

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Zuwendungsempfänger Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen – utg Men at Work GmbH – MaW	Förderkennzeichen 01DM19002A
Vorhabenbezeichnung Entwicklung eines Regelkreises für Anbindungen in der Folgeverbundtechnologie Development of a Control Loop for Connections in the Progressive Die Process (DICPROG)	
Laufzeit des Vorhabens 24.02.2024	
Berichtszeitraum 01.02.2019 – 24.02.2024	
Erstellt durch Florian Steinlehner – utg Stefan Laumann - MaW	
Projektpartner utg - Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen MaW – Men at Work GmbH FTI – Forming Technologies Inc. UW – University of Waterloo	

Teil II: Eingehende Darstellung

Gliederung

1. Einleitung
2. Stand der Wissenschaft und Technik
3. Anbindungscharakterisierung
 - a. Kategorisierung industriell eingesetzter Anbindungsgeometrien und Streifenlayouts
 - b. Charakterisierung der Anbindungseigenschaften
 - c. Modell zur Vorhersage der Anbindungseigenschaften
4. Versuchswerkzeug und Prozessbetrachtung
 - a. Konstruktion und Aufbau des modularen Versuchswerkzeugs
 - b. Prozesssimulation und digitales Abbild des Versuchswerkzeugs
 - c. Versuchsdurchführung mit Echtzeit-Datenerfassung
 - d. Aktive Beeinflussung des Bauteiltransports
5. Sonstige Arbeiten
 - a. Materialcharakterisierung
 - b. Auslegung aktiver Hochheber
 - c. Auslegung Zangenvorschub
6. Anhang
7. Literaturverzeichnis

1. Einleitung

Die Folgeverbundtechnologie stellt in der Stanztechnik eines der wirtschaftlichsten Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit hoher Stückzahl dar. Die Bandbreite der Bauteile erstreckt sich dabei von Bauteilen im Bereich, weniger Millimeter, welche mit Hubzahlen von bis zu 1000 Hub/min und mehr hergestellt werden, bis hin zu langsamer laufenden Bauteilen mit größeren Dimensionen. Im Zuge der immer weiter voranschreitenden Digitalisierung nehmen die Themen der datengetriebenen Auslegung und der Prozessüberwachung auch für die Folgeverbundtechnologie stetig zu.

Übergeordnetes Zielsetzung der Durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens ist ein tieferes Verständnis der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren, wie Streifenlayout, Anbindungsgeometrie und Bauteiltransport, auf den Folgeverbundprozess. Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurden die Erreichung dreier wesentlicher technologischer Teilziele angestrebt:

- Optimierung der Anbindungskonfiguration
- Entwicklung eines Versuchswerkzeugs zur Echtzeit-Datenerfassung
- Integrierte Prozessregelung

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens orientiert sich an dem im Antrag vorgesehenen Arbeitsplan, dargestellt in Abbildung 1

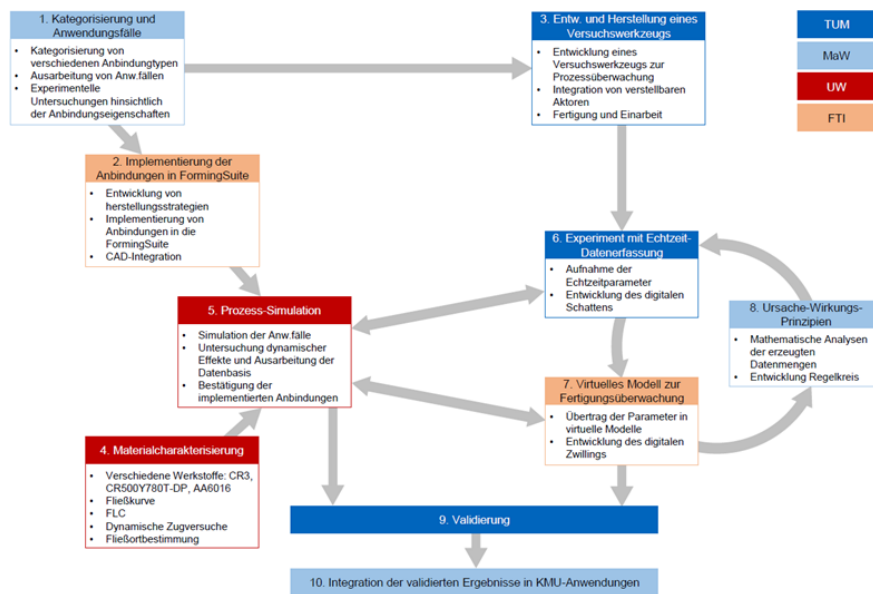


Abbildung 1 Arbeits- und Vernetzungsplan des Forschungsvorhabens

Stand der Wissenschaft und Technik

Folgeverbundwerkzeuge ermöglichen die Herstellung komplexer Werkstücke aus Blechwerkstoffen durch ein einzelnes Werkzeug. Verschiedene Fertigungsschritte wie Umformen, Schneiden und Prägen sind in verschiedenen Stufen innerhalb eines Werkzeugs angeordnet. Die einzelnen Werkzeugstufen können separat ausgebaut und montiert werden, was die Maschinenstandzeiten deutlich reduziert. [4][5][6] Weitere Vorteile, durch die Kombination verschiedener Fertigungsschritte, sind laut [5]:

- (i) Geringere Investitionskosten als bei Einzelwerkzeugen,
- (ii) wirtschaftlichere Pressenauslastung,
- (iii) die Möglichkeit zur Verkürzung der Bearbeitungszeiten und
- (iv) das Entfallen von Transport- und Logistikkosten.

Anwendungen finden sich vor allem in der Automobil- und Elektronikindustrie, die in den Ländern Kanada und Deutschland besonders ausgeprägt sind. Die Herstellung von Blechteilen im Folgeverbundprozess erfolgt direkt vom Blechband. Dadurch sind die Bauteile bis zur letzten Stufe, in der die Trennung des Bauteils erfolgt, mit dem Führungstreifen verbunden. Eine Optimierung des Streifenbilds ist enorm wichtig, da die Materialkosten 80-90% der gesamten Bauteilkosten ausmachen. Für eine einheitliche Nomenklatur und zum Aufzeigen der wesentlichen Elemente des Folgeverbundprozesses zeigt Abbildung 2 ein schematisches Werkzeug inkl. Peripherie und einen typischen Folgeverbundstreifen.

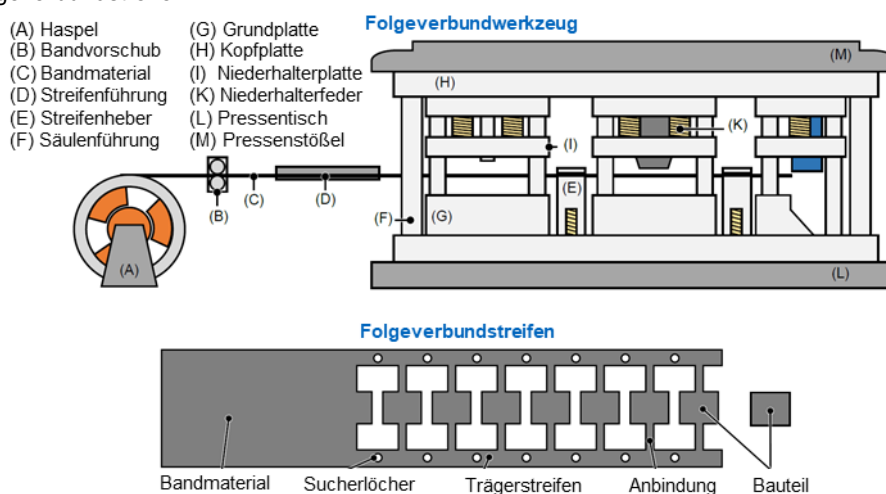


Abbildung 2 Wesentliche Bestandteile und Nomenklatur an einem schematischen Folgeverbundwerkzeug und -streifen

Mehrere Autoren beschreiben Methoden zur Modellierung von Streifenbildern. In [8], [9], [10] und [11] werden Modelle vorgestellt, die unterschiedlichen Aspekte der Streifenbildplanung, wie Reduzierung von Ausschuss oder Minimierung der Stufenanzahl, behandeln. Über die systematische Auswahl der Anbindungen ist kaum Literatur

verfügbar. [12], [13], [14] und [15] liefern lediglich Informationen über Anbindungsbreite in Abhängigkeit der Blechdicke. Neben der Grundlagenliteratur zur konstruktiven Auslegung bieten kommerzielle CAD-Softwaretools Lösungen für eine kostenoptimierte Streifenbildplanung und Verschachtelung der Bauteile. Beispiele hierfür sind HiCAD neXt Strip Planning, VISI Progress, B&W Progressive oder BLANKNEST von FTI. Sie bieten dem Konstrukteur jedoch keine verfahrenstechnische Unterstützung bei der Anbindungsproblematik. Vielmehr müssen Konstrukteure FEM-Programme einsetzen, um ihre prozessbasierten Anbindungen in mehreren Iterationsschleifen zu verifizieren und zu optimieren.

Die Informationsrecherchen ergeben somit, dass die Inhalte des Ziels „Optimierung der Anbindungskonfiguration“ nicht Gegenstand anderweitiger Forschungen oder Patente sind und keine Schutzrechte der späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen. Durch das Heben und Transportieren des Bleches kommt es zur Schwingung des Bandes. Diese Schwingungen sind nach Aussagen von Experten derzeit der Grund für Ausbringungsverluste bis zu 25%. Obwohl steife Anbindungen das Schwingen des Bleches verhindern können, hat das Blech in Folge der Versteifung zu wenig Flexibilität, um die erforderlichen Umformoperationen zu ermöglichen. Zusätzlich treten Schwankungen im Schwingungsverhalten des Blechbandes auf. Dies ist eine Folge von Prozessschwankungen, welche zu Qualitätsverlust, Bauteilausschuss oder sogar zu Werkzeugbeschädigungen führen können. Mögliche Ursachen für besagte Schwankungen sind:

- (i) Chargenwechsel oder Schwankungen des Halbzeuges (Blechdicke oder Materialeigenschaften),
- (ii) Variation in der Beölung,
- (iii) Werkzeugverschleiß oder
- (iv) Pressenwechsel.

Gegenwärtig sind Doppelblech- und Vorschubkontrollen technischer Standard bei Folgeverbundwerkzeugen. Nur wenige Unternehmen (z.B. [16] und [17]) bieten derzeit eine zusätzliche Prozessüberwachung im Bereich der Serienfertigung an. Dies geschieht auf der Basis von Kraft- und Körperschallmessungen und erlaubt lediglich Rückschlüsse auf Werkzeug- oder Bauteilversagen durch Messungen am Werkzeug. Die Schwingungen werden hierbei nicht untersucht. [18], [19]

Die Überwachung der Bandschwingung im Versuchswerkzeug im Arbeitsziel 2 „Entwicklung eines Versuchswerkzeugs zur Echtzeit-Datenerfassung“ basiert auf der Wirbelstromtechnologie und wird mittels Hochgeschwindigkeitskameras validiert. Dieser Ansatz wurde bisher im Folgeverbundprozess nicht verfolgt, die Inhalte sind nicht Gegenstand anderweitiger Forschungen und Patente.

Im konventionellen Umformprozess konnten bereits Regelungen implementiert werden. Beispielsweise wurden mit Wirbelstromsensoren in Großwerkzeugen für den automobilen Karosseriebau die mechanischen Eigenschaften erfasst und systematisch mit der Bauteilqualität verknüpft. Zudem wurde bereits die Bauteilgeometrie an qualitätskritischen Stellen mittels optischer Verfahren untersucht. Hier wurde der Prozess durch die Blechhalterkraft gesteuert und die Bauteilqualität in nachfolgenden Schneid- und Kalibrierwerkzeuge optimiert. [22] Im Zusammenhang mit dem Folgeverbundprozess konnte keine Literatur zur Prozessregelung gefunden werden. Die Prozessüberwachung dient nur zum Abschalten der Maschinen und zur manuellen Korrektur von Parametern. Die gezielte Regelung der Bandschwingung über Aktoren, die die Geometrie des Streifenbildes variieren, ist ebenfalls nicht Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben oder Patente und liegt somit nicht im Konflikt mit dem dritten Arbeitsziel „Integrierte Prozessregelung“.

Die Grundlagen der vernetzten Regelungen in der Produktionstechnik sind ausführlich in der einschlägigen Literatur zum Thema Industrie 4.0 mit Fokussierung auf die hier wesentlichen Begriffe digitaler Schatten, digitaler Zwilling und In-Line-Prozessregelung dargestellt [25-29].

2. Anbindungscharakterisierung

Für die Optimierung der Anbindungsconfiguration in der Folgeverbundtechnologie wurden Untersuchungen entsprechend dem folgendem strukturiertem Vorgehen durchgeführt.

- *Kategorisierung industriell eingesetzter Anbindungsgeometrien und Streifenlayouts*
Zu Beginn des Projekts steht die systematische Aufnahme und Analyse unterschiedlicher, industriell eingesetzter Anbindungsgeometrien, das Erlangen eines tieferen Verständnisses der Auswahlkriterien und das Ableiten normierter Grundtypen und Probengeometrien für das Forschungsvorhaben.
- *Charakterisierung der Anbindungseigenschaften*
Zunächst wurden die experimentellen Prüfstände und simulativen Modelle zur Testung und zur Bestimmung der Anbindungseigenschaften erstellt. Die Testmöglichkeiten beinhalten eine definierte plastische Vorverformung der normierten Anbindungsgeometrien, die Untersuchung der Steifigkeitseigenschaften und die Untersuchung des Schwingungsverhalten. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden standardisiert ausgewertet und anhand einheitlicher skalarer Größen bewertet. Die validierten Simulationsmodelle der Prüfstest ermöglichen den Aufbau einer Datenbank mit einer hohen Zahl an unterschiedlichen Anbindungsgeometrien und –grundtypen.
- *Modell zur Vorhersage der Anbindungseigenschaften*
Die Datenbank der Anbindungseigenschaften für unterschiedliche Geometrien wird für ein Modell basieren auf Maschinellen Lernen zur Vorhersage der Anbindungseigenschaften im Folgeverbundprozess genutzt.

3a. Kategorisierung industriell eingesetzter Anbindungsgeometrien und Streifenlayouts

Für eine allgemeingültige Charakterisierung verschiedener Anbindungen ist eine Kategorisierung und Standardisierung unterschiedlicher industriell eingesetzter Anbindungsgeometrien und Streifenlayouts notwendig. Dazu wurden die Layouts verschiedener industriell eingesetzter Folgeverbundstreifen vom Projektpartner MaW beschafft und zusammen mit dem Projektpartner utg untersucht. Eine Auswahl der untersuchten Streifen und der vorkommenden Anbindungsgeometrien ist in folgender Abbildung 3 dargestellt:

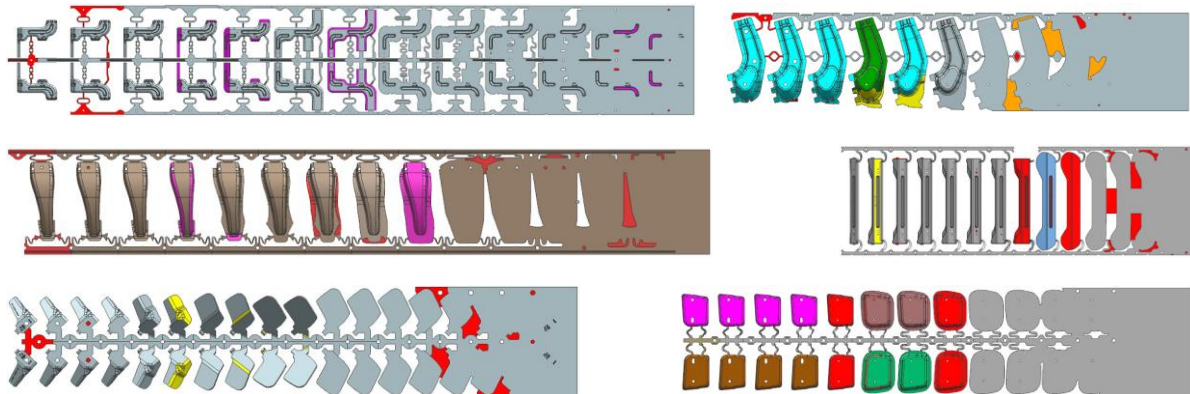


Abbildung 3: Industriell eingesetzte Streifenlayouts und Anbindungsgeometrie

Zusätzlich zu den untersuchten Streifen wurden Expertengespräche innerhalb des großen, einschlägigen Netzwerks der Projektpartner zu den Auswahlkriterien verschiedener Umsetzungslösungen geführt. Insgesamt standen 120 Industriestreifen zur Verfügung. Diese wurden hinsichtlich folgender Kriterien untersucht:

- Anzahl fallender Teile pro Hub (1-fach, 2-fach, 3-fach, 4-fach)
- Anzahl der Trägerstreifen je Bauteil (einseitig, zweiseitig, integriert)
- Anzahl der Anbindungen je herzustellendem Bauteil
- Anbindungsgeometrie (I-Anbindung, O-Anbindung, S-Anbindung)

Die Auswertung der untersuchten Eigenschaften ist in nachfolgender Abbildung 4 dargestellt.

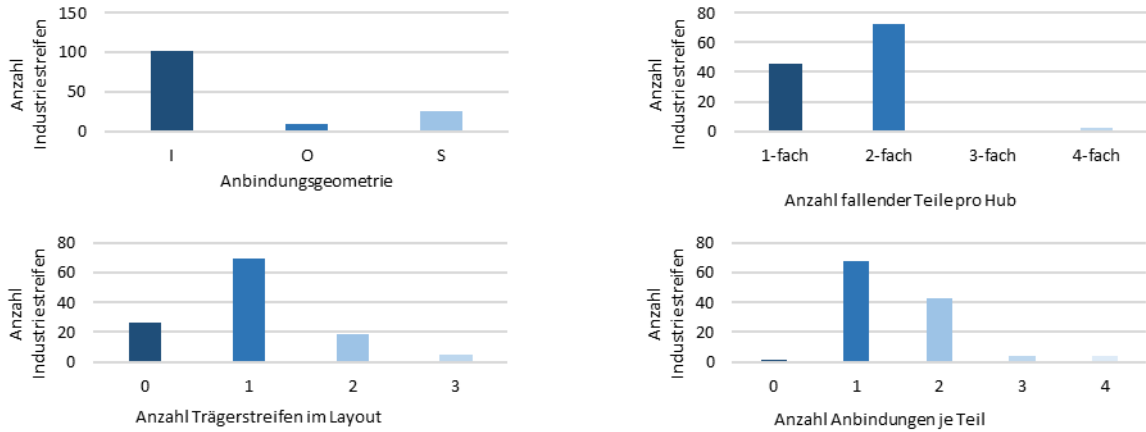


Abbildung 4 Auswertung industriell eingesetzter Folgeverbundstreifen. Art der Anbindung (l.o.), Anzahl an Teilen pro Hub (r.o.), Anzahl an Trägerstreifen (l.u.) und Anzahl an Anbindungen je Bauteil (r.u.)

Die Auswertung der industriell eingesetzten Streifen zeigt drei überwiegend eingesetzte Grundtypen. Dies deckt sich mit den Gesprächen erfahrener Werkzeugkonstruktoren. Die Anbindungsgrundtypen werden entsprechend ihrer geometrischen Ausprägung im Rahmen des Forschungsprojekts wie folgt in einer alphabetischen Nomenklatur benannt

- I-Anbindung
- O-Anbindung
- S-Anbindung

Die mit Abstand am häufigsten eingesetzte Anbindung ist mit ca. 71 % die I-Anbindung, gefolgt von der S-Anbindung mit 17 % und der O-Anbindung mit 11 %. Die Auswahl erfolgt häufig erfahrungsbasiert und mit Fokus auf dem Materialausnutzungsgrad des Streifenlayouts. Die Erfahrungen von Konstrukteuren zeigt, dass für Bauteile mit höherem benötigtem Ziehweg meist die S-Anbindung gewählt wird. Eine O-Anbindung wird meist aufgrund des zusätzlichen Prozessschritts zum Auslöchen der Anbindung vermieden.

Die Auswertung der fallenden Bauteile, zeigt ein Bestreben nach zwei fallenden Bauteilen pro Hub. Hierbei handelt es sich aus einem Kompromiss aus Komplexität im Bauteiltransport (mehrfachfallend) und Prozessgeschwindigkeit (1-fach fallend). Sofern der auszuliegende Folgeverbundprozess keine Gefahr eines kritischen Bauteiltransports oder einer weiteren Anforderung an die Anbindung besitzt wird, im Sinne der Materialausnutzung, versucht ohne Trägerstreifen mit einer direkten Anbindung von Bauteil zu Bauteil zu arbeiten. Zur zusätzlichen Stabilisierung großer, vor allem schwingungsanfälliger Bauteile werden zusätzliche Anbindungen je Teil herangezogen. Dies war in ca. 35 % der untersuchten Folgeverbundstreifen der Fall.

Die Grundtypen I-Anbindung, O-Anbindung und S-Anbindung sind in nachfolgender Abbildung 5 dargestellt. Zusätzlich werden die wesentlichen Geometrieparameter der Basisgeometrien in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Parameter zur Beschreibung der Anbindungsgeometrien für die I-, O- und S-Anbindung

Allgemeine Anbindungsparameter					
I-Anbindung		O-Anbindung		S-Anbindung	
t	Blechdicke	X_o	X-Ausdehnung O-Anbindung	X_s	X-Ausdehnung S-Anbindung
s	Stegbreite	Y_o	Y-Ausdehnung O-Anbindung	Y_s	Y-Ausdehnung S-Anbindung
l	Länge Anbindung	s_o	Stegbreite O-Anbindung	r_s	Radius S-Anbindung
r_f	Kantenverrundung	r_o	Radius O-Anbindung	n_s	Windungsanzahl
α_i	Winkel I-Anbindung	α_o	Winkel O-Anbindung	α_s	Winkel S-Anbindung

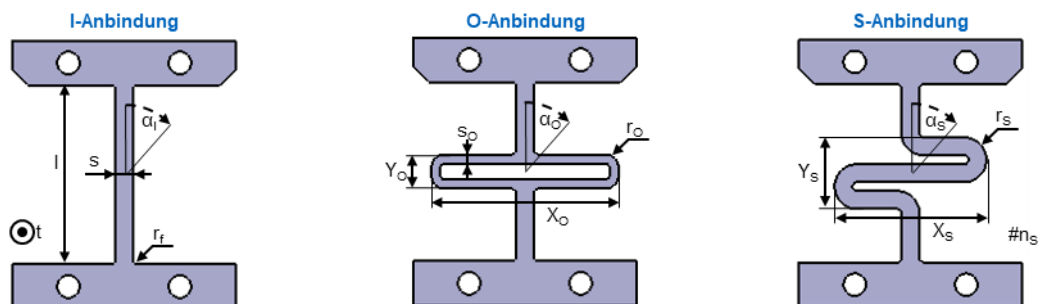


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Basisgeometrien I-, O- und S-Anbindung und die parametrisierten Größen

Die kategorisierten und parametrisierten Anbindungsgeometrien werden als Eingangsgrößen für die experimentelle und numerische Charakterisierung der Anbindungseigenschaften genutzt.

Die durchgeführten Arbeiten waren angemessen und die Teilziele wurden erreicht. Die Anbindungsgrundtypen wurden in [A] zusammen mit allen beteiligten Projektpartnern veröffentlicht. Die zukünftige Verwertung und Bekanntmachung der Ergebnisse erfolgt über das Netzwerk der beteiligten Projektpartner. Die Umsetzung der Anbindungsgrundtypen erfolgte bereits während der Projektlaufzeit durch eine Implementierung der parametrisierten Geometrien in die Software FormingSuite des Projektpartners FTI. Für die Erstellung der Anbindungsgeometrien wurde vom Projektpartner MaW ein Tool (Stretch Web Producer) entwickelt, welches über eine Eingabe der Anbindungsparameter die Konstruktionsdateien erstellt. Diese werden im Projektverlauf für die automatisierte Simulationsroutine benötigt. Die Benutzeroberfläche zur Eingabe und Umsetzung der unterschiedlichen Anbindungsgeometrien in der Software FormingSuite und des Konstruktionstools sind in nachfolgender Abbildung 6 dargestellt:

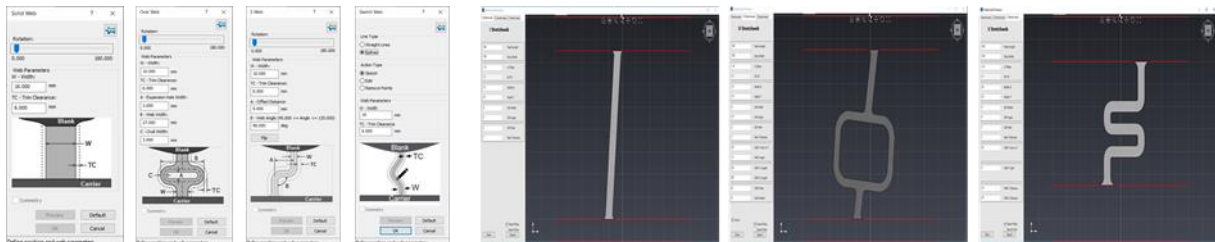


Abbildung 6 Benutzeroberfläche der Software FormingSuite (l.) und des Stretch Web Producers (r.)

3b. Charakterisierung der Anbindungseigenschaften

Die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsvorhabens zielen, neben einem besseren Verständnis der Einflüsse der Anbindungen auf den Folgeverbundprozess, auf eine Unterstützung für zukünftige Werkzeugkonstrukteure bei der Auswahl geeigneter, anforderungsgerechter Anbindungen. Um Anbindungen anforderungsgerecht im Folgeverbundprozess einzusetzen müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt und die Anbindungen geometrieunabhängig beschrieben werden. Die im Rahmen des Projekts identifizierten Haupteigenschaften von Anbindungen sind:

- **Wirtschaftlichkeit / Materialausnutzung**
Sowohl in der erfahrungsbasierten, als auch in der eigenschaftsbasierten Auswahl von Anbindungsarten und -geometrien ist der Materialausnutzungsgrad aus Wirtschaftlichkeits- und Nachhaltigkeitsgründen von entscheidender Bedeutung. Der Mehrbedarf durch die Anbindung als auch durch den Trägerstreifen soll minimiert werden.
- **Steifigkeit**
Die Steifigkeit einer Struktur ergibt sich auf der Kraft, welche für eine Längenänderung in einer bestimmten Achse erforderlich ist. Die lässt sich aus der Ableitung der Kraft-Weg-Kurve berechnen. Die Steifigkeit von Anbindungen wird über das Materialverhalten und das meist nichtlineare Verhalten der geometrischen Struktur definiert. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird die Steifigkeit als Kombination dieser beiden Effekte phänomenologisch betrachtet.
- **Dämpfung**
Die Dämpfung ist ein Maß für das Abklingen der vorherrschenden Schwingungen des Bauteils und des Folgeverbundstreifens. Es gibt eine Vielzahl an Dämpfungsfaktoren, die wesentlichen Einflussgrößen im Rahmen des Forschungsvorhabens sind die Materialdämpfung und die strukturelle Dämpfung auf Grundlage der Geometrie. Ein hoher Dämpfungswert ist für einen ruhigen Bauteiltransport im Prozess anzustreben.
- **Rückhaltekraft**
Die Rückhaltekraft einer Anbindung ist eine wichtige Prozessgröße für Tiefziehprozesse. Die Kraft wirkt dem Materialeinzug, welcher zusätzlich vom Niederhalter gesteuert wird, entgegen. Die Rückhaltekraft für Anbindungen ist zeitlich veränderlich und stellt sich entsprechend der Vorverformung, des verwendeten Werkstoffs und der Anbindungsgeometrie ein.
- **Dehnweg**
Der Dehnweg ist die mögliche Längenänderung einer Struktur bis zu einer definierten Eigenschaftsänderung. Dies kann das Versagen der Anbindung und eine deutliche Abnahme der anderen relevanten Eigenschaften, wie Steifigkeit und Dämpfung sein. Der Dehnweg ist hochgradig geometrieabhängig.

Für eine gute Vergleichbarkeit verschiedener Anbindungsgeometrien werden die oben genannten Eigenschaften in Form eines Spinnendiagramms für jede Anbindung dargestellt. Für die einzelnen Eigenschaften ist ein hoher Wert positiv zu bewerten. Für zwei Anbindung und ein exemplarisches Bauteil sind die Spinnendiagramme in folgender Abbildung 7 gegenübergestellt:

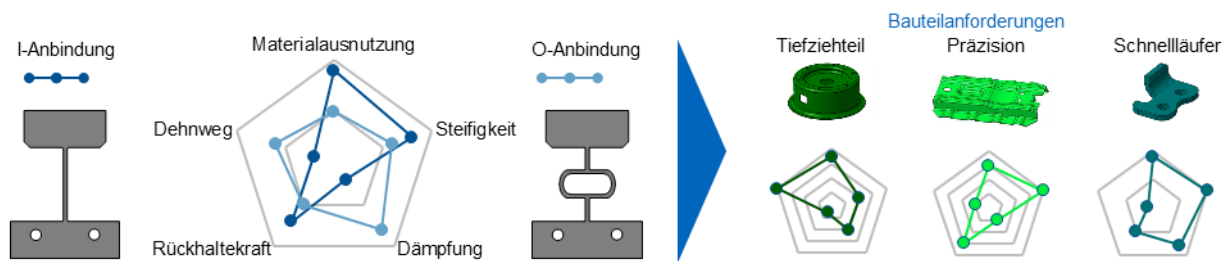


Abbildung 7 Spinnendiagramm zur Visualisierung der Anbindungseigenschaften (l.) und exemplarischer Bauteilanforderungen (r.)

Analog können auch die Anforderungen, verschiedener Bauteile und Bauteilkategorien beschrieben werden. Dies ermöglicht einen ersten schnellen Abgleich und eine datenbasierte Vorauswahl möglicher Anbindungsgeometrien. Für eine Standardisierung der Anbindungstestung wurde eine einheitliche Probengeometrie entwickelt, welche in Abbildung 8 dargestellt ist. Zur Ermittlung der Anbindungseigenschaften wurden im Rahmen des Forschungsprojekts sowohl experimentelle Versuchsstände entwickelt und aufgebaut, als auch Prozesssimulationen und numerische Untersuchungen herangezogen. Die Probengeometrien für die folgenden Versuche wurden mittels Laserstrahlschneiden aus den Versuchswerkstoffen hergestellt.

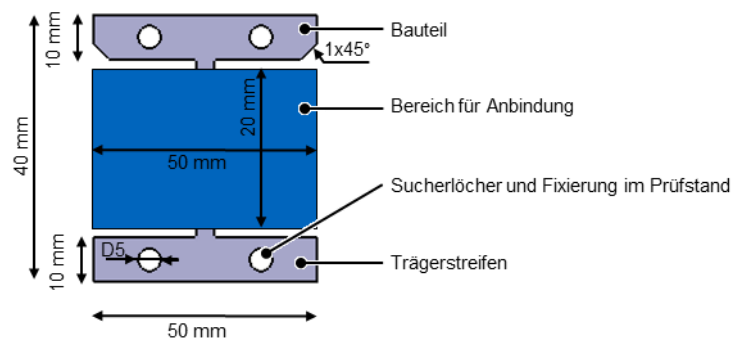


Abbildung 8 Dimensionen der Standardprobe für die Projektdurchführung

Experimenteller Multi-Axial-Prüfstand

Für die Untersuchung der Eigenschaften Dehnweg und Steifigkeit wurde ein Prüfstand zur multiaxialen Testung der standardisierten Proben aufgebaut. Der Prüfstand wurde entsprechend der Anforderungen an die Vorverformung der Anbindungen von den Projektpartnern MaW und utg gemeinsam entwickelt, konstruiert und am utg aufgebaut und in Betrieb genommen. Der Prüfstand ist in Abbildung 9 dargestellt:

Testbereich des aufgebauten Prüfstands



Isometrische Übersicht im CAD

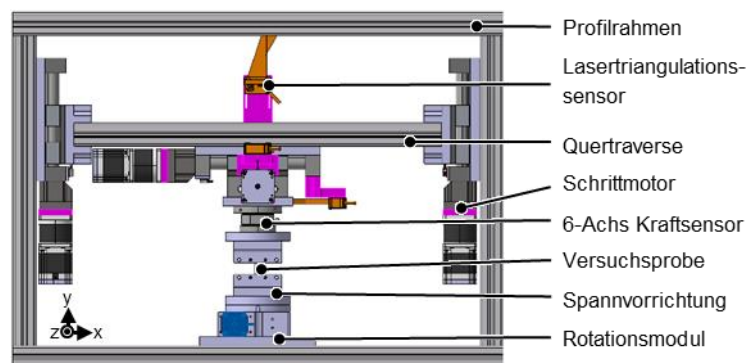


Abbildung 9 Schematische Beschreibung der Komponenten Prüfstand zur mehrachsigen Anbindungsbelastung

Die Zugprüfmaschine ermöglicht die definierte Verformung der Versuchsproben in alle drei translatorischen Raumrichtungen und zusätzlich eine Torsion um die y-Achse. Hierfür wird die Probe in die Spannvorrichtung eingelegt.

Die Hauptdehnrichtung entlang der Y-Achse wird über zwei parallel betriebene Lineareinheiten realisiert. Die Bewegung entlang der X-Achse und Z-Achse wird über die Kombination zweier Lineartische ermöglicht. Die translatorischen Bewegungen werden mittels Lineartische der Fa. Igus GmbH, Köln und NEMA 23 Schrittmotoren der Fa. Stepperonline Inc., New York, USA., Die Schrittmotoren werden über den integrierten Drehgeber in einem geschlossenen Regelkreis mit einem digitalen Schrittmotortreiber DM556T der Fa. Stepperonline Inc. Angesteuert. Um die Probe ebenfalls tordieren zu können, wird ein Motordrehtisch MM-01216 der Fa. MMEEngineering GmbH, Bayern, eingesetzt. Der Motordrehtisch wird mittels einem NEMA17 Schrittmotor über ein Schneckengetriebe angetrieben und mittels Schrittmotortreiber angesteuert Um eine definierte Ausgangsposition anfahren zu können, sind bei allen sich bewegenden Achsen Endschalter für das Einstellen der HOME-Position angebracht. Die bei der Umformung der zu untersuchenden Probe wirkenden Kräfte und Momente werden vollständig über einen Piezoelektrischer 6-Achsen-Kraft- Momenten-Sensor 9306A31 der Fa. Kistler Instrumente AG erfasst. Um ebenfalls die bei der Umformung zurückgelegten Wege aufzuzeichnen, werden an jeder Achse Lasertriangulationssensoren ILD1320 der Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, zur Positionsmessung verwendet. Die Datenerfassung der Messgrößen Kraft, Moment und Position und die Regelung der Linearmotoren mittels geschlossenem Regelkreis erfolgt durch eine CompactRio cRio-9049 und mehreren C-Modulen zur Strom- und Spannungsmessung (NI9202, NI9215) sowie zur digitalen Ansteuerung (NI9401) der Motortreiber ebenfalls der Fa. National Instruments Corp.

Experimentelle Schwingungsuntersuchung

Für die Schwingungsuntersuchungen wurde Prüfstand zur modalen und transienten Anregung von Anbindungen in Zusammenarbeit der Projektpartner MaW und utg entwickelt und am utg aufgebaut. Der aufgebaute Prüfstand ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Der Prüfstand ermöglicht ebenso die feste Einspannung der standardisierten Anbindungsproben, wie auch Segmente aus dem Folgeverbundstreifen mit einseitiger und zweiseitigem Trägerstreifen, um auch diese prüfen zu können. Durch eine definierte Anregung der festen Einspannung gerät die zu testende Probe in Schwingung. Diese Systemantwort der Probe wird mittels einem Lasertriangulationssensor ILD1320-50, Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, aufgenommen. Zusätzlich wird die Anregung der Einspannung mit einem weiteren Lasertriangulationssensor ILD 1320-50 vermessen. Dies ermöglicht die Bestimmung der Übertragungsfunktion aus Anregung und Systemantwort. Für die Anregung wird eine Modalshaker VT-20 der Fa. Sigmatest Messtechnik, Nübbel. Der Modalshaker ermöglicht Test mit einer Frequenz von bis zu 3.000 Hz und einer Amplitude von 5 mm. Die Art der Anregung wird dabei von einem, am utg vorhandenen, Frequenzgenerator 33521A, Fa. Agilent Technologies, Inc., Santa Clara, USA vorgegeben und von einem Verstärker PA100, Fa. Sigmatest Messtechnik, auf die notwendige Leistung verstärkt. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 10 dargestellt:



Abbildung 10 Aufbau des Prüfstands zur modalen und transienten Anregung von Anbindungen

Der Prüfstand kann mit zwei Anregungsarten, dem Frequenzgang und der transienten Anregung, betrieben werden. Bei der Frequenzganganalyse durchläuft die Einspannung einen vorgegebenen Frequenzbereich und in der Systemantwort stellen sich Resonanzen in Abhängigkeit der Steifigkeit und Dämpfung ein. Bei der transienten Anregung wird von Frequenzgenerator ein möglichst kurzer Impuls vorgegeben. Diese Anregung resultiert in einer abklingenden Schwingung der zu untersuchenden Probe. Die transiente Anregung regt ein breites Frequenzband an und das abklingende Signal beinhaltet daher Informationen sowohl zu den Eigenfrequenzen des Systems als auch zu den Dämpfungseigenschaften. Die beiden Anregungsarten und die dazu gemessenen, exemplarischen Daten der Systemantwort sind in nachfolgender Abbildung 11 dargestellt:

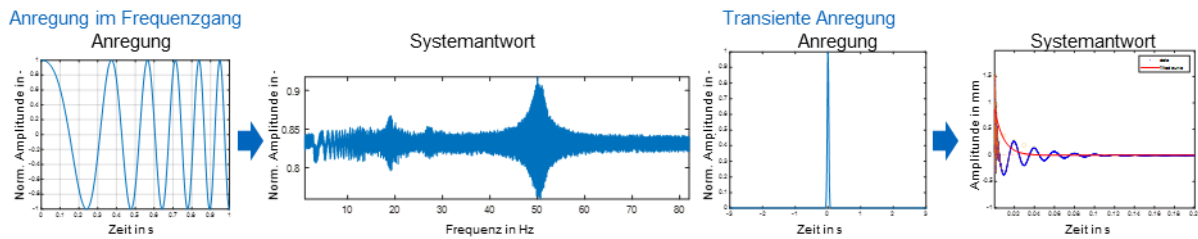


Abbildung 11 Eingangsgrößen und gemessene Größen der Betriebsarten Frequenzgang (l.) und transiente Anregung (r.)

Modellierung und simulative Versuchsdurchführung

Zusätzlich zu dem Aufbau der experimentellen Prüfstände und den durchgeführten Untersuchungen wurden ein Finite-Elemente Simulationsmodell für die digitale Versuchsdurchführung erstellt. Die Untersuchungsziele sind sowohl für das Experiment, als auch für die Simulation die gleichen. Ziel ist der Aufbau einer Datenbank für Anbindungen verschiedener Grundtypen und Geometrien und deren relevanten Eigenschaften. Für die Simulation wurde das Simulationsprogramm Abaqus/CAE 2022, Fa. Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Frankreich, verwendet.

Der Simulationsmodell beinhaltet folgende Berechnungsschritte:

- Geometrieerstellung / -import
Im ersten Schritt wurde die Geometrie der zu untersuchenden Anbindung erstellt, die Materialkarte zugewiesen, die Geometrie in Sets unterteilt und einheitlich vernetzt. Die Geometrieerzeugung fand sowohl im Stretch Web Producer (MaW), direkt in Abaqus/CAE oder in Catia V5 statt.
- Verprägen der Anbindung
Die Simulation des Verprägens wird dynamisch, explizit berechnet. Für den Trägerstreifen (carrier) sind alle Freiheitsgrade gesperrt. Als Werkzeugelemente werden die Geometrien der Werkzeugkonstruktion verwendet. Die Prozessparameter (Hubhöhe, Hubzahl, ...) entsprechen denen der experimentellen Versuchsdurchführung. Die Ergebnisse des Verprägeschritts können optional als Eingang für den Belastungsschritt verwendet werden.
- Ziehen / Belasten der Anbindung
Das mehrachsige Ziehen der Anbindungsgeometrien wird ebenfalls explizit berechnet. Die Freiheitsgrade des Trägerstreifens sind gesperrt und es wird eine Verschiebungsrandbedingung auf der freien Seite (Part) aufgebracht. Die Randbedingung kann in 4-Raumrichtungen frei gewählt werden. Die Referenzbelastung ist eine Belastung in X=5 mm, Y= 10 mm, Z=-10 mm, MY=30°.
- Untersuchung der Eigenschaften
Die Berechnung der Bauteileigenschaften erfolgt mit einem impliziten Solver. Die Berechnung wird jeweils für die initiale, unbelastete Geometrie, für die verprägte Geometrie und für den gezogenen / belasteten Fall berechnet. Vor jeder Berechnung der Bauteileigenschaft wird eine Rücksprungsimulation der Geometrie durchgeführt. Dies verhindert einen verfälschenden Einfluss des Kontakts mit den Werkzeugaktivelementen.
 - Steifigkeit: Die Steifigkeit wird jeweils in sechs Raumrichtungen berechnet. Dazu wird das freie Ende der Anbindung für die translatorischen Raumrichtungen um 0,1 mm und für die rotatorischen Raumrichtungen um 0,2 rad ausgelenkt. Die resultierenden Kräfte und Momente werden nach $k=F/\Delta l$ berechnet.
 - Eigenfrequenz: Es werden die ersten zehn Eigenfrequenzen lediglich mit der Randbedingung der festen Einspannung auf Seiten des Trägerstreifens berechnet.
 - Modalanalyse: Die Modalanalyse entspricht der Frequenzganganalyse. Hierbei durchläuft die feste Einspannung einen Frequenzbereich von 0,1 Hz – 100 Hz und es wird die Systemantwort als Ergebnisgröße berechnet. Die Modalanalyse wird für die weitere Auswertung und Modellbildung nicht verwendet. Alle benötigten Informationen werden aus der Berechnung der strukturellen Dämpfung verwendet.
 - Strukturelle Dämpfung: Die Berechnung der Dämpfungseigenschaften erfolgt für alle sechs Raumrichtungen. Dazu wird die feste Einspannung der Geometrie mit einem scharfen Impuls angeregt. Daraus resultiert eine breite Anregung aller Schwingungsmoden am freien Ende der zu untersuchenden Probe. Diese abklingende Systemantwort dient als Eingangsgröße der weiteren Auswertungen.

Die verschiedenen Schritte des Simulationsmodells sind in nachfolgender Abbildung 12 beschrieben:

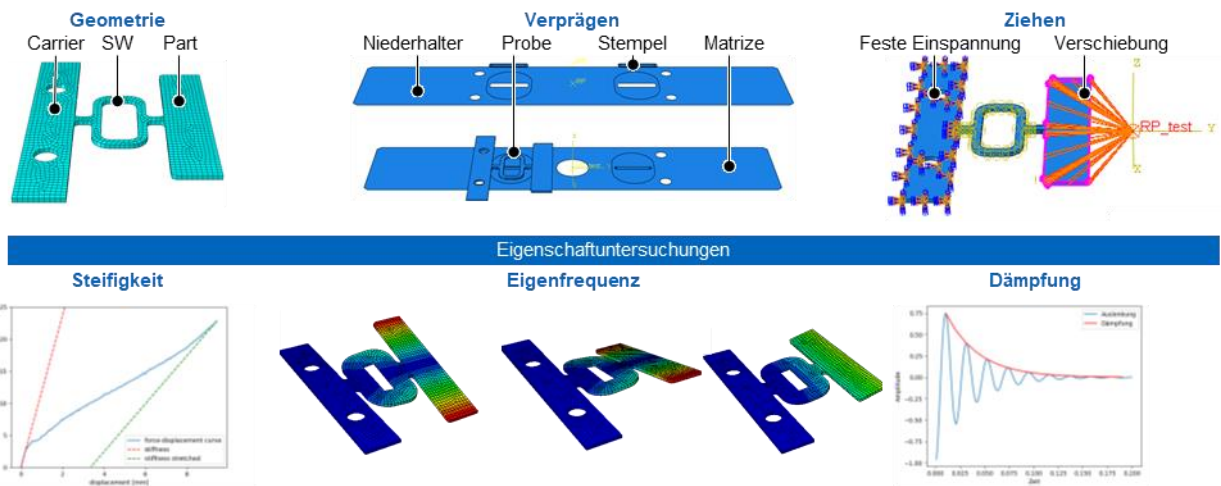


Abbildung 12 Übersicht der Berechnungsschritte der simulativen Versuchsdurchführung zur Berechnung der Anbindungscharakteristiken

Die durchgeführten Arbeiten waren angemessen und die Teilziele wurden erreicht. Sowohl mit Hilfe der experimentelle, als auch der simulativen, Untersuchungsmöglichkeiten können bisher nicht eingesetzte Anbindungsgeometrien einheitlich untersucht werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde über 50 unterschiedliche Anbindungsgeometrien untersucht. Die Erkenntnisse stoßen auf ein hohes Maß an Interesse bei den Partnern aus der Industrie und werden auch nach dem Projektende in öffentlichen Veranstaltungen des utg präsentiert. Die Ergebnisse der Anbindungscharakterisierung wurden von den Projektpartnern MaW und utg im Mai 2022 vor 300 Fachexperten im Rahmen eines Vortrags auf dem Kongress Stanztchnik vorgestellt.

3c. Modell zur Vorhersage der Anbindungseigenschaften

Die in der Datenbank vorliegenden Daten der simulativen und experimentellen Anbindungscharakterisierung wurden folgendermaßen aufbereitet und für das Modell verwendet:

- Eigenfrequenzen: Es wurden die ersten zehn Eigenfrequenzen für die jeweilige Anbindung und den Lastfall in Hz betrachtet.
- Steifigkeit: Die Steifigkeit wurde für die jeweilige Anbindungsgeometrie und den vorliegenden Lastfall (Geometrie, verprägt, vorverformt) für alle sechs Raumrichtungen in N/mm berechnet.
- Strukturelle Dämpfung: Die Dämpfung wurde anhand der Abklingkurve einer freien Schwingung für alle sechs Raumrichtungen anhand des Abklingkoeffizienten b des exponentiellen Fit ($a + \exp(-b \cdot x)$) einheitenlos errechnet

Im Rahmen der Modellbildung wurde ein Lineares Regressionsmodell (LR), ein Polynomiales Regressionsmodell (PR), k-Nächste-Nachbarn-Modell (KNN) und ein Random Forest Modell (RF) getestet. Zur Verbesserung der Modellgüte wurde eine Hyperparameteroptimierung durchgeführt (PR: Grad=2, 3, 4; KNN: Anzahl Nachbarn=2, 3, 4; RF: Anzahl Schätzfunktionen=100, 150, 200, 250, 300)

Die Modelle wurden für einen möglichst geringen RMSE (Root Mean Squared Error) trainiert. Für das Training werden die Daten in Trainings-, Test- und Validierungsdaten unterteilt.

Folgende Abbildung 13 zeigt die Ergebnisqualität des trainierten Modells bei der Vorhersage der Steifigkeit- und Dämpfungswerte in jeweils einer Richtung einer vorher unbekanntem Anbindungsvariante der I- und der O-Anbindung. Bei der O-Anbindung ist der relative Fehler für größere Steifigkeitswerte kleiner 2 %. Auch für sehr kleine Steifigkeitswerte mit einer höheren Unschärfe bereits in der Datenbank stellt sich ein Fehler kleiner 8% ein. Der relative Fehler der Dämpfungswerte für die betrachtete I-Anbindung liegt im Bereich kleiner 6 %.

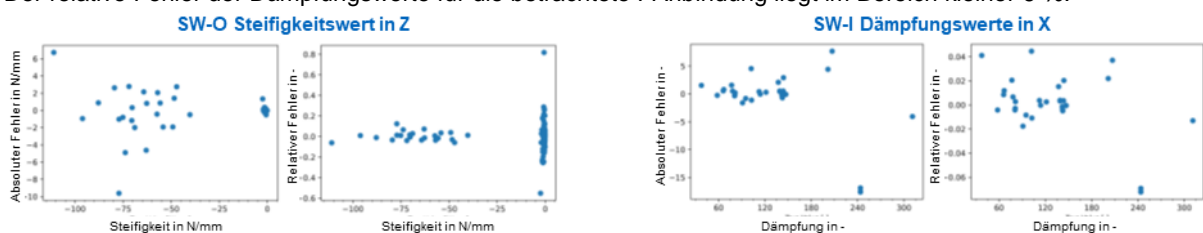


Abbildung 13 Betrachtung der Vorhersagegüte unbekannter Validierungsdaten des trainierten Modells für die Steifigkeit von einer O-Anbindung (l.) und die Dämpfung einer I-Anbindung (r.)

Die Steifigkeit in allen 6 Freiheitsgraden wird bei der O-Anbindung am besten mit einem RF-Modell beschrieben. Die Fehler der KNN-Modelle sind geringer als jene der PR-Modelle, welche wiederum besser abschneiden als die LR-Modelle. Die Steifigkeiten der I-Anbindung werden von verschiedenen Modellen gut vorhergesagt. Die strukturelle Dämpfung der O-Anbindung wird am besten durch RF-Modelle vorhergesagt. Die strukturelle Dämpfung der I-Anbindung wird in den 6 Freiheitsgraden durch unterschiedliche Modelle gut abgebildet.

Die durchgeführten Arbeiten waren angemessen und die Teilziele wurden erreicht. Das Modell zur Vorhersage der Anbindungseigenschaften kann ein Tool für die zukünftige Auslegung und Konstruktion von Folgeverbundwerkzeugen sein. Die Projektbeteiligten streben eine Veröffentlichung des Modells im Jahr 2024 an.

4. Versuchswerkzeug und Prozessbetrachtung

Für die Entwicklung eines Versuchswerkzeugs zur Echtzeit-Datenerfassung und der (integrierten) Prozessanpassung / -regelung wurde das Vorgehen in folgende Teilarbeitspakete strukturiert.

- *Konstruktion und Aufbau des modularen Versuchswerkzeugs*
Hauptwerkzeug der Untersuchungen des Schwingungsverhaltens während des Folgeverbundprozesses stellt ein modular aufgebautes Folgeverbundwerkzeug dar. Das Werkzeug ermöglicht die Untersuchung unterschiedlicher Streifenlayouts, Anbindungen, Bauteilgeometrien und Hochhebestrategien.
- *Prozesssimulation und digitales Abbild des Versuchswerkzeugs*
Für ein tieferes Verständnis der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessparameter, Streifen- und Werkzeugauslegung werden Simulationsmodelle zur Prozesssimulation einzelner, isolierter Prozessschritte des Werkzeugs und zur Simulation des Gesamtprozesses als digitaler Schatten erstellt.
- *Versuchsdurchführung mit Echtzeit-Datenerfassung*
Das Versuchswerkzeug wurde in verschiedenen Konfigurationen gerüstet und die resultierenden Bandschwingungen wurden über die integrierte Sensorik aufgenommen. Die Messdaten der integrierten Sensorik wurde genutzt, um ein digitales Abbild des Folgeverbundprozesses mittels Finiten-Elemente-Methode zu erstellen
- *Aktive Beeinflussung des Bauteiltransports*
Es wurden verschiedene Ansätze für eine aktiv geregelte Hochhebestrategie während des Bauteiltransports getestet. Die Trajektorien wurden aus den Erfahrungen der Simulation numerisch optimiert.

4a. Konstruktion und Aufbau des modularen Versuchswerkzeugs

Für die Untersuchung des Folgeverbundprozesses wurde das in Abbildung 14 dargestellte modulare Werkzeug entwickelt, konstruiert und gefertigt. Die Entwicklung und Konstruktion des Werkzeugs wurde vom Projektpartner MaW in enger Abstimmung mit dem Projektpartner utg in mehreren Optimierungsschleifen durchgeführt und am utg in Betrieb genommen. Die Fertigung des Werkzeugs und der wesentlichen Aktivelemente wurde von der Fa. Fütterer Werkzeugbau GmbH, Elchesheim-Illingen, übernommen. Fa. Fütterer Werkzeugbau GmbH ist in der Fertigung von Folgeverbundwerkzeugen sehr erfahren und konnte auch das modulare Werkzeugkonzept mit hoher Qualität umsetzen.

Das Werkzeug ermöglicht eine Beeinflussung des herzustellenden Bauteils, des Streifenlayouts und verschiedener Beeinflussungsmöglichkeiten während der Hochhebe- und Vorschubphase. Das Werkzeug besteht aus den folgenden Stufen:

- Beschnittstation (4 Stufen) zur Herstellung des Streifenlayouts und der Anbindungen
- Prägestation (1 Stufe) zum Verprägen der Anbindungen
- Tiefziehstation (1 Stufe) zur Herstellung des Bauteils
- Hebestation (6 Stufen) zur Untersuchung der Bandschwingungen
- Abhackstufe zum Vereinzeln der Bauteile vom Trägerstreifen.

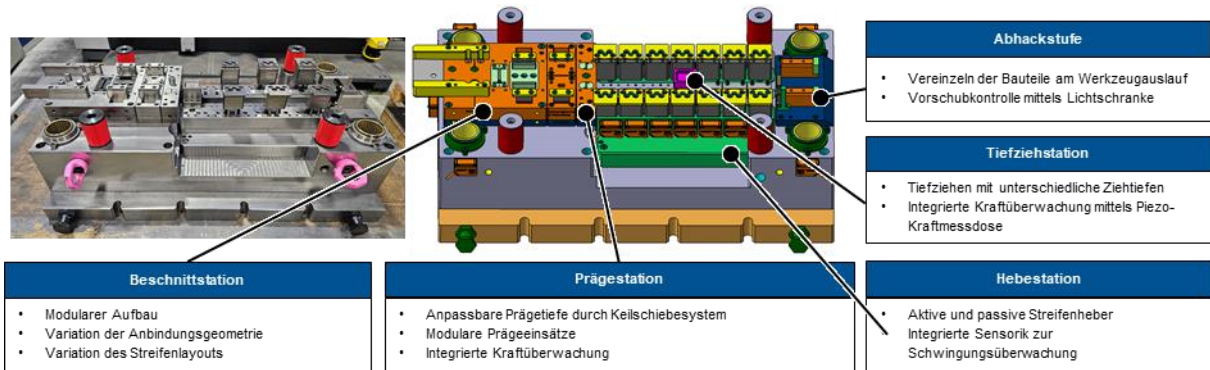


Abbildung 14 Realer und schematische Darstellung des Folgeverbundwerkzeugs und den wesentlichen Stationen

Die einzelnen Stufen und Funktionen des Werkzeugs werden im Folgenden erklärt.

Beschnittstation

Durch eine entsprechende Anpassung der modularen Aktivelemente der Beschnittstation lassen sich sowohl unterschiedliche Streifenlayouts, Anbindungsgeometrien als auch Bauteilgeometrien für den Folgeverbundprozess erzeugen. Aufgrund des zur Verfügung stehenden Materials wurde eine einlaufende Streifenbreite für alle Werkzeugkonfigurationen von 100 mm verwendet. Für das zweiseitig angebundene Streifenlayout wurden symmetrisch auf beiden Seiten die Anbindungen ausgeschnitten. Für das einseitige Streifenlayout wurde nur auf einer Seite die Anbindung ausgeschnitten und auf der gegenüberliegenden Seite wurde der Streifen durch Ausklinkungen auf eine Streifenbreite von 80 mm reduziert. Die möglichen Streifenlayouts, Anbindungen und Bauteilvarianten sind in nachfolgender Tabelle 2 und Abbildung 15 aufgeführt:

Tabelle 2 Mögliche Rüstkonfigurationen des Werkzeugs bzgl. Streifenlayouts, Anbindungen und Bauteilform

Streifenlayout	Anbindungsgeometrie	Bauteil
<ul style="list-style-type: none"> • Einseitiger Trägerstreifen • Zweiseitiger Trägerstreifen 	<ul style="list-style-type: none"> • I-Anbindung • O-Anbindung 	<ul style="list-style-type: none"> • Napf • X-Wanne • Y-Wanne

Beschnidestation			
	Napf	Y-Wanne	X-Wanne
Einseitige I-Anbindung			
Zweiseitige O-Anbindung			

Abbildung 15 Darstellung unterschiedlicher Rüstkonfigurationen zur Untersuchung des Streifenlayouts, der Anbindungen und zur Herstellung unterschiedlicher Bauteile

Prägestation

Um die Anbindungsgeometrien zusätzlich zu beeinflussen wurde nach der Beschnittstation eine Prägestation vorgesehen. Diese ermöglicht ein Verprägen der Anbindung mit Hilfe eines einstellbaren Keilschiebersystems entsprechend Abbildung 17.

Tiefziehstation

Die Tiefziehstation ermöglicht das Tiefziehen der Bauteile, welche sich durch die Konfiguration der Beschnittstation ergeben. Es kann eine Ziehtiefe bis zu 8 mm durch eine napfförmige Matrize und einen Tiefziehstempel mit Niederhalter realisiert werden. Der Tiefziehstempel hat eine Größe von 35 mm x 30 mm. Die Prozessüberwachung der Tiefziehstation erfolgt mittels Piezokraftmessdose 9071A, Fa. Kistler Instrumente AG, Witherthur, Schweiz im Krafthauptschluss am Stempel und wir mittels Ladungsverstärker Type 5073, Fa. Kistler Instrumente AG, und einer Messkarte NI9375 des CompactRio cRio-9049, Fa. National Instruments Corp., Austin, USA, abgetastet und während des Prozesses aufgenommen. Die Tiefziehstation in folgender Abbildung 16 dargestellt:

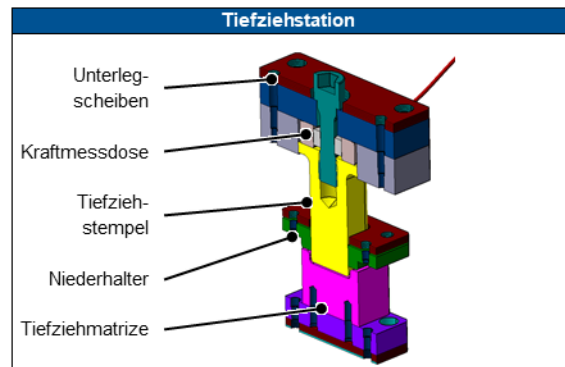
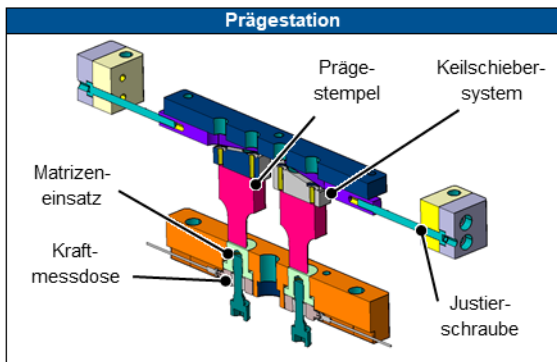


Abbildung 16 CAD-Darstellung und Benennung der Komponenten der Prägestation (l.) und der Tiefziehstation (r.)

Hebestation

Die Hebestation ist derart gestaltet, dass die Streifenlieger nach der Prägestation modular gewechselt und in ihrer Anzahl variiert werden können. Das Heben der Streifen erfolgt hierbei außen am Streifen und die Heber können sowohl vor, innerhalb oder nach der Tiefziehstation platziert werden. Die passive Konfiguration der Hebestation orientiert sich am Stand der Technik und verwendet federnd gelagerte Streifenheber, welche nach dem Verdrängerprinzip von der Niederhalterplatte während des Prozess nach unten auf die Tiefziehebene gedrückt werden. Nach oben ist der Hub der Streifenheber durch eine Anschlagplatte festgelegt. Die Hebehöhe ist für 20 mm Hebehub ausgelegt.

Da sich auch unter Zuhilfenahme des digitalen Abbilds des Folgeverbundwerkzeugs das Streifenheben als wesentliche prozessseitige Einflussgröße gezeigt hat wurde die Hebestation wechselbar gestaltet. Statt den passiv gefederten Streifenheber können bis zu sechs aktiv regelbare Streifenheber eingebracht werden. Dies wurde mittels Voice-Coil-Motoren RVCA-S30B-CRX, der Fa. Actronic-Solutions GmbH, Adelsdorf, umgesetzt. Die Aktuatoren werden überwiegend für Pick-und-Place-Lösungen eingesetzt und ermöglichen ein Verfahren in der notwendigen Geschwindigkeit (~100 mm/s) und der notwendigen Kraft (~80 N). Die Motoren werden über AKD Servoregler der Fa. Kollmorgen Europe GmbH, Ratingen und einen linearen Encoder ATOM, der Fa. Renishaw, Wotton-under-Edge, Vereinigtes Königreich, geregelt. Die Bus-Signale zu Ansteuerung der Motoren im Betrieb werden von dem Compact Rio System cRio-9049 erzeugt. Die angepassten Trajektorien können direkt auf dem cRio-9049 mittels Labview oder mittels Matlab/Simulink, Fa. The MathWorks, Massachusetts, USA, generiert werden. Die Kombination aus Geschwindigkeit, Frequenz der Hebevorgänge und die notwendige Kraft in einem anspruchsvollen Umfeld mit wenig Platzbedarf ist eine große Herausforderung bei der Auswahl geeigneter Motoren. Die ausgewählten Motoren besitzen eine Hubhöhe von 30 mm und sind mit einer Breite von 30 mm kleiner als die Vorschublänge des Folgeverbundprozesses und können damit gut integriert werden. Das Gewicht der Streifenheber ist mit 900 g sehr hoch je Motor sehr hoch. Die Hebestation in der passiven und der aktiven Konfiguration in Abbildung 17 dargestellt.

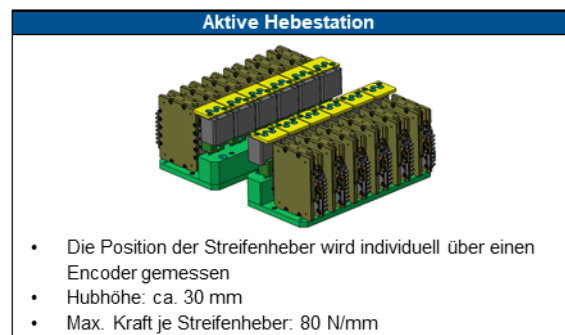
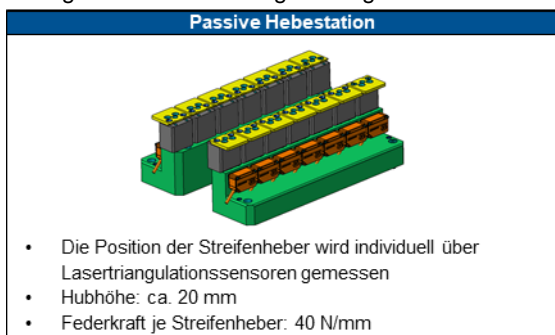


Abbildung 17 CAD-Darstellung und die Eigenschaften der passiven (l.) und aktiven (r.) Konfiguration der Hebestation

Die integrierte Prozessüberwachung und die Echtzeit-Datenaufnahme der Schwingungen wird in der Hebestation über Lasertriangulationssensoren ILD1320-25, Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, umgesetzt. Die Sensoren überwachen die Bewegung der passiven Streifenheber und können durch eine variable Positionierung unterhalb des Folgeverbundstreifens die Schwingungen des Streifens in z-Richtung aufnehmen.

Abhackstation

Die Abhackstation am Ende des Folgeverbundwerkzeugs dient dem Vereinzeln der Bauteile. Zusätzlich ist in der Abhackstation die Vorschubüberwachung mittels Gabellichtschranke E6536, Fa. Meusburger Georg GmbH, Wolfurt, Österreich integriert. Diese überprüft den Vorschub anhand der Sucherlöcher und löst bei ungeplantem Verhalten des Vorschubs einen Not-Stopp der Presse aus. Als zusätzliche Werkzeugüberwachung sind Piezo-Köperschallsensoren Diskflex der Fa. Dittel Messtechnik GmbH, Landsberg am Lech, in der Niederhalterplatte, sowohl über der Beschnittstufe, als auch über der Abhackstufe eingebracht. Diese dienen zur Doppelblechkontrolle und lösen bei nicht geplantem Verhalten ebenfalls einen Not-Stopp der Presse aus. Zusätzlich werden

Laservibrationssensoren ILD1320-100, Fa. Fa. Micro-Epsilon Messtechnik GmbH, zur Aufnahme der Bewegungskurven des Pressenstößels und des Niederhalters verwendet.

Die durchgeführten Arbeiten waren angemessen und die Teilziele wurden erreicht. Das aufgebaute Folgeverbundwerkzeug vereint die Arbeiten der Anbindungscharakterisierungen mit dem realen Prozess und ermöglicht dadurch sowohl experimentelle, als auch simulative Untersuchungen. Das Werkzeug ist wesentlich für die Projektinhalte aller Projektpartner.

4b. Prozesssimulation und digitales Abbild des Versuchswerkzeugs

Im Rahmen des Forschungsvorhaben wurden mehrere Simulationsmodelle verschiedener Prozesse mit unterschiedlichen Simulationstools erstellt. Für die Auslegung des Werkzeugs und eine erste Abschätzung der Machbarkeit wurde vom Projektpartner MaW eine Simulation der Tiefziehstufe und eine Betrachtung der Lasten auf die Anbindung in Stampack Xpress der Stampack GmbH, Bietigheim, durchgeführt.

Alle Simulation wurden mit der eigens dafür aufgenommene Materialkarte der zur Verfügung stehenden Versuchswerkstoffe aufgebaut. Die Modellierung der Werkzeugaktivelemente erfolgt aus Gründen der Recheneffizienz als Starrkörper. Die verformbaren Bauteile werden sowohl als Volumen-, als auch als Schalenelemente modelliert. Die Schalenelemente besitzen insbesondere bei der Berechnung der Bandschwingungen Vorteile bei der Rechengeschwindigkeit. Für den Fall verprägter Anbindungsgeometrien wird zwangsläufig auf Volumenelemente zurückgegriffen.

Die Prozesssimulation der einzelnen Fertigungsoperationen wurden detailliert bei Projektpartner utg in Abaqus/CAE 2022, Fa. Dassault Systèmes, erstellt. Folgende Abbildung 18 zeigt die den Modellaufbau der Prozessschritte Verprägen und Tiefziehen.

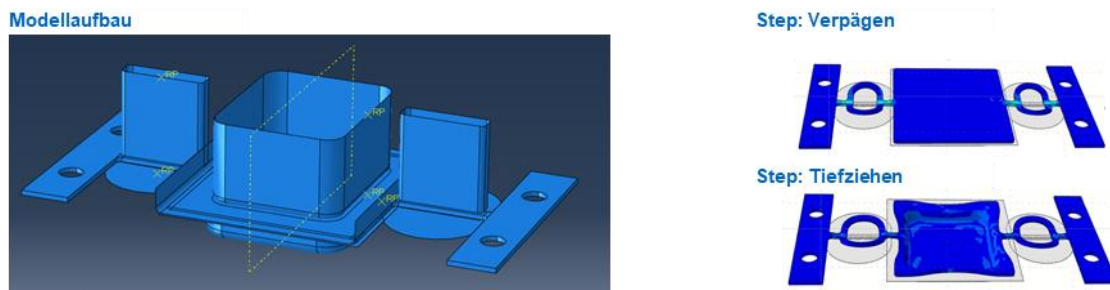


Abbildung 18 Modellaufbau der Prozesssimulation zum Verprägen und zum Tiefziehen

Für die Betrachtung der übergeordneten Zusammenhänge wurden die Prozesssimulationen sowohl am utg (Abaqus) als auch beim Projektpartner UW (LS-Dyna, Ansys Inc., Pennsylvania, USA) zu einem digitalen Abbild des gesamten Folgeverbundprozesses erweitert. Hierbei stellt sich die Herausforderung der Komplexität in den Rand- und Kontaktbedingungen und die Berechnung einer hohen Anzahl an Elementen. Die Laufzeiten der Simulationen sind im Bereich eines Tages für einen simulierten Hub inkl. Bauteiltransport. Das Simulationsmodell wurde anhand der experimentellen Daten abgeglichen und validiert. Eine exakte Abbildung aller Prozessgrößen ist nicht möglich, allerdings kann das Modell zur Ermittlung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge genutzt werden. Zusätzlich wurde am utg eine Schnittstelle der Simulationsumgebung zur Software Matlab / Simulink geschaffen. Mit dieser Schnittstelle ist es möglich gezielte Inputgrößen der Simulation zu ändern und für einen geschlossenen Regelkreis nutzbar zu machen. Dies wurde in [D] detailliert untersucht. Abbildung 19 zeigt das Vorgehensschema und die Schnittstellen zwischen Simulationsumgebung und Regler:

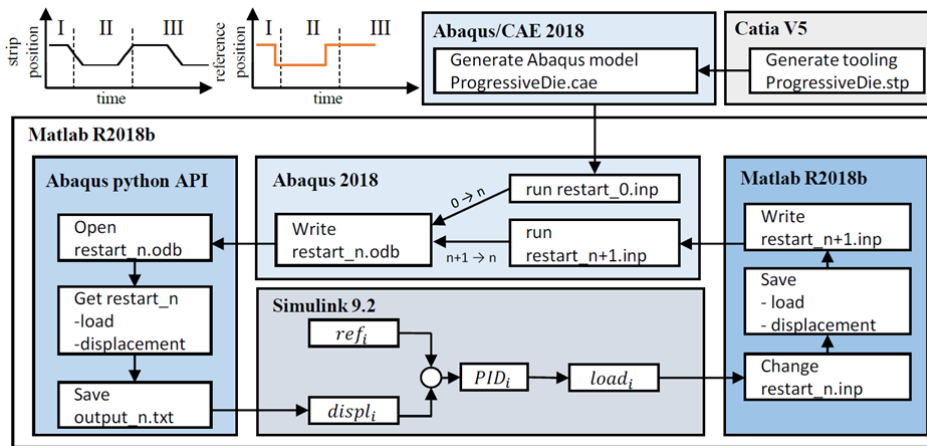


Abbildung 19 Ablaufschema der Co-Simulation zur Implementierung eines geschlossenen Regelkreises für die Simulation des Folgeverbundprozesses

Zur Rechenzeitoptimierung wurden Arbeiten mit dem Ziel einer impliziten Berechnung des Folgeverbundprozesses durchgeführt. Der eigentliche Prozess der Umformung und der hochdynamische Prozess des Streifenhebens können dabei nur explicit berechnet werden. Es wurden Untersuchungen einer impliziten-/expliziten-Co-Simulation in Abaqus durchgeführt, bei der die weniger dynamisch belasteten Bereiche mittels impliziten Solver berechnet werden. Die Ergebnisse sind vielversprechend und stellen eine Reduktion der Rechenzeit um bis zu 20 % in Aussicht. Die Ergebnisse werden weiterverfolgt und können im Rahmen des Verwertungsplans nach dem Projektende veröffentlicht werden.

Die durchgeführten Arbeiten waren angemessen und die Teilziele wurden erreicht. Die Simulationsmodelle ermöglichen eine breite Untersuchungen des Folgeverbundprozesses und geben Einsicht in die Ursachen der Bandschwingungen. Die Arbeiten [C], [D], [E] der Projektpartner UW und utg mit den weiteren Projektbeteiligten wurden bereits veröffentlicht.

4c. Versuchsdurchführung mit Echtzeit-Datenerfassung

Das Folgeverbundwerkzeug wurde am utg auf einem Schnellläufer Stanzautomaten BSTA1600 der Fa. Bruderer GmbH, Deutschland mit einer Presskraft von bis zu 1600 kN, einer einstellbaren Hubhöhe im Bereich 19 mm – 100 mm und einer Hubzahl von bis zu 600 Hub/min. Die Zuführung des Bandes erfolgt mittels einer Abwickelhaspel mit integriertem Richtautomaten KRSP, Fa. Kohler Maschinenbau GmbH, Lahr, und einem Rollenvorschub BSV, Fa. Bruderer GmbH.

Das Werkzeug wurde in der passiven Hebekonfiguration mit unterschiedlichen Rüstzuständen betrieben. Es wurden die Rüstzustände I-Anbindung und O-Anbindung mit einseitiger und zweiseitiger Trägerstreifenanbindung für die Bauteile Napf, X-Wanne und Y-Wanne untersucht. Während der Versuchsdurchführung wurden die Kraft-Weg-Kurven, die Bewegungskurven des Stößels und der Niederhalterplatte, die Bewegungskurve der Streifenheber und die Bandschwingung an ausgewählten Positionen untersucht. Zusätzlich wurden qualitative Aufnahme mittels Hochgeschwindigkeitskamera IDT Os-Kamera Os3, Fa. Imaging Solutions GmbH, Eningen unter Achalm, zur Untersuchung des Schwingungsverhalten und zur Identifikation der Hauptanregungsursachen aufgenommen.

Abbildung 20 zeigt die Phasen des Folgeverbundprozesses. Auf der linken Seite sind die Bewegungskurven über der den Kurbelwinkel eines Hubs aufgetragen, auf der rechten Seite sind die aktiven Prozessphasen über einen Hub, also 360° Kurbelwinkel aufgetragen:

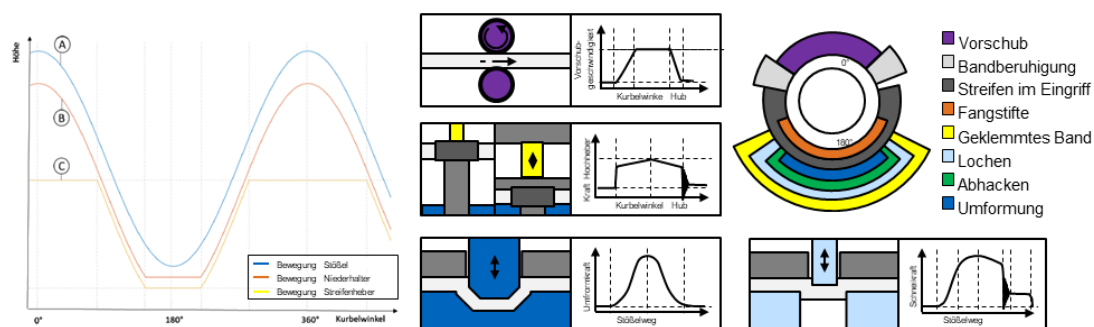


Abbildung 20 Bewegungskurven des Stößels, Niederhalters und Streifenhebers (l.) Phasen des Folgeverbundprozesses (r.)

Die Bandschwingungen sind in Abbildung 21 am Ende des Hebevorgangs deutlich messbar. Die Amplitude der Schwingungen beträgt bis zu 3 mm bei einer I-Anbindung mit geringer Stegbreite und einer Hubzahl von 100 1/s. Bei Absenken des Bandes, bzw. auf der unteren Bandlaufebene kommt es zu keinen signifikanten Schwingungen, da das Band dort vom Niederhalter geklemmt wird. Daher sind auch keine Schwingungen infolge der eigentlichen Schneid- und Umformprozesse zu erkennen. Die Abbildung zeigt neben dem Vergleich der Bandschwingung für eine I- und eine O-Anbindung auch die gemessenen Kurven der Streifenheber und des Niederhalters. Hierbei ist zu erwähnen, dass der Streifenheber keine Schwingung erkennen lässt und die Schwingung lediglich auf dem Streifen, in Folge dessen Trägheit induziert wird. Ebenso ist die Auswertung hinsichtlich des Abklingverhalten auf der oberen Vorschubebene und das FFT-transformierte Signal im Frequenzbereich zu dargestellt.

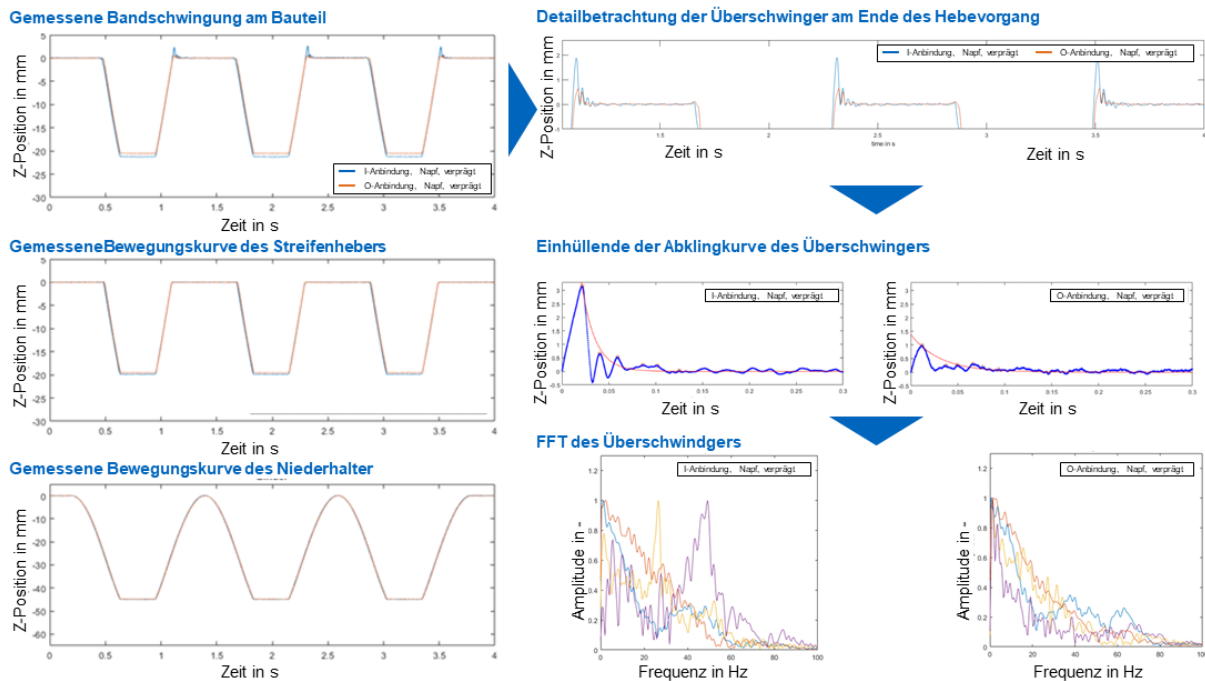


Abbildung 21 Über mehrere Hübe gemessene Bandschwingungen am Band und die Detailbetrachtung des Überschwingers

4d. Aktive Beeinflussung des Bauteiltransports

Um den Einfluss der Bewegung der Hochhebewegung auf das Schwingungsverhalten des Bauteils während des Bauteiltransports zu untersuchen wurden die Aktoren der Hebestation mit verschiedenen Trajektorien getestet. Für den passiven Hebevorgang gilt, dass sich die Geschwindigkeit des Streifenhebers zwischen der unteren Position und der oberen Vorschubebene der Geschwindigkeit des Niederhalters anpasst. Sowohl der Kurbelwinkelbereich, als auch die Hebegeschwindigkeit sind daher passiv durch die Konstruktion und die Hubzahl des Prozesses vorgegeben. Die wesentliche Anregung der Bandschwingungen resultieren aus dem abrupten Stopp der Streifenheber an der oberen Vorschubhöhe. Dieser Stopp regt den Streifen transient und damit in einem breiten Frequenzbereich mit einer hohen Energie an. Der angeregte Frequenzbereich ist in Abbildung 22 dargestellt. Mithilfe des über den geschlossenen Regelkreis aus linearen Inkrementalgebern und den Servokontrollern der aktiven Streifenheber können nun auch folgende, schwingungsreduzierende Trajektorien verwendet und untersucht werden:

- Ruckreduziert
- Sinusquadrat
- Polynom 7ter Ordnung

Folgende Abbildung 20 zeigt die Unterschiede in den angeregten Frequenzen der einzelnen Strategien verglichen mit der passiven Hebetrajektorie. Als Ursache der angeregten Frequenzen je Hochhebestrategie sind die Ableitungen der Position, die Geschwindigkeit (1.Ableitung), die Beschleunigung (2.Ableitung) und der physikalische Ruck (3.Ableitung):

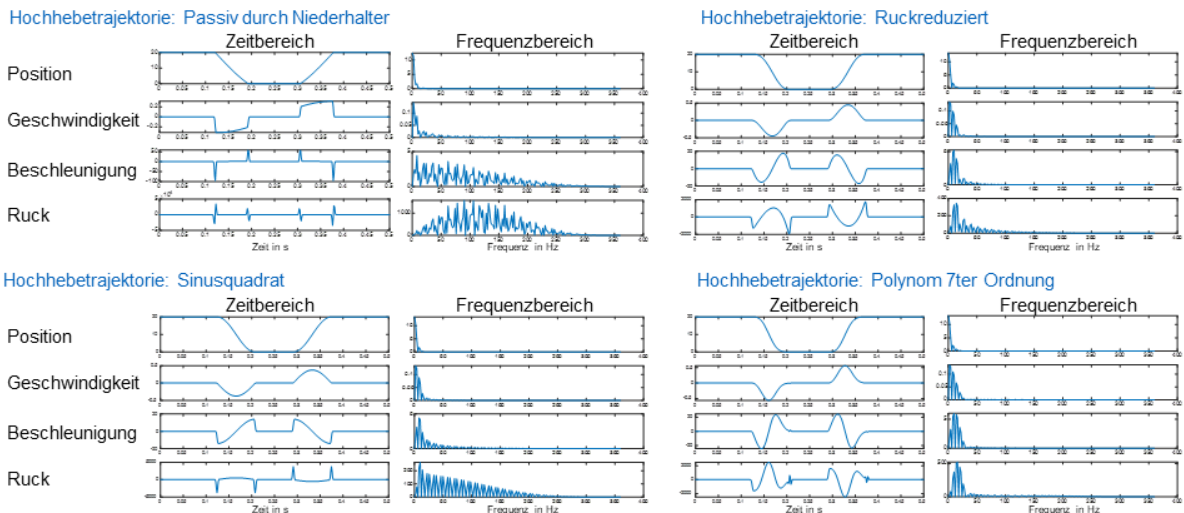


Abbildung 22 Die analytischen Positions-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Ruckprofile für unterschiedliche Hebetrajektorien

Zusätzlich zu einer ruhigeren Hebetrajektorie unter Berücksichtigung der angeregten Frequenzbereiche, kann der Kurbelwinkelbereich für das Hochheben aktiv beeinflusst werden. Sobald sich der Niederhalter prozessbedingt von den Streifenhebern löst, kann der Hochhebevorgang gestartet werden. Der Hebevorgang kann mehr Zeit in Anspruch nehmen, als dies bei dem passiven, verdrängten System der Fall ist und langsamer stattfinden. Der Hochhebevorgang sollte vor dem Beginn der horizontalen Vorschubphase beendet sein.

Abbildung 23 zeigt die Bandschwingungen in Folge der unterschiedlichen Hebestrategien für eine einseitig angebundene I-Anbindung mit Napf:

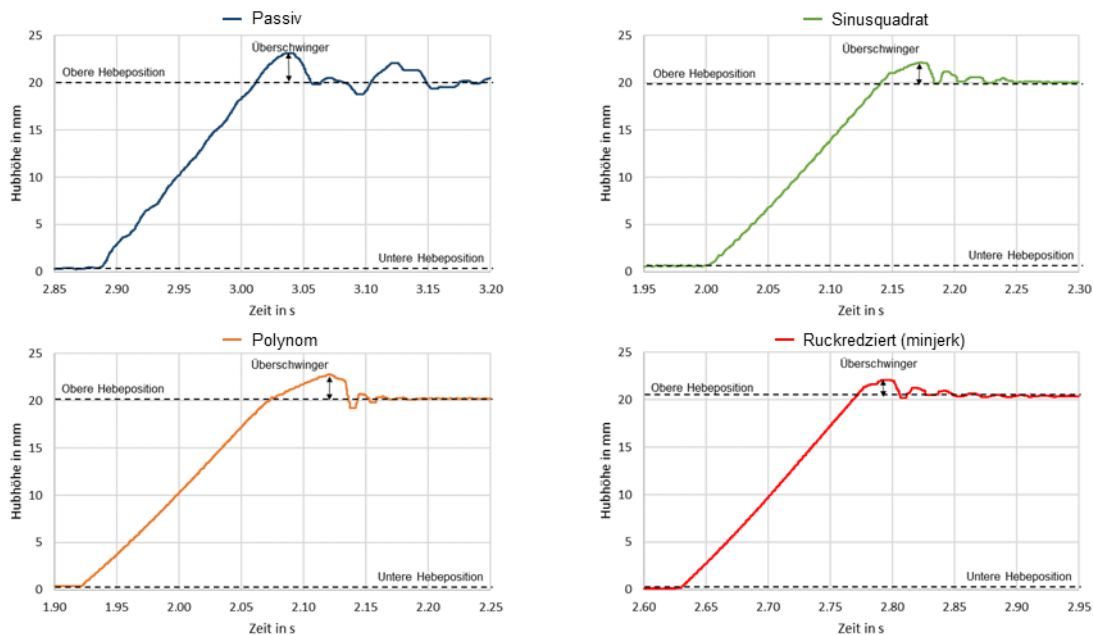


Abbildung 23 Überschwinger beim Hochheben (Streifen: Napf, I-Anbindung, einseitig, ohne Verprägung) für verschiedene Trajektorien

Es ist eine deutliche Reduzierung der Bandschwingungen für alle drei getesteten Strategien zu erkennen. Zusätzlich ist eine deutliche schnellere Reduzierung der auftretenden Schwingungen erkennbar. Aufgrund des fehlenden mechanischen Impulses ist dies auf eine ausbleibende Anregung der Streifenheber zurückzuführen.

5. Sonstige Tätigkeiten

Zur Erreichung der Untersuchungsziele wurden neben den oben erwähnten Arbeiten folgende ergänzende Untersuchung während der Projektlaufzeit durchgeführt.

- Materialcharakterisierung

Die numerische Abbildung des betrachteten Folgeverbundprozesses mittels Finiter-Elemente-Methode für die Prozesssimulation und auch für den digitalen Zwilling sind wesentlich von den verwendeten Materialdaten und den Konstitutivmodellen abhängig. Die Belastungszustände des Materials während des gesamten Prozesses decken eine Breite an unterschiedlichen Spannungszuständen und verschiedenen Verformungsgeschwindigkeiten ab. Dies muss in der Materialcharakterisierung berücksichtigt werden. Die Materialcharakterisierung wird drei verschiedene Werkstoffe durchgeführt:

- DC04, 1 mm
- AA6016, 1 mm
- DP600, 1 mm

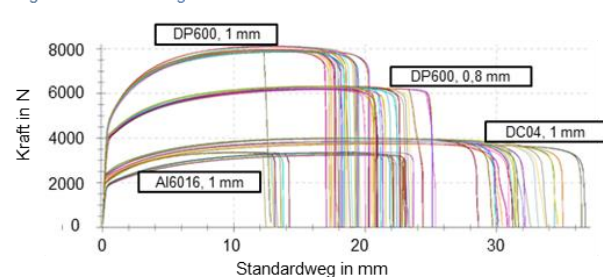
Ausgangspunkt werden dazu folgende Charakterisierungsversuche für anisotrope Konstitutivmodelle durchgeführt:

Tabelle 3: Übersicht der Charakterisierungsversuche für die anisotropen Konstitutivmodelle

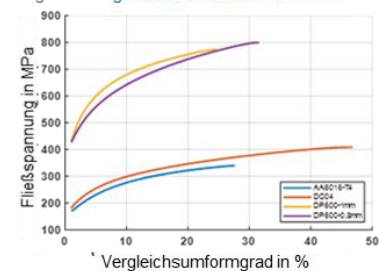
Charakterisierungsversuch	Norm	Zustand	Varianten	Ergebnis
Einachsiger Zugversuch	ASTM	Uniaxialer Zug	Walzrichtung Dehnrage	Zugfestigkeit Rm, Gleichmaßdehnung Ag, Fließkurve kf, r-Wert, Verfestigungskoeffizient n
Scherzugversuch	ASTM B831			Fließkurve kf
Tiefungsversuch nach Erichsen	ISO 20482			Höhere Umformgrade
Plain Strain Versuch	VDA	Ebener Spannungszustand		Fließkurve kf
Stauchversuch			-	Fließkurve
Hydraulischer Tiefungsversuch	DIN 16808	Biaxialer Spannungszustand		Fließkurve kf
Nakajima Test	ISO 12004-2	Verschieden	235 110 100 90 70	Grenzformänderungsdiagramm FLC

Die verwendeten Materialmodelle für die verschiedenen Simulationstools (Abaqus, LS-Dyna, Stampack) unterscheiden sich zum Teil stark. Die Fließkurve, die Fließortbeschreibung und das Grenzformänderungsdiagramm FLC liegen aber jeweils zugrunde. Die allgemeine Darstellung der FLC und des Fließorts sind in Abbildung 24 dargestellt.

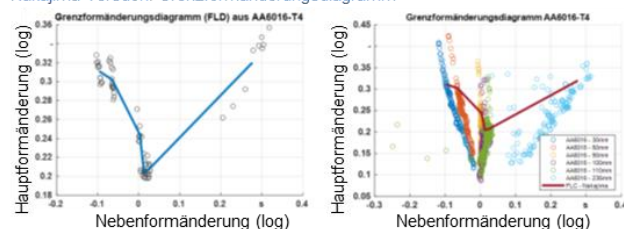
Zugversuch: Kraft-Weg-Kurven



Zug- und Bulgeversuch: Fließkurve



Nakajima-Versuch: Grenzformänderungsdiagramm



Scherzugversuch: Digital Image Correlation

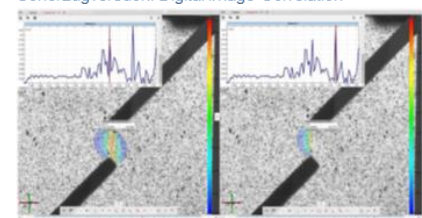


Abbildung 24 Überblick über die durchgeführten Untersuchungen und Ergebnisse der Materialcharakterisierung

Zur Materialcharakterisierung im Bereich sehr hoher Dehnraten (Split-Hopkins-Bar) und der Versagenskriterien und -mechanismen wurde Material der gleichen Charge an den kanadischen Projektpartner University

- Auslegung aktiver Hochheber
 Über den Rahmen des Forschungsvorhabens hinaus wurde das Thema des Folgeverbundprozesses und der damit einhergehenden Herausforderungen beim Hochheben während des Bauteiltransports in der aktiven Lehre behandelt. Im Rahmen von Seminaren und Studienarbeiten wurden von Projektpartnern und Studierenden der TUM Ansätze zur Entwicklung aktiver Streifenheber ausgelegt und entwickelt. Aufgrund der anspruchsvollen technischen Anforderungen der Streifenheber im Bereich Geschwindigkeit, Kraft, Frequenz und Bauraum wurde auf die Voice-Coil-Motoren als Lösung für das Versuchswerkzeug zurückgegriffen. Abbildung 25 zeigt die Ansätze der aktiven Streifenheber:

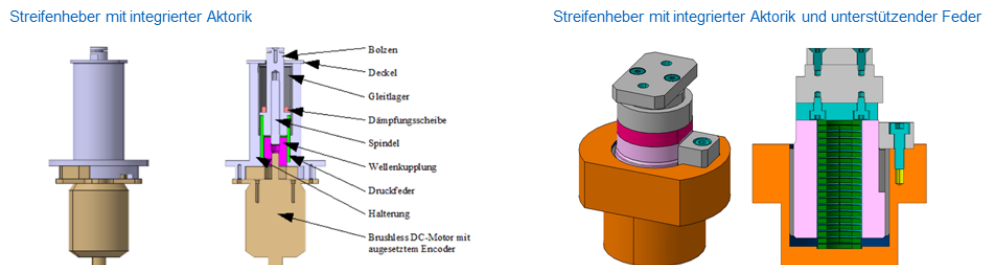


Abbildung 25 CAD-Modelle der ausgelegten aktiven Streifenheber

- Konstruktion und Aufbau eines Zangenvorschubs
 Über den Rahmen des Forschungsvorhabens hinaus wurde das Thema des Folgeverbundprozesses und der damit einhergehenden Herausforderungen beim Vorschub während des Bauteiltransports in der aktiven Lehre behandelt. Im Rahmen von Seminaren und Studienarbeiten wurden von Projektpartnern und Studierenden der TUM Ansätze zur Entwicklung eines frei-programmierbaren Zangenvorschubs ausgelegt und entwickelt. Aufgrund der anspruchsvollen technischen Anforderungen des Vorschubs im Bereich Geschwindigkeit, Kraft, Frequenz und Bauraum und der notwendigen Robust- und Zuverlässigkeit in einem schnelllaufenden Folgeverbundprozess wurde auf einen vorhandenen Bruder-Servo-Vorschub BSV als Lösung für das Versuchswerkzeug zurückgegriffen. Abbildung 26 zeigt die Ansätze Zangenvorschubs

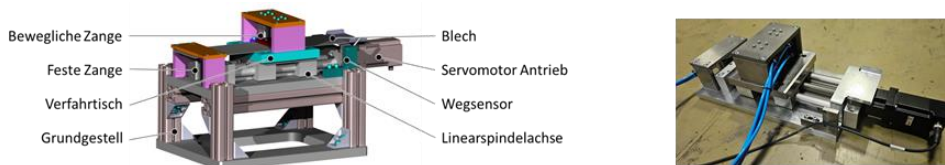


Abbildung 26 CAD-Modell (l.) des ausgelegten Zangenvorschubs und realer Aufbau (r.)

6. Anhang

- Realer Aufbau Multi-Axial-Prüfstand und eingebautes Werkzeug mit Kamera

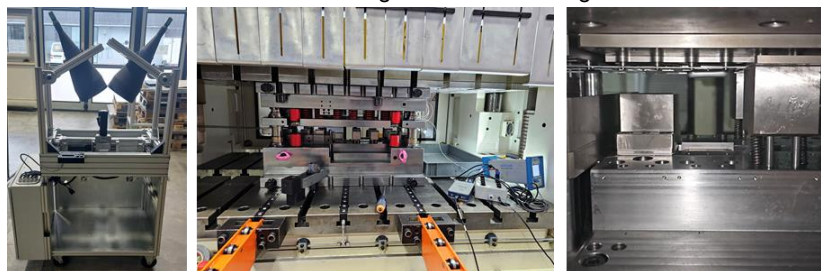


Abbildung 27: Aufbau des Multi-Axial-Prüfstands mit Stereokamera (l.), eingebautes Versuchswerkzeug (m.) und Blick ins Werkzeug zur optischen Schwingungsüberwachung per Kamera (r.)

- Versuchswerkzeug mit passiven und aktiven Hochhebern



Abbildung 28 Rüstkonfiguration des Versuchswerkzeugs mit passiven (l.) und aktiven Hochhebern (r.)

7. Projektveröffentlichungen

- [A] – F. Steinlehner, A. Weinschenk, Sven Kolb, S. Laumann, W. Volk; Numerical description of the physical properties of stretch web connectors in Progressive Die Stamping, Numisheet 2022, Toronto, Canada;
- [B] – S. Athreya, A. Weinschenk, F. Steinlehner, D. Budnick, M. Worswick, W. Volk, S. Huhn; Parametric Shape Optimization of Stretch Webs in a Progressive Die Process using a Neural Network Surrogate Model; IDDRG 2021, Stuttgart, Germany; DOI: 10.1088/1757-899X/1157/1/012081
- [C] – D. Budnick, A. Ghannoum, F. Steinlehner, A. Weinschenk, W. Volk, S. Huhn, W. Melek, M. Worswick; Predicting Dynamic Process Limits in Progressive Die Sheet Metal Forming; IDDRG 2022, Lorient, France; DOI: 10.1088/1757-899X/1238/1/012068
- [D] – F. Steinlehner, M. Ott, D. Budnick, A. Weinschenk, S. Laumann, M. Worswick, W. Volk; Development of inline closed-loop vibration control in progressive die stamping using finite element simulation; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; DOI: 10.1088/1757-899X/967/1/012035
- [E] – D. Budnick, F. Steinlehner, A. Weinschenk, W. Volk, W. Melek, M. Worswick, S. Huhn; Simulation of Dynamic Effects in Progressive Die Operation and Control; IDDRG 2021, Stuttgart, Germany; DOI: 10.1088/1757-899X/1157/1/012085

Literaturverzeichnis

- [1] - Obama Administration Finalizes Historic 54.5 MPG Fuel Efficiency Standards, White House Press Release, August 29, 60 2012, <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2012/08/28/obama-administration-finalizes-historic-545-mpg-fuel-efficiency-standard> abgerufen am 15.06.2018.
- [2] - IHS Automotive Supplier Business report, Weight Reduction in Automotive Design and Manufacture, 2014.
- [3] - Kelly, J.C., Sullivan, J.L., Burnham, A., Elgowainy, A., Impacts of Vehicle Weight Reduction via Material Substitution on Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions, Environ. Sci. Technol., 2015, 49 (20), pp 12535–12542, DOI: 10.1021/acs.est.5b03192, Publication Date (Web): September 22, 2015, <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b03192> 65
- [4] - Dillinger, J. et al.: Fachkunde Metall, 55. Auflage, Verlag Europa Lehrmittel, Haan Gruiten 2007
- [5] - Hellwig, W.: Spanlose Fertigung: Stanzen – Grundlagen für die Produktion einfacher und komplexer Präzisions-Stanzteile, 5 8. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden 2006; ISBN 978-3-8348-9043-6
- [6] - Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft –Band 3: Blechbearbeitung, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1990; DOI10.1007/978-3-662-10686-0
- [7] - N.,N., Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik, 1. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1996; ISBN 978-3-10 662-07703-0
- [8] - Ann, B.N.K. and Kai, C.C., A knowledge-based system for strip layout design, Computers in Industry. Volume 25 Issue 1, November 1994, pp. 31-44, DOI: [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)90030-2)
- [9] - Rao, R.V., Evaluation of metal stamping layouts using an analytic hierarchy process method, Journal of Materials Processing Technology, Volume 152, Issue 1, 1 October 2004, pp 71-76, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.03.007> 15
- [10] - Kumar, S. and Singh, R., An automated design system for progressive die, Expert Systems with Applications. Volume 38, Issue 4, April 2011, pp 4482-4489, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.09.121>
- [11] - Ghatrehnaby, M. and Arezoo, B., Automatic strip layout design in progressive dies, Journal of Intelligent Manufacturing, June 2012, Volume 23, Issue 3, pp 661–677
- [12] - Krahn, H.; Eh, D.; Kaufmann, N.; Vogel, H.: 1000 Konstruktionsbeispiele Werkzeugbau: Umformtechnik, Schneidetechnik, 20 Fügetechnik, 1. Auflage, Carl Hanser Verlag München, Wien 2009, ISBN: 978-3-446-42321-3
- [13] - Flimm, J.: Spanlose Formgebung, 6. Auflage, Hanser Verlag, München 1990; ISBN: 9783446155954
- [14] - Oehler, G.; Kaiser, F.: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1993; ISBN 978-3-642-97498-4
- [15] - Hille, P.: Spanlose Fertigungsverfahren – Kamprath-Reihe: Kompaktlehrbuch: Technik, Vogel Verlag Und Druck, 25 Würzburg 1979;
- [16] - Blechnet Schwer+Kopka GmbH; <https://www.blechnet.com/sensoren-sichern-den-stanz-und-umformprozess-a-454898/>, abgerufen am 20.06.2018
- [17] - Brankamp 2018; H https://www.meusburger.com/DE/DE/media/PRE_Einsatz-moderner-Prozessmesstechnik_IN.pdf 70. abgerufen am 20.06.2018
- [18] - Neher J.: Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozessüberwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen, STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 1, Fraunhofer Verlag 2012; ISBN: 978-3-8396-0424-3
- [19] - Kolbe M.; Hellwig W.: Spanlose Fertigung Stanzen, 12. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2018; ISBN 978-3-658-30 20024-4
- [20] - Faaß I.: Prozessregelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken; München: Hieronymus-Verlag 2009
- [21] - Mork R.: Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze; München: Herbert Utz Verlag 2011
- [22] - Maier S.: Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge; München: Hieronymus-Verlag 35 2018
- [23] - Groche P.; Schreiner J.; Hohmann J.; Birkhold M.; Lechler A.: Industrie 4.0 – Chance auch für die Umformtechnik; VDI-Zeitung 156 (2014), Nr. 6 - Juni

- [24] - Schuh G.; Walendzik P.; Luckert M.; Birkmeier M.; Weber A.: Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten; WGP Standpunkt, Carl-Hanser Verlag München; <https://www.hanser-elibrary.com/loi/zwf> ; 111 (2018) Dokumentnummer ZW 111613 40
- [25] - Qi Zhang, Xiaomei Zhang, Wenjun Xu, Aiming Liu, Zude Zhou and Duc Truong Pham: Modeling of Digital Twin Workshop Based on Perception Data; Intelligent Robotics and Applications, 10th International Conference, ICIRA 2017 Wuhan, China, August 16–18, 2017; Springer International Publishing AG 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-65298-6_1
- [26] - Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C.-Y. Lu & A. Y. C. Nee: Digital twin-driven product design framework; International Journal of Production Research 2018; DOI: 45 10.1080/00207543.2018.1443229
- [27] - Böttcher O.; Gruber M.; Raupach M.; Volk W.: EFB-Forschungsvorhaben Nr.449 Anbindungsoptimierung von Folgeverbundbauteilen; IGF 17794N 2016; <https://www.efb.de/-publikationen/401ff/bericht-449.html>
- [28] - Rahmaan T, Abedini A, Butcher C, Pathak N, Worswick M J, Experimental investigation of strain rate effect on fracture 50 characteristics of DP600 and AA5182-O sheet metal alloys under shear loading, International Journal of Impact Engineering, 2017, 108:303-321
- [29] - Abedini A, Butcher C, Nemcko M J, Kurukuri S, Worswick M J, Constitutive characterization of a rare-earth magnesium alloy sheet (ZEK100-O) in shear loading: studies of anisotropy and rate sensitivity, International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 128-129:54-69 55
- [30] - Volk, W. & Hora, P., 2011. New algorithm for a robust user-independent evaluation of beginning instability for the experimental FLC determination. Int J Mater Form, 4: 336-346, Web-Referenzen: