem starken Anstieg des Anteils dieser Fahrzeuge, was auch Auswirkungen auf die Anzahl der Fahrzeuge haben wird. [9, 10]

1.2 Beispielhafte Antriebsstränge und Fahrzeuge

Im Volkswagenkonzern werden aktuell modulare Baukästen für die elektrisch angetriebenen Modelle entwickelt. Bei Audi und Porsche werden die zukünftigen hochpreisigen Elektro-Modelle auf der PPE (Premium Plattform Elektro) aufbauen. Bei VW und Skoda werden die elektrischen Fahrzeuge auf dem MEB (Modularer Elektro-Baukasten) basieren. [11, 12]

Die PPE steht dabei noch in ihren Anfängen. Die Architektur dieser Plattformen soll die Vorteile eines rein elektrisch angetriebenen PKW nutzen, unter anderem hinsichtlich Package, Radstand und Raumangebot. Die ersten Modelle sollen ab Ende 2021 gefertigt werden. Bis dahin werden die ersten Elektromodelle der beiden Marken, der Audi e-tron (2018) und der Porsche Mission E (2019), noch unabhängig von dieser Plattform auf den Markt kommen. Mit den neuen Plattformen steht dem Einzug neuer Fahrzeugfamilien nichts im Wege. Basierend auf dem MEB hat VW bereits für 2019 die neue I.D.-Familie angekündigt mit dem beispielhaften Fahrzeug VW I.D. (siehe Bild 1.6). [11, 12]



Bild 1.6: VW I.D., Quelle: VWAG

Auch Daimler rüstet seine Marken für die Elektromobilität um bzw. erweitert seine Produktpalette. Ähnlich wie bei Volkswagen wird parallel zur Fertigung der konventionellen PKW, die zunächst weiterhin mit Verbrennungsmotor das Hauptgeschäft bleiben werden, eine neue Elektroauto-Familie und eine neue Plattform eingeführt. Die Plattform „Electric Vehicle Architecture“ (EVA) soll Mercedes Benz die Serienfertigung neuer, elektrisch angetriebener Modellfamilien ermöglichen. Die Plattform basiert auf dem Prinzip der MRA (Modular Rear Architecture) und sieht dementsprechend einen Heckmotor vor. Radstand, Spurweite, Batterie etc. sollen variabel anpassbar sein. Als Materialien werden wohl Stahl, Aluminium und Carbon verwendet werden. Basierend auf der EVA hat Daimler eine neue Modellfamilie angekündigt: die EQ Familie mit dem EQC (siehe Bild 1.7). [13, 14]



Bild 1.7: Mercedes Benz EQC (Konzeptauto), Quelle: Daimler AG

1.3 Notwendigkeit von Zusatzgetrieben

Im Vergleich zu Verbrennungsmotoren weisen Elektromotoren für Kraftfahrzeuge meist einen relativ großen Drehzahlbereich bei einem relativ hohen Drehmoment auf, weshalb es in vielen Fällen ausreichend ist, wenn ein Getriebe mit konstanter Übersetzung verwendet wird. Folglich wäre ein mehrgängiges Getriebe nicht erforderlich, könnte aber in Hinsicht auf das Fahrverhalten und die Effizienz durchaus sinnvoll sein. In Bild 1.8A ist ein vereinfachtes Drehmoment-Geschwindigkeits-Diagramm eines Elektromotors dargestellt. Zu erkennen sind insbesondere die Wirkungsgradbereiche des Motors. Der Bereich des höchsten Wirkungsgrads liegt in diesem Beispiel im mittleren Geschwindigkeitsbereich. Bei geringen als auch bei hohen Geschwindigkeiten ist der Wirkungsgrad des Elektromotors entsprechend niedriger. Der Einsatz eines Zwei-Gang-Getriebes führt in dem dargestell-

ten Beispiel einerseits zu einer Erhöhung des maximalen Drehmoments im ersten Gang sowie einer Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit im zweiten Gang, was in Bild 1.8B dargestellt ist. Parallel hierzu wird der Bereich höherer Motorwirkungsgrade, aufgrund der zwei Gänge, in Bezug auf das Kennfeld ebenfalls erweitert bzw. ausgedehnt. [15, 16]

Das erhöhte maximale Drehmoment bringt außerdem ein höheres Beschleunigungsvermögen sowie eine höhere Steigfähigkeit mit sich. Mit einem dritten oder vierten Gang könnte dieser Effekt ggfs. noch weiter verstärkt werden. Der Einsatz eines mehrgängigen Getriebes wäre also nicht nur aus Sicht der Umformtechnik, sondern auch in Bezug auf die Effizienz und die Fahreigenschaften des Fahrzeugs sinnvoll.

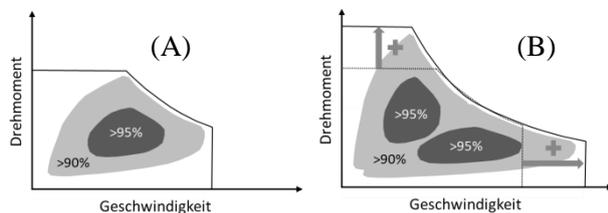


Bild 1.8: Elektromotor ohne Getriebe (A) und mit Getriebe (B) und dessen Auswirkung auf den Drehmoment-Geschwindigkeit-Bereich sowie die Motoreffizienz

2 Auswirkungen der Elektromobilität auf die Massivumformung

Mit den beschriebenen Entwicklungen im Bereich der Fahrzeugantriebe und -konzepte werden sich auch Veränderungen im Bereich der Komponentenfertigung ergeben. Im Jahr 2030 werden weltweit etwa 20 Millionen Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb erwartet. Die Zahl der auf Verbrennungsmotoren basierenden Antriebe wird bis dahin jedoch voraussichtlich nicht zurückgehen, sondern zwischen dem Jahr 2025 und 2030 ein Maximum von etwa 100 Millionen Fahrzeugen erreichen. Begünstigt wird dieser Wandel durch verschiedene Hintergründe. In Europa steigt der Anteil an elektrischen Fahrzeugen auf ca. 21%, insbesondere aufgrund der Regulierung der CO₂-Emissionen. Den höchsten Anteil an elektrischen Fahrzeugen wird voraussichtlich in China mit 29% erreicht, begünstigt durch politischen Druck. [17]

Der Wandel in der Antriebstechnik wird die Wertschöpfung und die Verteilung der Fertigungsprozesskosten an den Gesamtkosten verändern. Daher besteht großes Interesse daran zu wissen, wie sich der Wandel auf die Wirtschaft bzw. die Umformtechnik auswirken wird. Wird die gesamte Antriebstechnik betrachtet, ist der Studie [17] zu Folge ein jährlicher Anstieg der

Wertschöpfung um voraussichtlich 1,0 - 1,7 % bis 2030 zu erwarten (Bild 2.1; abhängig vom einsetzenden Szenario).

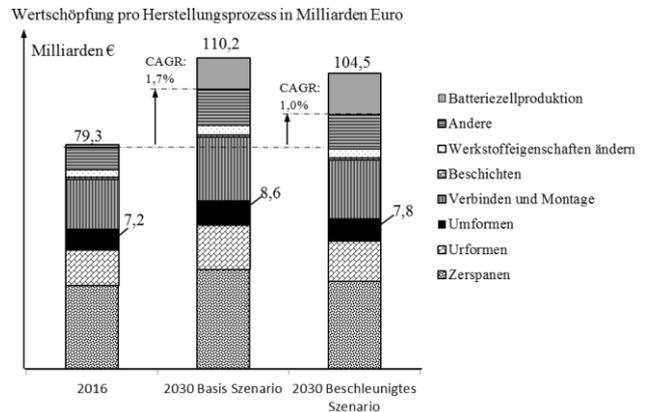


Bild 2.1: Entwicklung der Wertschöpfung pro Herstellungsprozess, Quelle: [17]

In der aufgeführten Studie [17] wird dabei zwischen einem Basisszenario und einem beschleunigten Szenario unterschieden, wobei Letzteres eine deutlich schnellere Zunahme des Anteils der elektrisch betriebenen Fahrzeuge prognostiziert. In Hinsicht auf die Wertschöpfung unterscheiden sich die Szenarien daher insbesondere in der Batterieproduktion, welche im beschleunigten Szenario um 3,5 % mehr Anteil an der Gesamtwertschöpfung der Antriebe aufweist. Die Wertschöpfung steigt aufgrund der folgenden Ursachen:

- Steigende PKW-Anzahl, angetrieben durch die Entwicklungen des chinesischen Marktes
- Elektrifizierung der Antriebe bei Mild-Hybrid-, Full-Hybrid- und Plug-In-Hybrid-Antrieben
- Konventionelle Antriebe mit effizienterer Technologie

Aus denselben Gründen wird die Wertschöpfung der Umformtechnik in Summe ebenfalls steigen, obwohl, wie nachfolgend erklärt wird, die Fertigungsprozesskosten durch Umformen in den E-Fahrzeugen spezifisch betrachtet abnehmen werden. Anhand der Antriebstypen Plug-In-Hybrid (PHEV), Mild-Hybrid sowie dem E-Fahrzeug (BEV) wurde die Zusammensetzung der Fertigungsprozesskosten genauer untersucht. Der Mild-Hybrid besitzt lediglich einen kleinen E-Motor mit einer kleinen Batterie. Die Fertigungsprozesskosten setzen sich bei diesem Fahrzeug entsprechend des ersten Balkens im Diagramm in Bild 2.2 zusammen. Der Plug-In-Hybrid besteht aus einem deutlich komplexeren Antriebsstrang mit sowohl Verbrennungsmotor mit Getriebe als auch einem großen Elektromotor.

Aufgrund der erhöhten Komplexität liegen die Fertigungsprozesskosten im Vergleich zum Mild-Hybrid höher. Der absolute Anteil der Umformtechnik ist aufgrund des weiteren Einsatzes eines Verbrennungsmotors folglich nahezu identisch mit dem Mild-Hybrid. Bei dem E-Fahrzeug hingegen weist der Antriebsstrang eine relativ geringe Komplexität und damit geringe Fertigungsprozesskosten auf. [17]

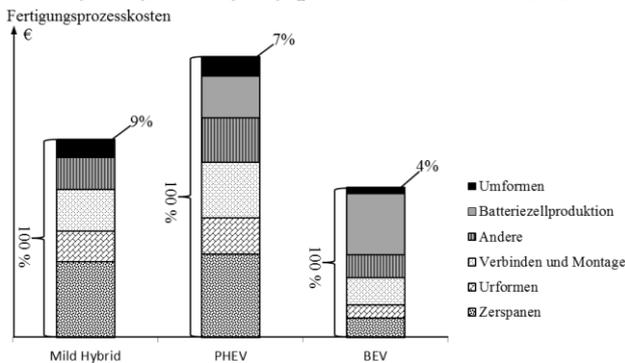


Bild 2.2: Fertigungsprozesskosten verschiedener Antriebssysteme, Quelle: [17]

Für die Umformtechnik lässt sich erkennen, dass die Fertigungsprozesskosten durch Umformen bei E-Fahrzeugen im Vergleich zu Mild-Hybrid-Antrieben und Plug-In-Hybrid-Antrieben deutlich geringer ausfallen. Dies liegt hauptsächlich an dem Entfall der verbrennungsmotorischen Komponenten sowie dem Getriebe, bei denen häufig umformtechnische Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. Den größten Anteil der Fertigungsprozesskosten beim E-Fahrzeug liegt aus aktueller Sicht in der Batterietechnik. [17]

Werden die einzelnen Antriebskomponenten betrachtet, so zeichnen sich gewisse Trends ab. Die Anzahl der verkauften Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren wird bis 2030 zwar abnehmen, die Komplexität dieser Motoren wird jedoch weiter steigen. Dies ist insbesondere bedingt durch neue Technologien, wie variable Verdichtung oder variable Ventilsteuerung, sowie stetige Weiterentwicklungen hinsichtlich Reibungsminimierung, Abgasaufbereitung, höhere Aufladungen und durch den fortschreitenden Leichtbau. Dieser Trend zeichnet sich sowohl beim Benzin- als auch beim Dieselmotor ab sowie bei deren Einzelkomponenten (vgl. Tabelle 2.1). Das Verkaufsvolumen von Hybridfahrzeugen wird bis 2030 vermutlich stark steigen. [17]

Tabelle 2.1: Technologietrends von verschiedenen Verkaufstreibern bis 2030 und deren Auswirkungen auf Volumen und Komplexität, Quelle: [17]

Legende	
Volumen	
Komplexität	
Trend (fallend, steigend)	
Verbrennungsmotor	
- Höhere Effizienz	↘
- Leichtbau, Reibungsminderung, Wärmemanagement	↗
- Effizientere Abgasnachbehandlung	↗
Zylinder / Kolben	
- Leistungen für Benzinmotoranwendungen von 80 - 100 kW/l	↘
- Gestiegener Spitzendruck für Benzinmotoren, Millerzyklus mit variabler Ventilbetätigung	↗
- gekühlte EGR-Systemen	↗
Benzinmotor	
- Direkte Treibstoffeinspritzsysteme (<350 bar); zweifach aufgeladene Motoren	↘
- Partikelfilter in allen Anwendungen für Europa, ausgewählte Anwendungen in den USA, China mäßig angewendet	↗
Dieselmotor	
- Geringe Rohstoffemissionen durch steigenden Treibstoffeinspritzdruck von bis zu 3000 bar mit Mehrfacheinspritzung	↘
- Abgasnachbehandlungssysteme mit Kombination von LNT und SCR in Verbindung mit DPF in geschlossener Paaranordnung	↗
Mild-Hybrid Fahrzeug	
- Einstiegsanwendungen mit P0-Architektur, P2-Architektur in größeren Fahrzeugen	↑
- 12V Bordnetz wird parallel bleiben	
- Mild-Hybrid-Technologie unterstützt Abgaseinhalten, speziell im realen Fahrzeuggebrauch	
Full-Hybrid Fahrzeug	
- Leistungstrennung und überwachte, hybride Kraftübertragung als wichtiger Trend	↗
- Serienhybrid mit vereinfachten, hocheffizienten Verbrennungsmotoren	
PHEV und BEV	
- Ablösung der Lithium-Ionen-Technologie durch z.B. Festkörper-Technologie nach 2025 erwartet	↑
- Reichweite für BEV mit über 350 km	
- Schnelles Laden mit 150 - 200 kW, in einzelnen Fällen bis zu 350 kW	
- (In-)Direktes Kühlen von Elektromotoren	

3 Potenziale aus Sicht der Massivumformung

Durch die zunehmende Elektrifizierung des Antriebsstrangs und dem zukünftigen Rückgang der Verbrennungsmotorproduktion nimmt in Folge auch das Volumen der in konventionellen Antriebssträngen verwendeten Komponenten ab, welche momentan mittels umformtechnischer Fertigungsverfahren hergestellt werden. Diese Entwicklung wird nicht abrupt eintreten, jedoch prognostizieren alle aktuellen Studien einen Rückgang konventionell angetriebener Fahrzeuge.

Im direkten Vergleich zu einem rein elektrisch angetriebenen Fahrzeug entfallen Bauteile wie beispielsweise Kolben, Pleuel, Ventile, Tassenstößel, Nockenwellen, Kurbelwellen und Kolbenbolzen. Durch den Entfall komplexer Mehrganggetriebe entfallen weitere massivumgeformte Getriebekomponenten. Trotz des Entfalls vieler Bauteilkomponenten bleiben auch einige umformtechnisch hergestellte Komponenten bestehen. Hierzu zählen je nach Antriebsstrang beispielsweise Achsen, Zahnräder, Wellen, Fahrwerkskomponenten, Getriebestufen mit konstanter Übersetzung oder auch schaltbare Getriebestufen. Des Weiteren bieten Elektromotoren und neue Antriebsstränge Potenzial für neue innovative Bauteile, die durch effiziente Fertigungsverfahren der Massivumformung hergestellt und Themen wie Leichtbau oder hochfester Präzisionsbauteile gerecht werden müssen. Aus diesen Gründen wird die Massivumformung - wenn auch in veränderter Form - in Zukunft weiterhin eine relevante Rolle in der Fertigung des Antriebsbereichs von Automobilen spielen. Der Markt wird sich mit zunehmender Elektrifizierung und Digitalisierung in den nächsten Jahren umstrukturieren. Um weiterhin sehr erfolgreich am Markt agieren zu können, ist somit eine gewisse Flexibilisierung der unternehmensspezifischen Zukunftsstrategie notwendig.

Im Folgenden werden Szenarien vorgestellt, die eine Hilfestellung bei der szenarischen Planung zukünftiger Marktentwicklungen bieten sollen. Es wird der Anspruch verfolgt, einerseits die Vielzahl der Einflussfaktoren und andererseits die notwendige Flexibilität der Marktteilnehmer hervorzuheben, um auf die angesprochenen Marktveränderungen reagieren zu können. Eine Übersicht und Zusammenfassung ist in der nachfolgenden Tabelle 3.1 dargestellt. Für jedes Szenario ist ein möglicher Lösungsansatz aufgezeigt, die entsprechenden Mittel zu deren Realisierung sowie das angestrebte Ziel. Jedes dieser Szenarien zeigt einen möglichen Weg auf, mit welchem sich ein Unternehmen auf dem Markt

zukünftiger Produkte der Massivumformung positionieren kann.

Tabelle 3.1: Kurzübersicht potenzieller Szenarien

	Technologieverbesserungen	Neue Geschäftsfelder	Innovative Fertigungsverfahren
Ansatz	Innovative Umformprozesse	Geringe Losgrößen	Fertigung von Komponenten im Elektromotor
Mittel	<ul style="list-style-type: none"> • Leichtbau • Verzahnungspressen • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Digitale Fertigung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressen Kupfer Käfigläufer • Gebaute Spule • ...
Ziel	Ausweitung der Anwendungsbereiche	Erschließen von Geschäftsfeldern im: <ul style="list-style-type: none"> • Flugzeugbau • Anlagenbau • ... 	Erweiterung des Teilespektrums

Zur Ausarbeitung der Szenarien wurden aus einer Vielzahl von Studien die folgenden Kernaussagen abgeleitet. Für jedes der Szenarien aus Tabelle 3.1 - Technologieverbesserungen, Erschließung neuer Geschäftsfelder und innovative Fertigungsverfahren - wurden spezifische Lösungsansätze entwickelt. Ausgehend von dem aktuellen Stand mit konventionellen Produkten im bisherigen Markt wurden die Szenarien entsprechend in eine Produkt-Markt-Matrix (siehe Tabelle 3.2) eingeordnet.

Tabelle 3.2: Einordnung der Szenarien / Verfahren

	Alte Produkte	Neue Produkte
Neuer Markt	Neue Geschäftsfelder (digitale Fertigung)	Innovative Fertigungsverfahren
Alter Markt	aktuell	Technologieverbesserungen

Bei den Technologieverbesserungen werden basierend auf bestehenden Komponenten neue Bauteilkonzepte entwickelt, um im bisherigen Markt einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen. Um mit konventionellen Produkten in neue Märkte vorzudringen, kann mittels Digitalisierung der Fertigungsprozess effizienter gestaltet werden. Die innovativen Fertigungsverfahren verfolgen das Ziel, mit neuen Komponenten in neue Märkte (Elektromobilität) vorzustoßen. Im Nachfolgenden werden die drei Szenarien näher erläutert und Möglichkeiten beschrieben, wie die Umsetzung aussehen könnte.

3.1 Technologieverbesserungen

In zukünftigen E-Fahrzeugen wird auch weiterhin eine Vielzahl an umformtechnischen Komponenten verbleiben. Die absolute Anzahl der Bauteile in E-Fahrzeugen wird sich jedoch, laut aktueller Prognosen, reduzieren. Hersteller von Komponenten, welche sich mit ihrem Liefer- und Leistungsspektrum im elektrifizierten Antriebsstrang langfristig

engagieren, sind daher zu einer Anpassung ihrer Strategie angehalten und werden sich folglich auf einen Teil der verbleibenden Bauteile konzentrieren. Hieraus resultiert ein international wachsender Konkurrenzdruck unter den Lieferanten von Massivumformprodukten. Um sich von Mitbewerbern abzuheben, ist es auch zukünftig notwendig, innovative Produkte und Prozesse zu entwickeln. Besonders relevant ist es darüber hinaus, bestehende Komponenten mittels effizienter und kostengünstiger Fertigungsverfahren herzustellen. Hierfür müssen neue und innovative Umformprozesse entwickelt werden mit dem Ziel, bestehende Verfahren zu verbessern und eine Ausweitung der Anwendungsgebiete zu erreichen. Hierbei sind die bereits bekannten Trends und Anforderungen der Umformtechnik weiterhin aktuell. Effiziente Produktionsprozesse, kluge Make or Buy-Strategien, eine hohe Materialausnutzung oder die Reduktion von Prozesskosten werden auch längerfristig wirkungsvolle Verbesserungsmaßnahmen darstellen. Das Themengebiet des Leichtbaus ist dabei stets gemeinsam mit dem Kunden zu bearbeiten. Es zeigt sich diesbezüglich bereits heute, dass die Beherrschung der Komplexität fortschrittlicher Leichtbaulösungen zwischen Funktion der Komponente im Gebrauch, dem verwendeten Werkstoff, seiner Eigenschaften vor und nach dem Umformen und der eingesetzten Produktionstechnik derzeit nur von wenigen Marktteilnehmern proaktiv als Alleinstellungsmerkmal genutzt wird. Beispielhaft hierfür sind die innovative Fertigung von verzahnten Hohlbauteilen mittels einer speziellen Vorformgeometrie [18] oder das in Bild 3.1 dargestellte „gebaute“ Zahnrad, bei welchem der Zahnradkörper mit einem vorgefertigten Zahnkranz umformtechnisch in einem Hub gefügt wird. Der Umformprozess ist dabei eine Kombination aus Napf-Rückwärts-, Napf-Vorwärts- und Quer-Fließpressen. [19, 20]

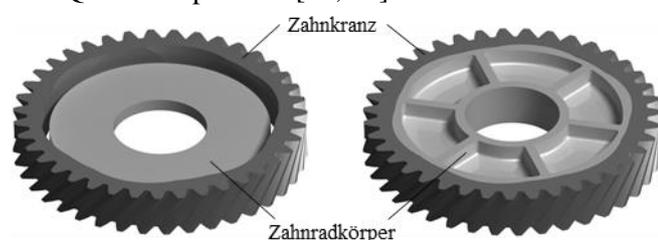


Bild 3.1: Beispiel eines innovativ gefertigten Zahnrades in Leichtbauweise; Quelle: [19]

Durch diese Vorgehensweise wird der Zahnradkörper bzw. die Welle-Nabe-Verbindung während des Fügeprozesses aus einem scheibenförmigen Rohteil mit Loch geformt. So kann einerseits in den stark lokal beanspruchten Bereichen des Zahnkranzes ein entsprechend hochfester Werkstoff verwendet werden,

wohingegen für den Zahnradkörper ein günstiger Werkstoff verwendet werden kann. Der Hauptaspekt dieses Forschungsprojektes lag dabei auf dem gezielten Leichtbau [19]. Weitergehend sind zukünftig auch Verfahren gefragt, mit welchen spezifische komplexe Konturen und Geometrien durch neue Kombinationen von Massivumformverfahren einfacher hergestellt werden können.

Zusammenfassend besteht das Szenario Technologieverbesserungen darin, bestehende Technologien und Anwendungen weiter zu verbessern, um unter zunehmendem Konkurrenzdruck noch wirtschaftlich fertigen zu können. Diesbezügliche Strategien setzen seitens der Unternehmen klar erkennbare Merkmale der *Diversifizierung* oder der *Kostenführerschaft* (economies of scale) voraus.

3.2 Erschließung neuer Geschäftsfelder

Durch den zunehmenden Konkurrenzdruck und die reduzierte Bauteilvielfalt kann es sinnvoll sein, den Fokus auf die Erschließung neuer Geschäftsfelder zu lenken. Dabei ist das Ziel, mit konventionellen Umformprodukten in neue Märkte vorzudringen. Dies kann in Einzelfällen gelingen, ohne neue Strukturen zu implementieren (economies of scope). Jedoch gibt es wenige neue Anwendungsgebiete, in welchen die Umformtechnik ihre Prozessvorteile ohne eine Anpassung von Produktionsstrukturen nutzen kann. Prozessketten in der Umformtechnik sind besonders kapitalintensiv und bedingen daher möglichst große Losgrößen. Heutige Stückkostenanalysen zeigen, dass der wesentliche Mehrwert von Kaltpress- und Schmiedebauteilen in ihrer Belastbarkeit, ihrem anwendungsspezifischen Gefüge und ihrer endkonturnahen Geometrie nach dem Umformen liegt.

Von der Auftragserteilung über die Werkzeugkonstruktion bis hin zur finalen Fertigung von technologisch schwierigen Komponenten werden heute durchschnittlich 12-20 Wochen benötigt. Aufgrund dieses Zeitbedarfs ist die umformtechnische Herstellung von Komponenten nur bei hohen Lieferverpflichtungen und großen Stückzahlen wirtschaftlich. Aufträge, welche schneller bearbeitet und kürzere Lieferzeiten der Komponenten erreichen müssen, erfordern daher alternative Produktionsverfahren. So kann beispielsweise mit einer spanenden Fertigung oder mittels Drucktechnik schnell und individuell auf derartige Nachfragen reagiert werden, wobei hierbei ein Vielfaches der Stückkosten anfällt. Derzeit sind Infrastrukturen, Abläufe und Prozessketten der Massivumformung nicht flexibel genug und können sog. „Kleinserien“ nur bis zu einem

bestimmten Produktionsvolumen wirtschaftlich darstellen.

Um mit konventionellen Produkten neue Geschäftsfelder, wie die Luft- und Raumfahrt oder den Anlagenbau, erschließen zu können, ist eine effiziente, flexible und automatisierte Fertigung erforderlich. Entgegen dem ersten Szenario soll also nicht das Produkt bzw. das Umformverfahren verbessert werden, sondern die übergeordnete Fertigungskette. Die fortschreitende Digitalisierung in der Fertigungstechnik bietet dabei auch in der Massivumformung neue Möglichkeiten.

In diesem Zusammenhang wurde eine Methode für eine durch digital unterstützte Fertigung im Schmiedebetrieb konzipiert. Hierbei liegen die Ziele in der Unterstützung des Fertigungspersonals und der Reduktion der körperlichen Arbeit sowie in der Automatisierung diverser Prozesse. Diese neue Methode ist schematisch in Bild 3.2 veranschaulicht.

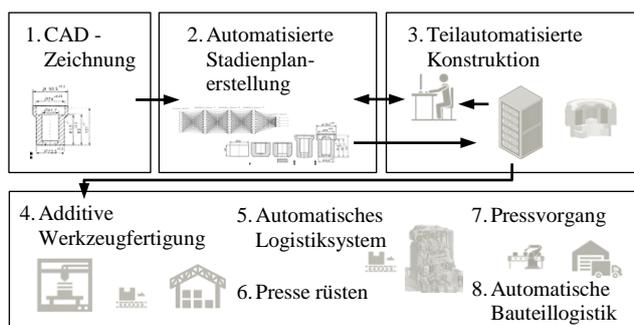


Bild 3.2: Schema der digital unterstützten Fertigung, Bildquelle: hackernoon, 123rf, VDI 3138

Bei der Umsetzung der digitalen Fertigung bilden der Einsatz einer deep-learning-Software und die additive Werkzeugfertigung die wesentlichen Elemente. Die deep-learning-Software „erlernt selbstständig“, einen Stadienplan für einen Umformprozess zu erstellen, indem sie etablierte Stadienpläne als Referenz verwendet. Dadurch kann die Stadienplanerstellung sowie die Werkzeugkonstruktion beschleunigt und somit Kosten eingespart werden.

Bei der angedachten Methode wird zunächst die CAD-Zeichnung der Zielgeometrie eines Kunden in eine deep-learning-Software eingeladen. Diese erstellt anschließend vollautomatisch einen Stadienplan zur Herstellung des gewünschten Produktes. Der erstellte Stadienplan wird von einem Mitarbeiter kontrolliert, gegebenenfalls angepasst und freigegeben. Die Software baut daraufhin eine vollständige Prozesssimulation auf, deren Berechnungsergebnisse dem Mitarbeiter nach erfolgreichem Durchlauf wieder zur Freigabe übermittelt wird. Danach erfolgt eine teilautomatisierte Konstruktion des Werkzeuges. Bedarf es in einzelnen Umformstufen besonderen

Wissens über die Prozess- oder Umgebungsbedingungen, so entscheidet der Mitarbeiter die Ausgestaltung der Umformstadien selbst. Zu Bauteilen, welche in ähnlicher Form bereits vielfach gefertigt wurden, kann die Software selbständig die Werkzeugkonstruktion vornehmen. Dabei lernt die Software mit jeder Konstruktion besser, die Prozesse und Konstruktionen zu implementieren - insbesondere unter Berücksichtigung der manuellen Eingriffe.

Die Konstruktion wird anschließend vom Mitarbeiter kontrolliert und freigegeben. Abhängig vom Auftragsvolumen und Fertigungstermin wird danach festgelegt, ob die Fertigung des Umformwerkzeuges oder einer Stufe konventionell oder mittels additiver Werkzeugfertigung erfolgen soll. Letztere ermöglicht eine schnelle Werkzeugerstellung und flexible Gestaltungsmöglichkeiten mittels 3D-Metalldruck. Es ist dabei immer zu beachten, dass auch bei dieser Technologie ein abschließendes Fräsen der Werkzeugoberflächen und evtl. Nachbearbeitungen oder Beschichtung der Werkzeugwirkflächen erforderlich sind. Eine etwaig geringere Werkzeugstandzeit der additiv gefertigten Werkzeuge würde deren Nutzung für geringere Losgrößen einschränken. Allerdings bietet dieses Fertigungsverfahren die Vorteile, hochflexibel und schnell auf Aufträge reagieren zu können.

Im Anschluss an die Fertigung werden die Werkzeuge montiert und in ein automatisches Logistiksystem eingeführt. Rückt der Press- bzw. Fertigungstermin näher, so werden alle Werkzeuge vollautomatisiert zur Presse transportiert. Hier wird das Umformwerkzeug bzw. der Werkzeugsatz dann von einem automatischen Pressenrüstsystem eingewechselt. Ein Mitarbeiter überwacht den Prozess und macht eine Qualitätskontrolle der Bauteile. Die gepressten Bauteile werden direkt über Förderbänder in Lagerhallen transportiert. Dort werden die Bauteile zentral gereinigt und entweder vollautomatisch zum Kunden versendet oder zu einer spanenden Nachbearbeitung bzw. Wärmebehandlung weitergeleitet.

Dieses, den Gesamtprozess umfassende, Vorgehen bietet die Vorteile einer Kostenreduktion, einer schnellen Auftragsabwicklung sowie einer wirtschaftlichen Fertigung auch kleinerer Losgrößen. Dadurch können Geschäftsfelder mit geringen Stückzahlen profitabel werden und die durch die Elektromobilität entfallenden Komponenten kompensiert werden. Nachteilig an diesem Konzept erscheint einerseits der hohe Entwicklungsaufwand für die konsequente Ausrichtung aller Prozessschritte entlang eines digitalen Schattens und die initialen Investitionskosten für die Automatisierungskomponenten.

3.3 Entwicklung neuer Fertigungsprozesse

Neben der Erschließung neuer Geschäftsfelder mit Hilfe einer digitalen Fertigung beschreibt das dritte Szenario die Entwicklung gänzlich neuer Fertigungsprozesse mit Hinblick auf neue Komponenten. Durch die Elektrifizierung des Antriebsstranges wird die Anzahl der bisher umformtechnisch hergestellten Komponenten sichtbar reduziert. Im gleichen Zuge entsteht jedoch auch ein neues Potenzial für Bauteile, die durch innovative Fertigungsverfahren der Massivumformung erschlossen werden können. Diese Bauteile müssen identifiziert und analysiert werden. Innovative Fertigungsprozesse haben somit zum Ziel, das bestehende Teilespektrum zu erweitern und die Herstellung neuer Bauteile zu ermöglichen.

In elektrisch angetriebenen Fahrzeugen können in diesem Zusammenhang unterschiedliche Komponenten des Fahrzeuges, wie beispielsweise der Elektromotor, die Batterien oder deren Kühlsysteme untersucht werden. Bei der Batterie besteht Potenzial in den Komponenten Gehäuse und Verbindungselemente. Die Batterien eines Elektrofahrzeuges müssen einerseits gekühlt werden, während der Innenraum des Fahrzeuges im Winter beheizt werden muss. Ein diesbezüglicher möglicher Zukunftstrend könnte sein, eine Wärmepumpe und einen chemischen Wärmespeicher in Fahrzeuge einzubauen. Mit dem Wärmespeicher könnte die Fahrgastzelle zum Fahrtbeginn ohne elektrischen Strom aufgeheizt werden. Mittels der Wärmepumpe kann die Batterie stark gekühlt werden und gleichzeitig die Fahrgastzelle geheizt werden. Bereits bestehende und die genannten zusätzlichen Komponenten bieten das Potenzial, die Anzahl der massivumgeformten Bauteile auch im Bereich der Kühlsysteme zu steigern. Der Fokus der folgenden Untersuchung wurde auf das umformtechnische Potenzial im Elektromotor gelegt.

Es gibt eine Vielzahl an Bauarten von Elektromotoren, die wiederum in verschiedene Bauweisen unterteilt werden können. Typischerweise erfolgt eine Einordnung der Elektromotoren in drei Hauptgruppen: Kommutatormaschinen, Asynchronmaschinen und Synchronmaschinen. Recherchen zeigen, dass in aktuellen elektrisch angetriebenen Fahrzeugen hauptsächlich permanenterrregte Synchronmaschinen und Asynchronmaschinen mit Kurzschlussläufern verwendet werden. Da Asynchronmaschinen ohne Permanentmagneten und somit ohne seltene Erden funktionieren, wurden für diese Motorbauart diverse Konzepte ausgearbeitet. Einige dieser Konzepte lassen sich auch auf andere Bauarten übertragen.

Zur Analyse und Konzepterstellung werden die Bestandteile des Motors bestimmt und jeweils

Konzepte zur alternativen Herstellung abgeleitet. In Bild 3.3 sind die wesentlichen Komponenten eines Asynchronmotors dargestellt, wobei eine Unterteilung zwischen Stator und Rotor vorgenommen wurde. Im Folgenden werden innovative Ansätze vorgestellt, wie die Komponenten des Asynchronmotors alternativ gefertigt werden könnten.



Bild 3.3 Komponenten des Asynchronmotors und dessen Aufbau, Bildquellen: renke-mueller, metallteile ezplast, xplora-dna, Danfoss

Die Blechpakete des Stators sowie des Rotors bestehen aus mehrlagigen Schichten von Elektroblech. Diese sollten zur Reduktion von Wirbelströmen und Steigerung des Wirkungsgrades möglichst dünn ausgeführt werden und sind jeweils elektrisch voneinander isoliert. Das momentane Fertigungskonzept besteht aus den Fertigungsschritten Trennen, Isolieren, Stapeln und Fügen der Blechlamellen. Da das wirtschaftliche Verfahren des Stanzens nur bis zu einer Blechdicke der Elektrobleche von größer als 0,2 mm einsetzbar ist, müssen neue Fertigungskonzepte entwickelt werden, mit welchen der Wirkungsgrad von Elektromotoren weiter erhöht werden kann. [21]

Neue innovative Fertigungskonzepte zur Herstellung der Blechpakete können das kompaktierte Walzen und das kompaktierte Schneiden bilden. Beim kompaktierten Walzen erfolgt der Walzvorgang nach dem Isolieren sowie das Fügen von mehreren Elektroblechen zu einem Blechpaket. Durch das Walzen des Blechpaketes kann eine geringere Elektroblechdicke der einzelnen Lagen erreicht und dadurch der Motorwirkungsgrad erhöht werden. Das gewalzte Blechpaket wird im Anschluss - je nach Enddicke - mittels Laserstrahlscheiden oder Stanzen in die Endform gebracht. Das kompaktierte Schneiden beginnt ebenfalls mit dem Isolieren und Fügen der Elektrobleche zu kleineren Blechpaketen mit anschließendem gleichzeitigem Schneiden auf die gewünschte Größe. Dadurch können relativ dünne Elektrobleche, welche ansonsten einzeln nicht geschnitten werden könnten, im Verbund geschnitten werden und ein hoher Motorwirkungsgrad durch die Verarbeitung sehr dünner Bleche erzielt werden.

Ein weiteres Fertigungskonzept für die Herstellung von Blechpaketen bildet das Elektroblech-Recycling.

Die recyclebaren Elektroblechpakete werden dazu zerkleinert, beschichtet und durch Formpressen wieder zu Bauteilen verarbeitet. Das Vorgehen basiert auf dem „Soft Magnetic Composite“ Verfahren, dabei wird mittels Beschichten die Oberfläche sehr kleiner Partikel elektrisch isoliert. Dieses isolierte Metallpulver wird anschließend in einem Formpressvorgang in die gewünschte Form gebracht. Die isolierten Partikel besitzen auch nach dem Formpressen einen hohen elektrischen Widerstand und verursachen somit geringe Wirbelstromverluste. Durch die unidirektionale Isolation sehr kleiner Partikel werden die Bauteile zumeist in hochfrequenten Anwendungen genutzt. In Elektromotoren werden keine derartig hohen Frequenzen benötigt, weshalb die zu beschichtende Partikelgröße vergrößert werden kann. Die zu recycelnden Elektrobleche werden daher in feine Späne zerteilt und im o.g. Prozess restlos verarbeitet. Die Späne werden daher zuvor gereinigt und isoliert. Folgend werden die Späne in die gewünschte Stator- oder Rotorform gepresst.

Weiteres Innovationspotenzial wurde in der Herstellung des Kurzschluss-Käfigläufers identifiziert. Derzeit werden Kurzschluss-Käfigläufer durch eine gebaute Ausführung oder durch Druckguss auf das Blechpaket hergestellt. Es ist momentan nicht möglich, Kupferdruckguss wirtschaftlich einzusetzen, weshalb für das Verfahren zumeist Aluminium verwendet wird. Hierdurch wird der Wirkungsgrad des Motors verringert. [22] In der „gebauten“ Ausführung werden zumeist die Stirnflächen und die Verbindungsstäbe (in den Läufernuten) separat gefertigt und miteinander verbunden. Um eine einfachere Montage und Herstellung zu erreichen, kann der Kurzschluss-Käfig in einem neuen Konzept durch Voll-Vorwärts-Fließpressen gefertigt werden. In einem weiteren neuen Konzept wird der Käfig direkt auf die Blechpakete gepresst, was in einer erhöhten Formfüllung und somit in einem höheren Wirkungsgrad resultiert. Ähnlich wie beim Druckguss mit Kupfer kann hier eine Blechpaketisolation bereits bei geringer Temperatur erreicht werden.

Es gibt heute eine Vielzahl an verschiedenen Spulenwicklungsverfahren. Diese werden unterteilt in Ständer- und Läuferwicklungen. Beispielhaft können hierfür die Kurzschlusswicklung, Zweilangenwicklung und Trommelankerwicklung genannt werden. [23]

Ein mögliches, neues Fertigungskonzept dafür bildet die in Bild 3.4 dargestellte „gebauete“ Spule. Hierbei wird das Kupfermaterial durch Strangpressen mittels Lochmatrize in das isolierte Blechpaket mit Platine gepresst. Anstelle des Strangpressens kann auch Draht durch die Bohrungen eingefädelt werden. Anschlie-

ßend werden die Kupferstäbe beschnitten und mit einer Leiterplatte verlötet. Dieses Verlöten kann durch einfaches Erwärmen des gesamten Paketes erfolgen. Erst durch diesen Vorgang werden die einzelnen Drähte zu einer Wicklung und damit auch zu einer Spule verbunden.

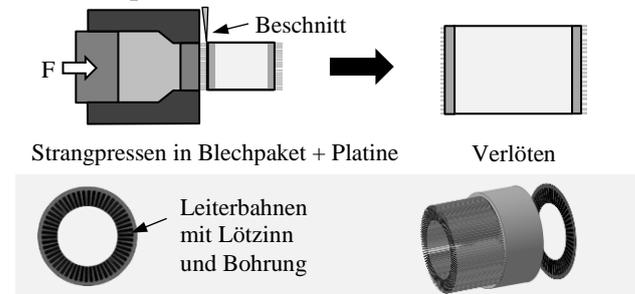


Bild 3.4: Konzeptbeispiel für eine „gebauete“ Spule

Durch dieses Konzept ist das Spulenwickeln nicht mehr notwendig, Kupfermaterial wird eingespart und der Bauraum des Motors wird kleiner. Es kann hierdurch eine exakte Steuerung des Motors erfolgen, da je nach Aufbau der Platine auch einzelne Spulenbereiche des Motors angesteuert werden können.

Die Motorwelle eines Elektromotors wird momentan zumeist umformtechnisch hergestellt, weshalb das Verfahren alternativ unter dem Szenario Technologieverbesserungen eingeordnet werden könnte. Jedoch ist es auch möglich, diese Komponenten weiter zu verbessern, um sich einen Wettbewerbsvorteil zu erarbeiten. Hierzu könnten Sensoren in die Hohlwelle eingearbeitet werden, um Zustands- oder Betriebsgrößen des Motors während dessen Einsatzes zu erfassen. Ebenso kann das Leichtbaupotenzial weiter ausgeschöpft werden, wobei es hierzu bereits Konzepte gibt. Hierbei sind auch Ausführungen mit hybrideren Werkstoffkonzepten für die Welle denkbar. Weiterhin könnten neue Konzepte zum umformtechnischen Fügen der Welle mit den Blechpaketen gegenüber dem heutigen Stand der Technik ausgearbeitet und verbessert werden.

Ein bereits umgesetztes Konzept zur innovativen Herstellung einer Welle für einen Elektromotor wurde von der Firma FELSS [24] vorgestellt. Bisher wurde diese als eine Mono-Hohlwelle mittels Rundkneten und Axialformen hergestellt. In einem neuen Fertigungskonzept wird die Welle als „gebauete“ Welle aus zwei Teilen, wie in Bild 3.5 zu sehen, ausgeführt. Durch diese gebaute Ausführung ergeben sich diverse Vorteile aufgrund einer gesteigerten Flexibilität bei der Motorkonfiguration.



Bild 3.5: Fertigungskonzept für eine „gebaute“ Welle mit auf die Motorlänge anpassbaren Komponenten, Quelle: [24]

Es können Motoren unterschiedlicher Länge und somit unterschiedlicher Leistung an dasselbe Getriebe angeflanscht werden. Darüber hinaus wird das Gewicht reduziert und es ergibt sich ein geringerer Wärmeinfluss. Dieses Konzept zeigt, dass sich Unternehmen der Massivumformung bereits heute in die Herstellung von Elektromotoren und deren Komponenten einbringen, um Produktionsprozesse durch innovative Ideen zu verbessern und ihr Produktportfolio zu erweitern. [24]

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Mobilitätssektor - insbesondere für die Großstädte der Zukunft - befindet sich derzeit in einem starken Wandel, vor allem aufgrund der unterschiedlich stark einwirkenden politischen und gesellschaftlichen Treiber. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen für die Personen- und Güterbeförderung bedeutet eine prozentuale Abnahme des Anteils verbrennungsmotorischer Antriebe, aber aufgrund des steigenden Fahrzeugbedarfs vorerst keine absolute Abnahme von Produktionsvolumen. Weitere Zukunftsthemen wie das Autonome Fahren und das Car-Sharing werden die Entwicklung der Fahrzeugproduktion ebenso beeinflussen wie der Trend zur Modularisierung und erhöhten Flexibilität. Die Antriebsvarianten der Hybridfahrzeuge bringen zukünftig eine erhöhte Komplexität und im Vergleich zu heute höhere Fertigungsprozesskosten mit sich. In der Wechselwirkung mit einer weiter ansteigenden Anzahl an Verbrennungsmotoren bis 2025 liegt weiterhin ein hoher Wertschöpfungsanteil in der Umformtechnik.

In diesem Beitrag wurden drei verschiedene Zukunftsszenarien für Unternehmen der Massivumformung vorgestellt, um die heute in diesem Marktsegment stattfindenden Planungen bis 2025 bzw. bis 2030 zu unterstützen. Ziel dieser Ausführungen solcher Szenarien bildet die Herleitung möglichst naheliegender Handlungsoptionen und des dafür erforderlichen

Kapitalbedarfs. Die ausgearbeiteten Szenarien wurden mit den Begriffen „Technologieverbesserungen“, „Erschließung neuer Geschäftsfelder“ sowie „Innovative Fertigungsprozesse“ beschrieben. Durch die steigende konstruktive Komplexität des Antriebsstranges steigen auch die Anforderungen an die dafür erforderlichen umformtechnisch hergestellten Komponenten. Diese Problematik wurde im Szenario „Technologieverbesserungen“ behandelt. Durch eine Verbesserung der bestehenden Verfahren können die höheren Anforderungen gewährleistet und zudem eine Ausweitung der Anwendungsgebiete erreicht werden.

Das Szenario „Erschließung neuer Geschäftsfelder“ fokussiert sich auf die Fertigung konventioneller Produkte für bisher unerschlossene Märkte. Die digitale Fertigung ermöglicht dabei eine Umstrukturierung der Fertigungskette zur Kostenreduktion, um auch kleinere Losgrößen wirtschaftlich herstellen zu können. Hierzu sind jedoch initiale Entwicklungen derartiger Systeme und Investitionen erforderlich.

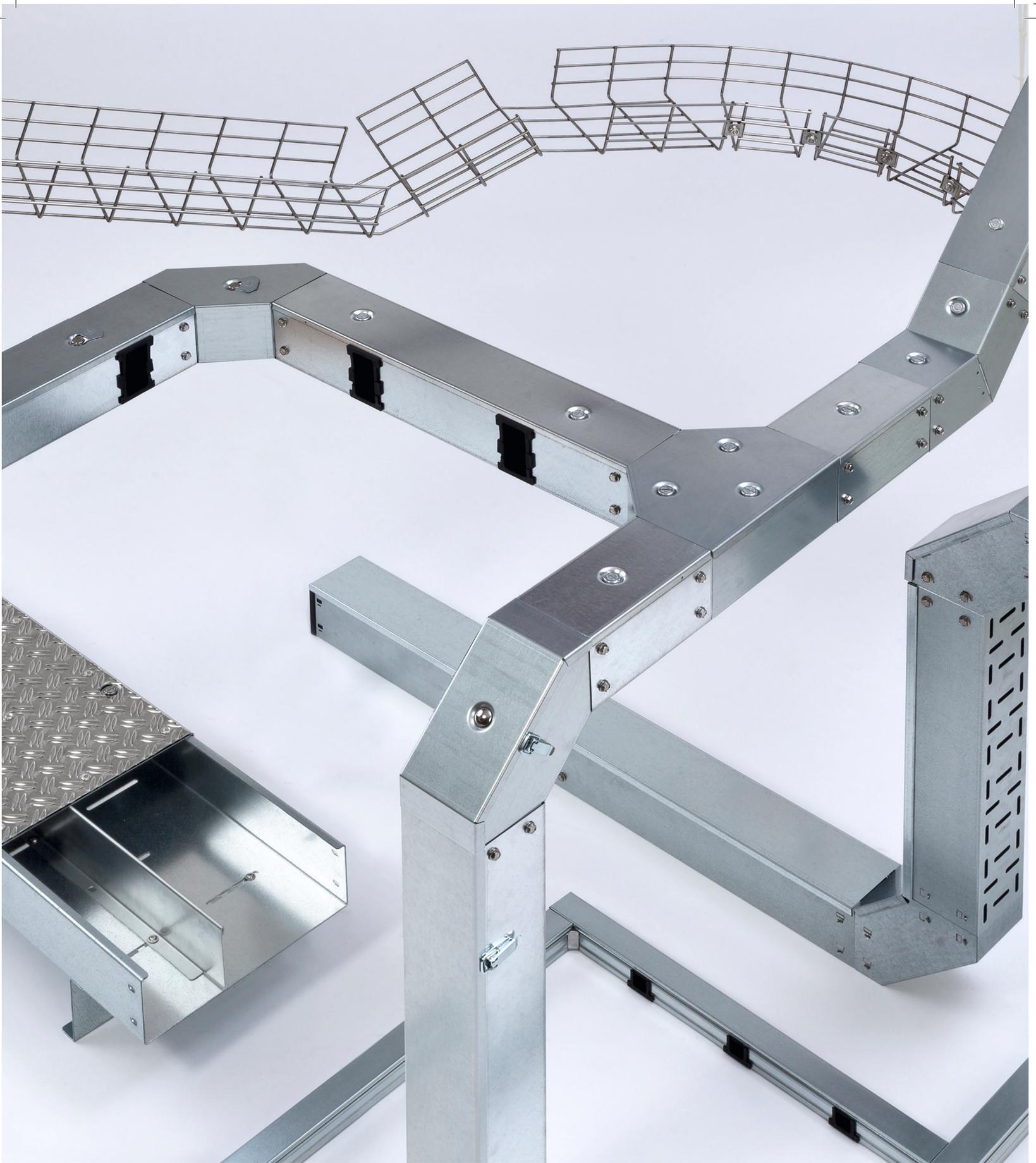
Durch die Elektrifizierung des Antriebsstranges müssen neue Bauteile für umformtechnische Verfahren identifiziert werden sowie innovative Fertigungsprozesse entwickelt werden. So kann auf den Rückgang der verkauften Verbrennungsmotoren und der damit verbundenen umformtechnisch gefertigten Bauteile reagiert werden. Diese zukünftigen Markttrends bilden die Motivation des dritten Szenarios unter dem Begriff der „Innovativen Fertigungsprozesse“. Sie beruht auf dem Planungsziel, auch weiterhin einen bleibenden Anteil der Blech- und Massivumformung an der Wertschöpfung von Antrieben im Unternehmen zu halten. Es wird hierbei vorausgesetzt, dass das bestehende Teilespektrum durch neue Produkte und Kompetenzen erweitert wird. Die Massivumformung wird, insofern solche Zukunftsszenarien bei der Planung berücksichtigt und verfolgt werden, somit auch in Zukunft eine wichtige Rolle in der Wertschöpfung der Fahrzeugproduktion spielen.

Literatur

- [1] VIEWEG, C.: *Alternative Antriebe: Bitte umsteigen! Aber womit?* URL <https://www.zeit.de/mobilitaet/2017-08/alternative-antriebe-auto-wasserstofffahrzeuge-brennstoff-lpg-erdgas>. - abgerufen am 2018-07-12. — Zeit Online
- [2] DALLINGER, D. ; DOLL, C. ; GNANN, T. ; HELD, M. ; KLEY, F. ; LERCH, C. ; MARSCHEIDER-WEIDEMANN, F. ; MATTES, K. ; U. A.: *Gesellschaftspolitische*

- Fragestellungen der Elektromobilität*, 2011
- [3] HOFMANN, P.: *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebssystem für die Zukunft*. Vienna : Springer Vienna, 2014 — ISBN 978-3-7091-1779-8
- [4] MOSQUET, X. ; ZABLIT, H. ; DINGER, A. ; XU, G. ; ANDERSEN, M. ; TOMINAGA, K.: *The Electric Car Tipping Point*. URL <https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/electric-car-tipping-point.aspx>. - abgerufen am 2018-07-12. — Boston Consulting Group
- [5] SANDER, N. R.: *Benchmark moderner Karosseriebauformen von konventionell, elektrisch und hybrid angetriebenen Stadtfahrzeugen*, Universität Stuttgart, 2014
- [6] EMOBILITAETONLINE.DE: *Das Elektroauto: Kapitel 2: Die Karosserie*. URL <https://www.emobilitaetonline.de/das-elektroauto/724-kapitel-2-die-karosserie>. - abgerufen am 2018-07-12
- [7] MÜNSTER, M. ; SCHÄFFER, M. ; STURM, R. ; KOPP, G.: From the NGC Urban Modular Vehicle Basic to the autonomous driving Cargomover: the modular body for the future urban electric vehicle. In: *Strategien des Karosseriebaus 2017, Bad Nauheim* (2017)
- [8] LANG, P. ; CONRAD, B.: *Die Level der Automatisierung und ethische Fragen*. URL <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/level-autonomes-fahren-sae/>. - abgerufen am 2018-07-12. — Auto Motor und Sport
- [9] GRELLA, C. ; WIRTH, M.: Urbane Mobilitätskonzepte. In: *Begleit- und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW)* Bd. Ergebnispa (2015)
- [10] Urbane Mobilität - Strategien für lebenswerte Städte. In: *Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (2016)
- [11] ECOMENTO.DE: *VW-Manager erklären Elektroauto-Plattform MEB*. URL <https://ecomento.de/2018/02/01/vw-manager-erklaren-elektroauto-plattform-meb/>. - abgerufen am 2018-07-12
- [12] HENBLER, S.: *Gemeinsame Architektur für Elektroautos von Porsche und Audi*. URL <https://www.elektroauto-news.net/2018/gemeinsame-architektur-elektroautos-porsche-audi>. - abgerufen am 2018-07-12. — elektroauto-news.net
- [13] JEB, C.: *Hier fährt Daimlers Elektro-Zukunft: Daimlers Zukunftsstrategie EQ*. URL <http://www.autobild.de/artikel/daimlers-zukunftsstrategie-eq-1124865.html>. - abgerufen am 2018-07-12. — Autobild
- [14] WUTTKE, W.: *Die Zukunft fährt elektrisch*. URL <https://www.daimler.com/innovation/next/die-zukunft-faehrt-elektrisch.html>. - abgerufen am 2018-07-12. — Daimler AG
- [15] IDLER, S. ; GWINNER, PH. ; STAHL, K. ; KÖNIG, R. ; RINDERKNECHT, S.: Innovative Super-High Multiple Speed Concept for the Electrified Automotive Powertrain. In: *5th Conference on Future Automotive Technology, Fürstenfeld* (2016)
- [16] REICHERT, U. ; EPSKAMP, T ; RADIMERSKY, A. ; OTT, S.: Development of a three-speed electric drivetrain - High Speed Electric Drive with a Three-Speed Gearbox. In: *CTIMAG, Dezember 2016*
- [17] *Studie „Antrieb im Wandel“* : VDMA, FEV Consulting GmbH, 2018
- [18] WEIß, A. ; LIEWALD, M. ; WEIß, A.: Manufacture of face gearing- a new production method by means of determined material predistribution. In: *17th International Conference on Metal Forming* (2018)
- [19] MEIBNER, R. ; LIEWALD, M.: Influence of lubrication on manufacturing of multicomponent gear wheels by lateral extrusion. In: *Key Engineering Materials* (2018)
- [20] MEIBNER, R. ; LIEWALD, M. ; WEIß, A.: Numerische Untersuchungen zum Einfluss der Vorspannung auf gefügte Zahnräder. In: *23. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Dresden* (2016)
- [21] BRACHTHÄUSER, N. ; WÄLZHOLZ, C. D.: Elektromobilität – Neue Herausforderungen an den Werkstoff Elektroband. In: *UKD* (2012)
- [22] *Gießereitechnik Kupferrotorenguss* : Breuckmann GmbH & Co. KG, 2015
- [23] HAGEDORN, J. ; SELL-LE BLANC, F. ; FLEISCHER, J.: *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren* : Springer Vieweg, 2016 — ISBN 978-3-662-49209-3
- [24] MARRÉ, M.: Megatrends & Einfluss auf unsere Marktsegmente - Neueste Entwicklungen. In: *Felss, Innovationstag E-Mobility* (2017)





PFLITSCH-Kabelkanalsysteme

Ihr Partner für industrielle Metall-Kabelführungen
und die erste Wahl für anspruchsvolle Projekte

www.pflitsch.de

 **PFLITSCH**[®]
Passion for the best solution



Smart Factory

Dipl.-Ing. Hilmar Gensert, Dr.-Ing. Christian Ludwig
KAMAX Tools & Equipment GmbH & Co.KG, Homberg (Ohm)

„Industrie 4.0“, „Digitalisierung“ oder „Smart Factory“ sind wohl die gegenwärtig am häufigsten verwendeten Schlagworte, wenn es um die Modernisierung der Produktion geht. Das Thema „Industrie 4.0“ ist sehr unterschiedlich definiert und wird oft auch mit Automation verwechselt. Unter „Smart Factory“ wird die Vision einer Produktionsumgebung verstanden, in der sich Fertigungsanlagen und Logistiksysteme ohne menschliche Eingriffe weitestgehend selbst organisieren.

Im Beitrag wird ein Projekt beschrieben, zu dessen Start keiner der Beteiligten das Thema „Smart Factory“ oder „Industrie 4.0“ auch nur ansatzweise mit dem Projekt in Verbindung brachte. Vielmehr wurde die Zielsetzung verfolgt, die Lieferzeit von heute 6-8 Wochen drastisch zu reduzieren. Das Ergebnis ist eine voll automatisierte und digitalisierte Herstellung von Matrizen für die Kaltmassivumformung. Diese beinhaltet die Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und Logistik für Matrizen mit „Losgröße 1“ und führt zu einer Durchlaufzeit von wenigen Stunden.

Smart Factory

"Industry 4.0", "digitization" or "smart factory" are probably the most commonly used buzzwords when it comes to modernizing production. The topic "Industry 4.0" is defined very differently and is often confused with automation. "Smart Factory" is understood as the vision of a production environment in which manufacturing equipment and logistics systems largely organize themselves without human intervention.

The article describes a project, which, at its start, was not associated by the persons involved with "Smart Factory" or "Industry 4.0". Rather, the objective to drastically reduce today's delivery time of 6-8 weeks was the primary focus. The result is a fully automated and digitized production of cold forming dies. This includes the development, design, manufacture and logistics of dies with "lot size 1" and leads to a lead time of a few hours.

Einleitung

Kundenindividuelle Produkte innerhalb kürzester Zeit liefern zu können, sind zwei entscheidende Faktoren, um in Zukunft erfolgreich am Markt bestehen zu können. Ein Schlüssel hierzu sind insbesondere in der Umformtechnik die Werkzeuge. Deren Lieferzeit entscheidet oftmals über den Erfolg eines Produktes, insbesondere bei Neuanläufen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Lösungsfindung iterativ verläuft, wodurch die Lieferzeit von Werkzeugen mehrfach kritisch eingeht. Eine Reduzierung der Lieferzeiten von Werkzeugen steht damit im Fokus bei der Herstellung des Kernproduktes.

Im Falle von KAMAX sind das Schrauben und Bolzen für die Automobilindustrie.

1 Standardisierung und Modularisierung

Eine Grundbedingung für eine Automatisierung ist die Standardisierung und Modularisierung von mindestens 80% der eingesetzten Matrizen unter dem Gesichtspunkt, dass die Funktionalität und/oder die Schnittstellen im Produktionssystem, d.h. Durchmesser, Längen sowie die formbildenden Konturen, beibehalten werden. Das schränkt die Gestaltungsmöglichkeiten stark ein. Ein zielführender Ansatz war es, ein Modulsystem zu entwickeln, aus dem sich alle Fassungs Durchmesser (Außendurchmesser der Matrizen) sowie alle Kerndurchmesser (Hartmetallkerne der Matrizen) abbilden lassen.

Erste Konzepte verfolgten den Ansatz, alle Armierungsringe mit einem Ringsystem abzubilden. Dabei sollten die Abstufungen der Armierungsringe nach einer mathematischen Reihe aufgebaut werden, d.h. ausgehend vom kleinsten Durchmesser durch Multiplikation mit einer Konstanten den nächst größeren Durchmesser zu berechnen.

Die Umsetzung scheiterte zunächst an der feinen Stufung, so dass sehr dünnwandige Rohre erforderlich gewesen wären. Am Markt waren diese Rohre weder wirtschaftlich zu beschaffen, noch mit den üblichen Technologien zu bearbeiten. Die Lösung war, zwei Ringsysteme versetzt zueinander einzusetzen. Die Konzeption ist patentrechtlich geschützt.

Aufgebaut aus dem Modulsystem, werden Matrizen im Durchschnitt fünffach armiert, woraus sich neben der Modularisierung der Matrizenkomponenten auch ein technologischer Vorteil ergibt. So führt die Mehrfacharmierung bis zu einer Verdopplung der Vorspannung des Kerns und somit bei den meisten Einsatzfällen zu einer Vervielfachung der Standmenge, vergleichbar mit Bandarmierungen.

Um mit nur einer Bearbeitungstechnologie bei der Innenbearbeitung auszukommen, wurden zudem die Kerne in Abhängigkeit vom Durchmesser längs geteilt. D.h. die Modularisierung wurde radial und axial umgesetzt.

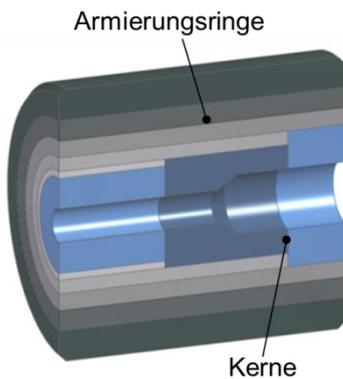


Bild 1: Schnitt durch eine Teleskopmatrize

2 Automatisieren

Der Schnitt in Bild 1 zeigt einen prinzipiellen Aufbau einer Matrize. Die hohe Anzahl an Einzelkomponenten ist einerseits Lösung aber andererseits auch eine Herausforderung. Die Schnittstelle zwischen Armierung und Kern ist funktionsbedingt mit $\pm 0,01\text{mm}$ toleriert. Das ist bei nur einem Pressverband mit üblicher Fertigungstechnik herstellbar und ausreichend. Werden allerdings acht Ringe ineinander gefügt, entsteht durch die Toleranzkette eine weitere Herausforderung. Eine Erweiterung der Toleranzen ist dabei nicht möglich. Um dieser Problemstellung zu begegnen sind iterative Bearbeitungsprozesse erforderlich. Die Maschine oder das System hat das erzeugte Ergebnis zu erfassen, die Konsequenzen abzuleiten und bei der Fertigung weiterer, zur Baugruppe gehörender Einzelteile zu berücksichtigen. Ähnlich ist mit der

Verschleißkompensation von Werkzeugen zu verfahren. Das System muss das Wissen des Bedieners „angelernt“ bekommen.

Teilweise waren Maschinen und Prozesse wie beispielsweise das Polieren am Markt nicht verfügbar und mussten neu entwickelt werden. Das Fertigungskonzept setzt Sondermaschinen voraus, die einerseits den gesamten Spannungsbereich abdecken und andererseits über die erforderlichen Schnittstellen verfügen.

Komplexer wurde es bei der automatischen Montagezelle. Es wird die Regel sein, dass sich die aufeinander folgenden Werkstücke in den Abmessungen und der Anzahl der zu montierenden Bauteile völlig unterscheiden. Es kann eine Matrize zu montieren sein, die aus einem Kern und acht Armierungsringen besteht und die darauf folgende Matrize aus vier Kernen und vier Armierungsringen. Zudem sind, wie bereits angemerkt, die Abmessungen völlig unterschiedlich. Hieraus ergibt sich die Fragestellung, welche Information die Zelle erhalten muss, d.h. wie wird codiert und decodiert?

3 Systemlandschaft

Verfolgt man den Produktentstehungsprozess von der Definition des Produktes über die Fertigung bis zur Anlieferung beim Kunden, ist dieser gekennzeichnet durch eine Vielzahl von Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Softwaresystemen.

Die meisten Schnittstellen werden heute noch manuell bedient. Im einfachsten Fall werden an den Schnittstellen Daten von einem System zum anderen übertragen und ggf. ergänzt. Durch eine geschickte Wahl der Systeme können aber auch Schnittstellen überwunden werden. Um beispielsweise den durchgängigen Datenaustausch und höchsten Automatisierungsgrad für CAD, CAM und PDM zu erhalten, kann es nicht nur hilfreich, sondern teilweise auch notwendig werden, neue Systeme in Betracht zu ziehen. Dies spart den Umweg mit verschiedenen Compilern arbeiten zu müssen. In der Regel ist dies nicht nur aufwendiger, sondern schränkt auch die Funktionalität stark ein. Ziel muss es sein, direkt mit nativen Daten zu arbeiten.

Eine besondere Herausforderung stellen vielmehr Prozesse dar, in denen menschliches Knowhow notwendig ist, d.h. es werden Entscheidungen z.B. nach Verfahrensanweisungen gefällt. Solange es dafür „artikulierbare“ Regeln gibt, also explizites Wissen vorliegt, lassen sich diese stark regelbasierten Abläufe meist auch in Algorithmen überführen. Die Schwierigkeit liegt im impliziten Wissen, Wissen

das auf Erfahrungen, Einstellungen oder Erinnerungen basiert. Hier stellt sich auch zukünftig die Frage, wie man dieses Wissen und die Erfahrungen maschinell lesbar und verwertbar aufbereiten kann.

Im vorliegenden Projekt sah man sich zunächst mit der Überführung tausender Matrizen in das neue Modul-System konfrontiert. Hierzu wurde ein automatischer Entwurf zwingend erforderlich. Dies war die Geburtsstunde für ein „Wissensmanagement-System“ und wurde im Zuge der Entwicklung schnell zum zentralen System aller beteiligten Systeme (Bild 2). Relevantes Wissen wird zentral und digitalisiert für alle Systeme maschinenlesbar abgelegt. Aktuell ist das System in der Lage, ausgehend von der Eingabe der Kundendaten und den werkzeugrelevanten Daten in ein Webfrontend, die Auslegung und Konstruktion der Matrize durchzuführen. Die Daten werden dann an die weiteren Softwaresysteme wie ERP, PDM, CAD-CAM, MES bis an die Steuerung der Maschinen verteilt sowie eine aktualisierte Rückmeldung zum Auftragsstatus via Webfrontend gegeben. Durch den Verbund aller Systeme mit dem Wissensmanagement ist es möglich, sowohl die kaufmännischen Prozesse im ERP, als auch die technologischen Systeme mit den relevanten Daten zu versorgen, anzutriggern und wiederum erzeugte Daten weiterzuleiten.

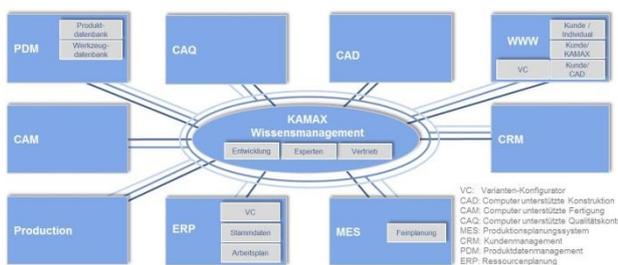


Bild 2: Systemlandschaft

Alle Maschinen erhalten bei jedem Teil neue Daten. Es werden keinerlei Produktdaten auf den Maschinen abgelegt, da die Fertigung für „Losgröße 1“ ausgelegt ist.

Weitere Problemstellungen finden sich im ablaufenden Informations- und Datenaustausch. Besonders resistent für derartige Prozesse ist das bestehende ERP-System, da es statisch arbeitet aber jetzt ein echtzeitfähiges Bedingungs-Ereignis-System erforderlich ist.

Im automatischen Produktionsprozess sind Rohlinge zu entnehmen, Halbfertig- oder Fertigprodukte einzulagern und entsprechend zu verbuchen. Reaktionszeiten der Systeme müssen in Echtzeit ablaufen. Ein SPS-Modul hat das bestehende ERP-System nicht.

Auch stellt die Art der Programmierung des Gesamtsystems besondere Anforderungen. Es ist das Bedin-

gungs-Ereignis-System, das die Steuerung übernimmt und so zu gestalten ist, dass es von allen Bedienern und nicht nur von SPS-Programmierern verstanden wird.

4 Zusammenfassung

Im Zuge der Entwicklungstätigkeiten wurde die Zielsetzung erreicht, die Durchlaufzeit von sechs Wochen auf Stunden zu reduzieren. Zudem haben die modularisierten Werkzeuge ein Vielfaches an Gebrauchswert.

Die Fertigung der „Losgröße 1“ nach Kundenvorgabe ist möglich, die Maschinen haben iterative Prozesse und das System ist selbstoptimierend. Es wurde eine Produktionsumgebung geschaffen, in der sich Fertigungsanlagen und Logistiksysteme weitgehend selbst organisieren. Alles Eigenschaften, die sich mit dem Thema „Industrie 4.0“ oder „Smart Factory“ verbinden lassen.

Aus Sicht der Mitarbeiter eine durchaus positive Entwicklung. Durch die deutlich höhere Produktivität und dem Vorteil der schnellen Verfügbarkeit von Werkzeugen wird der Druck, den personalintensiven Werkzeugbau in Niedriglohnländer zu verlegen nicht nur gesenkt, sondern bereits verlegte Produktion an den Standort Deutschland zurückgeführt.



Werkerassistenzsysteme am Beispiel des Profilierens

M. Sc. Tilman Traub, Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, Darmstadt
PtU Darmstadt

Dr.-Ing. Christian Müller, Schopfheim
Dreistern GmbH & Co. KG

Der beständige Trend zu kürzeren Produktlebenszyklen, kleineren Losgrößen und der Wunsch nach individuellen Produkten stellt etablierte Fertigungsverfahren wie das Walzprofilieren vor Herausforderungen. Um den aktuellen Marktanforderungen gerecht zu werden, muss die Prozessbetriebnahme und Fehlerbehebung beschleunigt werden. Diese Tätigkeiten beruhen bislang stark auf dem Erfahrungswissen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Bedingt durch den demographischen Wandel ist jedoch zu erwarten, dass die Verfügbarkeit erfahrener Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter tendenziell abnimmt. Die Erfassung aktueller Prozesszustände mittels Sensorik sowie die Analyse und Ableitung von Handlungsempfehlungen in Assistenzsystemen bietet die Möglichkeit, weniger erfahrene Beschäftigte bei wissensintensiven Prozessen zu unterstützen und somit die Prozesse zu beschleunigen. Dieser Beitrag untersucht die Möglichkeit, auf Basis von Kraftmessungen ein Assistenzsystem zur Mitarbeiterunterstützung in Walzprofilierprozessen zu erstellen. Zu diesem Zweck werden Kraftsensoren in einen beispielhaften Profilierprozess integriert und gezielt Störungen in den Prozess eingebracht. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass Kraftmessungen einen Beitrag zur Fehlerfindung leisten können. Gleichzeitig zeigt sich jedoch auch, dass Kraftmessungen alleine nicht ausreichen, um sämtliche Prozesszustände, die zu unerwünschten Anlagenzuständen bzw. Qualitätseinbußen führen, zu detektieren.

Operator Assistance Systems at the Example of Roll Forming

The ongoing trend towards shorter product life cycles, smaller batch sizes and the desire for individual products challenges established manufacturing processes such as roll forming. To meet recent market requirements, process setup and troubleshooting must be accelerated. So far, these activities have been strongly based on the experience of employees. However, due to demographic change, the availability of experienced employees is expected to decline. Assistance systems evaluating and analyzing the current process states based on sensor signals and providing recommendations for process improvements offer the possibility of supporting less experienced employees in knowledge-intensive processes and thus accelerate these processes. This paper examines the possibility of creating an assistance system supporting operators in roll forming processes on the basis of force measurements. For this purpose force sensors are integrated into a roll forming line and disturbances are intendedly set into the process. The evaluation of the results demonstrates that force measurements can contribute to error diagnosis. At the same time, however, it becomes evident that force measurements alone are not sufficient to detect all process states that lead to an undesirable plant status or quality losses.

Entwicklungstrends in der Fertigungsindustrie

Gegenwärtig stellen verschiedene Entwicklungen etablierte Fertigungsverfahren vor neue Herausforderungen. Höhere Qualitätsanforderungen bei gleichzeitig kürzer werdenden Produktlebenszyklen und Losgrößen führen zu veränderten Marktanforderungen [1]. Beispielhaft für diese Entwicklung steht die Automobilindustrie, in der sich zwischen 1997 und 2015 der durch-

schnittliche Produktionszyklus um rund ein Drittel reduziert hat (Bild 1). Gleichzeitig hat sich die Produkt- und Komponentenzahl mehr als verdoppelt. Als Konsequenz dieser Entwicklung steigt die Anzahl von Wechseln in der Produktion von einem zum nächsten Produkt. Die Nebenzeiten, die zum Rüsten und Einstellen neuer Prozesse sowie zur Fehlerbehebung und zur Sicherstellung der benötigten Produktqualität anfallen, entscheiden somit in zunehmendem Maße über die Wirtschaftlichkeit einer Fertigungstechnologie.

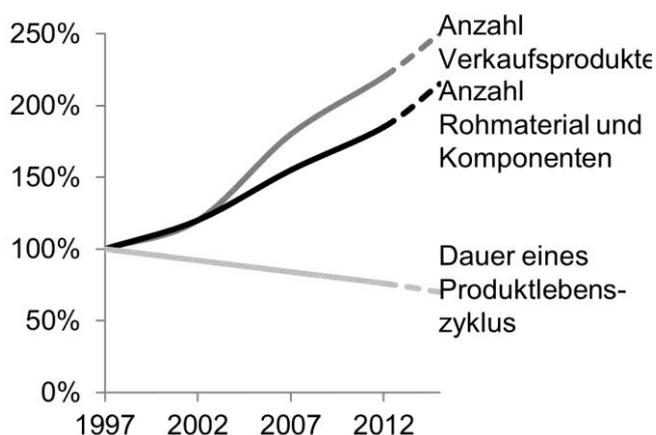


Bild 1: Entwicklung der Produktzahl und Lebenszyklen in der Automobilindustrie [1]

In der Umformtechnik obliegt die finale Abstimmung der Prozesse bis heute weitestgehend den Facharbeiterinnen und Facharbeitern. Die Grundlage für ihre zielgerichteten Prozessoptimierungen bildet dabei häufig implizites Erfahrungswissen, das die Beschäftigten während ihres Berufslebens nach und nach ansammeln. Bedingt durch den demographischen Wandel besteht in vielen entwickelten Volkswirtschaften jedoch die Tendenz, gerade diese erfahrenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in den Ruhestand zu verlieren, ohne entsprechende Nachwuchskräfte in ausreichender Zahl verfügbar zu haben. Bild 2 skizziert diese Entwicklung für den Industriestandort Deutschland [2]. Obwohl die Bevölkerungszahl in Deutschland bis zum Jahr 2030 nahezu auf dem Niveau von 2000 bleibt, reduziert sich der Anteil jüngerer Beschäftigter in diesem Zeitraum um rund 20 %. Der verstärkte Trend zum Studium, der sich sowohl in der Zunahme der Studierendenzahlen als auch in der Zunahme an unbesetzten Lehrstellen [3] zeigt, droht den Mangel an Facharbeiterinnen und Facharbeitern weiter zu verschärfen.

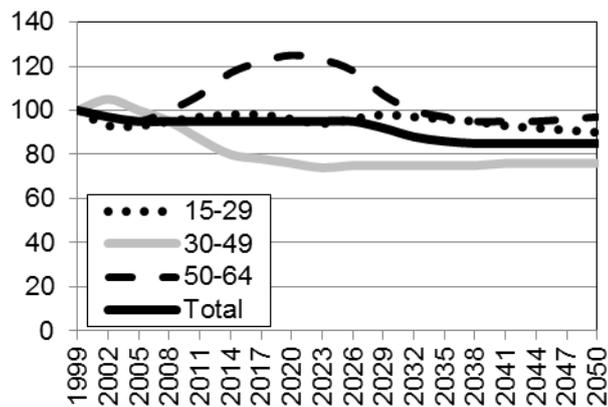


Bild 2: Entwicklung der Bevölkerungsgruppen in Deutschland aufgeschlüsselt nach Alter [2]

Eine Möglichkeit, diesen Entwicklungen entgegenzutreten, bietet die Unterstützung von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern durch intelligente Automatisierung mit autonomen Bestandteilen. Intelligente Systeme wie beispielsweise Assistenzsysteme können dazu beitragen, bereits vergleichsweise unerfahrenen Beschäftigten einen Grundstock an Erfahrungswissen zur Verfügung zu stellen. Derartige Systeme können die Problemlösekompetenz sowohl zu Beginn des Arbeitslebens als auch in dessen Verlauf erhöhen (Bild 3) [4].

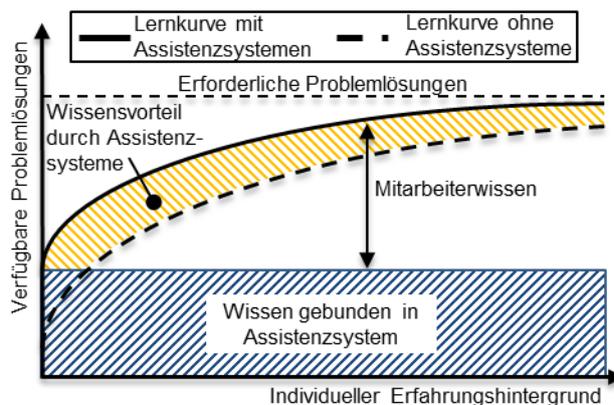


Bild 3: Wissensvorsprung durch Bindung von Erfahrungswissen in Assistenzsystemen [4]

1 Entwicklungsstand des Walzprofilierens

Einer der größten Vorteile des Profilierens gegenüber alternativen Fertigungsverfahren ist die hohe Wirtschaftlichkeit, die hauptsächlich durch die Anlagenverfügbarkeit und die Teileleistung bestimmt wird. Bei häufigen Produktwechslern und somit häufigen Rüst- und Einstellvorgängen kann jedoch aufgrund der vielen zu überprüfenden Einstellmöglichkeiten die produktive Anlagennutzungszeit, je nach Anwendungsszenario, auf unter 50 % abfallen [5].

Aufgrund des Kostendrucks und des Wettbewerbs sind deshalb seit vielen Jahren verschiedene Trends zu beobachten. Einerseits wird versucht, zusätzliche Prozessschritte, wie z. B. Stanzoperationen, in die Profilieranlage und somit inline zu integrieren und somit die Produktionskosten zu senken. Dies erhöht die Flexibilität, aber auch die Anforderungen an das Anlagenknowhow und Prozesswissen. Andererseits sollen weitere Optimierungen hinsichtlich Teileleistung, Rüstzeiten und Profilkombinatorik helfen, den Teilepreis zu reduzieren und die Wirtschaftlichkeit zu steigern.

Kurze Rüstzeiten können durch Automatisierung erreicht werden. Ein Vorteil des Profilierens besteht darin, mithilfe zahlreicher Werkzeugverstellachsen

hochgenaue Profile auch bei schwankenden Eigenschaften des Ausgangsmaterials herstellen zu können. Gleichzeitig ist die große Anzahl an Verstellachsen ein großer Nachteil hinsichtlich der Automatisierung der Werkzeugeinstellung. Eine komplette motorische Ansteuerung aller Verstellachsen innerhalb einer Profiliermaschine ist heutzutage noch nicht wirtschaftlich. Um sowohl die Rüstzeit beim Wechsel von einer Profilvariante zu einer anderen als auch die Investitionen in Aktorik und Steuerungstechnik möglichst gering zu halten, bedarf es einer intelligent gewählten Automatisierung. Hierbei werden nur die häufig benötigten Stellglieder mit langen Einstellwegen motorisch bestückt. Die anderen Einstellungen bleiben manuell.

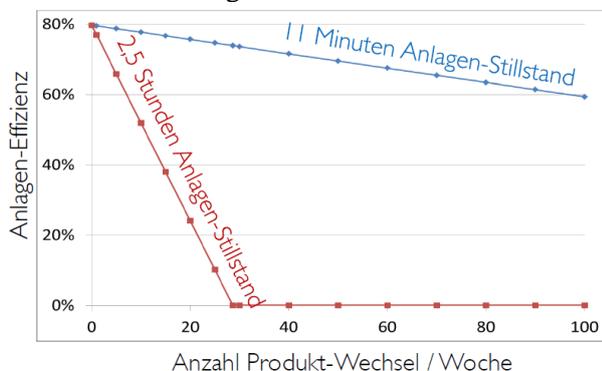


Bild 4: Steigerung der Gesamtanlagen-Effizienz [6]

Die Firma Dreistern konnte so ein Maschinenkonzept realisieren bei dem ganze Profilmfamilien, also geometrisch ähnliche Profile mit variierenden Breiten, Höhen und Dicken, mit einer einzigen Profiliermaschine hergestellt werden können. Aufgrund der großen Variantenvielfalt lag der Fokus hier auf einer kurzen Rüstzeit. Bild 4 zeigt die Reduzierung der Anlagen-Effizienz bei Erhöhung der Produktwechsel ohne Automatisierung (untere Kurve) [6]. Durch das gewählte Automatisierungskonzept war es hier möglich, die Anlagen-Stillstandszeit durch Rüstoperationen deutlich zu verkürzen (obere Kurve) ohne den Anlageninvest signifikant zu erhöhen.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Optimierung der Herstellung liegt in der Schrottminimierung. Der Profilverbrauch wird zu einem hohen Prozentanteil von dem Materialeinsatz bestimmt. Durch Coil- und Produktwechsel fallen je nach Maschinenkonzept anteilig Schrottmengen an, die zu gestiegenen Teilekosten führen. Intelligente Maschinenkonzepte mit z. B. einem abfalllosen Teilewechsel und Ausnutzung der vollen Restbandlänge können helfen, die anfallende Schrottmenge zu minimieren [6].

Ein weiterer Aspekt der Optimierung der Profilproduktion betrifft die Maschinensteuerung. Durch Internetzugriff können Ferndiagnosen und die Identifikation von Fehlerbehebungsmöglichkeiten helfen, die Maschinenverfügbarkeit zu erhöhen [7]. Sensorische Elemente zur Messung der Stanzwerkzeug- und Blechposition helfen den Ist-Zustand an der Anlage zu ermitteln. Durch ein intelligentes Steuerungskonzept ist es möglich, je nach Konfigurationswunsch die Komponenten nach dem Plug & Play Konzept zu betreiben [8].

Die Summe dieser einzelnen Optimierungsaspekte führt zu einer kostenoptimalen und flexiblen Produktion. Eine Beurteilung dieser Anlagenkonzepte erlaubt die Kennzahl OEE („Overall Equipment Efficiency“, Bild 5).

★★★DREISTERN

Overall Equipment Efficiency (OEE)

A Gesamte Betriebsdauer				Geplante Maschinen Stops
B Geplante Betriebsdauer				
C Produktionszeit			Coil / Werkzeug-Wechsel	
D Effektive Produktionszeit		Maschinenbedingte Stillstände		
E IO Teile	F NIO Teile			
Nutzungs-Faktor		Effizienz-Faktor	Qualitäts-Faktor	
OEE =		B/A x D/B	x E/(E + F)	

Bild 5: Definition Overall Equipment Efficiency [7]

2 Ansätze für Industrie 4.0 beim Walzprofilieren

Moderne Profilieranlagen sind hinsichtlich der vorher beschriebenen Optimierungsansätze weitestgehend ausgereizt. Durch weitere Verbesserungen können Anlagen weiter optimiert werden, „große Schritte“ scheinen hier allerdings nicht mehr möglich. Die bisherigen Produktionsoptimierungen helfen der / dem Maschinenbediener/in die Anlagen schneller und effizienter zu betreiben. Unberücksichtigt bleiben bisher sowohl die Stillstandszeiten aufgrund der Erstkonfiguration der richtigen Rollenpositionen bei einem neuen Rollformwerkzeug als auch deren Feinjustage bei einer Änderung des Prozesses, die z. B. einer Chargenänderung nötig werden kann. Die Rollen bei der Ersterprobung und bei möglichen, im Betrieb eintretenden Geometrieabweichungen richtig zu positionieren, setzt einen entsprechend großen Erfahrungsschatz des Bedienpersonals voraus. Dieser muss erst in vielen Praxisjahren aufgebaut werden. Die nötige Lernkurve steht einer merklich steigenden Fluktuation von Monteur/innen und Maschinenbediener/innen gegenüber.



Bild 6: Weg Industrie 4.0 und Rollprofilieren 4.0 [6]

Digitale Konzept- und Prozessunterstützungen existieren schon heute, allerdings stellen diese meist Insellösungen dar und deren Verknüpfung und Interpretation obliegen noch dem Menschen [6]. Finite-Elemente-Simulationen helfen bei der Auslegung des Umformprozesses und der Abbildung von umformtechnischen Phänomenen. Die Interpretation liegt bei der Konstrukteurin / beim Konstrukteur. Die Digitalisierung hilft auch bei dem korrekten Einstellen des Rollformwerkzeuges. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Rollenposition und Profilgeometrie. Zu beidem gibt es digitale Messunterstützung, die der Rollenmonteurin / dem Rollenmonteur beim Einstellen hilft. Das „Finden“ der für den Prozess optimalen Rollenpositionen ergibt sich aber noch immer durch Einbezug des Erfahrungsschatzes des Personals. Im Moment befindet sich die Profilierwelt in einem Übergang von der immer noch vom Menschenverstand und Mechanik dominierten Anlagentechnik (Rollprofilieren 3.0) und der angestrebten „Komplettlösung“, d.h. einem intelligenten, vernetzten und fehlerlosen System (Rollprofilieren 4.0), (Bild 6). Zur Weiterentwicklung des Walzprofilierens im Sinne Industrie 4.0 bedarf es folglich Ansätze, um diese intelligente und vernetzte Komplettlösungen zu ermöglichen.

3 Handlungsfelder und Entwicklungsmöglichkeiten

Zur systematischen Einführung digitaler Produktionssysteme hat die Wissenschaftliche

Gesellschaft für Produktionstechnik (WGP) ein fünfstufiges Modell vorgestellt, wie heutige, mechanisch dominierte Fertigungsprozesse zu digitalen, (teil-)autonomen Fertigungssystemen weiterentwickelt werden können [9]. Bild 7 wendet dieses Modell auf das Walzprofilieren an [10].

Der erste Schritt auf dem Weg zu digitalen Fertigungssystemen besteht in der sensorischen Ausstattung des Profilierprozesses. Erste Ansätze zur Messung von Prozessgrößen in Profilierprozessen wurden in den vergangenen Jahren entwickelt. Lindgren [11] und Larrañaga [12] nutzen Messungen von Kräften und Antriebsmomenten zur Validierung numerischer Simulationsmodelle. Arbeiten von Müller [13] und Groche et al. [14] zeigen, dass unter Berücksichtigung des Gerüstverhaltens in Form von Spiel und Steifigkeitsverhalten Walzprofilierprozesse realitätsnah durch numerische Modelle abgebildet werden können. Die numerische Simulation bietet somit eine Möglichkeit, bereits vor Beginn des Realprozesses Zielwerte für die zu erwartenden Kräfte und Momente zu identifizieren. Im Realprozess zeigen Sáenz de Argandoña et al., dass ein veränderter Profilierspalt in den Kraftsignalen der vertikalen Reaktionskräfte nachweisbar ist [15]. Traub et al. untersuchen den Einfluss weiterer Rollenfehlstellungen auf die vertikalen Reaktionskräfte und zeigen, dass Kraftmessungen eine beschleunigte Fehlerfindung unterstützen [16]. Abeyrathna et al. korrelieren in numerischen Untersuchungen Kraft und Antriebsmomente mit der Bogenbildung der gefertigten Profile [17]. Auch sie

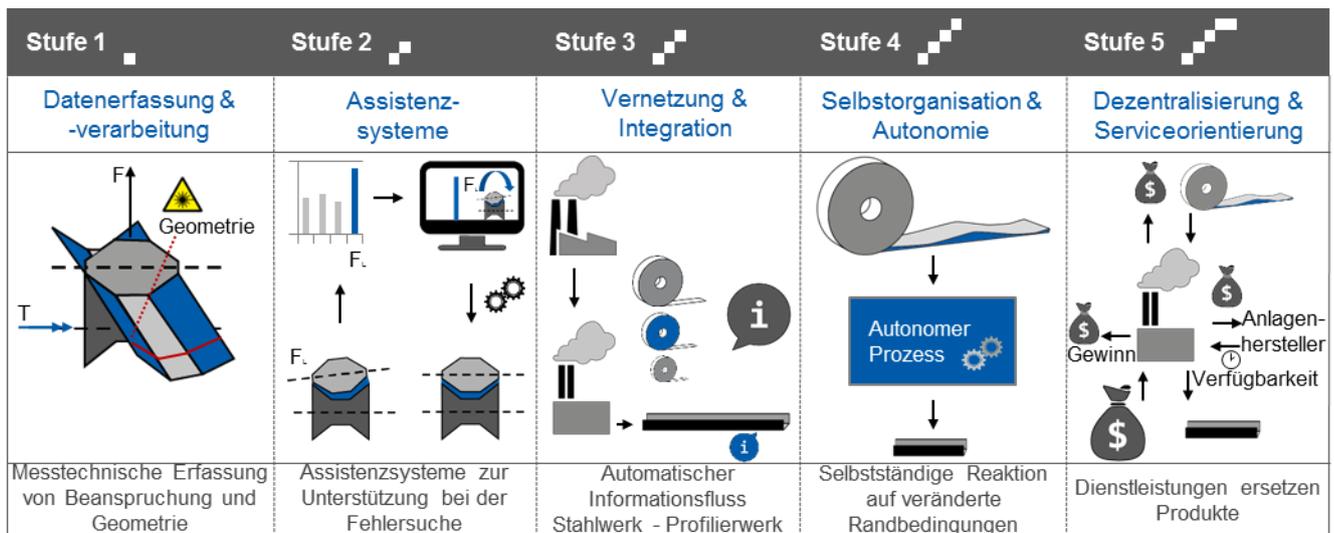


Bild 7: Anwendung des WGP 5-Stufen Modells zur Einführung von Industrie 4.0 in der Produktion auf das Walzprofilieren [10]

finden Hinweise, dass Messungen zur Prozesskontrolle geeignet sind. Die Erreichung der ersten Stufe ist somit - zumindest aus wissenschaftlicher Sicht - nachgewiesen.

Die zweite Stufe beschreibt die Einführung von Assistenzsystemen, die, basierend auf den Messwerten aus Stufe 1, das Bedienpersonal bei der Gewährleistung stabiler Prozessbedingungen unterstützen. Im Bereich des Walzprofilierens beginnt die Entwicklung derartiger Systeme gerade erst [10]. Auch dieser Beitrag wird sich im Folgenden mit derartigen Systemen beschäftigen. Die dritte Stufe des Entwicklungsmodells beschäftigt sich mit der Vernetzung unterschiedlicher Informationsquellen. Die Quellen können dabei sowohl unternehmensintern (z. B. Informationsweitergabe aus einem Stanzprozess in den folgenden Profilierprozess) oder unternehmensübergreifend (z. B. Informationsweitergabe aus dem Stahlwerk in das Profilierwerk) verteilt sein. Basierend auf den Stufen 1 bis 3 werden in der vierten Stufe hochautomatisierte oder gar (teil-)autonome Fertigungsprozesse etabliert. Kennzeichen dieser Prozesse ist, dass sie sich unabhängig von Anlagenbedienerinnen oder -bedienern auf neue Randbedingungen einstellen können und die Fehlerbehebung und Prozessoptimierung weitestgehend selbstständig durchführen. Die Einführung solcher Systeme legt die Basis für neue, dezentrale Dienstleistungskonzepte. Neben Angeboten zur Fernwartung und vorbeugenden Instandhaltung wären hierbei sogar neue Geschäftsmodelle denkbar. Beispielsweise könnten Anlagenhersteller nicht mehr die Anlage, sondern deren Verfügbarkeit vermarkten. Ähnliche Konzepte sind in der Luftfahrt bereits unter dem Begriff "Power

by the Hour" für die Bereitstellung von Triebwerken etabliert [18]. Im Bereich der klassischen Fertigungsindustrie sind derartige Systeme bislang jedoch nicht verbreitet.

4 Werkerassistenzsysteme für die Produktion

Die grundlegende Aufgabenstellung an Fertigungsprozesse ist die Herstellung von Produkten mit festgelegten Produkteigenschaften p . Das primäre Ziel von Assistenzsystemen ist deshalb die Gewährleistung dieser Qualitätsanforderungen. Zusätzlich gibt es jedoch häufig noch weitere Anforderungen, die ein Prozess erfüllen sollte, ohne dass die Nichterfüllung dieser Anforderungen einen direkten negativen Einfluss auf die Produktqualität hat. Beispiele hierfür sind die Gewährleistung energieeffizienter Anlagenbedingungen, die rechtzeitige Identifikation von Wartungsbedarf sowie der Schutz der Anlage vor Überlast. Diese Anforderungen können durch die Auswertung zusätzlicher Prozessinformationen i , z. B. Kraftmessungen, kontrolliert werden. Ein Assistenzsystem zielt darauf ab, unzulässige Prozesszustände zu erkennen sowie dem Bedienpersonal zielführende Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Bild 8 stellt ein allgemeines Funktionsmuster für Assistenzsysteme vor [10].

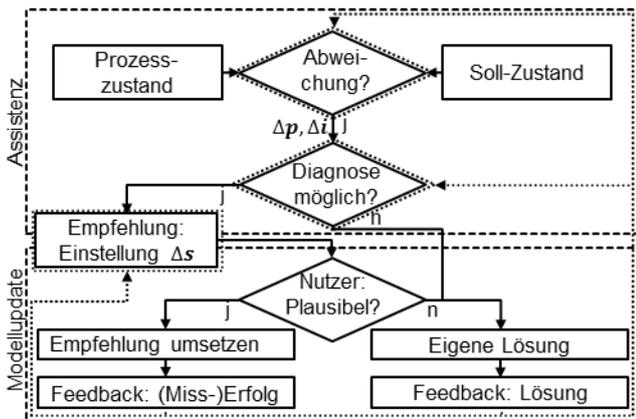


Bild 8: Funktionsmodell für die Entscheidungsfindung in Assistenzsystemen und kontinuierliche Verbesserung mittels Modellupdate [10]

Das Assistenzsystem erhält Sensordaten, die den aktuellen Prozesszustand beschreiben. Diese Messdaten gleicht das System mit den Zielvorgaben ab, die aufgrund der Produktspezifikation, der Prozessauslegung oder numerischen Simulationen bekannt sind. Auch Erfahrungsdaten aus vorangegangenen Fertigungsprozessen können zur Festlegung von Zielwerten genutzt werden. Sobald eine Abweichung zwischen Ist- und Zielwerten festgestellt wird, startet das Assistenzsystem die Fehlersuche. Abweichungen können dabei einerseits in den Produkteigenschaften Δp und andererseits in den zusätzlichen Prozessinformationen Δi auftreten. Während Erstere ein Qualitätsproblem beschreiben, beschreiben Weitere ineffiziente Prozesszustände. Sobald eine Abweichung festgestellt wird, startet das System die Identifikation der Ursache sowie die Auswahl einer geeigneten Gegenmaßnahme. Die identifizierte Gegenmaßnahme Δs lässt sich durch die Veränderungen in den möglichen Stellparametern s des Prozesses beschreiben. Die Grundlage für die Ursachenanalyse sowie die Auswahl von Gegenmaßnahmen bilden dabei Korrelationen zwischen Sensorsignalen, Fehlerursachen und geeigneten Gegenmaßnahmen. In den meisten Fällen reicht eine einzelne Information, z. B. ein einzelnes Sensorsignal, jedoch nicht aus, um eine eindeutige Ursache und eine passende Gegenmaßnahme zu identifizieren. Deshalb müssen die Muster der Abweichungen in verschiedenen Signalen betrachtet werden. Zur Festlegung dieser Muster können einerseits analytische oder physikalische Modelle dienen. Andererseits ist es auch möglich, Korrelationen aus verfügbaren Prozessdaten mittels maschinellem Lernen zu identifizieren. Sofern das Assistenzsystem eine Ursache und Gegenmaßnahme für eine Abweichung feststellen

kann, erhält die / der Anlagenbediener/in einen Vorschlag, wie der ungünstige Zustand behoben werden kann. Um die Ausführung falscher Gegenmaßnahmen, die potentiell zu noch schlechteren Prozesszuständen führen können, zu vermeiden, entscheidet die / der Anlagenbediener/in über die Umsetzung der Maßnahme. Falls sie / er zu dem Schluss kommt, dass - beispielsweise aufgrund mangelnder Entwicklungsreife des Systems - die Gegenmaßnahme ungeeignet ist oder falls die Diagnose innerhalb des Assistenzsystems scheitert, muss die / der Anlagenbediener/in selbst nach geeigneten Lösungen suchen. Die Rückmeldung dieser Lösung bzw. eine Rückmeldung über den Erfolg oder Misserfolg einer umgesetzten, vorgeschlagenen Maßnahme dient dazu, die Entscheidungs- und Diagnosealgorithmen kontinuierlich zu verbessern.

Die folgenden Abschnitte zeigen, wie bei Feststellung einer Geometrieabweichung Kraftmesswerte zur Identifikation der Ursache genutzt werden könnten. Ferner zeigt ein Beispiel, wie ein Assistenzsystem auch verschlissene Anlagenkomponenten identifizieren könnte, ohne dass hierdurch die Produktqualität bereits negativ beeinflusst wird.

5 Anwendungsszenario: Nutzung von Kraftmessungen zur Prozessdiagnose

Zur Voruntersuchung der industriellen Umsetzbarkeit von Assistenzsystemen in Walzprofilierprozessen wird folgender Prozess auf einer Profilieranlage vom Typ P3.125 der Firma Dreistern GmbH & Co. KG mit einem Gerüstabstand von 400 mm betrachtet. Der betrachtete Umformprozess fertigt aus einem Stahlband (Abmaße: 100 mm mal 1,25 mm, Güte: DX51D + Z275) das in Bild 9 dargestellte Hutprofil. Der Prozess untergliedert sich hierzu in eine Prägestufe, die die Sicke im Bodenbereich herstellt und vier folgende Profilierstufen, in welchen die vier Biegekanten simultan nach der Kalbibriermethode „konstante Bogenlänge“ erzeugt werden. Die folgenden Untersuchungen betrachten ausschließlich die vier Profilierstufen.

Die Oberrollen, die zur Einförmung des Flansches in Stich 4 dienen, sind frei drehend gelagert. Alle anderen Rollen sind über einen Zentralmotor angetrieben. Bei einem Blechvorschub von 4 m/min, den gewählten Rollendurchmessern sowie einem Übersetzungsverhältnis zwischen Ober- und Unterwelle von 1,4 ergibt sich somit eine Wellendrehzahl von rund 7,6 1/min (oben) bzw. 10,6 1/min (unten). Der Spalt zwischen Ober- und

Unterrolle ist in den Stufen 2 bis 4 auf 1,0 mm eingestellt, um so das mittels einer Messuhr bestimmte Auffederverhalten der Gerüste zu kompensieren. In Stufe 1 beträgt das Spaltmaß lediglich 0,8 mm, um ein Durchrutschen des Bandes beim Einführen zu unterbinden.

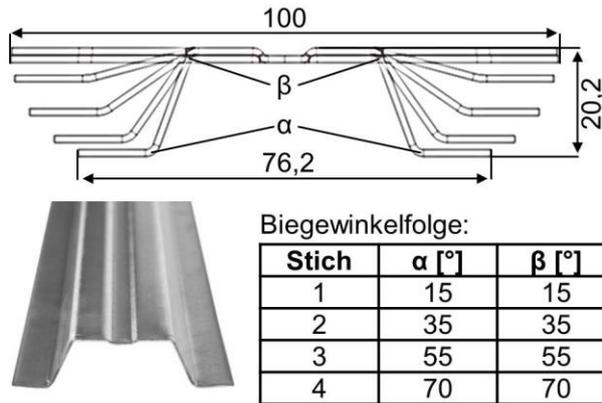


Bild 9: Profilblume und Abbildung der untersuchten Profilgeometrie

Zur Prozessbeobachtung werden in den vier Profilerstufen zwei unterschiedliche Messsysteme zur Kraftmessung eingesetzt (Bild 10): Zur absoluten Messung der vertikalen Reaktionskraft an der Oberrolle sind in jedem Gerüst zwischen dem Lagerblock und der Verstellspindel auf der linken und rechten Gerüstseite jeweils eine Kraftmessdose vom Typ C9B (Hersteller: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) eingesetzt (Bild 10 links unten). Die Messsignale werden mittels eines Messverstärkers vom Typ MX 840 A (Hersteller: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) und der Software Catman Easy, Version 3.1.3.22 (Hersteller: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) aufgezeichnet. Die

Kraftsensoren sind mittels zweier Schrauben auf rund 1,0 kN vorgespannt. Zur Auswertung der absoluten Reaktionskraft muss diese Vorspannung zu den gemessenen Kraftwerten hinzuaddiert werden [16]. Der Vorteil der Messung der absoluten Reaktionskraft liegt in der direkten Vergleichbarkeit der Messwerte mit, beispielsweise, Simulationen. Allerdings ist die Integration der Sensorik vergleichsweise aufwändig. Eine Alternative bietet der Einsatz von Messschrauben (Hersteller: Consenses GmbH), die zur indirekten Kraftmessung genutzt werden. Hierzu werden in jeder Profilerstufe Schrauben, die die Quertraversen der Gerüstständer mit den Führungssäulen verbinden, durch Messschrauben ersetzt (Bild 10 links oben). Die entsprechende Bezeichnung der Messpositionen ist Bild 10 rechts zu entnehmen. Bei den Messungen zur Analyse des Einflusses von Rollenfehlstellungen sind in allen vier Umformstufen die Schrauben an den Messpositionen links vorne und rechts hinten durch Messschrauben ersetzt. Bei der Untersuchung des Einflusses eines verschlissenen Lagers in Stich 3 auf die Messwerte sind in Stichen 2 und 4 die Messstellen an den Positionen links vorne und rechts hinten sowie an Stich 3 alle vier in Bild 10 rechts dargestellten Messpositionen mit Messschrauben ausgestattet, während in Stich 1 keine Messschraube zum Einsatz kommt. Je nach Verfügbarkeit kommen dabei Messschrauben der Größen M12 bzw. M16 mit passenden Adaptern zum Einsatz. Die Ladungssignale der Schrauben werden durch einen Ladungsverstärker vom Typ 5067 mit einer Steuereinheit vom Typ 5080 (Hersteller: Kistler Instrumente GmbH) in ein Spannungssignal

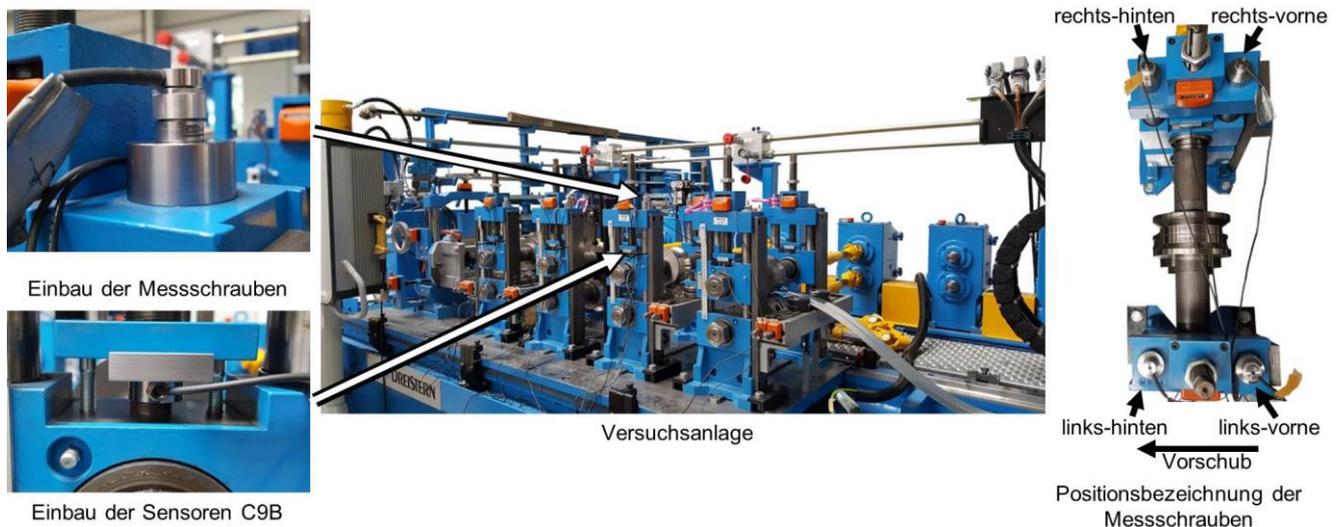


Bild 10: Versuchsanlage und Einbau der Messsensorik

überführt, welches analog zu den Signalen der Kraftsensoren weiterverarbeitet wird. Der einfacheren Integration steht bei der Auswertung der Messsignale jedoch die Schwierigkeit gegenüber, dass die gemessenen Kraftwerte nicht unmittelbar tatsächliche Prozesskräfte darstellen, die beispielsweise in numerischen Simulationen vorhergesagt werden können. Zur Auswertung der Messungen ist deshalb zwingend eine Referenzmessung oder eine aufwändigere Simulation, die neben der Umformung auch die Weiterleitung der Kräfte im Gerüst betrachtet, notwendig. Die Messrate beträgt 50 Hz (C9B-Sensoren) bzw. 2.400 Hz (Messschrauben). Die Auswertung der Messungen erfolgt jeweils über einen Zeitraum von mindestens 24 s, in der alle vier Profilierstufen im Eingriff sind. Jede Messung wird dreimal wiederholt. Die folgenden Diagramme zeigen jeweils den Mittelwert aus den Signalen dieser drei Messungen sowie deren maximale Streuung.

Zur Beurteilung der Profilqualität wird in jeder Messung ein 1.085 mm langer Profilabschnitt mittels Abscheren entnommen. Die Vermessung erfolgt manuell unter Nutzung verschiedener taktiler Messgeräte (Bild 11).



Bild 11: Taktiler Vermessung der Profilgeometrie

Zur Vermessung der Biegewinkel wird ferner ein Lasermesssystem vom Typ Profile 360 (Hersteller: Starrett) eingesetzt. Die veränderten Biegewinkel werden insbesondere in veränderten Außenmaßen (Profilhöhe und Profilbreite) deutlich, weshalb diese für die weitere Diskussion der Ergebnisse genutzt werden. Neben der Auswirkung der eingebrachten Störungen auf die Querschnittsgeometrie, werden auch longitudinale Gestaltabweichungen in Form von Bogenbildung und Verdrillung erfasst. Bis auf eine Ausnahme wird die Bogenbildung nur geringfügig von den hier betrachteten Fehlstellungen beeinflusst, während die Verdrillung deutlich empfindlicher auf diese reagiert. Aus diesem Grund wird diese Größe in erster Linie für die weitere Diskussion herangezogen.

Nach Erfassung des Referenzzustands werden verschiedene Rollenfehlstellungen, die in

Produktionsbetrieben beispielsweise durch Fehler beim Rüsten auftreten können, eingebracht sowie die Auswirkungen auf die Kraftwerte betrachtet.

5.1 Detektion veränderter Profilierspale

5.1.1 Vertikale Spaltveränderung

In einem ersten Versuch werden die Auswirkungen eines veränderlichen Profilierspals betrachtet. Die Ursachen für eine derartige Fehlstellung können beispielsweise in unerwarteten Setzvorgängen oder einer fehlerhaften Prozesseinstellung liegen. In dieser Studie wird der Spalt zwischen Ober- und Unterrolle in Stich 2 um 0,3 mm erhöht oder verringert. Bei der Auswertung der Profilqualität zeigt sich, dass sich die Geometrie wie in Tabelle 1 zusammengefasst, ändert. Bei engen Toleranzen können insbesondere die Abweichungen der Profilbreite infolge geringfügig veränderter Biegewinkel unzulässige Geometrieabweichungen darstellen. Die Zunahme der Torsion ist in diesem Fall vergleichsweise gering.

Tabelle 1: Auswirkung eines veränderten Spaltmaßes in Stich 2 auf die Profilgeometrie

Messgröße	Wert Referenz	Spalt 0,7 mm	Spalt 1,3 mm
Profilbreite [mm]	76,17	76,33	76,07
Profilhöhe [mm]	20,15	20,09	20,15
Verdrehung [°/m], positiv nach links	0,67	1,14	0,44

Die Auswertung der gemessenen Reaktionskräfte ergibt, dass, insbesondere in Stich 2, die Kraftwerte in Folge eines weiteren/engeren Profilierspals deutlich abfallen/ansteigen (Bild 12). Gleichzeitig deutet sich in der folgenden Stufe 3 der umgekehrte Trend an, wonach ein reduzierter Spalt in Stich 2 hier zu geringeren Kräften führt und ein größerer zu höheren. Die Kraftänderungen an Stich 3 liegen jedoch im Bereich der Streuung der Messungen. Diese Ergebnisse decken sich mit Laborversuchen am PtU, in denen die Fertigung eines U-Profiles untersucht wurde [16]. Die Erklärung für die Kraftänderung in der folgenden Stufe liegt demnach darin, dass durch das veränderte Spaltmaß das Biegeinkrement in Stich 2 erhöht bzw. erniedrigt wird und somit in Stich 3 das erforderliche Biegeinkrement ab- bzw. zunimmt.

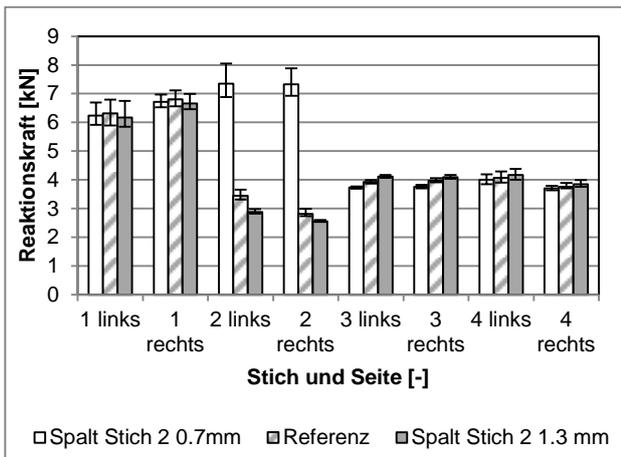


Bild 12: Auswirkung eines veränderten Spaltmaßes in Stich 2 auf die Reaktionskräfte

Die Betrachtung der erfassten Schraubenzusatzkräfte der Messschrauben zeigt tendenziell das gleiche Verhalten wie die gemessenen Reaktionskräfte (Bild 13).

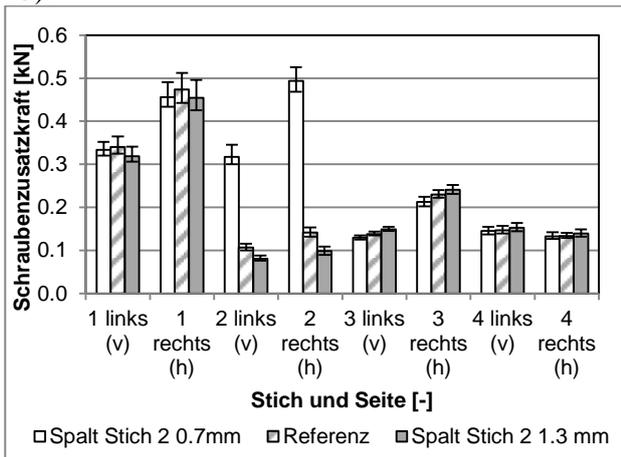


Bild 13: Auswirkung eines veränderten Spaltmaßes in Stich 2 auf die Schraubenzusatzkräfte

5.1.2 Horizontale Spaltveränderung

Im zweiten Versuch wird die Position der Oberrollen in Stich 3 in horizontaler Richtung um 0,6 mm nach links bzw. rechts verschoben. Wie beim vorangehend betrachteten Fehler auch könnten mögliche Ursachen hierfür in Setzeffekten oder fehlerhaften Maschineneinstellungen liegen. Tabelle 2 fasst die Auswirkungen dieser Fehlstellung auf die Profilgeometrie zusammen. Die deutliche Zunahme der Profilbreite sowie die Veränderung der Torsion des Profils könnte im Produktionsfall zur Nichterfüllung der Toleranzanforderungen führen.

Tabelle 2: Auswirkung einer veränderten, horizontalen Position der Oberrolle in Stich 3 auf die Profilgeometrie

Messgröße	Wert Referenz	Verschiebung nach links (0,6 mm)	Verschiebung nach rechts (0,6 mm)
Profilbreite [mm]	76,17	76,38	76,52
Profilhöhe [mm]	20,15	20,11	20,08
Verdrehung [°/m], positiv nach links	0,67	3,20	-1,76

Bei der Auswertung der gemessenen Reaktionskräfte zeigt sich in Stich 3 ein Anstieg der gesamten Reaktionskraft (Summe aus Signal links und rechts, Bild 15). Gleichzeitig ist eine Zunahme der Asymmetrie der Verteilung der Gesamtkraft auf den rechten und linken Ständer des Gerüsts zu beobachten.

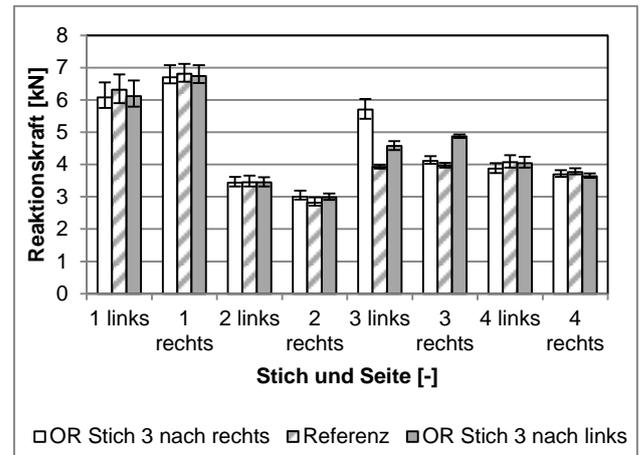


Bild 14: Auswirkung einer veränderten Oberrollenposition in Stich 3 auf die Reaktionskräfte

Die erfassten Schraubenzusatzkräfte weisen einen vergleichbaren Effekt auf. Aufgrund der deutlich unterschiedlichen Niveaus der Kraftsignale der einzelnen Schrauben in der Referenzmessung ist die Zunahme der Asymmetrie der Lastverteilung insbesondere bei der Betrachtung der relativen Änderung der Messsignale der Schrauben zu erkennen (Bild 15).

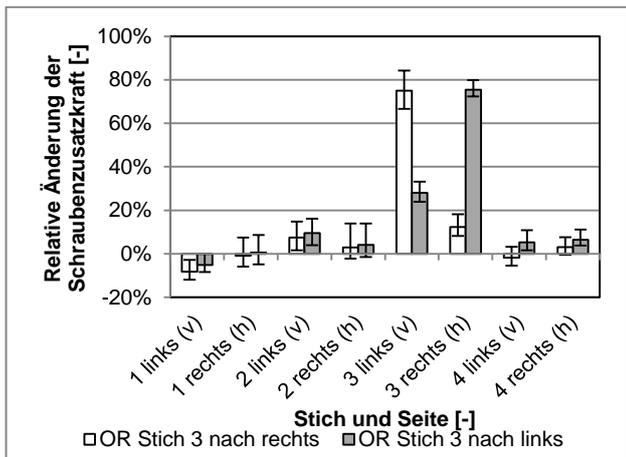


Bild 15: Veränderung der Schraubenzusatzkraft infolge einer veränderten Oberrollenposition in Stich 3

5.1.3 Verkippung der Oberwelle

Im dritten Versuch wird die Oberwelle in Stich 3 absichtlich verkippert, indem der rechte und linke Lagerblock jeweils gegengleich um 1,0 mm erhöht oder erniedrigt wird. Bei einer Breite der Profiliergerüste (Länge der Welle zwischen den Lagerungen) von 450 mm entspricht dies einer Verkippung um 0,25°. Die wahrscheinlichste Ursache für einen derartigen Fehler liegt in der fehlerhaften Einstellung der Lagerblöcke beim Rüsten. Tabelle 3 fasst die Auswirkungen dieser Fehlstellung auf die Profilgeometrie zusammen. Auch bei dieser Fehlstellung reagieren die Profilbreite und die Torsion am sensitivsten auf die Fehlstellung.

Tabelle 3: Auswirkung einer verkipperten, Oberrolle in Stich 3 auf die Profilgeometrie

Messgröße	Wert Referenz	Verkippung nach links (0,25°)	Verkippung nach rechts (0,25°)
Profilbreite [mm]	76,17	76,51	76,28
Profilhöhe [mm]	20,15	20,04	20,12
Verdrehung [°/m], positiv nach links	0,67	-1,48	4,26

Unabhängig von der Richtung der Verkippung resultiert diese Fehlstellung in einer deutlichen Abnahme der Kraft in Stich 3 rechts (Bild 16). Die Ursache für das asymmetrische Verhalten von Stich 3 liegt in der Art der Lagerung der Oberwelle, die auf

der rechten Seite ein Festlager besitzt und auf der linken Seite ein Loslager.

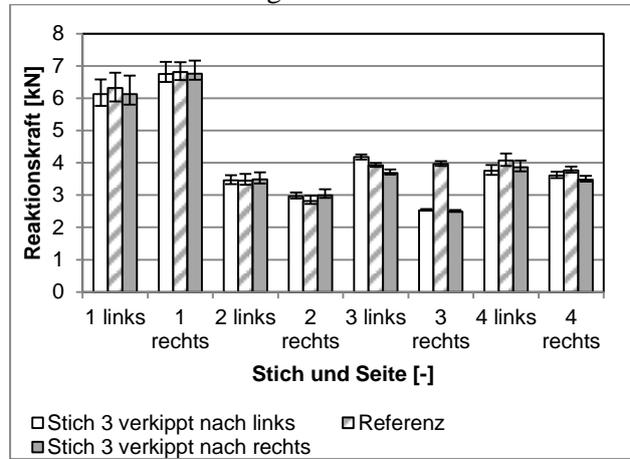


Bild 16: Auswirkung einer verkipperten Oberrolle auf die Reaktionskräfte

Auch bei Auswertung der Signale der Messschrauben ist der deutlichste Effekt an der Messposition in Stich 3 rechts (hinten) zu beobachten (Bild 17). Je nach Richtung der Verkippung ist hier eine Zu- bzw. Abnahme der Schraubenzusatzkraft zu beobachten. In Abhängigkeit vom Niveau der Referenzmessungen, kann es hier deshalb zu widersprüchlichen Diagnosen zwischen Verkippung bzw. horizontaler Verschiebung der Oberwelle kommen.

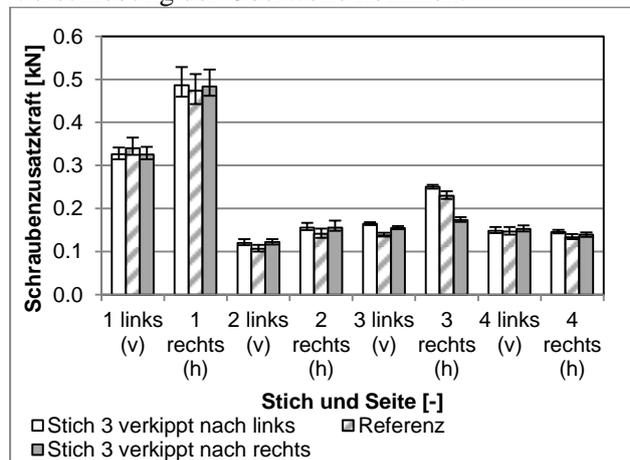


Bild 17: Auswirkung einer verkipperten Oberrolle auf die Schraubensignale

5.1.4 Detektion von falschen Wellenniveaus

Im vierten Versuch werden beide Wellen in Stich 3 um 5 mm angehoben. Bei Anlagen, die eine vertikale Veränderung der Unterwelle erlauben, liegt eine mögliche Ursache für eine derartige Verstellung in der fehlerhaften Justage. Bei Anlagen wie der hier genutzten, die diese Möglichkeit jedoch nicht bietet, wäre die Ursache in Montagefehlern beim Rüsten zu

suchen. Tabelle 4 fasst die Auswirkungen dieser Fehlstellung auf die Profilgeometrie zusammen. Im Gegensatz zu den anderen Fehlstellungen, folgt dieser Fehlstellung eine Verringerung der Profilbreite. Auch die Torsion verändert sich deutlich. Ferner zeigt diese Rollenfehlstellung einen deutlichen, negativen Einfluss auf die Ausbildung eines vertikalen Bogens entlang der Profilhöhe.

Tabelle 4: Auswirkung einer erhöhten Wellenposition in Stich 3 auf die Profilgeometrie

Messgröße	Wert Referenz	Wellenniveau Stich 3 um 5 mm erhöht
Profilbreite [mm]	76,20	76,00
Profilhöhe [mm]	20,15	20,12
Bogenbildung [mm/m], positiv bei Biegung nach oben	Kaum ausgeprägt (<0, >-0,5)	4,2
Verdrehung [°/m], positiv nach links	1,53	-0,32

Trotz der deutlichen Geometrieabweichungen ist kein nennenswerter Effekt auf die Reaktionskräfte (Bild 18) oder die erfassten Schraubenzusatzkräfte festzustellen.

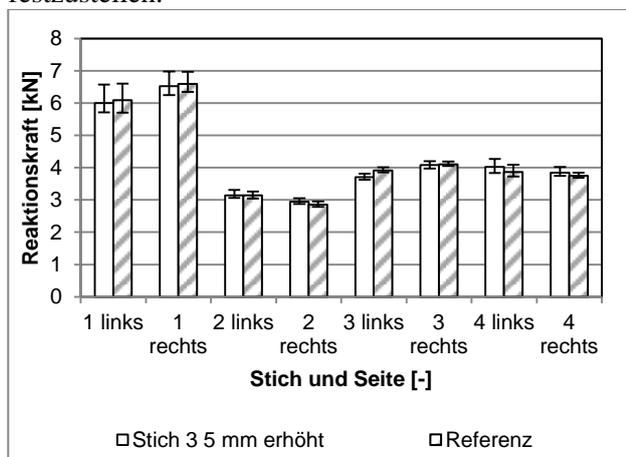


Bild 18: Auswirkung veränderter Wellenniveaus auf die Reaktionskräfte

Auch in vorangegangenen Studien am PtU war allein durch Messungen der vertikalen Reaktionskräfte der

Einfluss einer vertikalen Verschiebung beider Wellen nicht zu identifizieren [16]. Die Ursache hierfür liegt darin, dass aufgrund des vergleichsweise großen Gerüstabstands die Zusatzkraft, die zum Biegen des Profils entlang der Profillängsachse erforderlich ist, gegenüber der Profilerkraft gering ist. Derartige Fehler sind erst durch die Betrachtung zusätzlicher Prozessgrößen, wie beispielsweise, Antriebsmomente erkennbar [10]. Bei Anlagen der betrachteten Bauform ist das Auftreten dieses Fehlers aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur vertikalen Verstellung der Unterwelle relativ unwahrscheinlich.

5.2 Detektion von Lagerverschleiß

Während sich die vorangegangenen Versuchsreihen mit Fehlstellungen beschäftigen, die auf Abweichungen beim Rüsten bzw. Einstellen der Anlage zurückzuführen sind und die durch entsprechende Korrekturmaßnahmen kompensiert werden können, betrachtet dieser abschließende Versuch einen Anlagenfehler in Folge von Lagerverschleiß. Zu diesem Zweck wird das linke Lager der Oberwelle in Stich 3 durch ein Lager ersetzt, bei welchem mittels Sandstrahlen Verschleiß simuliert wird. Da erwartet wird, dass die Auswirkungen dieses Verschleißes in erster Linie an Stich 3 messbar sind, werden für diese Messung die Messschrauben aus Stich 1 in Stich 3 eingebaut. Somit ist jede Verbindungsstelle Quertraverse-Führungssäule in Stich 3 mit Messschrauben ausgestattet.

Tabelle 5: Auswirkung eines verschlissenen Lagers an der Oberrolle in Stich 3 links auf die Profilgeometrie

Messgröße	Wert Referenz	Lager verschliss-
Profilbreite [mm]	76,21	76,26
Profilhöhe [mm]	20,18	20,18
Verdrehung [°/m], positiv nach links	1,22	1,17

Wie die Werte in Tabelle 5 zeigen, hat das verschlissene Lager kaum Einfluss auf die Geometrie des gefertigten Profils. Die Diagnostikfähigkeit des Assistenzsystems kann in diesem Fall folglich nicht durch eine Abweichung der Profilgeometrie Δp ausgelöst werden. Vielmehr muss dieser Zustand

direkt durch Abweichungen Δi der zusätzlichen Messwerte identifiziert werden.

Die Mittelwerte der erfassten Reaktionskräfte variieren kaum infolge des Lagerverschleißes. Allerdings ist an den Messungen an Stich 3 links zu beobachten, dass durch den Einbau des verschlissenen Lagers dem ursprünglichen Kraftsignal eine Schwingung überlagert ist (Bild 19). Die Periodendauer dieser Schwingungen (ca. 6 - 8 s, siehe gestrichelte Linien in Bild 19) stimmt näherungsweise mit den Periodendauern der Umdrehungen von Ober- (7,9 s) und Unterwelle (5,7 s) überein.

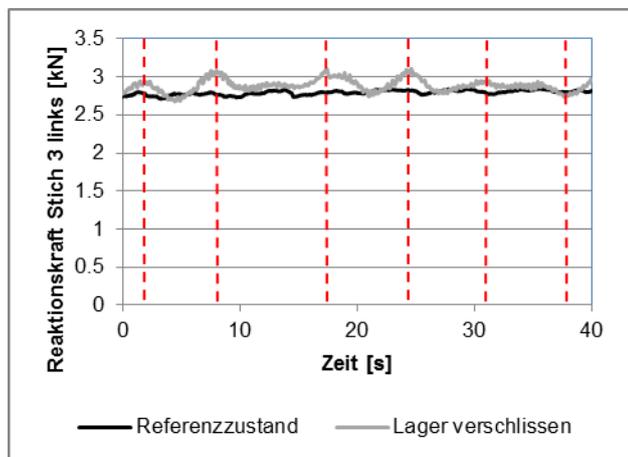


Bild 19: Auswirkungen des verschlissenen Lagers auf die Reaktionskraft

Ein vergleichbarer Effekt zeigt sich auch an den Messsignalen der Messschrauben an Stich 3 links vorne (Bild 20) und hinten (Bild 21).

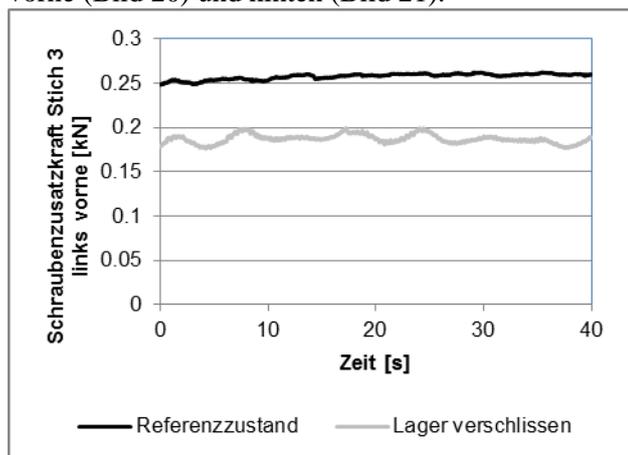


Bild 20: Auswirkungen des verschlissenen Lagers auf die Schraubenzusatzkraft (Messposition: Stich 3 links vorne)

Diese Messungen deuten somit darauf hin, dass sich auch ein veränderter Verschleißzustand aufgrund von charakteristischen Mustern in Messsignalen feststellen lässt. Gleichzeitig ist jedoch anzumerken, dass auch

bei intaktem Lager Schwingungen auftreten können. Für die Detektion von Verschleiß erscheinen somit zum jetzigen Zeitpunkt die kontinuierliche Erfassung von Messwerten sowie deren fortlaufende Analyse zwingend erforderlich.

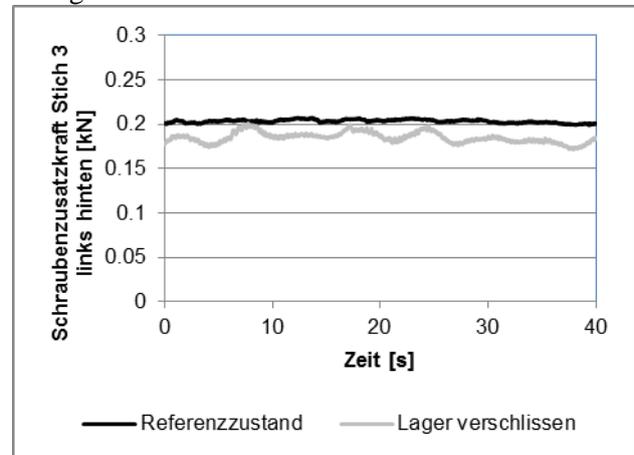


Bild 21: Auswirkungen des verschlissenen Lagers auf die Schraubenzusatzkraft (Messposition: Stich 3 links hinten)

6 Diskussion der Perspektive für ein Assistenzsystem beim Walzprofilieren

Die Ergebnisse der hier dargestellten Versuchsreihen zeigen, dass durch die Auswertung von Kraftmessdaten aus Profilierprozessen, Hinweise auf mögliche Fehlstellungen sowie Lagerverschleiß gegeben werden können. Diese Hinweise können bei entsprechender Aufbereitung durch Assistenzsysteme Anlagenbedienerinnen und Anlagenbediener bei der Sicherstellung effizienter Prozesszustände unterstützen.

Sowohl die Messung absoluter Reaktionskräfte als auch die indirekte Messung von durch diesen hervorgerufenen Zusatzkräften in Schraubverbindungen können zur Diagnose dienen. Der einfacheren Integrierbarkeit der indirekt messenden Messschrauben steht dabei ein höherer Aufwand für die Beschaffung von Referenzwerten gegenüber, da bei Verwendung von Messschrauben die Kraftwerte aus der Prozessauslegung nicht unmittelbar als Referenzwerte dienen können.

Der Abgleich der gemessenen Kraft mit der Referenzkraft eines ordnungsgemäß abgestimmten Prozesses reicht bei diesem Beispielprozess bereits aus, um die Fehlerbilder variiertes Profilierspalt, horizontale Verschiebung der Oberwelle sowie Verkipfung der Oberwelle zu detektieren. Tabelle 6 fasst die gefundenen Diagnoserichtlinien zusammen. Diese Hinweise können Anlagenbedienerinnen und -bedienern bei der Identifikation der Ursache, die zum Auftreten einer Geometrieabweichung geführt

hat, unterstützen. Ein verkehrt eingestelltes Wellenniveau lässt sich jedoch alleine durch die hier beschriebenen Kraftmessungen nicht identifizieren. Hier wäre die Nutzung weiterer Messsignale wie beispielsweise Antriebsmomenten zur zuverlässigen Diagnose erforderlich.

Table 6: Auswirkung von Fehlstellungen auf die Reaktionskräfte

Fehlstellung	Auswirkung
Vergrößerung/Verkleinerung des Profilierpalts	Ab-/Zunahme der Kraft in dieser Stufe
Horizontale Verschiebung der Oberwelle	Zunahme der Kraft in dieser Stufe, asymmetrische Verteilung zwischen linker und rechter Gerüsthälfte
Verkipfung der Oberwelle	Abnahme der Kraft auf der Seite der Festlagerung

Die Betrachtung der Auswirkung von Lagerverschleiß zeigt, dass dieser durch die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Kraftsignalen identifiziert werden kann. Eine Veränderung der dem Kraftsignal überlagerten Schwingungen deutet demnach auf Lagerverschleiß hin.

7 Zusammenfassung und Fazit

Zur Sicherung der hohen Wettbewerbsfähigkeit des Walzprofilierens bei kleiner werdenden Losgrößen und folgend häufigeren Produktionswechseln bedarf es Lösungen, um die Vorgänge zur Anlageneinstellung und Fehlerbehebung beschleunigen. Bislang beruhen diese Vorgänge maßgeblich auf dem Erfahrungsschatz der Anlagenbedienerinnen und -bediener. Gemäß wissenschaftlichen Entwicklungsmodellen könnten Assistenzsysteme, die basierend auf Messwerten Fehlerursachen identifizieren und Lösungsvorschläge ableiten, hierzu einen Lösungsansatz bieten.

Die Untersuchungen in diesem Beitrag legen nahe, dass beispielsweise Kraftmessungen in Profilierprozessen benötigte Daten zur Fehleranalyse sein könnten. Ferner lassen sich in diesen Werten Muster erkennen, die auf mögliche Fehlstellungen hinweisen. Hier wurde gezeigt, dass ausgewählte Änderungen der Rollenpositionen prinzipiell mithilfe der Messtechnik detektierbar und die gemessenen Effekte in sich schlüssig sind. Dieser Messumfang reicht allerdings noch nicht aus, um die prinzipielle

Detektion aller möglichen Fehlstellungen und eine Reproduzierbarkeit sicher zu stellen. Auch ist ungewiss, ob die Umformkraft alleine alle Fehlstellungen beschreiben kann. Weiterhin muss überprüft werden, ob ein eindeutiger Umkehrschluss, das richtige Bestimmen einer Fehlstellung anhand vorhandener Messdaten, ebenfalls möglich ist. Denn nur so können die Monteur/innen einen vorab nicht bekannten Fehler erkennen und korrigieren. Grundsätzlich erscheint die Ableitung von Assistenzsystemen, basierend auf diesen Erkenntnissen, auch beim Walzprofilieren möglich zu sein.

Die hier vorgestellte Messtechnik besteht größtenteils noch aus Laborzubehör. Um einen industriellen Einsatz oder eine industrielle Vermarktung eines solchen Assistenzsystems realisieren zu können, muss die gezeigte Messtechnik zukünftig in ein kommerzielles, robustes Equipment mit Anbindung an die Steuerung überführt werden.

Danksagung

Teile der Ergebnisse dieses Beitrags wurden unter freundlicher Unterstützung des Mittelstands 4.0 Kompetenzzentrums Darmstadt erarbeitet. Das Kompetenzzentrum Darmstadt ist Teil der Förderinitiative "Mittelstand 4.0 - Digitale Produktions- und Arbeitsprozesse", die im Rahmen des Förderschwerpunkts „Mittelstand-Digital – Strategien zur digitalen Transformation der Unternehmensprozesse“ vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird.

Gefördert durch:

Mittelstand-Digital



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Literatur

- [1] Roland Berger Strategy Consultants GmbH Mastering product complexity, Düsseldorf, 2012
- [2] Kistler, E., Hilpert, M. Auswirkungen des demographischen Wandels auf Arbeit und Arbeitslosigkeit, Aus Politik und Zeitgeschichte, Nr. 3(4), 2001, S. 5-13

-
- [3] N. N. Zahl der Azubis erreicht Rekordtief, Spiegel – online 12.04.2017: <http://www.spiegel.de/karriere/wiesbaden-zahlder-azubis-erreicht-rekordtief-a-1143078.html> (abgerufen am 02.11.2017)
- [4] Felber, P., Groche, P., Hohmann, J., Traub, T. Der Weg in die Digitalisierung – Kompetenzzentrum als Unterstützung, *blechnet*, Nr. 4, 2017, S. 78-79
- [5] Groche, P., Götz, P. Wirtschaftliches Profilieren, Forschung für die Praxis P 782, Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Verlag und Vertiebsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2010
- [6] Müller, C., Kummle R. Intelligente Automatisierung an Rollformanlagen zur Steigerung der Produktivität und Prozesssicherheit, 10. Fachtagung Walzprofilieren, Darmstadt, 2017
- [7] Weber, H. Zukunftsprojekt Industrie 4.0 für die Profiliertechnik, UMFORMtechnik Blech Rohre Profile, 05/2015
- [8] Müller, C. Industrie 4.0 in der Umformtechnik, Rollprofilieren 4.0 – Stand und Ausblick, 12. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt, Darmstadt, 2015
- [9] Bauernhansel, T., Krüger, J., Reinhart, G., Schuh, G. WGP-Standpunkt Industrie 4.0, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP e. V., 2016
- [10] Traub, T., Gregório, M.G., Groche, P. A framework illustrating decision making in operator assistance systems and its application to a roll forming process, *Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, Nr. 97(9-12), 2018, S. 3701-3710
- [11] Lindgren, M. Validation of finite element model of roll forming, Proceedings of the 27th International Conference of the International Deep-Drawing Research Group (IDDRG), 16. – 18. Juni 2008, Olofström, 2008
- [12] Larrañaga Amilibia, J. Geometrical accuracy improvement in flexible roll forming process by means of local heating, Dissertation, Mondragon Unibertsitatea, Mondragon, 2011
- [13] Müller, C. Numerische Abbildung und Validierung von Beanspruchungsgrößen in Rollprofilierprozessen, Shaker Verlag, Aachen, 2014
- [14] Groche, P., Müller, C., Traub, T. Das Profilieren realitätsnah simulieren, *Bleche, Rohre, Profile*, Nr. 4, 2014, S. 14-17
- [15] Sáenz de Argandoña, E., Larrañaga, J., Legarda, A., Galdos, L. Roll forming set-up influence in the forming forces and profile quality, *Key Engineering Materials*, Nr. 504, 2012, S. 1249-1254
- [16] Traub, T., Miks, C., Groche, P. Force Measurements Supporting the Set-up Process in Roll Forming, Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering, 17. - 20. Juli 2017, Athen: ATINER'S Conference Paper Series, No: MEC2017-2346, 2017
- [17] Abeyrathna, B., Rolfe, B., Hodgson, P., Weiss, M. A first step towards a simple in-line shape compensation routine for the roll forming of high strength steel, *International Journal of Material Forming*, Nr. 9(3), 2016, S. 423-434
- [18] Smith, D.J. Power-by-the-hour: the role of technology in reshaping business strategy at Rolls-Royce, *Technology analysis & strategic management*, Nr. 25(8), 2013, S. 987-1007
-





Industrie 4.0 und Leichtbau als Innovationstreiber in der Befestigungstechnik

Olaf Ambros, Ober-Ramstadt/Rohrbach
baier&michels GmbH & Co. KG

Leichtbau und Industrie 4.0 als Schlagwörter werden gerne genutzt. Was diese zu bedeuten haben, und welche Vorteile sie bieten, ist meist nicht ganz klar. Viele Unternehmen stehen daher vor der Herausforderung, Vorteile dieser industriellen Revolution für sich zu erkennen und zu nutzen. Dargestellt wird, wie baier&michels Industrie 4.0 für sich definiert und die Hindernisse im Bereich des Leichtbaus bewältigen konnte. Mithilfe modernster Prozessüberwachung gelang es, einen für die Massivumformung ungeeigneten Werkstoff zu einem neuen innovativen Produkt umzuformen. Neben der Prozessüberwachung wird eine Werkzeugmanagementdatenbank vorgestellt, die aufgrund cleverer Verknüpfungen bereits vorhandener Daten, großen Mehrgewinn für das Unternehmen liefert.

Industry 4.0 and Lightweight as an Innovation Driver in fastening technology

Lightweight construction and "Industrie 4.0" as keywords are often used. The meaning of these keywords is usually unclear. Many companies are facing the challenge of recognizing and gaining advantages from this industrial revolution. It is shown how baier & michels defines "Industrie 4.0" and overcomes the obstacles in the field of lightweight construction. State-of-the-art process monitoring made it possible to form an unsuitable material into a new, innovative product. In addition to the process monitoring, a tool management database is presented which, thanks to the smart linking of already existing data, provides the company with great added value.

Einleitung

Die Themen Leichtbau und Industrie 4.0 werden heiß diskutiert. Während Leichtbauwerkstoffe wie Carbon als Problemlöser gelten, steht man der Digitalisierung noch sehr skeptisch gegenüber. Viele Quellen schreiben der Digitalisierung zu, Arbeitsplätze zu bedrohen oder Firmen Know-How durch offene IT-Schnittstellen zu gefährden [1, 2].

Doch wo fängt Industrie 4.0 eigentlich an und wo hört sie auf? Die Digitalisierung als vierte industrielle Revolution betrifft jeden Bereich der Produktion und verknüpft verschiedenste Wissenschaftsdisziplinen. Grundsätzlich kann man von Digitalisierung sprechen, sobald Komplexitäten der Produktion durch Informations- und Kommunikationstechnologien vereinfacht oder gelöst werden [3]. Das heißt, Informationen erfasst und ausgewertet werden, um den Produktionsprozess zu verbessern.

Für Hersteller von Befestigungsteilen führen Verbindungen mit Carbon zu Schwierigkeiten. Hauptproblem ist die stark ausgeprägte Kontaktkorrosion der Verbindungspartner. Grund für die Oxidation ist die elektrochemische

Potenzialdifferenz zwischen Stahl bzw. Zink und Kohlenstoff.

Bewältigt werden konnte dieses Problem durch einen speziellen Vergütungsstahl, der sich wiederum nur schwer umformen lässt. Mithilfe modernster Prozessüberwachung und -regelung konnte baier&michels dieses Problem jedoch bewältigen.

Diese Anstrengungen führten dazu, dass baier&michels heute mit den b&m-CARBON-Produkten eine Ausnahmestellung auf dem Markt vorweisen kann.

1 Herausforderung Leichtbau

Herkömmliche Schrauben bestehen aus Stahl, die zum Korrosionsschutz meist mit einer Zink-Lamellen-Beschichtung versehen werden. Diese führt in Verbindung mit dem Kohlenstoff bei Carbonanwendungen zu schwerer Kontaktkorrosion. Neben der Korrosionsproblematik stellen Delaminierungseffekte, abrasiver Verschleiß und geringe Einschraubtiefen Ingenieure bei Direktverschraubungen in CFK vor große Herausforderungen.

Galvanische Entkopplungen, adhäsive Fügeverfahren oder andere marktübliche Lösungsmöglichkeiten sind sehr kostenintensiv. Daher hat baier&michels

die Verbindung aus Stahlschraube und CFK genauer untersucht. Die Lösung sind Schrauben aus einem speziellen, korrosionsresistenten Vergütungsstahl. Dies ermöglicht eine korrosionsfreie Verbindung in Form einer Direkt- oder einer metrischen Verschraubung.

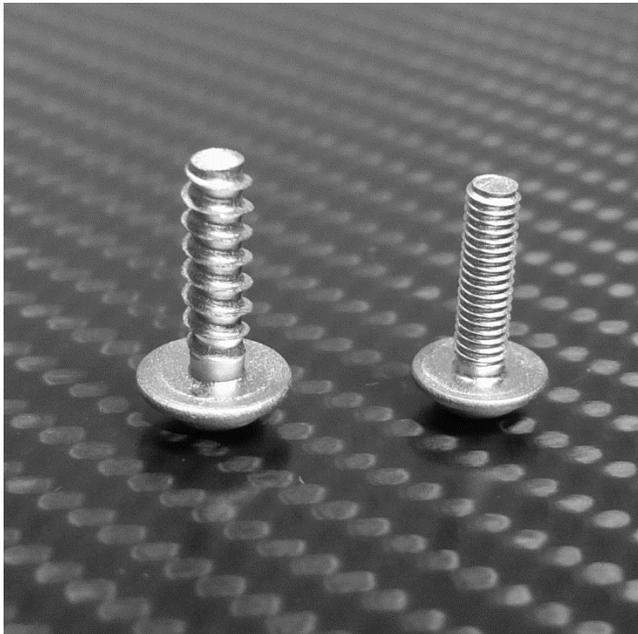


Bild 1: b&m CARBONPLAST[®] und b&m CARBONMETRIC[®]

Die b&m-Innovationen b&m CARBONPLAST[®] und b&m CARBONMETRIC[®] bewältigen somit alle Hürden, die der neuartige Werkstoff Carbon an die Befestigungstechnik gestellt hat. Darüber hinaus führten die neuen Produkte durch ein Alleinstellungsmerkmal auf dem Markt zu einem Wettbewerbsvorteil.

Doch neben diesen vielen Vorteilen gibt es natürlich auch Schwierigkeiten mit den neuen Schrauben. Größte Herausforderung ist der gewählte Werkstoff, da sich dieser nur schwer umformen lässt. Gründe für die Umformunwilligkeit des Werkstoffs sind seine hohe Kaltverfestigung, die mit steigendem Umformgrad die Umformung erschweren, eine hohe Fließgrenze und ein schlechtes Reibverhalten. Der Werkstoff neigt zu adhäsivem Verschleiß und lässt sich aufgrund seiner chemischen Beständigkeit nicht phosphatieren. Ein gängiges Phosphat-Schmiersystem lässt sich daher nicht nutzen. Um die Umformung dennoch zu ermöglichen, wird der Draht, bevor er zum Schraubenrohling gepresst wird, induktiv erwärmt. Dazu wurde eine Temperaturregelung mithilfe eines Pyrometers aufgebaut, die für eine konstante Drahtabschnittstemperatur sorgt.

Die erhöhte Temperatur sowie der umformunwillige Werkstoff führen wiederum zu erhöhtem Werkzeugverschleiß und einer zusätzlichen Wärmebelastung der Umformmaschine. Dank Prozessüberwachung können diese Aspekte aber beobachtet und im Falle einer Grenzwertverletzung nachgesteuert werden.

2 Digitalisierung als Chance

baier&michels setzt seit langem konsequent auf Prozessüberwachung. Zusammen mit Schwer+Kopka wurden daher alle Maschinen mit Sensoren, Messverstärkern und Anzeigeräten ausgestattet. Die zusätzlichen Informationen, wie beispielsweise Kraftverläufe beim Umformen, ermöglichten es, so ein tieferes Prozessverständnis aufzubauen, das dazu beigetragen hat, sich den Herausforderungen des neuen Werkstoffs zu stellen.

Grundlage der Industrie 4.0 ist die Erfassung von Daten. Bei baier&michels beginnt das mit der Maschinendatenerfassung (MDE). Zu diesem Zweck müssen Sensoren und Messumformer verbaut werden. Am Beispiel des Pressrohlings für die b&m CARBONPLAST[®] erklärt, sind das:

- Ein Pyrometer im Bereich der Drahtzufuhr
- Ein Kraftsensor im Drahtanschlag
- Drei Kraftsensoren im direkten Kraftfluss in den Stempeln
- Ein Temperatursensor im Matrizenblock
- Ein Überwachungsterminal SK-800 von Schwer+Kopka für Prozess- und Werkzeugüberwachung

Die Produktion von Schrauben beginnt mit einem Draht. Dieser wird vor dem Pressen auf den passenden Durchmesser gezogen und anschließend gerichtet. Nach dem Richten wird der Draht über Einzugsrollen in die Maschine gezogen und in diesem speziellen Fall durch eine Induktorspule geführt. Der Induktor erwärmt den Draht auf ca. 400°C, um die später folgenden, hohen Umformgrade zu ermöglichen. Mit dem verbauten Pyrometer wird die Drahttemperatur nach der Spule gemessen.

Nach dieser Messstelle wird der Draht in Abschnitte zerteilt. Dazu trifft der Draht auf den Drahtanschlag, der in diesem Fall mit einem piezobasierten Kraftsensor ausgestattet ist. Der Abstand von Drahtanschlag zu Schermesser definiert die Länge des Drahtabschnitts.

Im Anschluss erfolgt die stufenweise Umformung des Drahtabschnitts zum Pressrohling. Die Umformung wird stempelseitig mit drei Kraftsensoren erfasst. Matrizen­seitig wird die Temperatur des Werkzeugs aufgenommen.

Alle gemessenen Signale werden über das SK-800 Terminal verstärkt und in Daten umgewandelt. Dort werden sie dann auch weiterverarbeitet. Erster Nutzen der neu gewonnenen Daten ist eine Regelung der Drahttemperatur. Um die Temperatur konstant zu halten wird das Signal des Pyrometers mit einem Sollwert verglichen. Der Regler berechnet aus der resultierenden Abweichung einen Strom als Vorgabe für den Induktor. Sollte trotz Regelung die Temperatur zu niedrig für die Umformung sein, wird zur Absicherung ein Pneumatikzylinder angesteuert, der die Drahtweitergabe, nach dem Abscheren, unterbricht. Zu kalte Abschnitte werden dann direkt dem Ausschuss zugeführt um Werkzeugschäden zu vermeiden.

Die Überwachung des Drahtanschlags wird genutzt um zu große Axialkräfte auf den Draht zu vermeiden. Schieben die Einzugsrollen den Draht zu stark auf den Anschlag, kann es zum Ausknicken des Drahts kommen. Da der Draht in diesem Falle bereits durch die Erwärmung geschwächt ist, hilft die Kraftüberwachung des Anschlags dem Werker beim Einrichten die Einzugsrollen so einzustellen, dass der Draht sanft auftrifft und nicht ausknickt.

Während der Umformung helfen die Kraftsensoren in den Umformstufen beim Rüsten der Maschine und dienen zur Überwachung der Fertigung. Über Hüllkurven können n.i.O.-Teile im laufenden Prozess aussortiert sowie abrupter Werkzeugverschleiß (Bsp. Werkzeugbruch) und Prozessfehler erkannt werden. Die Information wie und welche Hüllkurve verletzt wurde, unterstützt außerdem den Bediener bei der Fehlersuche und verkürzt die Stillstandszeiten.

Der Temperatursensor im Matrizenblock dient zur Überwachung und in Kombination mit einem zusätzlichen Kühler zur Regelung der Matrizen­temperatur. Durch die konstante Temperatur kann die Lebensdauer des Werkzeugs erhöht werden. Außerdem ist es durch den erhöhten Wärmeeintrag durch den Draht nötig um Werkzeug- oder Maschinenschäden zu vermeiden.

Zusätzlich zur reinen Hilfestellung beim Einrichten und zur unmittelbaren Überwachung werden die Signalverläufe über ein Intervall gemittelt gespeichert.

Diese gespeicherten Verläufe werden zu einer Trendanalyse herangezogen. Darüber kann der Werker sehen, ob sich über einen Produktionsauftrag ungewollte Veränderungen ergeben haben oder sich ein kontinuierlicher Werkzeugverschleiß einstellt. So kann im Zweifel nachgestellt oder ein Werkzeug getauscht werden, bevor die Qualitätskontrolle eingreifen muss.

All diese Informationen werden natürlich nicht nur in der Maschine erfasst und verarbeitet, sondern auch an die Betriebsdatenerfassung (BDE) weitergegeben und gespeichert. Realisiert wird diese über die Software SK-go! von Schwer+Kopka. Mithilfe der Software kann man so von überall und jederzeit auf alle Daten aus der Produktion zugreifen und sich schnell und einfach einen Überblick verschaffen. Außerdem kann im Reklamationsfall, selbst nach Jahren, überprüft werden, ob es während der Produktion zu Auffälligkeiten gekommen ist

3 Schaffen von Schnittstellen

Nächster wichtiger Schritt bei der Digitalisierung ist nach der Erfassung, die Weitergabe und Verknüpfung der Daten. Aus der Kombination BDE mit SK-go!, der firmenweiten ERP-Software Microsoft Dynamics AX 2012, sowie einem 2D-Scanner und einem Faserlaser wurde daher ein Werkzeugmanagement aufgebaut.

Ziel des Werkzeugmanagements ist eine Datenbank mit deren Hilfe sich aktuelle Lagerorte, Bestände und Standzeiten aller Werkzeuge ermitteln lassen. Ein Algorithmus aus dem Supply-Chain-Management (SCM) generiert über die Schnittstelle außerdem Bestellvorschläge für Werkzeugeinzelteile. Über diese Verknüpfung der Daten wird somit sichergestellt, dass immer ausreichend, aber nicht zu viele Werkzeuge für den aktuellen Auftragshorizont verfügbar und auffindbar sind.

Um zu wissen, wann Werkzeuge nötig sind, kommuniziert das WKZ-Management mit Dynamics AX. Die ERP-Software fungiert als das Gedächtnis des Unternehmens in dem alle wichtigen Informationen abgespeichert sind. Hinterlegt sind hier beispielsweise monatliche Abrufe bestimmter Produkte, Start- und Endtermin der Produktion beim Kunden (SOP, EOP), Lagerort oder benötigte Werkzeuge zur Produktion eines gewissen Produkts.

Die Mindestmenge der zu bevorratenden Werkzeuge kann nur berechnet werden, wenn man weiß wie

viele Teile ein Werkzeug produzieren kann, bevor es versagt. Um diese Zuordnung zu ermöglichen, müssen Werkzeuge eindeutig identifiziert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Faserlaser angeschafft. Dieser ermöglicht es, Identifikationsnummern in Form von Datamatrix Codes auf jedes Werkzeug zu lasern. Verbunden mit den Stückzahlen aus SK-go! lassen sich so Standzeiten berechnen, die wiederum im SCM-Algorithmus benötigt werden.

Durch das Scannen von Werkzeugen und Produktionsaufträgen kann man neben dem Ein- und Ausbuchen von Werkzeugen zu Inventurzwecken außerdem feststellen, wo Werkzeuge sich befinden. Werden Werkzeuge das erste Mal eingebucht, befinden sie sich im Anschluss im Werkzeuglager. Werden Sie dort entnommen und ausgebucht, weiß das System über den Produktionsauftrag, der ebenfalls gescannt wird, in welche Maschine das Werkzeug verbaut wird. Beim Beenden des Auftrags in SK-go! findet im Anschluss wiederum die Zuordnung von gefertigter Stückzahl, zu Werkzeug statt und das Werkzeug wird dem maschinennahen Lager zugeordnet. Sollte während der Produktion ein gleiches Werkzeug entnommen werden, weiß das System, dass ein Werkzeug verschlissen ist und verringert den Bestand.

Aus vorhandenen Informationen und einer kleinen Investition konnte somit ein essentielles Werkzeug für das Unternehmen geschaffen werden. Dank des Werkzeugmanagements konnten Prozesse effizienter gestaltet werden, aber auch die Gefahr eines Produktionsstillstandes im Haus oder gar beim Kunden durch fehlendes Werkzeug deutlich verringert werden.

4 Zusammenfassung

Die Herausforderungen Leichtbau und Industrie 4.0 hat b&m rückblickend somit gefördert. Neben neuen Sichtweisen auf die eigenen Prozesse und ein tiefes Prozessverständnis, konnten neue Wege gegangen, aber auch Sicherheiten gewonnen werden.

Neben den offensichtlichen Vorteilen der Prozessüberwachung, wie kürzere Einrichtprozesse, geringerer Ausschuss und höhere Qualität, bieten sich auch viele indirekte Vorteile. Durch die neuen Einblicke in den Prozess konnte baier&michels ein tieferes Prozessverständnis erwerben, dass auch dazu beiträgt Produkte fertigen zu können, die für Mitbewerber unmöglich scheinen und Standzeiten von Werkzeugen deutlich erhöhen. So konnten etwa die Standzeiten von Walzwerkzeugen auf das Dreifache

erhöht werden. Erreicht wird dies mitunter durch deutlich effizientere Rüstvorgänge dank besserem Feedback durch die Maschine an den Maschinenbediener.

Gleiches gilt für die Vernetzung, ein Kernaspekt der Industrie 4.0. Durch die Digitalisierung der Informationen und Kommunikation verschiedener Systeme können menschliche Fehlerfaktoren verringert bzw. abgeschafft werden. Durch digitale Hilfsmittel werden die Mitarbeiter unterstützt und nicht ersetzt.

Literatur

- [1] **Windelband, Lars:** *Zukunft der Facharbeit im Zeitalter „Industrie 4.0“*. Journal of Technical Education (JOTED) Jg. 2 (Heft 2), S. 138-160. Universität Stuttgart, Stuttgart [Artikel], (2014)
- [2] **Röcher, Dror-John:** *Eine vernetzte Industrie ist anfälliger für Angriffe*. In COMPUTERWOCHE, IDG Business Media GmbH, München [Artikel], (2013)
- [3] **Groche, Peter ; Hohmann, Johannes ; Becker, Helmut ; Höhr, Sara ; Birkhold, Markus ; Vey, Lukas ; Baum, Walter ; Faulhaber, Wolfgang ; Ludwig, Manuel ; Gruner, Mike P. ; Hoher, Simon ; Groß, Dominic:** *Der Weg zu Industrie 4.0 in der Produktion. BMBF Zukunftsprojekt RobIN 4.0 – Robustheit durch Integration, Interaktion, Interpretation und Intelligenz*. Meisenbach Verlag GmbH, Bamberg ISBN 978-3-87525-418-1 [Buch], (2017)





Profilbiegen 4.0 – Roadmap für die Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens

T. Kessler¹, D. Huttel², J. Kilz¹, P. Groche¹

¹Institut für Produktionstechnik und Umformmaschinen, TU Darmstadt

²Herkules Wetzlar GmbH

Kinematische Profilbiegeverfahren, wie das Drei-Rollen-Profilbiegen, zeichnen sich durch ihre hohe Flexibilität hinsichtlich der fertigen Konturen aus. Gleichzeitig führt der geringe Automatisierungsgrad des industriellen Standards des Drei-Rollen-Profilbiegens zu einem hohen Personal- und Zeitaufwand, was die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beeinträchtigt. Aktuelle Entwicklungen im Zuge von Industrie 4.0 können zu einer Automatisierung des Prozesses beitragen. Im vorliegenden Beitrag werden basierend auf einer Analyse des industriellen Standards eine Vorgehensweise zur stufenweisen Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens und erste Entwicklungsergebnisse vorgestellt.

Profile Bending 4.0 – Roadmap for the Automation of Three-Roll Profile Bending

Kinematic profile bending processes, such as three-roll profile bending, are characterized by their high flexibility with regard to the finished contours. At the same time, the low degree of automation of the industrial standard of three-roll profile bending leads to high personnel and time expenditure, which affects the efficiency of the process. Current developments in the course of Industry 4.0 have the potential to contribute to an automation of the process. Based on an analysis of the industrial standard, this paper presents an approach for the gradual automation of the three-roll profile bending process and the first development results.

Einleitung

Die Nachfrage für gebogene Profile als Struktur- und Designelemente im Transportwesen und im Baugewerbe hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen [1]. Die damit verbundenen geometrischen und konstruktiven Freiheitsgrade bieten im Bereich des Leichtbaus entscheidende Vorteile, beispielsweise im Hinblick auf eine aerodynamische Bauweise [2]. Die gesteigerte Nachfrage und die schrittweise Entwicklung der Massenproduktion zu einer kundenorientierten seriellen Maßanfertigung bringen neue technologische Herausforderungen mit sich [3]. Um den kürzeren Produktlebenszyklen und der zunehmenden Produktdiversifikation fertigungstechnisch und wirtschaftlich gerecht zu werden, sind eine gesteigerte Flexibilität, Prozessstabilität und Effizienz von Profilbiegeverfahren erforderlich. Kinematische Profilbiegeverfahren bilden aufgrund ihrer prozessinhärenten Flexibilität die Grundlage zur Bewältigung dieser Herausforderungen. Bedingt durch ihre nicht werkzeuggebundene Formgebung, bei welcher der erzielte Biegeradius prozessseitig durch die relative Zustellung der Werkzeuge zueinander bestimmt wird, bieten diese Verfahren eine attraktive Möglichkeit, eine große Produktvielfalt fertigungstechnisch abzudecken [4]. Besonders herausfordernd ist in diesem Zusam-

menhang die Realisierung einer hohen Prozessstabilität, da Schwankungen der Halbzeugeigenschaften durch eine anspruchsvolle Prozessführung kompensiert werden müssen [5]. In Abhängigkeit der Güte des Halbzeugs können zwischen und innerhalb von Chargen sowie über die Länge des einzelnen Profils hinweg, zum einen die Querschnittsabmessungen und zum anderen die Werkstoffkennwerte starken Schwankungen unterliegen, welche die elastische Rückfederung beeinflussen. Hierdurch ist neben einem oft iterativen Einrichten des Prozesses ein stetiges Überwachen der Produktqualität und Adaptieren des Prozesses erforderlich. Dies wiederum hat einen direkten Einfluss auf die Effizienz und die Wirtschaftlichkeit kinematischer Biegeverfahren. Aufgrund des geringen Automatisierungsgrads der Prozesse sind diese mit einem hohen Personal- und Zeitaufwand verbunden. Ausschlaggebend sind hierbei vor allem die Prozessnebenzeiten zum Vermessen der Profile und Adaptieren des Prozesses. Zusammen mit dem zunehmenden Mangel an Facharbeiter/-innen kann dies die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen am Produktionsstandort Deutschland nachhaltig gefährden und stellt vor allem für kleine und mittelständische Unternehmen eine Herausforderung dar.

Aktuelle Entwicklungen im Zuge von Industrie 4.0 haben das Potenzial, dieser Herausforderung gerecht

zu werden. Durch die informationstechnische Vernetzung der industriellen Fertigung können Produktionsdaten zur gezielten Einstellung von Produkt- und Prozessparametern genutzt werden. Möglich wird dies durch den Einsatz zusätzlicher Sensorik zur Ermittlung von Prozess- und Produktdaten. Durch die so geschaffene Informationsbasis können zum einen Maschinenbediener/-innen in der Prozessführung unterstützt werden. Zum anderen bildet diese Informationsbasis die Grundlage für eine Erhöhung des Automatisierungsgrads im Sinne einer Prozessregelung. Im Folgenden werden die Potenziale und Möglichkeiten hinsichtlich einer Erhöhung des Automatisierungsgrads kinematischer Profilbiegeverfahren am Beispiel des Drei-Rollen-Profilbiegens analysiert.

1 Drei-Rollen-Profilbiegen

Das Drei-Rollen-Profilbiegen ist eines der am weitest verbreiteten kinematischen Profilbiegeverfahren und in der Unternehmenslandschaft vorwiegend bei kleinen und mittelständischen Unternehmen vertreten, die oft in der Rolle eines Zulieferbetriebs agieren. Das Verfahren zeichnet sich durch seine hohe Adaptivität aus, die es ermöglicht, mit einfachen Werkzeugen eine Vielzahl von Profilkonturen mit unterschiedlichen Querschnittsgeometrien zu fertigen. Zum anderen ermöglicht es die prozessinhärente Flexibilität, auf Schwankungen der Halbzeugeigenschaften zu reagieren und die Rückfederung zu kompensieren. Im Hinblick auf die iterative Prozessführung bietet das Drei-Rollen-Profilbiegen den Vorteil einer möglichen mehrstufigen Profilbiegung, was beispielweise im Gegensatz zum Drei-Rollen-Schubbiegen eine Korrektur eines bereits gebogenen Bauteils ermöglicht. Hierdurch können Ausschusszahlen reduziert werden. Der industrielle Standard sieht eine stark durch das bedienende Personal geprägte, iterative Prozessführung vor. Hierbei spielen die Erfahrung und das Knowhow des Personals eine entscheidende Rolle beim Adaptieren des Prozesses. **Bild 1** zeigt den schematischen Ablauf der Prozessführung. Das Profil wird zunächst in die Biegemaschine eingelegt und auf Basis von empirischen Erfahrungswerten in einer ersten Biegung umgeformt. Anschließend erfolgt die meist manuelle Messung der Profilkontur mit Hilfe von Schablonen, Anrissen und Ersatzgrößen wie Sekanten- und Stichmaßen (siehe **Bild 2**), die zur Bestimmung der vorliegenden Biegeradien herangezogen werden. Die erfassten Biegeradien und Konturdaten werden mit der Sollgeometrie des zu fertigenden Bauteils abgeglichen. Erfüllt die Profilgeometrie nicht die erforderlichen Toleranzen wird eine Korrekturbiegung vorgenommen und der Vorgang wiederholt, bis das Sollmaß erreicht ist. Die Zahl der so durchgeführten

Iterationen liegt für gewöhnlich zwischen zwei und neun. Nicht dargestellt in **Bild 1** sind zusätzliche Prozessschritte wie z. B. das Richten von Profilen, die eine ungewollte Torsion aufweisen. Dies ist vor allem für Profile mit asymmetrischem Querschnitt von Relevanz.

In der Prozessführung führen vor allem das manuelle Vermessen des Profils, das Adaptieren des Prozesses in den Korrekturschleifen und das damit verbundene Handling des Profils zu hohen Nebenzeiten.

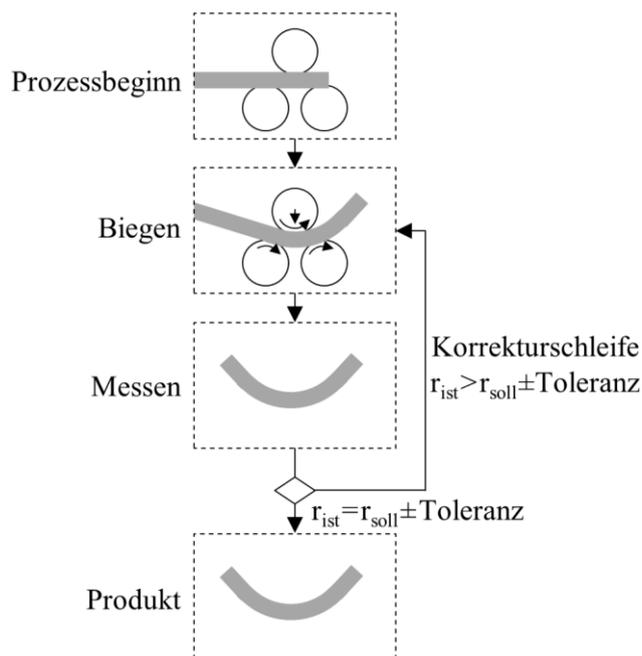


Bild 1: Prozessführung beim Drei-Rollen-Profilbiegen

Insbesondere bei großen Bauteilen mit Profillängen von bis zu 12 m können die Nebenzeiten auf bis zu 70% der Gesamtprozesszeit ansteigen. Dies resultiert vor allem aus dem gesteigerten Zeitaufwand für die manuelle Messung der Profilkontur.

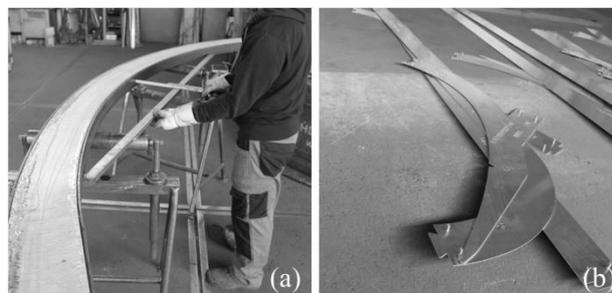


Bild 2: Messung der Profilkontur mit Sekanten- und Stichmaßen (a) und Schablonen (b)

Aufgrund des großen Einflusses von Schwankungen der Halbzeugeigenschaften auf den Prozess konnten sich Automatisierungslösungen nur bedingt in der

Industrie etablieren. Grund hierfür ist ein Mangel an industrietauglicher Messtechnik zur Erfassung der Profilgeometrie. Auf dem Markt verfügbare Automatisierungslösungen nutzen taktile Stützpunktverfahren zur Bestimmung des Biegeradius am Auslauf der Biegemaschine. Durch die Erfassung von drei Stützpunkten (oder mehr) auf der Profilloberfläche kann mit Hilfe der Kreisgleichung der Biegeradius berechnet werden.

Hierbei können Oberflächenbeschädigungen des Profils zu großen Abweichungen des ermittelten Radius führen. Ebenso besteht ein Zielkonflikt zwischen der Messung von großen Biegeradien und einem möglichst kleinen Abstand zwischen den äußeren Messpunkten. Mit zunehmendem Abstand der äußeren Messpunkte nimmt die Sekantenhöhe, die durch den mittleren Messpunkt erfasst wird zu, wodurch auch große Biegeradien mit einem beschränkten Messfehler gemessen werden können. Gegenläufig hierzu sinkt mit zunehmendem Abstand der äußeren Messpunkte die Eignung des Messverfahrens zur Erfassung von Radienverläufen. [5]

Der industrielle Standard zeigt, dass das Drei-Rollen-Profilbiegen im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren einen sehr niedrigen Automatisierungsgrad aufweist und der Trend aktueller Entwicklungen noch nicht angekommen ist.

An dieser Stelle setzt die Firma Herkules Wetzlar GmbH gemeinsam mit dem Institut für Produktions-

technik und Umformmaschinen (PtU) an. Durch den zum einen seit 1877 bestehenden Profilbiegemaschinenbau und zum anderen seit mehreren Jahrzehnten etablierten Bereich der Lohnfertigung für Serienanläufe und Sonderteile im Bereich des Profilbiegens verfolgt die Firma Herkules Wetzlar GmbH, im Vergleich zu anderen Herstellern, einen ganzheitlichen Ansatz mit einem praxisnahen Bezug zu aktuellen Problemstellungen. Dies bildet in Verbindung mit dem Forschungsspektrum des Partners PtU die Grundlage für eine umfassende Betrachtung über den reinen Prozess hinaus und damit eine lösungsorientierte Entwicklung von Prozessketten für den Markt. In Anbetracht der Herausforderungen für Unternehmen am Produktionsstandort Deutschland stellt sich in diesem Kontext die Frage nach den Möglichkeiten zu einer Erhöhung des Automatisierungsgrads für den Drei-Rollen-Profil-Biegeprozess und welcher Automatisierungsgrad erreichbar bzw. sinnvoll ist.

2 Automatisierungsstufen des Drei-Rollen-Profilbiegens

Für eine Bewertung des aktuellen industriellen Standards, einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungsschritte und das Ableiten des Handlungsbedarfs werden in diesem Abschnitt Automatisierungsstufen für den Drei-Rollen-Profilbiegeprozess vorgestellt. Groche et al. und Behrens et al. postulieren in [6,7] ein Stufenmodell für die Automatisierung von Produkti-

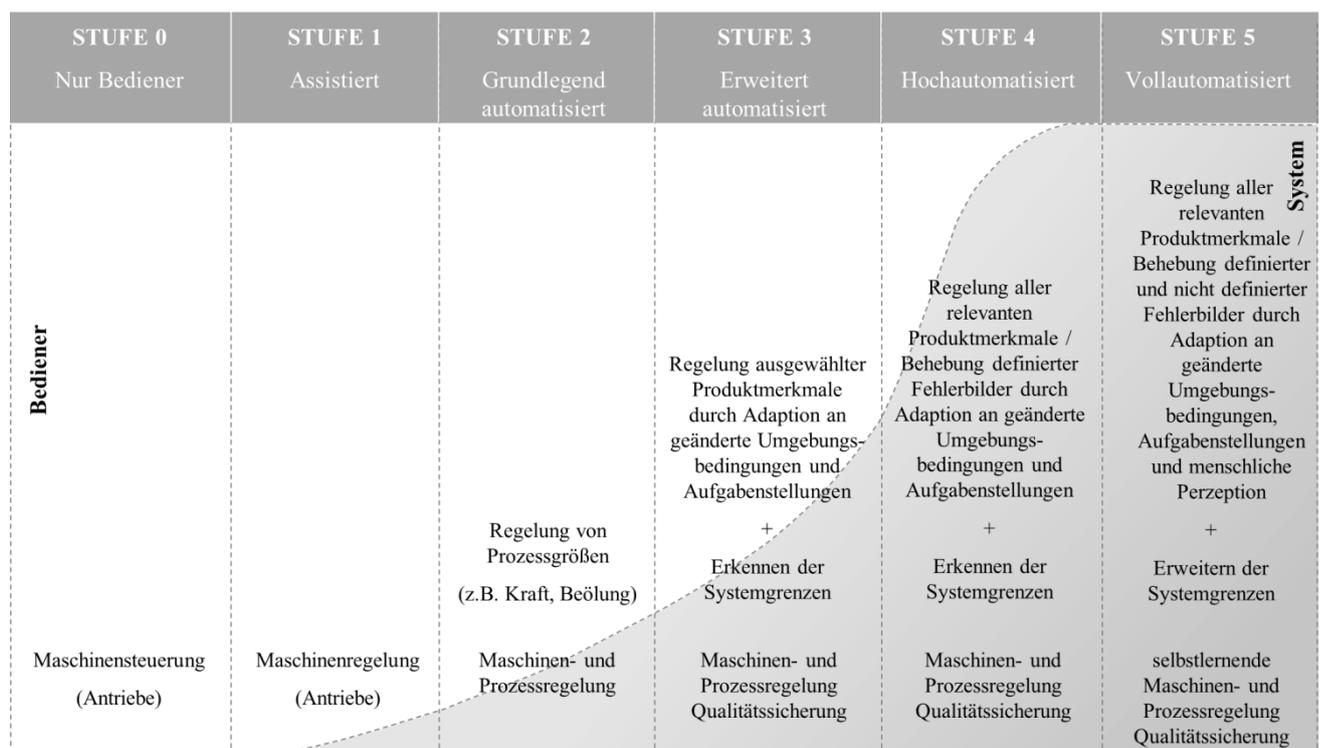


Bild 3: Automatisierungsstufen von Fertigungsprozessen [6,7]

onsprozessen (**Bild 3**). Hierbei werden in Abhängigkeit der Aufteilung der Aufgaben zwischen Mensch und Maschine (System) sechs Stufen der Automatisierung unterschieden.

Das Drei-Rollen-Profilbiegen und dessen industrieller Standard sind in diesem Modell in den Stufen 0 und 1 anzuordnen. Dies beinhaltet Biegemaschinen mit geordneten Antrieben und CNC-Steuerungen. Zur systematischen Analyse möglicher Maßnahmen zur Erhöhung des Automatisierungsgrads, der Ableitung des konkreten Handlungsbedarfs und einer Einordnung des aktuellen Stands der Forschung werden im Folgenden die Stufen 2 bis 5 in Anlehnung an das postulierte Modell für den Drei-Rollen-Profilbiegeprozess definiert.

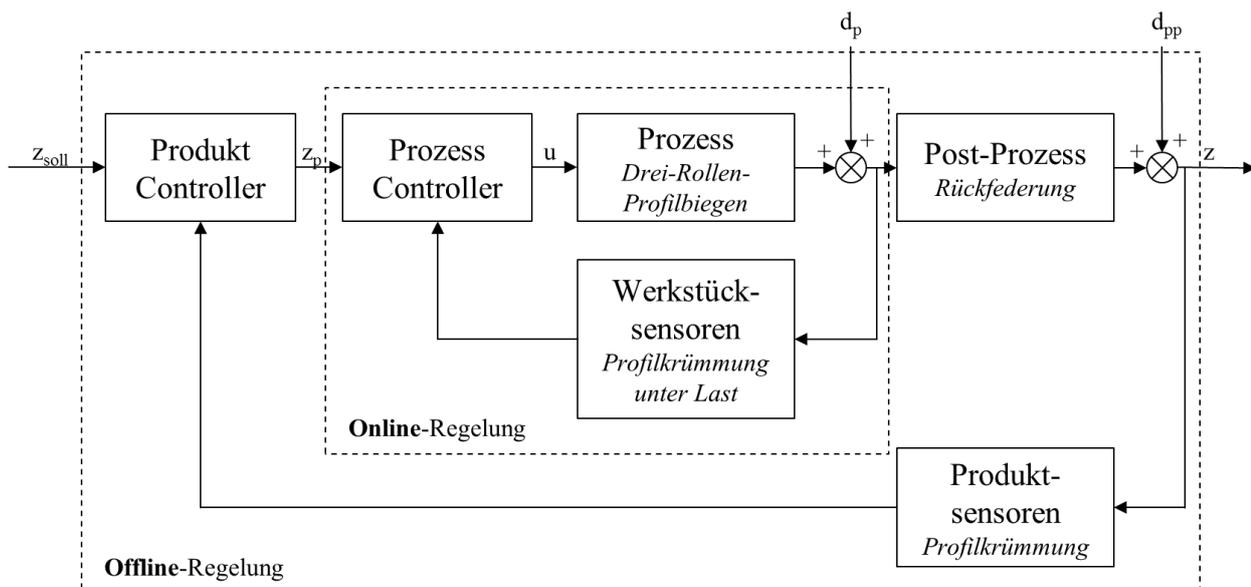
Auf Stufe 2 (**Bild 3**) ordnet das Modell Prozesse ein, in welchen eine Regelung von Prozessgrößen implementiert ist, wie z. B. die Regelung der Umformkraft in [8]. Aufgrund der vielfältigen Einfluss- und Störgrößen auf den Drei-Rollen-Profilbiegeprozess und der nicht werkzeuggebundenen Formgebung ist eine reine Regelung von Prozessgrößen ohne das Einbeziehen von messtechnisch erfassten Werkstück- oder Produktgrößen unzureichend und die im Modell beschriebene Stufe 2 somit nicht auf den Drei-Rollen-Profilbiegeprozess anwendbar. Alternativ hierzu wird Stufe 2 an dieser Stelle für den Drei-Rollen-Profilbiegeprozess neu definiert. Aus der beschriebenen iterativen Prozessführung (**Bild 1**) gehen das Messen der Profilgeometrie sowie das Adaptieren des

Prozesses als inhärent mit dem Prozess verknüpfte Aufgaben hervor. Im Kontext der hohen Nebenzeiten für diese Aufgaben werden in Stufe 2 für den Drei-Rollen-Profilbiegeprozess Messsysteme und digitale Assistenzsysteme eingeordnet, die das bedienende Personal in der Durchführung dieser Aufgaben unterstützen oder Teilaufgaben gänzlich übernehmen und somit zu einer Reduzierung der Nebenzeiten und Steigerung der Produktivität beitragen. Beispiele für diese Automatisierungsstufe sind automatische und halbautomatische Messsysteme zur Erfassung der Profilgeometrie und die Aufbereitung der Messdaten in Assistenzsystemen, die den Maschinenbediener beim Adaptieren des Prozesses unterstützen.

Als Biegemaschinen, die der Stufe 3 zuzuordnen sind, werden Anlagen mit einer Regelung des Biegeradius und somit der Profilkontur definiert. Das bedienende Personal überwacht den Prozess und die verbleibenden Produkteigenschaften (z. B. die Torsion des Profils) und greift korrigierend ein, wenn Abweichungen auftreten oder die Systemgrenzen der Regelung erreicht werden.

Eine solche Regelung des Biegeradius beim Drei-Rollen-Biegen wurde bereits in verschiedenen Forschungsarbeiten untersucht. Die hierbei verwendeten Ansätze sollen an dieser Stelle analysiert werden.

Nach Allwood et al. kann die Regelung von Produkteigenschaften in Umformprozessen in Online- und Offline-Regelungen unterschieden werden (**Bild 4**). In den dargestellten Regelkreisen sind Werk-



z_{soll}	Soll-Wert der Produkteigenschaft	z_p	modifizierter Referenzzustand	d_p	Störgröße (Prozess)
z	Ist-Wert der Produkteigenschaft	u	Stellgröße	d_{pp}	Störgröße (Post-Prozess)

Bild 4: Online- und Offline Regelung des Biegeradius bzw. der Profilkrümmung nach [9]

stücksensoren als Sensoren zu verstehen, die den Zustand des Produkts während des Umformprozesses erfassen, und Produktsensoren als solche, die den Zustand des Produkts nach einem dem eigentlichen Umformprozess nachgelagerten Post-Prozess erfassen. Hierbei bleibt der Offline-Produktsensor Bestandteil eines geschlossenen Regelkreises, insofern die zurückgeführten Produktparameter zur Regelung von folgenden Produkten genutzt werden können. Im Fall des Drei-Rollen-Profilbiegens ist es zusätzlich möglich, die zurückgeführten Produktparameter zur Regelung der in der Prozessführung vorgesehenen Korrekturbiegungen zu nutzen. [9]

Hardt et al. [10] und Yang et al. [11] verwenden eine Prozessregelung für das Drei-Rollen-Biegen, die auf einer Online-Regelung der Krümmung unter Last des Profils beruht (**Bild 4**). In beiden Regelungen dienen Modelle (empirisch und analytisch) des Post-Prozesses dazu die Rückfederung zu beschreiben und hierdurch die Krümmung des entlasteten Profils zu prognostizieren. Eine Einbeziehung dieser in Form eines zusätzlichen Offline-Regelkreises durch Produktsensoren findet nicht statt. Hierdurch können Störgrößen, die eine Beeinflussung der Rückfederung zur Folge haben (d_{pp}), nicht korrigiert werden. Modellungenauigkeiten und Schwankungen der Halbzeugeigenschaften führen somit zu einer ungenauen Prognose und hierdurch zu Abweichungen im Biegeergebnis.

Chatti stellt in [12] eine Offline-Regelung des Biegeradius vor. Hierbei wird mit einem halbanalytischen Simulationssystem anhand der Soll-Krümmung des entlasteten Profils die Krümmung unter Last und die dazu korrespondierende Zustellung der Mittelrolle berechnet. Anhand der im Prozess durch einen Produktsensor (taktile Krümmungssensor auf Basis eines Stützpunktverfahrens) erfassten Krümmung des entlasteten Profils wird die Regelabweichung bestimmt. Durch eine zur Regelabweichung korrespondierenden Adaption des im Simulationsmodell verwendeten Modells für die Rückfederung und eine in den Prozess integrierte Simulationsrechnung wird die Walzenzustellung korrigiert. Dieser Schritt wird wiederholt, falls nach dem Reglereingriff weiterhin eine Regelabweichung vorliegt. Ein Nachteil dieser Regelung ist die hohe Totzeit. Die von Chatti durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die Mindestprofillänge von etwa dem doppelten Achsabstand der Seitenrollen eingezogen werden muss, um die Auswirkung eines Reglereingriffs zu erfassen. Zudem ist eine Beeinflussung der entlasteten Profilkrümmung durch eine Korrekturbiegung nach deren Messung nicht für den vorgestellten Regler vorgesehen und wurde in den experimentellen Untersuchungen nicht

berücksichtigt. Somit können die durch den Produktsensor zurückgeführten Produktparameter zwar zur Regelung von folgenden, gleichen Produkten verwendet werden. Diese Vorgehensweise ist jedoch nur einsetzbar, wenn die Schwankungen der Halbzeugeigenschaften zwischen den Profilen sehr gering sind. Andernfalls ist mit hohen Ausschusszahlen zu rechnen.

Dirksen stellt in [5] eine Prozessregelung vor, die eine Kombination der Offline-Regelung von Chatti [12] und der Online-Regelung von Hardt et al. [10] darstellt. Zur Bestimmung der Krümmung unter Last kommt hierbei ein Triangulations-Laser zum Einsatz, der die Biegelinie in der Umformzone über Stützpunkte erfasst. Die Messung der Krümmung des entlasteten Profils am Auslauf der Maschine erfolgt durch einen taktilen Krümmungssensor auf Basis eines Stützpunktverfahrens. Des Weiteren wird das Biegemoment anhand der auf die Mittelrolle wirkenden Kraft im Prozess bestimmt, um Änderungen des Rückfederungsverhaltens des Profils zu detektieren und die Prädiktion des entlasteten Radius im Online-Regelkreis anzupassen. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigen gute Ergebnisse, jedoch wurden lediglich konstante Sollwertvorgaben verwendet. Nachteilig ist auch bei dieser Regelung, dass eine Anwendung auf Mehrfach- oder Korrekturbiegungen nicht vorgesehen ist und lediglich Einfachbiegungen unterstützt werden.

Als hochautomatisierte Biegemaschinen der Stufe 4 sind Anlagen anzusehen, die neben dem Biegeradius und der Profilkontur auch die Torsion von Profilen regeln. Profile mit asymmetrischen und offenen Querschnitten neigen dazu während des Drei-Rollen-Biegens zu tordieren. Zur Kompensation und Regelung der Torsion sind sowohl zusätzliche Sensorik als auch zusätzliche Aktorik erforderlich. Das bedienende Personal überwacht den Biegeprozess und greift korrigierend ein, falls die Systemgrenzen der Regelung erreicht werden.

Die höchste Automatisierungsstufe (Stufe 5) bilden vollautomatisierte Biegemaschinen die neben der Regelung der Profilkontur und der Torsion selbstlernend ihre Systemgrenzen erweitern.

In Anbetracht des aktuellen industriellen Standards, der aufgezeigten Defizite vorhandener Prozessregelungen und den Einschränkungen der auf dem Markt verfügbaren Messtechnik besteht ein hoher Entwicklungs- und Forschungsbedarf. Produktionsprozesse der Stufen 4 und 5 sind Gegenstand der aktuellen Forschung [7]. Für den Fall des Drei-Rollen-

Profilbiegens besteht hier zudem ein hoher Entwicklungsbedarf, um die Grundlagen für eine industrielle Umsetzung zu schaffen. Festzuhalten ist an dieser Stelle, dass gut ausgebildete Facharbeiter/-innen auch auf längere Sicht essentiell für eine qualitativ hochwertige und wirtschaftliche Fertigung im Bereich des Drei-Rollen-Profilbiegens sind. Um die Automatisierung in industriellen Prozessen auf die Stufen 2 und 3 zu etablieren und die Grundlagen für hoch- und vollautomatisierte Profilbiegeprozesse zu schaffen, lassen sich anhand der durchgeführten Analyse jedoch ein konkreter Handlungs- und Entwicklungsbedarf sowie Maßnahmen ableiten. Diese sind im Folgenden beschrieben.

3 Roadmap für die Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens

Grundlage für eine weiterführende Automatisierung des Drei-Rollen-Profilbiegens bildet, in Anlehnung an die vorgestellten Automatisierungsstufen, die Entwicklung industrietauglicher Messtechnik zur Erfassung der Profilkontur im und nach dem Prozess (Werkstück- und Produktsensoren). Um eine Automatisierung bei gleichbleibender Prozessflexibilität zu gewährleisten, ist hierbei sicherzustellen, dass kleine und große Biegeradien sowie Radienverläufe mit einem beschränkten Messfehler erfasst und somit die Profilkontur mit der industriell geforderten Genauigkeit gemessen werden kann.

Neben der Messtechnik, welche die Grundlage für die Automatisierungsstufe 2 ist, sind digitale Assistenzsysteme zur Unterstützung des Maschinenpersonals beim Einrichten und Adaptieren des Prozesses zu entwickeln. Hierzu sind die durch Produktsensoren erfassten Konturdaten aufzubereiten und dem bedienenden Personal zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich ist zur Erhaltung und Einbeziehung des empirischen Fachwissens erfahrener Mitarbeiter/-innen ein nachhaltiges Wissensmanagement anzustreben. Eine Möglichkeit dies zu gewährleisten, ist die Entwicklung von Datenbanken zur Archivierung und Bereitstellung von empirischem Fachwissen und der Produktionshistorie. Durch eine Aufbereitung und Einbindung der so geschaffenen Datenbasis in Assistenzsysteme kann das bedienende Personal bei der Prozessführung unterstützt und die Zeit für die Ausbildung neuer Fachkräfte verkürzt werden.

Zur Erreichung der dritten Automatisierungsstufe sind neue Prozessregelungen für den Biegeradius bzw. die Profilkontur zu entwickeln. Hierbei wird zwei Regelungskonzepten das größte Potential beigegeben. Zum einen sind dies Offline-Regelungen, die auch im Rahmen von Korrekturbiegungen anwendbar sind. Zum anderen sind dies Regelungen die sowohl über

einen Online- als auch einen Offline-Regelkreis verfügen. Auch hierbei ist die Anwendbarkeit der Regelung auf Korrekturbiegungen sicherzustellen.

4 Mobile Messvorrichtung zur Messung der Kontur gebogener Profile

Im Rahmen des durch LOEWE (Landes-Offensive zur Entwicklung wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz) geförderten KMU-Verbundprojekts „Konturvermessung beim Profilbiegen“ arbeitet die Herkules Wetzlar GmbH in Kooperation mit dem PtU an der Entwicklung neuer Messtechnik für das Drei-Rollen-Profilbiegen als Grundlage für eine weiterführende Prozessautomatisierung. Einer der Impulse, der dieses Projekt initiierte, war die gemeinsame Entwicklung einer mobilen Messvorrichtung, die im Rahmen eines Umsetzungsprojekts des „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrums Darmstadt“ prototypisch umgesetzt wurde.

Mit Hilfe des Prototyps der mobilen Messvorrichtung, der als Handmessgerät ausgeführt ist, kann durch ein einfaches, manuelles Abfahren des Profils die Profilkontur erfasst werden. Das dabei verfolgte Funktionsprinzip basiert auf der inkrementellen Messung der Bogenlänge Δb_i des Profils über ein Reibrad sowie der simultanen Messung des Tangentenwinkels $\Delta \alpha_i$ des Profils über ein Gyroskop. Der Tangentenwinkel wird hierbei über die Kontaktpunkte des Reibrads und der Rolle mit dem Profil definiert (**Bild 5**).

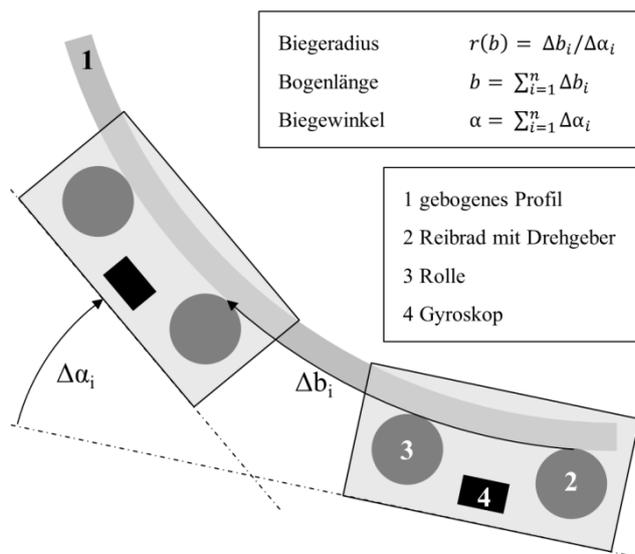


Bild 5: Funktionsprinzip der mobilen Messvorrichtung

Die gewonnenen Konturdaten dienen einerseits dazu, den Radius bzw. die Krümmung in Abhängigkeit der Bogenlänge des Profils zu ermitteln (**Bild 6**) und

andererseits dazu, die Profilkontur virtuell nachzubilden (**Bild 7** (a)). Durch einen virtuellen Soll-Ist-Abgleich der Profilkontur wird es hierdurch ermöglicht, Abweichungen anhand direkter Messgrößen, wie z.B. Sekanten- und Stichmaße, und indirekter Messgrößen, wie z. B. die Profilkrümmung (**Bild 6**), zu quantifizieren und zu lokalisieren.

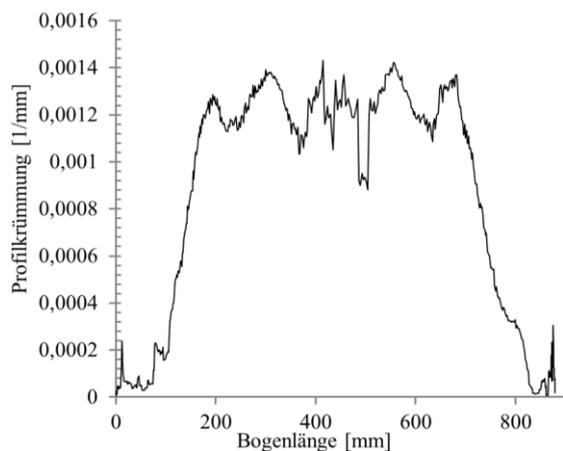
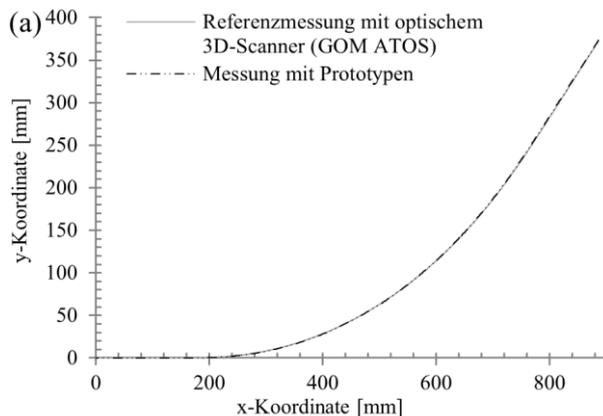


Bild 6: Mit mobiler Messvorrichtung erfasster Krümmungsverlauf eines gebogenen Profils

Erste Messungen mit dem Prototyp in der Fertigung der Herkules Wetzlar GmbH und unter Laborbedingungen am PtU zeigen vielversprechende Ergebnisse (**Bild 7**).



(b)

	Prototypen-messung	Referenz-messung	Abweichung
Biegewinkel [°]	45,85	46,09	0,25
Sekantenlänge [mm]	963,77	962,16	1,61
Stichmaß [mm]	136,63	135,77	0,86

Bild 7: Abgleich der Prototypmessung mit optischem 3D-Scanner: (a) digital rekonstruierte Profilkontur, (b) abgeleitete direkte Messgrößen

Ein Abgleich der Messergebnisse des Prototyps mit denen eines optischen 3D-Scanners weist sehr geringe Abweichungen auf. Dies spiegelt sich sowohl in den

aus den Messungen abgeleiteten direkten Messgrößen (**Bild 7** (b)) als auch in der absoluten Konturabweichung zwischen den Messungen wieder (**Bild 8**).

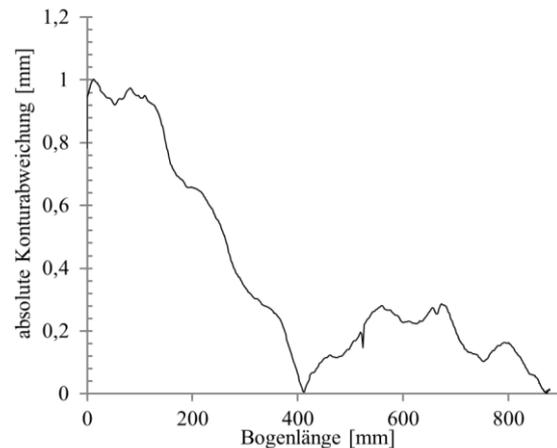


Bild 8: Abweichung der durch den Prototyp ermittelten Profilkontur zu Referenzmessung und Krümmungsverlauf

Die mobile Messvorrichtung hat das Potential, existierende Messmittel zu ersetzen. Vor allem für die Messung von komplexen Profilkonturen mittels Schablonen oder Lehren stellt sie eine wirtschaftliche Alternative dar. Des Weiteren ist eine Erweiterung des Prototyps zur Messung dreidimensional gekrümmter Profilkonturen möglich. In den gezeigten Untersuchungsergebnissen wird eine Achse des im Prototyp verbauten dreiachsigen Gyroskops für die Messung verwendet. Durch die Einbeziehung der beiden verbleibenden Gyroskopachsen kann eine Messung der Torsion und einer Biegung um die zweite Querschnittsachse des Profils realisiert werden. Dies ist Bestandteil zukünftiger Untersuchungen. Aufgrund der nicht maschinengebundenen Bauweise der Messvorrichtung ist zudem eine Anwendung auf andere Profilbiegeverfahren möglich. Im Rahmen des laufenden Projekts wird der bestehende Prototyp untersucht und weiterentwickelt. Ziel dieser Entwicklung ist es, durch eine Aufbereitung und Bereitstellung der gewonnenen Messdaten, das Maschinenpersonal in der Prozessführung zu unterstützen und die Nebenzeiten zu reduzieren. Zum aktuellen Zeitpunkt wird hierbei in Kombination mit Assistenzsystemen von einer Reduzierung der Nebenzeiten um bis zu 70 % ausgegangen. Des Weiteren kann durch die Digitalisierung der Messergebnisse zur Produktnachverfolgbarkeit im Sinne eines digitalen Produktpasses und einer Vernetzung der mobilen Messvorrichtung mit der Biegemaschine im Sinne einer Offline-Regelung beigetragen werden.

Neben der Weiterentwicklung des mobilen Messsystems ist die Entwicklung von industrietauglichen stationären Messsystemen und deren Einbindung in eine Prozessregelung Ziel des Projekts.

5 Zusammenfassung

Anhand der durchgeführten Analyse des industriellen Standards und der Definition von Automatisierungsstufen konnten im Rahmen dieses Beitrags der Handlungs- und Entwicklungsbedarfs zur Erhöhung des Automatisierungsgrads von Drei-Rollen-Profilbiegeprozessen abgeleitet und eine Roadmap für zukünftige Entwicklungen erstellt werden. Die darin vorgestellte Vorgehensweise kann mit Einschränkungen auch auf andere kinematische Profilbiegeverfahren angewendet werden. Bei erfolgreicher Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen kann der Produktionsstandort Deutschland für das Profilbiegen nachhaltig gesichert werden. Die vorgestellten Ergebnisse erster Entwicklungen hierzu und die hierdurch zu erwartende Steigerung der Wirtschaftlichkeit unterstreichen das Potential einer Erhöhung des Automatisierungsgrads.

Danksagung

Das Projekt „Konturvermessung beim Profilbiegen“ (HA-Projekt-Nr.: 632/18-55) wird im Rahmen von Hessen Modellprojekte aus Mitteln der LOEWE – Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz, Förderlinie 3: KMU-Verbundvorhaben gefördert.

Literatur

- [1] Yang H., Li Heng, Zhang Zhiyong, Zhan Mei, Lliu Jing, Li Guangjun: Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies, Chinese Journal of Aeronautics 25 (2012) 1-12, 2012
- [2] Chatti S.: Production of Profiles for Lightweight Structures, Habilitation Thesis, University of Franche Comté, Books on Demand GmbH, Deutschland, 2006
- [3] Yang D. Y., Bambach M., Cao J., Duflou J. R., Groche P., Kuboki T., Sterzing A., Tekkaya A. E., Lee C. W.: Flexibility in metal forming, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2018
- [4] Groche P., Kessler T., Huttel D.: Online-Konturvermessung beim Profilbiegen, Werkstattstechnik online Jahrgang 107 (2017) H. 11/12, Springer VDI Verlag, 2017
- [5] Dirksen U.: Testumgebung für Prozessregelungen zum Drei-Rollen-Profilbiegen mit virtuellem und realem Biegeprozess, Dissertation, TU Dortmund, Shaker Verlag, Aachen, 2008
- [6] Groche P., Hoppe F., Kessler T., Kleemann A.: Industrial Working Environment 2025, in: New Developments in Sheet Metal Forming, Stuttgart, S. 125-136, 2018
- [7] Behrens B.-A., Groche P., Krüger J., Wulfsberg J.P.: WGP-Standpunkt Industriearbeitsplatz 2025, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik, 2018
- [8] Groche P., Heß B.: Friction control for accurate cold forged parts, in: CIRP Annals – Manufacturing Technology 63, S. 285-288, 2014
- [9] Allwood J.M., Duncan S.R., Cao J., Groche P., Hirt G., Kinsey B., Kuboki T., Liewald M., Sterzing A., Tekkaya A.E.: Closed-loop control of product properties in metal forming, CIRP Annals – Manufacturing Technology 65, S. 573-596, 2016
- [10] Hardt D.E., Roberts M.A., Stelson K.A.: Closed-Loop Shape Control of a Roll-Bending Process, in: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 104/317, 1982
- [11] Yang M., Shima S., Watanabe T.: Model-based Control for Three-Roll Bending of Channel Bar, in: Journal of Engineering for Industry 112, Nr. 11, S. 345-351, 1990
- [12] Chatti S.: Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen, Dissertation, TU Dortmund, 1998





Cyberphysisches Rüsten und smarte Prozesse beim Rotationszugbiegen

Dr.-Ing. Christopher Kuhnhen, Linda Schulte, M. Eng., Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel,
Michael Schiller, M. Sc.,
Siegen,
Universität Siegen, Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät,
Institut für Produktionstechnik, Lehrstuhl für Umformtechnik

Das Potential von Industrie 4.0 ermöglicht zunehmend komplexer werdende industrielle Prozesse, um die Realisierung von stetig höheren Produktanforderungen auch zukünftig gewährleisten zu können. Richtig angewendet verbindet und ergänzt sie die menschliche Leistungsfähigkeit mit Maschinenprozessen. Darüber hinaus bietet sie die Möglichkeit Produkte bei skalierbaren Fertigungsverfahren bis zum Zeitpunkt des Rüstens zu individualisieren.

Dabei können definierte Bauteileigenschaften lediglich durch die Beherrschung des Prozesses und einer autonomen Prozessführung erreicht werden, da Schwankungsgrößen wie Halbzeugeigenschaften, Werkzeug- und Maschinenverschleiß erfasst und ausgegletzt werden müssen.

Neben den Schwankungsgrößen sind beim Rotationszugbiegen insbesondere die Positionierung der bis zu sieben Werkzeuge maßgeblich für einen fehlerfreien Prozess. Im industriellen Arbeitsumfeld benötigt ein Werker an einer Rotationszugbiegemaschine aufgrund der Komplexität technische Hilfsmittel zur Beherrschung der Produktion.

Hierzu müssen die Prozesse und deren zur Beherrschung erforderlichen Hilfsmittel mit dem Menschen und nicht an diesem vorbei erforscht und entwickelt werden. Das Projekt Cyberrüsten 4.0 hat diese Visionen zum Ziel. Dazu erfolgt in der Umsetzung die Verkürzung der Rüstzeit durch ein Tool, welches dem Maschinenbediener als eine Art Navigationssystem zur Verfügung steht und diesen so durch den Rüstprozess strukturiert leitet. Das Navigationssystem nutzt zur Visualisierung die Microsoft HoloLens, welche als Handsfree-Tool dient und dem Maschinenbediener den Rüstvorgang und die notwendigen Handhabungsschritte ohne Einschränkungen ermöglicht. Gleichfalls kann mittels smarterer Biegewerkzeuge eine Rückmeldung an den Maschinenbediener erfolgen. Es entstehen somit hybride Kollaborationen zwischen Mensch, Maschine und Prozess sowie letztendlich auch dem qualitätsinhärenten Bauteil.

Cyber Physical setup and smart processes in rotary draw bending

Industry 4.0 calls for increasingly complex industrial processes. Thus, the realization of ever-higher product requirements can be guaranteed in the future. Used correctly, it combines and complements human performance with machine processes. Furthermore, it offers the possibility of individualizing products in scalable manufacturing processes up to the time of set-up.

Defined component properties can only be achieved by mastering the process and autonomous process control due to the fluctuation variables such as semi-finished product properties, tool and machine wear must be recorded and controlled.

In addition to the fluctuation variables, the positioning of up to seven tools is particularly important for a flawless process in rotary draw bending. The complexity of industrial working conditions for rotary draw bending also requires technical aids helping the user to work with it.

For this purpose, the processes and their tools required for the control must be researched and developed with humans work and not past them. The research project Cyber-Equipping aims for these visions. For this reason, the shortening of set-up time takes place in the implementation by means of a tool, which is available to the machine operator as a kind of navigation system and guides the operator through the set-up process in a structured manner. The navigation system uses Microsoft HoloLens for visualization. It thus serves as a hands-free tool for the machine operator, which can thus enable the set-up process and the necessary handling steps without restrictions. Likewise, feedback can be sent to the machine operator by means of smart bending tools. This results in hybrid collaborations between man, machine, and process as well as ultimately in the quality-inherent component.

Einleitung

Die Erweiterung der Antriebskonzepte in der Automobilindustrie bedingen zunehmend kleiner werdende Losgrößen. Aufgrund der Kundenansprüche nach Variantenvielfalt und unterschiedlichen Fahrzeuggattungen wird die Produktindividualisierung steigen. Diesem Anspruch wurde bisher nahezu unter Beibehaltung der umformtechnischen Möglichkeiten und mit konstruktiven und organisatorischen Mitteln begegnet. Dabei wurden Konzepte in Form von Gleichteilekonstruktion, verschiedenen Plattformstrategien und Modulbauweisen verfolgt. Eine Weiterentwicklung von Umformverfahren hinsichtlich einer Flexibilität in Form von skalierbaren Fertigungsverfahren hat bisher in den Presswerken kaum stattgefunden. Die Skalierbarkeit bezieht sich auf eine Variabilität hinsichtlich:

- Werkstoff
- Halbzeugdicke
- Bauteilgeometrie
- Stückzahl

Die Anwendung von Profilen und Profillumformverfahren bietet die Möglichkeit die Forderungen nach skalierbaren Fertigungsverfahren zu erfüllen.

1 Rotationszugbiegen

Eine Verfahrensvariante des Profilbiegens ist das Rotationszugbiegen (*RZB*).

Hierbei handelt es sich um ein Umformverfahren, bei dem ein Profil unter Einleitung eines Momentes gebogen wird (Bild 1.1).

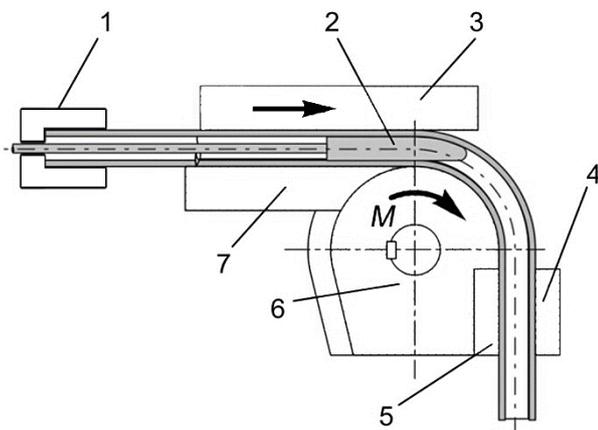


Bild 1.1: Werkzeuge des Rotationszugbiegeprozesses [1]

Das ungebogene Profil wird im Spannhalter (1, siehe Bild 1.1) fixiert und zwischen innerer (5) und äußerer Spannbacke (4) geklemmt. Während des Biegeprozesses

wird das Profil in der Kavität der Biegeform (6) gebogen. Der Faltenglätter (7) vermeidet in Verbindung mit dem Biegedorn (2) die Faltenentstehung am Profillinienbogen. Der Biegedorn wirkt zudem der Querschnittsdeformation des Profilquerschnittes entgegen. Der Gegenhalter (3) dient während des Biegeprozesses als Widerlager und der Führung des Profils.

Somit müssen bis zu sieben Werkzeuge gerüstet werden (Bild 1.2).

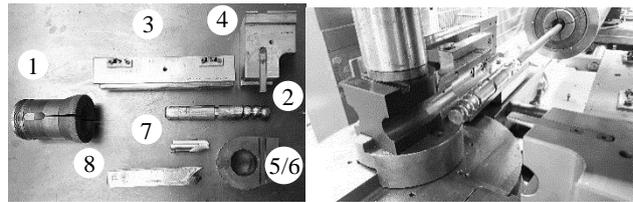


Bild 1.2: Biegewerkzeugsatz

1- Spannhalter, 2- Dorn, 3- Gegenhalter, 4- Spannbacke außen, 5/6- Biegeform inklusive innerer Spannbacke, 7- Faltenglätter, 8- Halter für Faltenglätter

Das Rotationszugbiegen ist aus einer Werkstatttechnik entstanden und an die Bedarfe der Serienfertigung angepasst worden. Die Erweiterung der Anwendbarkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Wiederholgenauigkeit wurde insbesondere durch speicherprogrammierbare Steuerungen und den Anbau von Zusatzelementen wie Faltenglätter und ansteuerbarem Gegenhalter erreicht.

Dadurch wurden die heute eingesetzten Maschinen zu einem Standard entwickelt, mit dem es möglich ist, komplexe Biegegeometrien bei Rohren und Profilen auch in hochautomatisierten Linien herzustellen.

Bei Rohren wird die Biegeaufgabe durch den sog. Biegefaktor beschrieben,

$$B = \frac{R}{d_0} \quad (1)$$

wobei R für den Biegeradius bis zur Schwerpunktsachse des Rohres und d_0 für den Durchmesser des Rohres steht. Das Wanddickenverhältnis W beschreibt die dimensionslose Rohrgeometrie,

$$W = \frac{d_0}{s_0} \quad (2)$$

dabei steht s_0 für die Wanddicke des Rohres.

Die Komplexität der Biegeaufgabe steigt dabei mit kleiner werdendem Biegefaktor und steigendem Wanddickenfaktor (Bild 1.3). Zudem zeigt Bild 1.3 die Verfahrensgrenzen, die sich durch die Auswahl eines Dornes ergeben. Bei dem Einsatz eines Gliederdornes ist die Verwendung eines Faltenglätters zur Kraftübertragung nötig.

Da bei großen Wanddickenfaktoren und kleinen Biegefaktoren das Faltenrisiko hoch ist, ist insbeson-

dere bei diesen Biegeaufgaben ein Biegen ohne Falten-glätter nicht möglich.

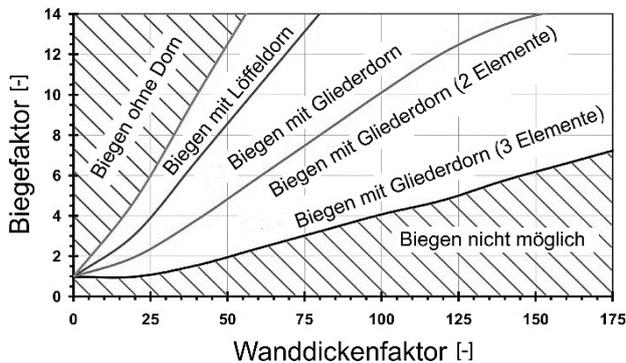


Bild 1.3: Biegediagramm des RZB [2]

Die Grenzen beim Rotationszugbiegen zeigen sich durch Risse am Außenbogen und Faltenbildung am Innenbogen. Der Riss am Außenbogen führt zum Prozessabbruch und Bauteilausschuss. Zur Bewertung der Risswahrscheinlichkeit wird die Dehnung der Randfaser am Außenbogen herangezogen. Dabei sollte als erste Abschätzung die Grenzdehnung ϵ_{Grenz} , vorgegeben durch den Biegefaktor, kleiner als die Gleichmaßdehnung A_G des Werkstoffes des Rohr- oder Profilhalbzeuges sein.

$$\epsilon_{Grenz} = \frac{d_0}{R} \cdot \frac{1}{2} \leq A_G \quad (3)$$

Bild 1.4 zeigt die Risseintrittsgrenze, abhängig von dem Biegefaktor und der Gleichmaßdehnung.

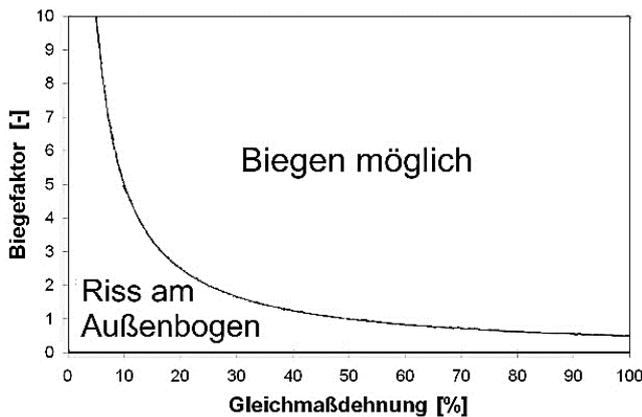


Bild 1.4: Risseintrittsgrenze beim RZB [3]

Die Formel (3) dient lediglich als erste Abschätzung des Risses, da sich die Dehnungspfade im Formänderungsdiagramm bei kleinen Biegefaktoren $B \leq 1$ ähnlich einer ebenen Formänderung verhalten, während die Dehnungspfade bei größeren Biegefaktoren $B \geq 3$ dem einachsigen Zugversuch ähneln [3].

Die analytische Bestimmung des Falteintritts ist ohne empirische Ermittlung von Korrekturfaktoren noch nicht möglich. Praktische Versuche zur Validierung der existierenden Berechnungsformeln streuen

sehr stark, da schon die geringste Vorbeule ausreicht, um das Rohr aus dem sog. vorkritischen Zustand in den ausgebeulten Zustand zu überführen [4, 5]. FE-Simulationen machen eine erste Abschätzung der Faltenbildung möglich.

Biegeprozesse sind im Vorfeld sicher auslegbar gegen Rissbildung. Die Prozessauslegung gegen Faltenbildung stellt sich ungleich schwieriger dar, weil eine ganze Reihe von Einflussfaktoren für dieses Fehlerbild verantwortlich sind (Bild 1.5).

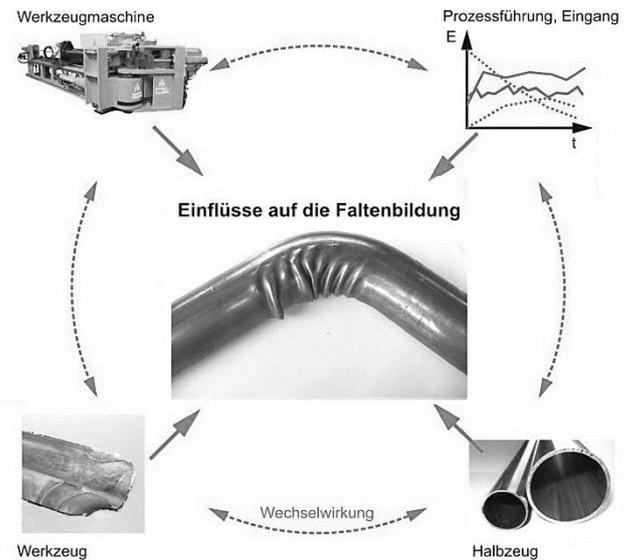


Bild 1.5: Haupteinflussgrößen auf die Faltenbildung beim RZB [6]

Dabei lassen sich die Einflüsse in die Bereiche Halbzeug, Werkzeug und Maschine sowie Prozessregelung unterteilen.

Neben der Positionierung der Einzelkomponenten kommt dem Ausrichten des Faltenglätters und des Gegenhalters eine besondere Bedeutung zu, da die sich im Prozess einstellende Kraftübertragung zwischen Gegenhalter, Rohr und Faltenglätter maßgeblich die Faltenhöhe beeinflusst.

Weitere prozessbeeinflussende Größen sind Aufbiegungen des Werkzeuges und der Maschine, daher ist die Steifigkeit eines jeden Werkzeuges und jeder Maschinenachse von großer Bedeutung.

Die Schwankungen, denen ein Biegeprozess unterliegt, wirken sich negativ auf die Biegebauteilqualität aus. Je robuster der Prozess gegenüber seinen Einflussfaktoren gestaltet werden kann, desto reproduzierbarer können die Qualitätskriterien des Biegebauteils eingehalten werden. Aufgrund der an die Produktgeometrie gebundenen Werkzeugkonturen und der sich einstellenden Hebelarme zur Kraftübertragung lösen nur kleine Positionsabweichungen im Rotationszugbiegeprozess umso größere geometrische Abweichungen am Rohr- oder Profilbogen aus,

die eine Erhöhung der Toleranzspanne am Endbauteil verursachen. Bauteile, die aus mehreren Bögen bestehen, unterliegen besonders großen Toleranzen, da sich die Maßabweichungen der Einzelbögen von Bauteil-anfang zu Bauteilende zu einer Gesamtabweichung aufsummieren.

Die Biegebranche ist vornehmlich in der mittelständischen Unternehmenskultur beheimatet und weist als Erfolgsmerkmal ein hohes Maß an Expertenwissen auf. Das Expertenwissen wird durch erfahrene Mitarbeiter zum Einstellen der Prozesse eingebracht. Dieses Expertenwissen stellt gleichfalls ein hohes Risikopotenzial bereit. Sofern ein Mitarbeiter ausfällt, ist das Expertenwissen in der Regel nicht so einfach abrufbar. Dies führt bei komplizierten Einstellvorgängen oftmals zu einem stark ansteigenden Rüstaufwand. Durch die oft nur von „Experten“ nach jahrelangem Trial and Error zu stabilisierenden Prozesse sind keine Methode, um wiederholgenau komplexe Biegebauteile mit extremen Anforderungen an Wanddicke und Biegegeometrie in den Markt zu bringen.

Das Forschungsprojekt „Cyberrüsten 4.0 - Cyberphysische Unterstützung des Menschen beim Rüstvorgang am Beispiel eines Biegeprozesses zur Kleinserienfertigung auf Basis eines Wissenstransferansatzes“ hat zum Ziel den Bediener beim Einstellen der Maschine aktiv mittels eines cyberphysischen Systems (CPS) zu unterstützen. Dadurch wird eine Methode entwickelt, die den Biegevorgang in einen stabilen Prozess überführt, bei dem geometrisch maßhaltige Bauteile wiederholgenau und robust gegenüber den Versagensarten, insbesondere der Faltenbildung, produziert werden können. Zur Steigerung der Prozessstabilität sind verschiedene Maßnahmen zu treffen. Zum einen beeinflusst der durchgeführte Rüstvorgang den Biegeprozess entscheidend. Ist dieser erfolgreich durchgeführt und geprüft worden, kann die korrekte Positionierung der Werkzeuge und Einstellung der Prozessparameter gewährleistet werden.

Kommt es zu Steifigkeitsschwankungen an Werkzeugen oder Maschinenachsen, können einzelne Werkzeuge in ihren Prozessparametern, wie Kontaktkräften und Anstellwegen, nachgestellt werden und einer Aufbiegung entgegenwirken.

Für einen stabilen Prozess müssen die Halbzeuginformationen, wie Geometrietoleranzen und Werkstoffeigenschaften, vorliegen. Dazu wird im Sinne der Industrie 4.0 eine Datenkette zwischen Qualitätskontrolle des Halbzeuges und der Biegemaschine hergestellt, die die benötigten Informationen durch Echtzeitübertragung zur Einrichtung des Prozesses bereitstellt.

Während des Biegeprozesses können zudem Schwankungen im Umformverhalten des Biegebauteils auftre-

ten. Auf derartige Schwankungen kann durch eine In-Line-Regelung reagiert werden. Die Rückfederung

eines Rohrbogens wird beispielsweise analytisch bestimmt und durch eine korrigierte Winkeleinstellung in der Steuerung kompensiert, aber Einflüsse, wie Temperatur, Geschwindigkeit und Werkstoffverfestigung, verändern die Rückfederung während des Prozesses. Um dieser Prozessschwankung entgegenzuwirken, kann durch das Herauspeichern einzelner Prozessparameter auf das aktuell vorliegende Rückfederungsverhalten des Biegebauteils zurückgeschlossen werden und eine angepasste Winkelposition der Biegeachse zurück an die Steuerung gegeben werden. Diese Form der In-Line-Regelung ermöglicht ein Kompensieren von Prozessschwankungen bereits während des Biegevorgangs.

2 Einteilung des Rüstvorgangs

Der Rüstprozess kann in einen statischen und einen dynamischen Anteil untergliedert werden. Diese Betrachtungsweise basiert auf den im Projekt getätigten Voruntersuchungen des Biegeprozesses. Hierbei wurden die Mitarbeiter mittels der Eye-Tracking-Brille *Tobii-Pro* sowie einer externen Kamera beim Rüsten und Einrichten der Biegemaschine beobachtet als auch im Anschluss zu ihrer Handlungsweise und dem Vorgehen interviewt. Es hat sich herausgestellt, dass der Rüstvorgang, weitestgehend unabhängig von der Maschine, bei der Montage der Werkzeuge einen stetigen, d. h. direkt vergleichbaren Charakter aufweist. Erst ab dem Beladen und dem anschließenden Programmieren der Produktionsmaschine führen die maschinen- und steuerungsspezifischen Besonderheiten der jeweiligen Maschinen zu signifikanten Unterschieden.

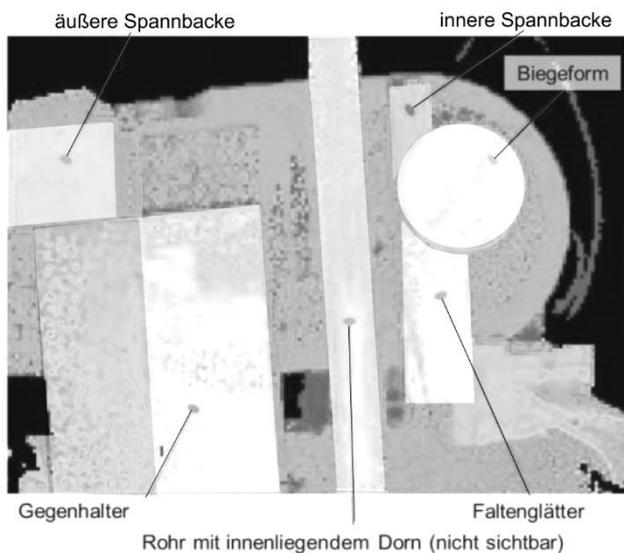


Bild 2.3: 3D-Information zur Werkzeugpositionierung [7]

Die Werkzeuge werden zusätzlich zur Kontur durch die Tiefeninformation der Kamera unterschieden, indem die Höhe der Werkzeuge mit einer Genauigkeit von ± 7 mm gemessen und den Werkzeugen zugeordnet wird.

Bei akut geänderten Anforderungen kann der Bediener von der aktuellen Situation an der Maschine ein Foto oder ein Video zur Dokumentation in das CPS einspielen. Dieses kann wiederum für nachfolgende Rüstoperationen, insbesondere solche die von anderen Mitarbeitern ausgeführt werden, genutzt werden.

2.2 Dynamischer Teil – Dynamic-Expert-Module (DEM)

Der dynamische Teil des Rüstvorgangs startet mit dem Laden des jeweiligen artikelspezifischen Programms nach der letzten Montageoperation der Werkzeuge an der Maschine. Auf Basis von Vergangenheitsdaten, wie beispielsweise für die Prozessauslegung durchgeführte FE-Simulationen oder vormals eingestellte Parameterkombinationen, wird ein Case Based Reasoning (CBR) durchgeführt. Dieses CBR vergleicht beispielsweise bei einer außerhalb der Toleranz aufgetretenen Abweichung der am Bauteil festgelegten Qualitätsmerkmale, welche Einstellungen in der Vergangenheit durchgeführt wurden, um die Abweichungen zu beseitigen. Hierbei werden durch den Algorithmus relevante Ähnlichkeitsmerkmale untersucht und die Kombinationen gewählt, die eine höchstmögliche Abstellwahrscheinlichkeit bieten werden. Ursächlich hierfür ist die „grundlegende Annahme beim CBR [...], dass bei zwei ähnlichen Fällen, wahrscheinlich auch ihre Problemlösung ähnlich ist“ [8], S. 4. Hierzu kann eine Fallunterscheidung nach

dem erfolgreich durchgeführten Suchalgorithmus durchgeführt werden. Die Unterscheidung basiert auf drei Fällen:

1. eine Lösung, welcher der Anfrage am nächsten kommt
2. mehrere Lösungen, welche sehr nahe an der Anfrage sind
3. alle Lösungen, welche einen minimalen Ähnlichkeitswert aufweisen [8], S. 8.

Nach Übernahme der Parametervorschläge, der Plausibilitätsprüfung durch den Maschinenbediener und einer durchgeführten Biegung wird das Bauteil durch den Maschinenbediener einer Qualitätskontrolle unterzogen. Das Ergebnis dieser Qualitätskontrolle wird dabei als Erfolgswahrscheinlichkeit in das System zurückgespielt. Somit ist ein geschlossener Regelkreis gegeben, welcher darüber hinaus selbstlernend ist und sich kontinuierlich verbessert.

3 Mensch-Maschine Interaktion

Unter dem Begriff Mensch-Maschine Interaktion versteht man die Schnittstelle zwischen der Maschine und dessen Bediener. Bei einer Produktionsmaschine ist dies in der Regel das Bedienpanel. Im Zuge des Projektes Cyberrüsten wird diese Schnittstelle um zusätzliche externe Steuerungseinheiten erweitert, welche mittels OPC UA Schnittstelle mit der Produktionsmaschine kommunizieren. Nach [9], S. 409 ist es möglich „einen schnellen und komfortablen Zugriff auf Prozessdaten in SIMATIC S7-Steuerungen“ zu erhalten.

4 Smarte Prozesse

Im digitalen Wandel können durch die Entwicklung von intelligenten Fertigungsverfahren, also smarten Prozessen, höhere Produktivität und Effizienz in der industriellen Fertigung erzielt werden. Es wird eine Produktionsumgebung angestrebt in der sich Fertigungsanlagen selbst steuern oder durch intelligente Werkstücke gesteuert werden. Hierüber wird auch die Möglichkeit zur Adaption von Produktionsprozessen an individuelle und individualisierbare Produkte in Form von smarten Prozessen eröffnet. Das Potenzial von Industrie 4.0 bietet die Möglichkeit Produkte bis zum Zeitpunkt des Rüstens oder bei skalierbaren Fertigungsverfahren sogar in Form von „Losgröße eins“ zu individualisieren.

Für industrielle Prozesse ist eine solche Produktion nur dann erfolgreich, wenn die heute typischen Verzögerungen bei Geometrieänderungen deutlich reduziert werden können. Bei Betrachtung heutiger Produktentstehungsprozesse sind trotz Simultaneous

Engineering Haltepunkte notwendig, ab denen eine neue Produktentstehungsphase stattfinden kann (siehe Bild 4.1).

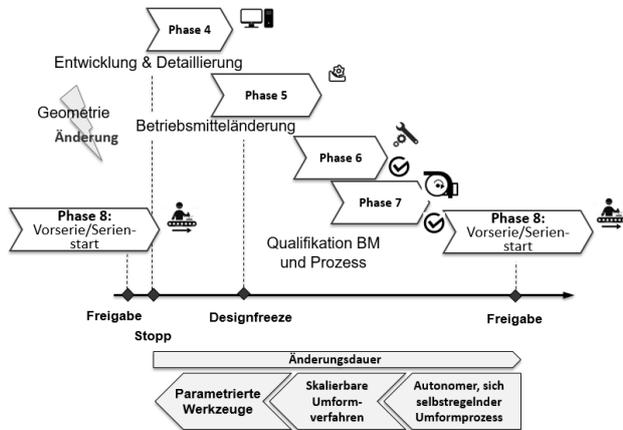


Bild 4.1: Änderungen im Produktentstehungsprozess

Tritt in einem klassischen Prozess eine Geometrieänderung auf, so muss an erster Stelle die Produktion sofort gestoppt werden. Dieser Stopp erfolgt solange, bis neue Betriebsmittel, Prozesse und Qualitätssicherungsmethoden implementiert und erprobt sind.

Die Fertigung von Einzelbauteilen unter dem Anspruch der Serienproduktion bedeutet im strengen Sinn eine permanente Änderung, die folgerichtig auch eine immer wiederkehrende Verzögerung und einen Stillstand der Produktionslinie bedeutet. Um diese Verzögerungszeit zu minimieren oder gar zu eliminieren sind folgende Maßnahmen notwendig:

- Einsatz skalierbarer Umformverfahren
- Parametrisierung in der Konstruktion von Produkten
- Parametrisierung in der Konstruktion von Betriebsmitteln
- CAD-CAM Modul für Umformachsen
- Autonom, sich selbst regelnder Umformprozess

Im Gegensatz zur zerspanenden Formgebung, ist das Vorhandensein und die Nutzung von CAD-CAM-Schnittstellen kein Standard. Die sehr starke Individualisierung von Steuerungen und hier insbesondere die Gestaltung von HMI macht es oft sehr schwer, CAM-Schnittstellen zu implementieren.

Eine weitere Schwierigkeit stellt in der Umformtechnik die Parametrisierung geometrischer Merkmale und die darauf aufbauende Logik zur Achssteuerung im Umformprozess dar.

Für das Rotationzugbiegen sind geometrische Bauteilbeschreibungen durch die Mittelachse und der Bezug zu den Achsbewegungen definiert und normiert (VDI 3430). Demnach wird beim RZB der Biegeverlauf in einer sog. Biegetabelle beschrieben (siehe Bild 4.2).

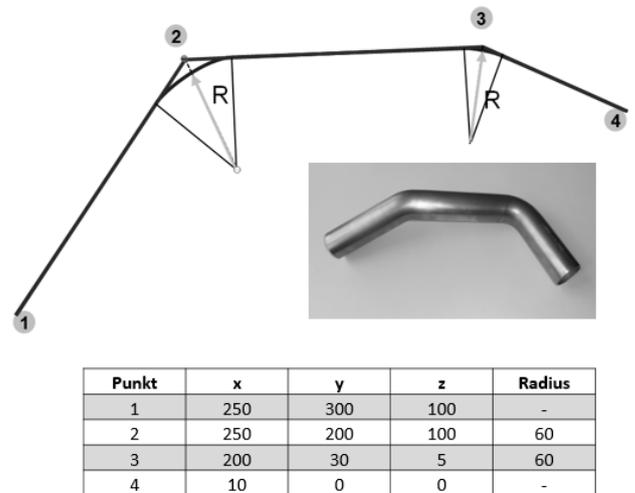


Bild 4.2: Beispiel für eine Biegelinie und Biegetabelle

Grundsätzlich lässt sich ein Biegebauteil aus einer Aneinanderreihung von Bögen und Zylindern zusammensetzen. Die Mittellinie beschreibt entsprechend den Grundbausteinen Bogen und Zylinder eine Aneinanderreihung von Kreissegmenten und Geraden.

Um an Biegegeometrien leicht Änderungen vornehmen zu können, wird für die Bemaßung gerne die Polygonlinie verwendet. Die Polygonlinie verbindet die geraden Abschnitte bis zu ihrem Schnittpunkt.

Die Biegetabelle bezeichnet in der ersten Spalte die Punktnummer, es folgen die Koordinaten der End- und Schnittpunkte in X;Y;Z Koordinaten. Die letzte Spalte bezeichnet den am Schnittpunkt beabsichtigten Radius. Aus dieser Tabelle können alle erforderlichen Informationen für den Prozess abgeleitet werden. Insbesondere werden aus der Biegetabelle die entsprechenden Sollvorgaben für den Rohrvorschub und den Biegewinkel direkt berechnet. Damit ist es möglich Geometrieänderungen über die Schnittpunkte zu generieren, wonach sich direkt gekoppelt die Achsdaten berechnen lassen.

Für einen erfolgreichen Biegevorgang sind außerdem die Rückfederung aus dem Prozess sowie die Maschinen- und Werkzeugeinflüsse zu berücksichtigen. Sehr oft geschieht dies aus Historiendaten und iterativen Anpassungen der Prozessparameter.

Um diese Einstellarbeiten mit folgendem Ausschuss zu vermeiden, ist es erforderlich an dieser Stelle einen sich selbst regelnden Umformprozess zu implementieren. Beim Biegen beinhaltet dieses Modul

- die inline Rückfederungskompensation
- statistische Erfassung und Berücksichtigung von Schwankungsgrößen
- Kompensation der Werkzeug- und Maschinenbewegungen

Um die Potenziale eines smarten Prozesses zu veranschaulichen, wird eine Demonstrations-Anwendung zur Fertigung eines individualisierbaren Biegebauteils mittels Freiformbiegen entwickelt. Das Ziel hierbei ist der Nachweis einer Prozesskette, in der der Kunde bis in die Produktion eingreift. Dazu wurde als Demonstrationsprodukt ein individualisierbarer Freischwinger-Stuhl gewählt, um einen kundenspezifischen Bezug herzustellen (siehe Bild 4.3).

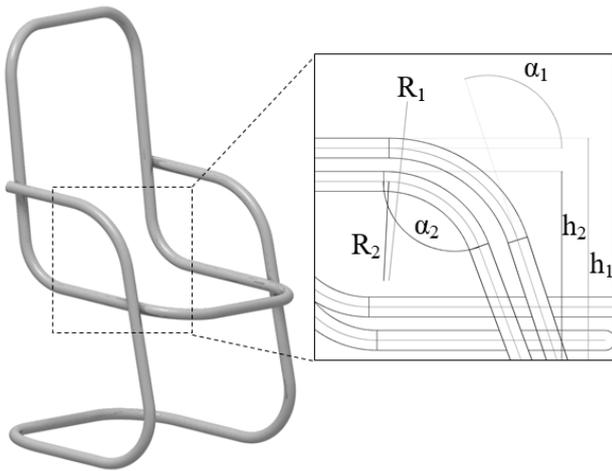


Bild 4.3: CAD-Modell Freischwinger

Die geometrische Skalierbarkeit beim Freiformbiegen liegt in der Anordnung von Bögen über der Länge eines Biegeteils im Dreidimensionalen, in variablen Biege winkeln und -radien, in variablen Wanddicken eines Rohres sowie in der Möglichkeit des Biegens von Splines mit variablen Krümmungen und Krümmungsverläufen. Neben der geometrischen Skalierbarkeit zeichnet sich das Freiformbiegeverfahren auch durch eine Skalierbarkeit von Produktionsmengen und -kosten und der Verwendbarkeit verschiedener Werkstoffe aus.

Der innovative Kern ist die Individualisierung des Freischwingers auf Basis der Körpermaße des vorgesehenen Nutzers. Erklärtes Ziel hierbei ist es, den Einsatz von Industrie 4.0 so zu gestalten, dass es mit gängigen Mitteln möglich ist eine Autonomisierung der Prozesse zu erreichen.

Zur Entwicklung eines smarten Prozesses wird eine Datenkette implementiert, die es erlaubt den Freischwinger auf Basis eines Kundenwunsches zu individualisieren. Dazu werden die erforderlichen Prozesse mit der Vernetzung

- eines Scanprozesses zur Erfassung der Körpermaße,
- einer parametrisierten Konstruktion,

- einem CAD-CAM-Modul mit Regelung zur individuellen Geometrie anpassung und der Ableitung des Biegeprogramms sowie
- der Biegemaschine

in einer Datenkette mit übergeordneter Cloud zu einer smarten Prozesskette verbunden.

Für den Scanprozess kann beispielsweise die Kinect Sensorleiste genutzt werden. Die darin integrierte Sensorik erfasst die Körpermaße und liefert die Ausgangsmesswerte für die EDV-technische Berechnung der Produktgeometrie. Über eine parametrisierte Konstruktion des entworfenen Freischwingers, werden die Abmessungen des Sitzmöbels automatisiert an die erfassten individuellen Körpermaße angepasst. Dabei wird die ergonomisch korrekte Auslegung des Freischwingers auch unter Berücksichtigung der DIN 33402-2:2005-12, Ergonomie - Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte, sichergestellt. Die ermittelten Konstruktionsdaten werden an einen Biegelinienbaukasten im CAD-CAM-Modul übergeben, der hieraus maschinengerechte Biegeparameter ermittelt und das erforderliche Biegeprogramm ableitet. Zur Ableitung des Biegeprogramms wird ein eigens am Lehrstuhl für Umformtechnik der Universität Siegen für das Freiformbiegen entwickelter Korrekturalgorithmus auf die abgeleiteten Biegelinien angewendet, um ein konstruktionsgerechtes Biegebauteil zu gewährleisten. Das abgeleitete Biegeprogramm wird an die Biegemaschine übermittelt. Nach der Freigabe des Biegeprogramms durch den Maschinenbediener wird die Biegung der Bauteile des Freischwingers durchgeführt. Zur Beurteilung der Bauteilqualität nach erfolgreicher Biegung ist vorgesehen, dass der Maschinenbediener auf virtuelle Biegebauteile des Freischwingers zurückgreift, die entlang der Prozesskette mitgeführt werden. Als unterstützendes Medium ist auch hierfür der Einsatz der Microsoft Hololens vorgesehen.

Über den Verbund der Prozesskette zu einer Datenkette wird auch das Simultaneous Engineering erweiterbar, indem eine Kommunikation zwischen einzelnen Prozessen in beide Richtungen sowie über eine Cloud über M2M-Kommunikationsprotokolle, beispielsweise auf Basis von OPC UA, erfolgen kann. Hierdurch wird die adaptive Regelung eines laufenden skalierbaren Produktionsprozesses möglich (siehe Bild 4.1).

5 Zentrum für Smart Production Design Siegen (SmaP)

Das Zentrum für Smart Production Design Siegen befindet sich derzeit im Aufbau. Es wird ebenfalls wie das Projekt Cyberrüsten 4.0 durch EFRE-Mittel

vom Land NRW und der EU zu gleichen Teilen gefördert. Innerhalb dieses Zentrums wird eine Forschungsinfrastruktur aufgebaut, welche es ermöglicht Werkzeuge mittels neuer additiver Fertigungsmöglichkeiten zu realisieren. Als Werkzeuge stehen hier insbesondere die Umformwerkzeuge im Fokus der Betrachtung. Hierbei können Sensoren in die Werkzeuge integriert werden. Darüber hinaus wird mittels einer im Zentrum zur Verfügung stehenden optischen Messtechnik der Gebrauch der Werkzeuge am Einsatzort innerhalb der Produktionsmaschine untersucht. Diese Untersuchungen ermöglichen im Rahmen von im Projekt definierten Umsetzungsprojekten die Erforschung der Machbarkeit der neuartigen Werkstoffe und Fertigungsverfahren auf ihre Tauglichkeit im Betrieb. Weiterhin dient das Zentrum zukünftig als Experimentierlabor zur Erforschung seriennaher Anwendungsbereiche. Eine Sensorintegrationswerkstatt liefert darüber hinaus die Möglichkeit mittels 3D-Druck Sensorik in die Werkzeuge zu implementieren sowie die gestalterische Möglichkeit zu schaffen den Platz an im Werkzeug relevanten Stellen vorzuhalten.

6 Danksagung

Das Forschungsverbundprojekt Cyberrüsten 4.0 wird durch die Europäische Union und das Land Nordrhein-Westfalen gefördert. Europäische Union – Investition in unsere Zukunft – Europäischer Fonds für regionale Entwicklung. EFRE.NRW Investition in Wachstum und Beschäftigung. (www.efre.nrw.de; www.wirtschaft.nrw.de)



EUROPÄISCHE UNION
Investition in unsere Zukunft
Europäischer Fonds
für regionale Entwicklung



EFRE.NRW
Investitionen in Wachstum
und Beschäftigung

Literatur

- [1] VDI 3430: Rotationszugbiegen von Profilen, 06.2014
- [2] Gerlach, Christian: Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen, Universität Siegen, Siegen 2010
- [3] Engel, Bernd; Hinkel, Markus: Analytisch unterstützte Vorauslegung des Rotationszugbiegeprozesses, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben 2011
- [4] Schapitz, E.: Festigkeitslehre für den Leichtbau 2. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1963
- [5] Schulte, L.; Kuhnhen, C.; Engel, B. (2018): Cyberrüsten 4.0 - Analyse des Boosterkrafteinflusses auf die Biegebauteilgeometrie beim Rotationszugbiegen. 37. Verformungskundliches Kolloquium, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben 2018
- [6] Engel, Bernd; Mathes, Christian: Erweiterung der Prozessfähigkeit des Rotationszugbiegens durch ein alternatives Faltenglätterkonzept, EFB-Forschungsbericht Nr. 378, Hannover 2013
- [7] Kuhnhen, C.; Schulte, L.; Engel, B. (2018): Cyberrüsten 4.0 – „Expert to go“ zum Einstellen einer Produktionsmaschine am Beispiel des Rotationzugbiegens. 37. Verformungskundliches Kolloquium, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben 2018
- [8] Aslan, Bedrettin: Eine Android App auf Grundlage von Case Based Reasoning zur Früherkennung von Hautkrebs. Bachelorarbeit, Universität Siegen, Siegen, 16.16.2016
- [9] Lange, J.; Iwanitz, F.; Burke, T. J.: OPC – Von Data Access bis Unified Architecture. 4., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage. VDE-Verlag, Berlin Kassel, 2010, ISBN: 978-3-8007-3217-3

Edge Computing für Industrie 4.0 Anwendungen in der Umformtechnik

Dipl.-Ing.(FH) Jan Viesel, Neitersen
Georg Maschinenteknik GmbH & Co. KG

Das begriffliche Verständnis für Industrie 4.0, dessen Sinn und Ziel sowie die grundsätzliche technische Umsetzung bei Einzelmaschinen gilt als hinreichend veröffentlicht. Aus Konzepten sind etliche technische Grundlösungen entstanden, für die es Anwendungen gibt. Jedoch ist Industrie 4.0 noch kein Flächenmarkt geworden, auch wenn die Wahrnehmung in der Fläche angekommen ist. In einer mittelfristigen planerischen Industrie 4.0 Strategie werden sich Systeme durchsetzen, die sich vereinheitlichen, skalieren und warten lassen. Dieser Essay stellt und beantwortet hierzu einige wesentliche Fragen.

Edge Computing for Internet of Things Applications in Field of Metal Forming

The meaning of the term Internet of Things, the sense and the goal as well as the basic technical solutions for single machines is deemed published in a sufficient manner. Several technical mainstream solutions arise from concepts, which have turned into practical applications. Thus, the Internet of Things has not developed to being a mass market, despite the awareness having reached broad public attention. In a midterm strategy of planning Internet of Things systems, those will push through that will be uniform, be capable of being scaled and be maintainable. This essay raises and answers several essential questions in this respect.

Vom Anwendungsbeispiel zur Betriebsorganisation

Obwohl der Ursprung des Begriffes „Industrie 4.0“ erst 2008 vom DKSI als solcher geprägt wurde, so reichen doch die technischen Vorläufer, Elemente und Überlegungen bis in die 1980er Jahre zurück. Erst die kommerzielle Datennutzung im Bereich des Consumer-Marketings (B2C) beflügelte die Vision der Datennutzung im industriellen Umfeld (B2B). Gepaart mit der Erkenntnis, dass klassische Methoden zur Produktivitätssteigerung in der Produktion ausgereizt sind, führte zu einer – auch politisch / volkswirtschaftlich motivierten – Kampagne zur Stärkung des Bewusstseins, um die Chance durch Digitalisierung Produktivitätssteigerungen zu erzielen. Die Chance für „die Wirtschaft“ ist dabei die Entwicklung von Produkten im Umfeld von Industrie 4.0, aber auch deren Anwendung und Wartung zur Produktivitätssteigerung.

Inzwischen hat eine Konsolidierung der Lösungen der ersten Stunde stattgefunden und erste Anwendungsbeispiele (Usecases) sind auf Plattformen veröffentlicht, um Nachahmer zu motivieren.

In einem nächsten wichtigen Schritt gilt es nun, sowohl Flexibilität als auch Mengengerüste zu beherrschen.

1 Aspekte der Einführungsstrategie

Die Geschäftsmodelle der Lösungen im Bereich Industrie 4.0 sind außerordentlich vielfältig. Es gibt Lösungen, die auf das Datensammeln von Maschinendaten aus sind. Andere Lösungen beschäftigen sich weniger mit der Maschine, sondern mehr mit den Prozessdaten. Wiederum andere Geschäftsmodelle zielen auf Nutzen aus der Verkettung von Maschinen durch Weitergabe von Logistikdaten und Auftragswerten in einer sequenziellen Fertigung. Es gibt auch Lösungen, die sich mit einem Warenkorb zur Optimierung und Vereinfachung von Ersatzteilbestellungen auf Basis einer virtuellen Maschine beschäftigen. Virtuelle Maschinen werden auch für das Modell des „digitalen Zwillinges“ eingesetzt. Digitale Zwillinge unterstützen u.a. einen schnellen Anlagenwechsel in laufender Produktion durch Vorabinbetriebnahme am digitalen Modell der einzubringenden Maschine. Aus dieser unvollständigen Aufzählung wird deutlich, dass etliche Lösungen für die Industrie 4.0 auf Einzelmaschinen beschränkt bleiben und von deren komplexer digitaler Modellierung leben. Andere Lösungen jedoch müssen sehr unterschiedliche Maschinen digitalisieren und miteinander verbinden können. Um diese zweite Kategorie geht es im Folgenden.

1.1 Betriebswirtschaftliche Aspekte

Die meisten bis 2017 veröffentlichten Usecases beschäftigen sich mit der Optimierung einer einzelnen Maschine und dem Bereitstellen der Daten aus dem Umfeld der Maschine auf einer Plattform. Man bezeichnet dies auch als Leuchtturmprojekte.

Bei überwiegend oder vollständig analogen Maschinen ist die technisch einfachste Lösung das Nachrüsten von Sensorik und Steuerungen und der anschließenden Datenverarbeitung der neu gewonnenen Daten. Diese Lösung wird logischerweise von Sensorherstellern und Steuerungsherstellern beworben. Um die Kosten der Umrüstung zu senken, versuchen die Sensorhersteller – unter Belassung der Steuerung – Sensordaten direkt in mobile Applikationen zu transportieren. Steuerungshersteller wiederum liefern Bausteine, um klassische Sensordaten aufzubereiten.

Ein weitverbreitetes Geschäftsmodell von Unternehmen basiert jedoch auf der Fertigung mit Gebrauchtmaschinen oder Alt-Maschinen. Insbesondere in der Umformtechnik sind Pressen mit einem Alter von über 40 Jahren keine Seltenheit. Manche Presswerke sind das Spiegelbild der Industriegeschichte. Das nicht immer einfache Geschäftsmodell profitiert dabei betriebswirtschaftlich von der Differenz aus kalkulatorischer Abschreibung und notwendiger Tilgung.

Daher ist eine der zentralen Fragen der Digitalisierung eines Presswerks oder einer beliebigen Maschinenhalle, wie hoch die Investition in die Digitalisierung sein darf, um das Geschäftsmodell nicht zu gefährden.

Die arithmetische Logik der Produktivitätssteigerung bezieht sich auf ein Mengengerüst oder auf Zeit. Der Sinn, die Rendite, einer Investition bezieht sich auf den Wert der Investition und die Zeit, in der diese infolge z.B. von Produktivitätssteigerung sich amortisiert. Man spricht vom Return on Investment (RoI).

Neben der o.g. versteckten betriebswirtschaftlichen Überlegung und der schulbuchmäßigen Kostenrechnung ist ein weiterer wichtiger Faktor für die Abwägung einer Investition die zur Verfügung stehende Liquidität. Die endliche Liquidität führt oft dazu, dass nicht alles, was in der Kostenrechnung sinnvoll erscheint, auch umgesetzt werden kann.

Ergänzend hierzu ist der Aufwand zur Einführung einer komplexen Struktur in einem konjunkturell positiven Umfeld eine Frage der Ressourcen.

Mit Blick auf die betriebswirtschaftlichen Aspekte einer Investition in Digitalisierung sei abschließend

erwähnt, dass die Einführung einer komplexen Struktur ohne eigene Erfahrung eine abstrakte akademische Leistung darstellt, die nicht trivial ist.

In der Qualitätspolitik gibt es den Begriff des „kontinuierlichen Verbesserungsprozesses“ (KVP). Ein gut funktionierender Ansatz im Spannungsfeld von Produktivität, Kosten und Liquidität ist die Politik der kleinen Schritte, oder mit anderen Worten, die Summe der **kleinen ausbaufähigen Nutzen**. Wie sich diese mathematisch darstellen wird im Folgenden beschrieben.

1.2 Mathematische Aspekte

Algorithmen aus dem Industrie 4.0 Umfeld lassen sich mathematisch einteilen in

1. „festverdrahtete“, vorgedachte, Algorithmen
2. Lernende Algorithmen

Die lernenden Algorithmen sind begleitet von Schlagworten wie „Maschine Learning“, „Schwarmintelligenz“ und „Blockchain“. Auch hier wird der Unterschied zwischen Einzelmaschine und einem Maschinenverbund aus der Begrifflichkeit bewusst.

Bei Maschinenverfügbarkeiten von über 90% stellt sich also die einfache Frage, wie oft ein einzelnes Ereignis in einer gewünschten Periode überhaupt auftritt und damit wie lange es dauert, bis lernende Algorithmen eine Datenbasis für sichere Prognosen haben.

Die Verschiebung der Planung einer komplexen Struktur in eine konjunkturell schwache Periode wird daher möglicherweise zu einem überraschend langen zeitlichen Horizont führen, bis lernende mathematische Algorithmen ihren vollen Nutzen entfalten.

Unbestritten ist also, dass das frühzeitige **Sammeln von Daten**, aus mathematischer Sicht, auch ohne den Algorithmus selbst implementiert zu haben, die Einführung von Industrie 4.0 Applikationen zur **Produktivitätssteigerung unter Kostendruck unterstützen kann**.

2 Standard in einem heterogenen Umfeld

Industrie 4.0 Diskussionen und Veröffentlichungen sind auch geprägt von Modeworten, „Buswords“, und die gleichen Anbieter treffen sich immer wieder auf Foren, Messen und in Arbeitsgruppen. Geprägt sind diese Veranstaltungen von einem Community-Charakter mit Fachjargon. Schaut man vergleichend auf das früher begonnene und entwicklungsintensive

autonome Fahren, so wird man nüchtern betrachtet feststellen, dass außerhalb von Busswords und Community manche ganz primitive Fragen nicht geklärt sind. Eine wesentliche Frage, sowohl beim autonomen Fahren als auch in der Industrie 4.0 ist, ob die Systeme kostengünstig massenmarktfähig sind.

In einer Fertigung stellt sich eine weitere hochbrisante Frage, die zweigeteilt ist:

1. Wer ist betriebsintern der Eigentümer einer internetverbundenen Anwendung im Schaltschrank einer Produktionsmaschine: Die Produktion oder die EDV? Die Frage ist dann wichtig, wenn es um das Recht, den Zeitpunkt und die Methode einer Instandhaltung, die ggf. auf einen Austausch der Hard- und Software hinausläuft, die in der Nachtschicht ausgefallen ist, geht.
2. Aus der o.g. Frage leitet sich dann verstärkt die zweite Frage ab, nämlich wie viele Systeme, also Herstellerlösungen, ein Anwender für einen schnellen Tausch bevorraten möchte, und damit, ob eine voll integrierte Herstellerlösung in einer Neumaschine nicht zu einer ungewünschten Diversifizierung der Industrie 4.0 Anwendungen beiträgt.

Auch die zunehmenden Maßnahmen zur Datensicherheit werden zu einheitlichen Architekturen führen, um die Zyklen für Penetration-Tests, kurz PEN-Test genannt, nicht unnötig zu verkürzen.

2.1 Analoge Maschinen digitalisieren

Schaut man auf eine alte Presse oder alte Maschine, fällt es möglicherweise schwer, die Vision einer Digitalisierung zu wirtschaftlichen Kosten und unter Berücksichtigung der Liquidität zu entwickeln.

Aber da viele Mitbewerber ebenfalls analoge Alt-Maschinen betreiben, entsteht aus dem reinen Betrieb der Maschine nicht unbedingt ein Wettbewerbsvorteil. Also kann Wettbewerbsfähigkeit aus dem Management des Maschinenumfelds entstehen. Insbesondere bei analogen Maschinen spielt also die Summe der kleinen Nutzen eine wichtige Rolle.

Ein typisches Beispiel für eine Maßnahme zur Produktivitätssteigerung ist die Kenntnis der Werkzeugstandzeit in einem Presswerk. Oft sind diese Standzeiten nicht systematisch erfasst. Analoge Pressen haben unter Umständen nicht einmal einen (digitalen) Hubzahlzähler, keine Werkzeugkodierung oder ähnliches. Das fragliche Werkzeug selbst kann aber wahlweise auf verschiedenen Maschinen eingesetzt werden.

Man kann diese Aufgabe analog lösen, indem man eine Laufkarte händisch ausfüllt. Man kann im ERP-System dem Produktionsauftrag das Werkzeug zuordnen und die rückgemeldeten Fertigteile in einem Tabellenkalkulationsprogramm summieren. Man kann ergänzend eine Software kaufen und eine Schnittstelle zum ERP programmieren, wie im Ansatz der Messmittelüberwachung oder des Dokumentenmanagements.

Erst wenn einem bewusst wird, dass die Hubzahl in Kombination mit der Losgröße auch genutzt werden kann, um zu prognostizieren, wann der Auftrag beendet werden wird, und dass dies weiter an die Folgemaschine und die Werkslogistik gemeldet werden kann, beginnt sich der sinnvollste Ort der Datenverarbeitung zu erschließen. Neben der Werkzeugstandzeit kann dann auch noch der Bestand und teilebezogene Verbrauch von Hilf- und Betriebsstoffen von Interesse sein, der sich aus Behälterständen, Hubzahlen und Artikelnummern / Werkzeugnummern ergibt.

So können mit relativ einfachen Mitteln an analogen Alt-Maschinen Nutzen gehoben werden. Insbesondere die oben genannten Nutzen sollten bevorzugt in einer Datenbank verwaltet werden, da sie maschinenübergreifend sind. Die Gerätetechnik sollte aus Instandhaltungsgründen sinnvollerweise einheitlich sein. Überraschend mag sein, dass dies auch für digitale Maschinen gilt.

2.2 Digitale Maschinen digitalisieren

Die Überschrift mag etwas paradox klingen. Es geht hierbei um das Vernetzen von Maschinen mit einer digitalen Steuerung. Maschinen mit einer digitalen Steuerung haben den Vorteil, dass eine Vielzahl von Signalen und Daten bereits von der Maschine erfasst und erzeugt werden, um wiederum eindeutige Betriebszustände zu erzeugen. Jedoch sind weder die Steuerungen heterogen noch die Anzeigen an den Maschinen, die vom monochromen Zeilendisplay bis zum modernen Touchpanel reichen können. Die gleiche Problematik ist bereits aus der Einführung eines CAD/CAM-Verbundes eines gewachsenen Werkzeugmaschinenparks bekannt. Auch bei digitalen Maschinen kann daher die Erfassung von Sensorsignalen, durch Verdrahtung an der Steuerung vorbei, eine Alternative zur Beauftragung von Spezialisten sein, einen Steuerungszugang zu ermöglichen. Insbesondere in Deutschland kann man festhalten, dass der Zugang auf eine Steuerung der Generationen S5 und S7 von Siemens gelöst und machbar ist. Pressen haben historisch etwas weniger Varianz in der Steuerungstechnik als

Werkzeugmaschinen. Die Visualisierungen der gleichen Maschinen stellen jedoch eine größere Hürde dar.

Zurückkommend auf die unterschiedlichen Geschäftsmodelle in der Einleitung von Kapitel 1 ist es gerade im Presswerk nicht unüblich, dass parallel zur maschinenbezogenen, vergleichsweise niederfrequenten Datenanalyse, auch hochfrequente Prozessdatenanalysen stattfinden. Möglicherweise befindet sich in der gleichen Zelle / Linie noch ein Anschluss an das BDE-System mit einem weiteren Bildschirm.

Aus diesen Überlegungen leitet sich ab, dass eine Client-Server-Struktur der Industrie 4.0 Lösung in einem Presswerk oder einer anderen Maschinenhalle mit gleicher Software und maximal einheitlicher Hardware eine kluge Lösung sein kann. Der Edge Data Analyzer (EDA), von Georg Maschinenteknik erfüllt diese Forderung durch maximal zwei modulare Hardwareplattformen und eine modulare Software für sowohl analoge als auch digitale Pressen und Maschinen.

3 Mengengerüste, Datenmengen

Der 2015 konzipierte Edge Data Analyzer hatte, neben dem Ansatz eine Lösung für ein ganzes Presswerk zu sein, auch die Frage nach dem Ort der Datenverarbeitung in aller Konsequenz beantwortet: On the Edge, also an der Maschine, sollen die Daten aufbereitet werden. Diese Aufbereitung ist eine ohnehin erforderliche Wertschöpfung und es stellt sich nüchtern nur die Frage, wo sie entsteht und wer davon profitiert. Inzwischen folgen auch renommierte Konzerne diesem Ansatz aus unterschiedlichen Gründen. Die Aussagen, dass Speicher kaum Geld kostet und „alles“ in die Cloud kann, sind nicht falsch. Rechenzeiten für komplexe Algorithmen liegen aber meist schon über dynamischen Abstraten und alleine diese Erkenntnis führt zu der Frage, ob von allen Daten die 1. und 2. Ableitung von Interesse ist. Es ist auch diskussionswürdig, ob die Abstrategie eines Behälterstandes gleich sein sollte wie die eines Schwingungssensors und ob diese Art Daten von einem gesamten Presswerk als Rohdaten in der Cloud oder gar einem ERP-System gut aufgehoben sind.

Die sichere Übertragung (nach innen und nach außen) der Daten in einem Presswerk führt zu der Frage, ob WLAN ausreichende Bandbreite und Sicherheit bietet, denn nicht überall sind physische LAN-Kabel gelegt. Zugleich stellt sich die Frage, wer und wo das Ende,

der Empfänger der Daten, der WLAN-Übertragung ist.

Unbestritten gibt es zahlreiche sinnvolle Anwendungen von WLAN-Übertragungen und Cloud-Anschlüssen. Typischerweise machen Cloud-Lösungen Sinn bei internationalen Konzernen mit dem Ziel eines Benchmarks (Best Practice) über alle Standorte oder bei Lösungen von Maschinenherstellern, die gleichfalls global aufgestellte Maschinen analysieren und mit Services aus den Daten (Wertschöpfung!) der Maschinen anbieten wollen.

Ein wichtiger weiterer Aspekt der Architektur von Hard- und Software einer Digitalisierungslösung ist auch das Management einer möglichst einheitlichen Plattform mit großer Teilnehmerzahl, also z.B. eines Presswerks mit vielen Edge Data Analyzern von Georg Maschinenteknik. Für die Wartung der Geräte bietet sich wiederum ein Eco-System an, das cloudbasiert auf Rechte- und Betriebssystemebene operiert, wie es beispielsweise die Siemens Mindsphere ist.

4 Fazit und Ausblick

Das Grundprinzip von Lösungen im Umfeld von Industrie 4.0 wird immer klarer. Einzelplatzlösungen kosten nur noch einzahlige Vielfache eines Tagessatzes eines einschlägigen Beraters. Der Weg ist bereitet für Menschen, die eigene Erfahrungen einem Beratungsbericht vorziehen.

In einem Unternehmensnetzwerk kennen wir selten „wilde Mischungen“ aus Linux- und Windowssystemen sowie dazugehörigen Office Anwendungen. Drucker, Kopierer und Netzwerkswiches werden aus offensichtlichen Gründen vereinheitlicht.

Seit Anfang der 2000er Jahre ist es üblich, dass sich die zu den Geräten gehörende Software über zentrale Eco-Systeme, nach Zustimmung, gewartet wird.

In einer mittelfristigen planerischen Industrie 4.0 Strategie werden sich Systeme durchsetzen, die sich gleichfalls vereinheitlichen, skalieren und warten lassen.

Notizen

Notizen

Notizen

Notizen
