

# Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für mechanische Bauteile

## Manufacturing Stage-Based Design Model for Mechanical Components

Kevin Herrmann<sup>1</sup>, Tim Brockmöller<sup>1</sup>, Paul Gembarski<sup>1</sup>, Iryna Mozgova<sup>1</sup>, Roland Lachmayer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Garbsen  
herrmann@ipeg.uni-hannover.de

**Abstract (deutsch):** Durch fertigungsbedingte Restriktionen wird der Gestaltungsraum von mechanischen Bauteilen während der Produktentwicklung eingeschränkt. Die Einschränkungen sind in der Regel nicht vollständig bekannt und können daher nicht in vollem Umfang bei der Bauteilgestaltung berücksichtigt werden. Das betrifft insbesondere prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen, die bei der Aneinanderreihung von mehreren Fertigungsschritten entstehen. Dieser Beitrag schlägt einen Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsansatz vor, um das Wissen für ein herstellungsgerechtes Bauteil möglichst früh im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung zu stellen. Grundlage dieses Gestaltungsansatzes sind Transfermodelle, welche Fertigungsprozessketten entgegen der späteren Prozessrichtung beschreiben. Dabei werden schrittweise zwischengelagerte Fertigungsstufen abgeleitet und deren Herstellbarkeit mit Hilfe geeigneter Kontrollmechanismen evaluiert.

**Keywords (deutsch):**

Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell, fertigungsgerechte Gestaltung, Tailored Forming, Parametrische CAD-Modelle

---

**Abstract (english):** Manufacturing restrictions limit the design scope of mechanical components during product development. Often, these restrictions are not completely known and can therefore not be taken fully into account during the design of component. This concerns in particular cross-process manufacturing restrictions, which arise when several manufacturing steps are chained together. This paper proposes a design approach based on knowledge about of manufacturing steps in order to provide a manufacturable component as early as possible in the product development process. The basis of this design approach are transfer models, which describe the manufacturing process chain against the later process direction. Thereby, intermediate manufacturing stages are derived step by step and their manufacturability is evaluated by means of suitable control mechanisms.

**Keywords (english):**

Manufacturing Stage Based Design Model, Design for Manufacturing, Tailored Forming, Parametric CAD-models

## 1 Einleitung

Die stetige Weiterentwicklung in der Produktionstechnik erweitert den konstruktiven Lösungsraum bei der Gestaltung von Bauteilen auf eine sehr grundlegende Weise. Während z.B. Verfahren der Additiven Fertigung die Freiheitsgrade bei der Formgebung von mechanischen Bauteilen eröffnen (Lachmayer et al. 2017), erschließen immer mehr Prozessketten das Potenzial, auch unterschiedliche Werkstoffe in einer einzelnen Komponente zu verarbeiten (Behrens et al. 2019, Blohm et al. 2018; Chugreeva et al. 2018). Die Entwicklung solcher Multi-Materialbauteile erlaubt hierbei, weitere Potenziale im Leichtbau und in der belastungsgerechten Konstruktion zu heben (Ashby und Cebon 1993, Kleemann et al. 2017, Brockmöller et al. 2017). Die entsprechenden Fertigungsprozessketten zeichnen sich dadurch aus, dass die Komplexität mit der Anzahl der notwendigen Fertigungsschritte steigt. Ein Beispiel dafür sind die im Sonderforschungsbereich (SFB) 1153 entwickelten Tailored Forming Prozessketten, bei denen verschiedene Füge- und Umformschritte hintereinandergeschaltet sind (Behrens et al. 2016). Besonders der Initialaufwand von der Planung bis zu einem robusten Prozess ist hoch (Özbayrak et al. 2004). Daher ist es vorteilhaft, nicht erst bei der Prozessplanung, sondern auch bei der Produktentwicklung auf möglichst viel formalisiertes Expertenwissen zurückgreifen zu können, um sicher herstellbare Bauteile zu konstruieren. Dieses Wissen kann in unterschiedlicher Form vorliegen, was von Gestaltungsrichtlinien bis hin zu wissensbasierten Analyse- oder Simulationswerkzeugen für einzelne Prozessschritte reicht (Brockmöller et al. 2020).

Da sich der Änderungsaufwand mit fortschreitender Entwicklung erhöht, wird im Rahmen von front loading-Ansätzen das Ziel verfolgt, das Wissen für ein herstellungsgerechtes Bauteil möglichst früh im Produktentwicklungsprozess zur Verfügung zu stellen (Boothroyd 1994). Um das Ziel zu erreichen, wird in diesem Beitrag ein Fertigungsstufen-basierter Gestaltungsansatz vorgeschlagen, um auch Restriktionen aus zwischengelagerten Wertschöpfungsstufen beginnend bei der Halbzeuggestaltung in die Bauteilgestaltung einfließen zu lassen. Kernaspekt des Gestaltungsansatzes sind Transfermodelle, welche Fertigungsprozessketten invers, also entgegen der späteren Prozessrichtung beschreiben.

## 2 Theoretischer Hintergrund und verwandte Arbeiten

Um Produkte bereits gezielt auf spätere Fertigungsprozesse auslegen und entwickeln zu können, werden in Literatur und Praxis unterschiedliche Ansätze verfolgt, die sich grob in allgemeine Konstruktionsmethodiken und Problemlösungsprozesse, in Gestaltungsrichtlinien sowie in, im weitesten Sinne, modell- und wissensbasierte Ansätze gliedern lassen. Ein Beispiel für ersteres stellt die Konstruktionsmethode *Axiomatic Design* dar (Suh 2005). Dieser Ansatz beruht auf einem Domänenkonzept, das zwischen Kundendomäne (als Menge aller Kundenanforderungen), funktionaler Domäne als deren Übersetzung in die Sprache der Konstruktion, physischer Domäne als parameterhafte Beschreibung von Lösungen bis auf Ebene von Einzelteilen und ihrer Gestaltparameter (Design Parameter) und Prozessdomäne differenziert. Letztere enthält mit den Prozessvariablen die Kernparameter der Fertigungsprozesse, mit denen ein Design Parameter realisiert wird. Die vier Domänen führen zu einer starken Formalisierung des Entwurfsprozesses, bei der die Anforderungen einer Vorgängerdomäne mittels Entwurfsmatrizen auf die Lösungen der Folgedomäne abgebildet werden. Dreht man den Prozess um und beginnt die Betrachtung bei einer allgemein formulierten Prozessdomäne, so ergibt sich hieraus ein Portfolio an Fähigkeiten, wodurch Design Parameter mit einer vorhandenen Prozesskette erzeugt werden können (Gembarski 2018, Sheveleva et al. 2020).

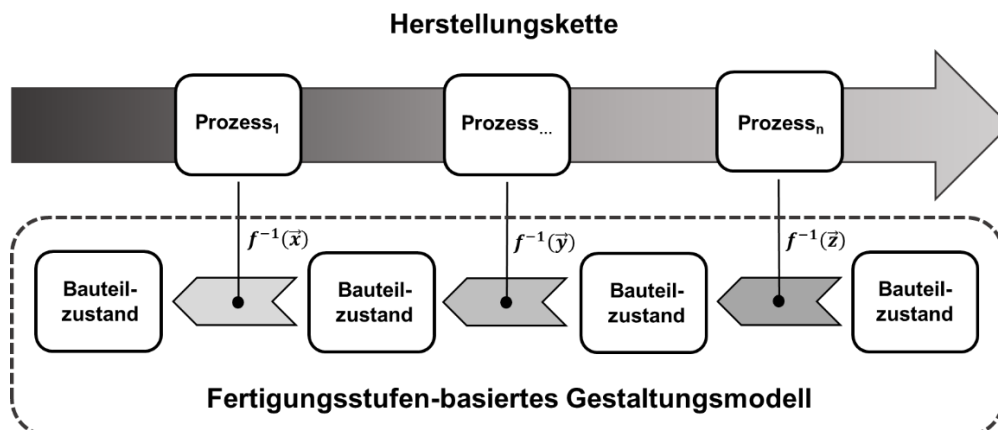
Ein Werkzeug, welches Konstruierende bei fertigungsgerechtem Entwurf und Detaillierung unterstützt (im Englischen: Design for Manufacturing, DfM), stellen Gestaltungsrichtlinien dar. Diese bestehen aus Sammlungen von z.B. Fertigungsrestriktionen und Heuristiken, mit denen Erfahrungen aus

unterschiedlichen Fertigungsprozessen formalisiert werden (Boothroyd 1994, Huang 1996). Die Operationalisierung dieser Gestaltungsrichtlinien im Rahmen von rechnerunterstützten Konstruktions- oder Analysesystemen kann jedoch unterschiedlich aufwändig sein. Während sich der Zusammenhang zwischen Blechstärke und Biegeradius durch eine Parameterverknüpfung darstellen lässt, erfordert z.B. die Gestaltungsrichtlinie „Materialmix minimieren“ aus dem recyclinggerechten Gestalten bereits eine Auswertung von Baugruppen- oder Stücklistendaten (Dostatni et al. 2016). Gestaltungsrichtlinien wie „Materialanhäufungen vermeiden“ aus dem gießgerechten Gestalten bedingen hingegen spezialisierte Analysesoftware oder den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz (Gembariski 2020a).

Während die o.g. Gestaltungsrichtlinien eine allgemeingültige Formulierung von z.B. Fertigungsrestriktionen darstellen, beziehen modell- und wissensbasierte Ansätze konkrete Fertigungseinrichtungen und ihre spezifischen Restriktionen wie z.B. den maximalen Verfahrenweg einer NC-Achse mit ein (Vajna et al. 2018, Siqueira et al. 2019). Ein Ansatz, der auf die Gestaltung von mehrstufigen Fertigungsprozessen abzielt, wurde von Milisavljevic-Syed et al. (2019) vorgestellt. Auf Basis eines state-space Modells werden hierbei die Fähigkeiten der einzelnen Fertigungsprozesse unter Berücksichtigung von verfügbaren Werkzeugen, Einstellparametern, Prozessgrößen und Sensoren der Maschinen formalisiert. Für eine bekannte Bauteilgeometrie lassen sich anschließend auf dieser Basis über ein Entscheidungsnetzwerk diejenigen Fertigungsprozesse auswählen, die den geringsten Aufwand bei der Prozessüberwachung bei gleichzeitig größter Prozesssicherheit bieten. Lassen sich Geometrielemente nicht herstellen, wird dieses zurückgemeldet. Das Modell wird anhand eines mehrstufigen Stanzbiegeprozesses aus dem Automobilbau diskutiert. Einen anderen Ansatz wählt Gembariski (2020b). Hier wird das Portfolio der Fähigkeiten einer Fertigungsprozesskette direkt als wissensbasiertes System modelliert. Dieses lässt sich anschließend mit rechnerunterstützten Konstruktionssystemen koppeln, um z.B. neue Produktvarianten direkt im Hinblick auf ihre Fertigbarkeit zu überprüfen oder die Auswirkung von einer Geometrieänderung auf die Fertigungsprozesskette beurteilen zu können. Das Modell wird anhand von Spulenteilen eines Hairpin-Stators erläutert.

### 3 Ansatz des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell

Wenngleich Konstruktionsmethoden wie *Axiomatic Design* eine grundsätzliche formelle Berücksichtigung von Fertigungsrestriktionen oder Gestaltungsrichtlinien ermöglichen, werden hierbei in der Regel keine Fertigungsstufen berücksichtigt. In den Wissensbasierten Ansätzen geschieht dieses lediglich implizit über die ausgedrückten Fähigkeiten einzelner Prozesse. Der im Folgenden vorgestellte Ansatz soll beide Sichtweisen verbinden, indem die Herstellungskette entgegengesetzt zur Prozessrichtung betrachtet wird. Damit lassen sich ausgehend von einer vorgeschlagenen Bauteilgestalt schrittweise die einzelnen Bauteilzustände zwischen den Fertigungsstufen ableiten und jede Stufe für sich hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit überprüfen (siehe Bild 1).



**Bild 1:** Ansatz des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodells

Die Bewertung der Herstellbarkeit wird im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell unter Zuhilfenahme der vorhandenen Fertigungsressourcen, z. B. Maschinen oder Werkzeuge, durchgeführt. Dafür ist eine rechnergestützte Formalisierung der Spezifikationen notwendig, die im Modell über Parameter hinterlegt werden.

### 3.1 Aufbau des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell

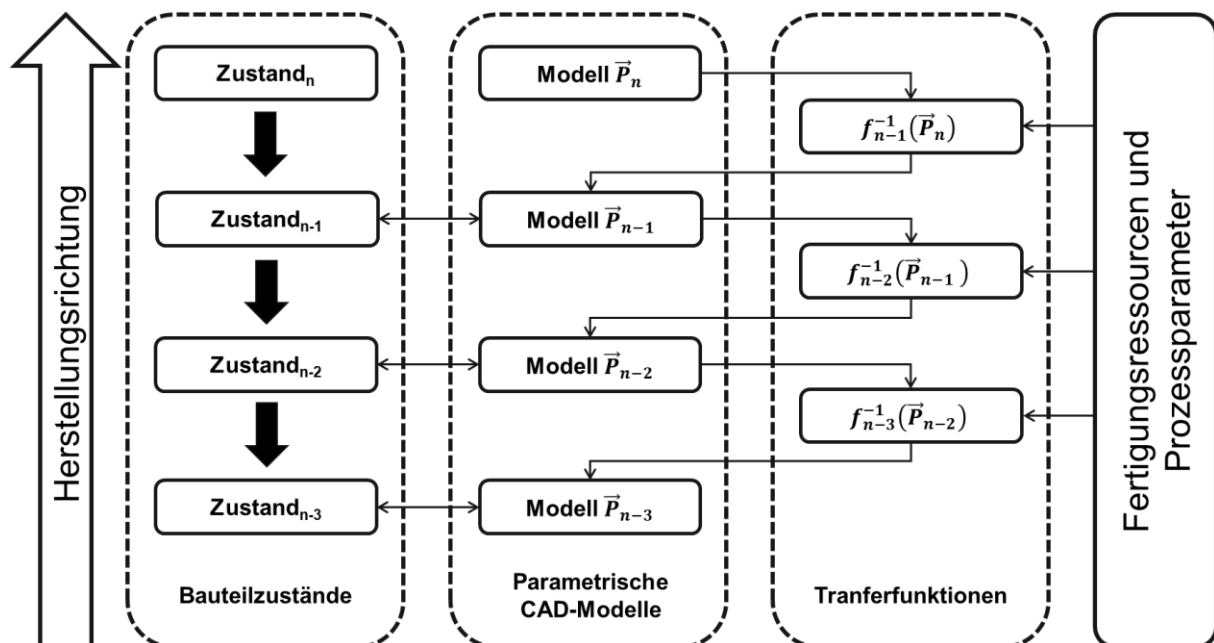
Die Grundlage des Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells bilden miteinander verknüpfte parametrische CAD-Modelle von dem betrachteten Bauteil und dessen Bauteilzuständen während der Herstellung. Die Parametrisierung ermöglicht die Darstellung der Bauteilzustände durch eine Vektor  $\vec{P}_i$  von geometrischen Parametern, wie beispielsweise Längen, Winkel und Durchmesser.

$$\vec{P}_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}\} \quad (1)$$

Die Verknüpfung der Bauteilzustände erfolgt durch Transferfunktionen  $f^{-1}$ , die aus den im Modell hinterlegten Fertigungsprozessen und -ressourcen abgeleitet werden und den jeweiligen Herstellungsschritt entgegen der Prozessrichtung abbilden. Mit den Transferfunktionen wird aus dem Parametervektor  $\vec{P}_i$  eines Bauteilzustands der Parametervektor  $\vec{P}_{i-1}$  des vorgelagerten Bauteilzustands berechnet.

$$\vec{P}_{i-1} = f_{i-1}^{-1} f_{i-1}(\vec{P}_i) \quad (2)$$

Diese Verknüpfung erlaubt es, die Zustandsänderungen des Bauteils während der Herstellung auf die parametrischen CAD-Modelle zu übertragen und damit die Fertigungsstufen des Bauteils rechnerunterstützt abzubilden (siehe Bild 2).

**Bild 2:** Verknüpfung der Bauteilzustände

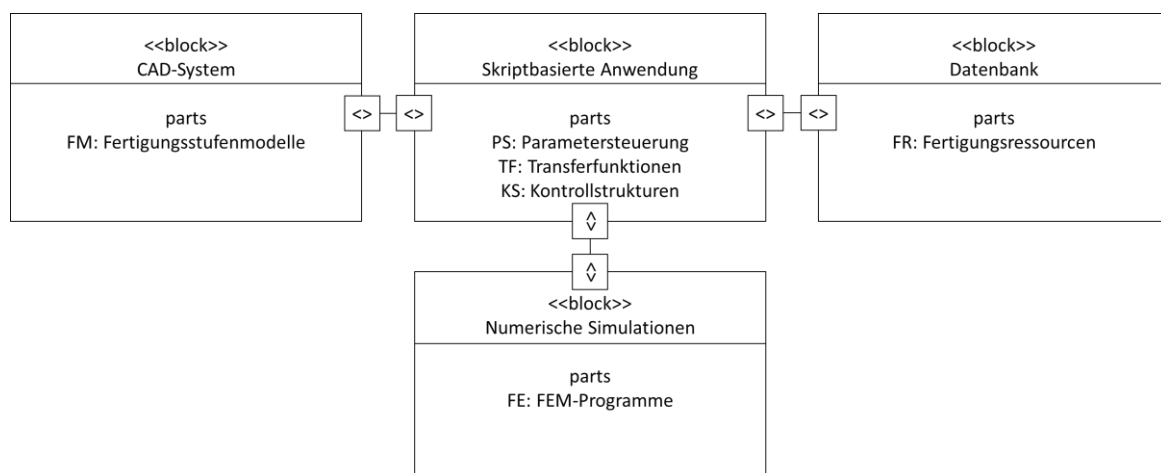
Der Begriff Transferfunktion wird an dieser Stelle als parametergebundene Zustandsänderung von einem Bauteilzustand in den vorgelagerten Bauteilzustand aufgefasst. Eine Transferfunktion kann

beispielsweise aus einer Menge an analytischen Funktionen bestehen, die die Parameter zweier Bauteilzustände miteinander verknüpfen, auf einer numerischen Simulation basieren, welche über den Austausch von Parametern in dem Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell implementiert ist. Neben den Transferfunktionen verfügt das Modell über Kontrollstrukturen, die die Herstellbarkeit der Bauteilzustände überprüfen. Diese Überprüfung erfolgt ebenfalls parametergebunden über ein Abgleich mit zulässigen Grenzen, die von den Fertigungsressourcen abgeleitet sind. Dafür ist es notwendig, die verfügbaren Fertigungsressourcen (z.B. Maschinen oder Werkzeuge) ebenfalls in Form von Parametern zu beschreiben. Diese sind in einer Datenbank abgelegt, die mit dem Modell verknüpft ist. Damit lassen sich die verfügbaren Fertigungsressourcen und die Fertigungsrestriktionen dynamisch anpassen, wenn ein neues Werkzeug zur Verfügung steht.

### 3.2 Systemarchitektur

Die Systemarchitektur des Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells setzt sich aus drei festen Systemkomponenten und einer optionalen Komponente zusammen, die über Schnittstellen miteinander verknüpft sind (siehe Bild 3). Das zentral steuernde Element ist eine skriptbasierte Anwendung. Die Fertigungsstufen des betrachteten Bauteils werden innerhalb eines CAD-Systems modelliert und parametrisiert. Ausgehend von der skriptbasierten Anwendung lassen sich nun die Parameter der einzelnen Fertigungsstufen aus dem CAD-System auslesen und verändern, sodass eine Steuerung der parametrischen Modelle möglich ist. Die im Modell hinterlegten Fertigungsressourcen sind im Rahmen einer Datenbank abgelegt. Dadurch lassen sich die zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen beliebig erweitern oder modifizieren, indem neue Datenbankeinträge erstellt oder vorhandene Datenbankeinträge angepasst werden. Mit Hilfe von Abfragen hat die skriptbasierende Anwendung Zugriff auf die Parameter der Fertigungsressourcen innerhalb der Datenbank. Als optionale Komponente lassen sich in dem Modell zusätzlich externe Simulationsprogramme, wie Finite-Elemente-Analysen, implementieren. Dies ist notwendig, wenn die Transferfunktionen für Zustandsänderungen oder die Kontrollstrukturen zur Überprüfung der Herstellbarkeit nicht in Form von expliziten Gleichungen oder Aussagen innerhalb der skriptbasierten Anwendung abgebildet werden können.

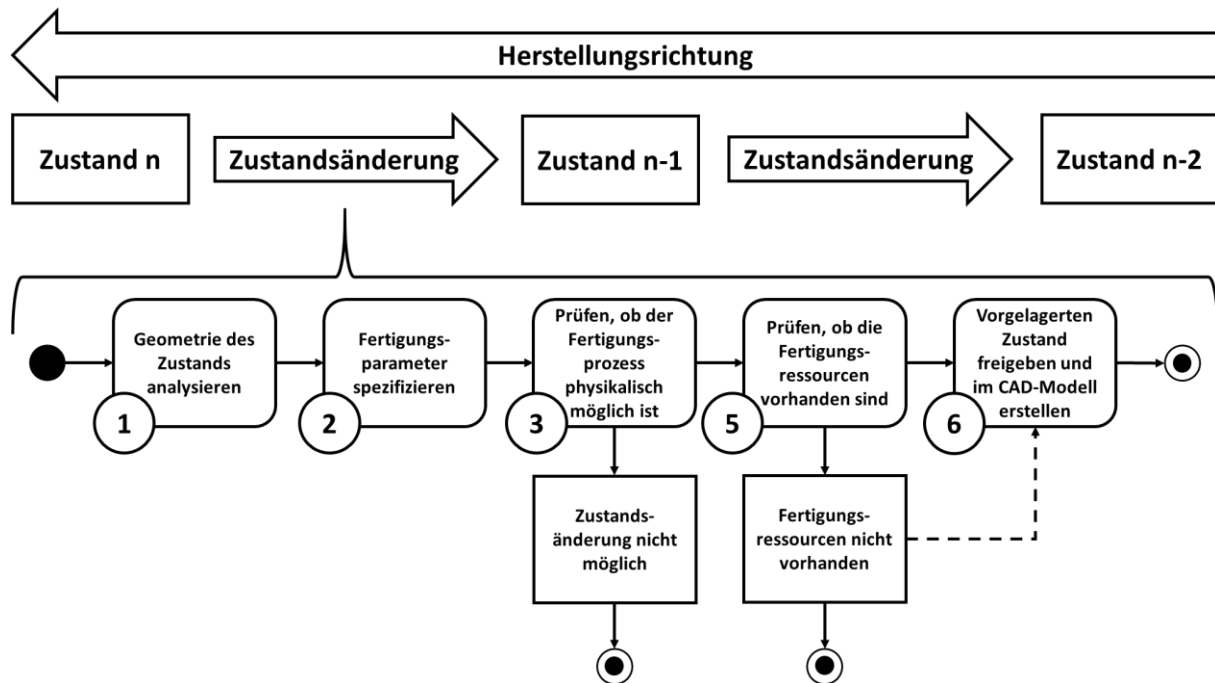
Durch diesen Systemaufbau laufen alle Parameter in der skriptbasierten Anwendung zusammen, wo sie mit Hilfe der Transferfunktionen und der Kontrollstrukturen verarbeitet, verändert, berechnet und überprüft werden können.



**Bild 3:** Systemarchitektur des Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodells

### 3.3 Ablauf einer Zustandsänderung und Prüfung der Herstellbarkeit

Der Übergang von einem Bauteilzustand in den vorgelagerten Bauteilzustand wird im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell mit Hilfe der Transferfunktionen umgesetzt. Bevor jedoch aus einem Zustand der vorgelagerte Zustand eines Bauteils im Rahmen seiner Herstellungskette modelliert wird, muss die Durchführbarkeit dieses Herstellungsschrittes untersucht werden. Dabei wird einerseits die physikalische Durchführbarkeit geprüft und andererseits inwieweit die benötigten Fertigungsressourcen zur Verfügung stehen. Der Prozess, um von einem Bauteilzustand in den vorgelagerten Bauteilzustand zu gelangen, umfasst fünf Schritte, die im Folgenden beschrieben werden (siehe Bild 4).



**Bild 4:** Ablauf einer Zustandsänderung und Prüfung der Herstellbarkeit

Der erste Schritt bei einer Zustandsänderung ist das Erfassen der Geometrie des Ausgangszustands. Dabei werden die im CAD-Modell hinterlegten Parameter in Form eines Vektors ausgelesen und an die skriptbasierte Anwendung übergeben. Dort werden im zweiten Schritt diejenigen Fertigungsparameter spezifiziert, die benötigt werden, um die vorgelagerte Fertigungsstufe zu erhalten. Demnach werden sowohl Werkzeuggeometrien als auch Maschinenparameter, wie beispielsweise eine benötigte Umformkraft auf Basis der Ausgangsgeometrie berechnet. Sind die Fertigungsparameter spezifiziert, wird im dritten Schritt die physikalische Durchführbarkeit der Zustandsänderung überprüft. Neben der Betrachtung von Näherungsformeln, wie einem maximal zulässigen Umformgrad, können an dieser Stelle z.B. auch externe FEM-Simulationen implementiert werden, die beispielsweise lokale Spannungsspitzen oder maximale Fließspannungen in die Bewertung der physikalischen Herstellbarkeit miteinbeziehen. Die Überprüfung im dritten Schritt besitzt zwei mögliche Ausgänge, die Zustandsänderung ist durchführbar oder sie ist nicht durchführbar. Bei letzterem wird der Prozess der Zustandsänderung abgebrochen und eine Meldung ausgegeben, die den Grund der Nichtdurchführbarkeit nennt. Nun muss der Konstruierende die Bauteilgestalt so anpassen, dass eine Zustandsänderung in den betrachteten Prozessschritt möglich wird. Ist die Zustandsänderung durchführbar, wird im vierten Schritt überprüft, ob die im zweiten Schritt spezifizierten Fertigungsparameter von den in der Datenbank hinterlegten Fertigungsressourcen abgedeckt werden. Dies erfolgt über ein Abgleich von zuvor abgeleiteten Parametern aus den Fertigungswerkzeugen und -maschinen. Hierbei sind wieder zwei Ausgänge möglich, die Fertigungsressourcen sind vorhanden oder sie sind nicht vorhanden. Wenn die Ressourcen nicht

vorhanden sind, kann einerseits das Bauteil angepasst oder andererseits ein neues Werkzeug und / oder Maschine entwicklungsweise beschafft werden. Lässt sich das Bauteil durch die vorhandenen Fertigungsressourcen herstellen, wird im letzten Schritt die Freigabe zur Zustandsänderung erteilt und die vorgelagerte Fertigungsstufe wird unter Anwendung der jeweilig hinterlegten Transferfunktion im CAD-Modell modelliert. Dieser Ablauf einer Zustandsänderung wird im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell mehrfach durchgeführt. Bei  $k$  Fertigungsstufen innerhalb einer Herstellungskette sind  $k - 1$  Zustandsänderungen notwendig. Dadurch, dass bei jeder Zustandsänderung die Durchführbarkeit des jeweiligen Herstellungsschritts erfolgt, lassen sich die prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen identifizieren.

Das Fertigungsstufen-basierte Gestaltungsmodell ist als modulares Rahmenwerk zu verstehen, mit dessen Systemarchitektur die Modellierung unterschiedlicher Herstellungsketten ermöglicht wird. Dafür ist eine individuelle Entwicklung der parametrischen CAD-Modell, der Transferfunktion, der Kontrollstrukturen sowie der Formalisierung der vorhandenen Fertigungsressourcen notwendig.

#### 4 Methodik zur Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells

Die Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells ist individuell und abhängig von dem betrachteten Bauteil und dessen Herstellungskette. Dennoch lassen zentrale Schritte im Rahmen einer Methodik identifizieren, die bei der Entwicklung notwendig sind. Die Grundlage dieser Methodik bietet eine Empfehlung nach Stokes zur Entwicklung von wissensbasierten technischen Anwendungen mit dem Schwerpunkt in den späten Phasen des MOKA-Lebenszyklus, das heißt erfassen, formalisieren, verpacken und aktivieren (Stokes 2001). Die Erfassung beinhaltet das Identifizieren, Sammeln und Validieren aller notwendigen Wissensentitäten, die zu dem Zeitpunkt in unstrukturierter Form vorliegen, während der Formalisierung wird das unstrukturierte Wissen in eine formal, maschinenlesbares Wissensmodell überführt. Die Verpackung und die Aktivierung umfassen abschließend die Implementierung, das Testen und die Einführung des wissensbasierten Systems. Die Übertragung der vier Spätphasen von MOKA auf die Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells ist im Folgenden beschrieben.

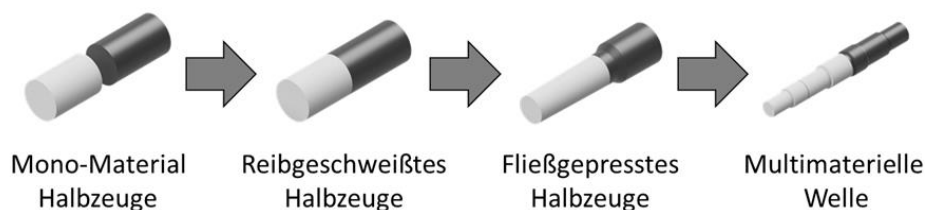
Im ersten Schritt der **Erfassung** wird das zu betrachtende Bauteil ausgewählt und daraufhin dessen Herstellungskette analysiert. Das bedeutet, es werden alle Fertigungsprozesse und -ressourcen innerhalb der Herstellungskette aufgenommen und die zugehörigen Prozessparameter sowie prozessbezogene Fertigungsrestriktionen identifiziert. Neben der Herstellungskette müssen zudem die Fertigungsstufen zwischen den Herstellungsschritten erfasst werden. Das Ergebnis der Phase Erfassung ist eine Dokumentation von allen relevanten Informationen im Hinblick auf die Fertigung des gewählten Bauteils. Während der **Formalisierung** werden die gesammelten Informationen in ein maschinenlesbares Modell überführt. Im Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodell werden dafür parametrische Darstellungen der Informationen genutzt. Um diese zu nutzen, werden die identifizierten Fertigungsstufen, -ressourcen und -restriktionen parametrisiert. Im nächsten Schritt müssen die Transferfunktionen für die Zustandsänderung von einer Fertigungsstufe in die vorgelagerte Fertigungsstufe formuliert und die prozessbezogenen Fertigungsrestriktionen über Kontrollstrukturen abgebildet werden. Dieser Schritt beinhaltet ebenfalls die Überlegung, ob für die Transferfunktionen oder die Kontrollstrukturen externe Simulationen notwendig sind. Zum Ende der Formalisierung sind alle Fertigungsstufen, -ressourcen und -restriktionen über Transferfunktionen und Kontrollstrukturen in einem formalen und maschinenlesbaren Modell miteinander verknüpft. Im Rahmen der **Verpackung** wird das formale Modell in eine Systemanwendung übersetzt, wie sie in Abschnitt 3.2 beschrieben ist. Dazu müssen parametrische CAD-Modelle für die Fertigungsstufen erstellt, die Transferfunktionen und die Kontrollstrukturen innerhalb der skriptbasierten Anwendung implementiert und gegebenenfalls externe Simulationen in das System eingebunden werden. Zudem ist eine Datenbank aufzusetzen und Einträge für die zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen anzulegen. Abschließend müssen die

Schnittstellen zwischen den einzelnen Systemkomponenten geschaffen werden. Die **Aktivierung** ist die letzte Phase und beinhaltet die Einführung des fertigungsstufen-basierte Gestaltungsmodells innerhalb der gewünschten Zielgruppe. Dabei ist zu klären, über welche Kanäle wird das Modell bekannt gemacht, wie erhalten die Nutzer Zugang zu dem Modell und wie erfolgt die Einweisung zum Umgang mit dem Modell.

Um die dargestellte Methode zur Entwicklung eines Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells zu veranschaulichen folgt im nächsten Abschnitt ein Fallbeispiel.

## 5 Fallbeispiel

Als Fallbeispiel dient eine multimateriale Welle, die mit Hilfe der Tailored Forming Technologie hergestellt wird. Die hierbei betrachtete Herstellungskette wurde im Sonderforschungsbereich 1153 entwickelt und besteht aus den Prozessen zum Fügen, Umformen und Zerspanen. Im ersten Schritt werden zwei Mono-Material-Halbzeuge miteinander durch Reibschweißen gefügt. Das dabei entstandene multimaterielle Halbzeug wird anschließend durch Fließpressen thermomechanisch umgeformt. Im nächsten Schritt folgt die Zerspanung, in der das Bauteil seine Endkontur erhält (Behrens et al. 2019). Innerhalb der Herstellungskette lassen sich vier Fertigungsstufen identifizieren (s. Bild 5)



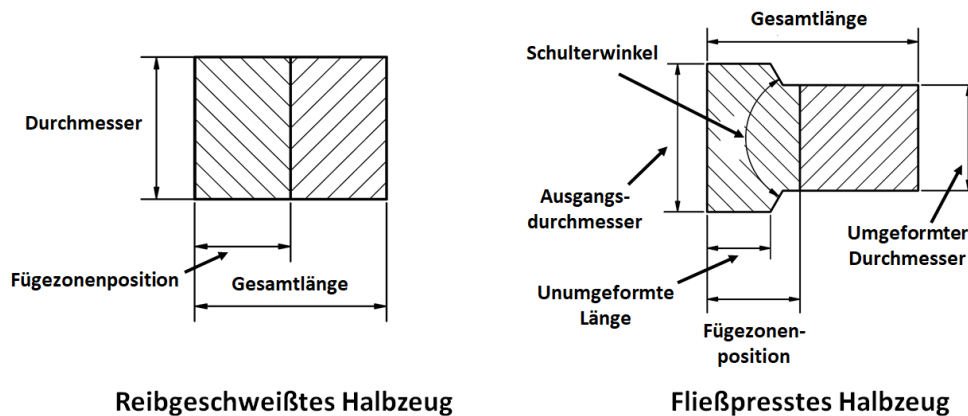
**Bild 5:** Fertigungsstufen des Fallbeispiels

Im Fokus dieses Fallbeispiels steht der Fließpressprozess, der die Zustandsänderung vom reibgeschweißten Halbzeug zum fließgepressten Halbzeug erzeugt. Da der Schwerpunkt bei der Entwicklung eines fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells in den Phasen der Erfassung und Formalisierung liegt, werden diese anhand des Fließpressprozesses schematisch skizziert. In diesem Fallbeispiel werden thermomechanische und metallografische Aspekte nicht berücksichtigt. Ziel dieses Fallbeispiels ist es nicht, ein ausgearbeitetes Modell für den genannten Anwendungsfall vorzustellen, sondern den Entwicklungsansatz durch ein Beispiel zu verdeutlichen.

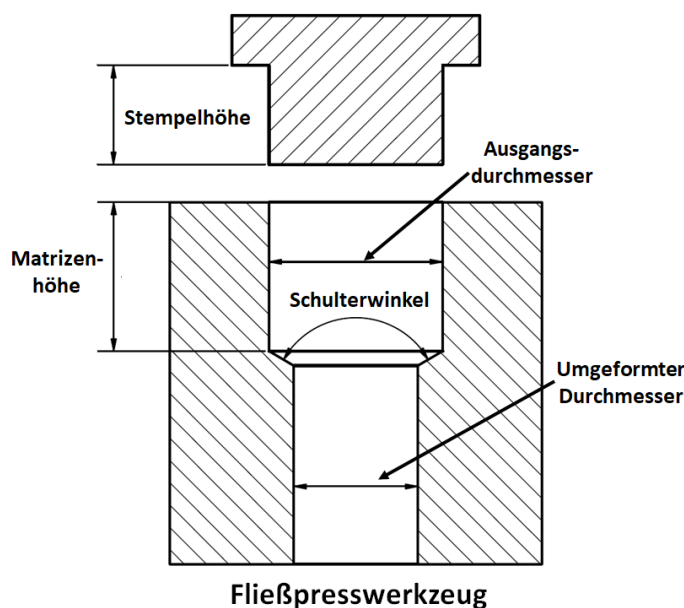
Beim Fließpressen wird das Halbzeug mittels eines Stempels durch eine Matrize gepresst und umgeformt. Dabei ergibt sich die Geometrie des umgeformten Halbzeugs aus dem verwendeten Fließpresswerkzeug und den eingestellten Prozessparametern. In der Erfassung ist es daher wichtig neben den Spezifikationen der Presse, wie beispielsweise maximale Presskraft oder mögliche Stempelwege, insbesondere die Geometrien des Fließpresswerkzeugs aufzunehmen. Diese sind maßgebliche Fertigungsrestriktionen, welche die umformbaren Geometrien festlegen. Im Rahmen des Fließpressens sind zwei Fertigungsstufen relevant, das reibgeschweißte Halbzeug vor und das umgeformte Halbzeug nach dem Fließpressprozess. Diese werden ebenfalls geometrisch erfasst.

Nun werden die identifizierten Objekte und Zusammenhänge beim Fließpressen formalisiert. Dafür werden die betrachteten Fertigungsstufen und das Fließpresswerkzeug parametrisiert. Diese Parametrisierung ist in Bild 6 und Bild 7 zu sehen.





**Bild 6:** Parametrisierung des reibgeschweißten (links) und des fließpressten (rechts) Halbzeugs



**Bild 7:** Parametrisierung des Fließpresswerkzeugs

Aufbauend auf den abgeleiteten Parametern werden Zusammenhänge zwischen ihnen mithilfe von Transferfunktionen formuliert. Dabei wird die Herstellungsrichtung rückwärts betrachtet. D. h. der Ausgangszustand ist das fließpresste Halbzeug, welches durch einen inversen Fließpressprozess in den Zustand des reibgeschweißten Halbzeugs überführt wird. Dementsprechend werden die Parameter des fließpressten Halbzeugs als Eingangsgrößen und die Parameter des reibgeschweißten Halbzeugs sowie die des Fließpresswerkzeugs als Ausgangsgrößen der Transferfunktionen betrachtet. Ein analytischer Ansatz, die Transferfunktionen beim Fließpressen zu formulieren, ist die Annahme der Volumenkonstanz während des Prozesses. Über die Volumenkonstanz

und die Vorgaben des Fließpresswerkzeugs lässt sich ein Gleichungssystem aufstellen, mit dem alle geometrischen Parameter des reibgeschweißten Halbzeugs berechnen werden können. An dieser Stelle kann auch eine numerische Umformsimulation eingesetzt werden, um die geometrischen Parameter des reibgeschweißten Halbzeugs zu berechnen. Die Kontrollstrukturen für die Prüfung der Herstellbarkeit des Fließpressprozesses werden in zwei Stadien betrachtet. Zuerst werden Regeln definiert, welche die physikalische Durchführbarkeit des Prozesses überprüfen. Dafür lassen sich beispielsweise Umformgrade berechnen und mit zulässigen Erfahrungswerten vergleichen oder zulässige Fließspannungen betrachten. Letztere können ebenso aus einer Umformsimulation stammen können oder analytisch berechnet werden. Zudem werden Kontrollstrukturen eingebunden, die überprüfen, ob der Prozess mit den zur Verfügung stehenden Fertigungsressourcen durchgeführt werden kann. Diesbezüglich lassen sich die Parameter des fließpressten Halbzeugs mit den Parametern des Fließpresswerkzeugs vergleichen. Wenn beispielsweise der Schulterwinkel des fließpressten Halbzeugs  $120^\circ$  beträgt, dann muss der Schulterwinkel des Fließpresswerkzeugs ebenfalls  $120^\circ$  betragen. Andernfalls ist die Herstellung nicht möglich. Neben der Geometrie der Werkzeuge müssen auch die Prozessgrößen der Presse, wie die maximale Presskraft, mit betrachtet werden. Sind alle Transferfunktionen und Kontrollstrukturen formuliert, werden diese mit den Fertigungsstufen im Rahmen eines formalen Modells miteinander verknüpft.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Um Bauteile fertigungsgerecht zu gestalten, muss das Fertigungswissen möglichst früh in der Produktentwicklung verfügbar sein. Dieser Beitrag schlägt hierfür ein Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell vor, um insbesondere prozessübergreifende Fertigungsrestriktionen in expliziter Form konstruierenden bereitzustellen. Neben dem Aufbau und der Systemarchitektur wird ebenfalls eine Methode aufgezeigt, mit der ein Fertigungsstufen-basiertes Gestaltungsmodell für eine beliebige Herstellungskette unter Zuhilfenahme von Transfermodellen entwickelt werden kann. Anhand eines schematischen Fallbeispiels wird die Entwicklungsmethode abschließend veranschaulicht.

Gegenstand der weiteren Erforschung des Fertigungsstufen-basierten Gestaltungsmodells wird die Umsetzung des beschriebenen Fallbeispiels über die analytische Ebene hinaus. Das bedeutet, es wird untersucht, wie sich gezielt numerische Fertigungssimulationen einbinden lassen, um die Transferfunktionen oder Kontrollstrukturen abzubilden. Hierbei ist von besonderem Interesse, wie z.B. sich Wissen über Erwärmungsstrategien mit einbinden lassen, die für die Warmumformverfahren der Tailored Forming-Prozessketten grundlegend sind.

Des Weiteren soll der Aufbau von wissensbasierten CAD-Modellen in den Ansatz mit einbezogen werden. Hierbei ist zu untersuchen, inwieweit explizite Modelle in Form von Feature-basierten oder generativen, parametrischen Modellen geeignet sind, große Lösungsräume adäquat abbilden zu können, oder ob implizite Modellierungsansätze, wie z.B. graphenbasierte Verfahren oder Multi-Agentensysteme für diese Aufgabe besser geeignet sind.

### Danksagung

Die Ergebnisse dieser Publikation sind im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1153 „Prozesskette zur Herstellung hybrider Hochleistungsbauteile durch Tailored Forming“ innerhalb des Teilprojekts C2 entstanden. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle und organisatorische Unterstützung des Projektes (Projektnummer: 252662854).

## Literatur

- Ashby und Cebon 1993 ASHBY, Michael; CEBON, David. *Materials selection in mechanical design*. J. Phys. IV (1993), 3, 1–9. DOI: 10.1051/jp4:1993701.
- Behrens et al. 2016 BEHRENS, Bernd-Arno; BOUGUECHA, Anas; FRISCHKORN, Conrad; HUSKIC, Adis; DURAN, Deniz: *Tailored Forming Technology for Three Dimensional Components: Approaches to Heating and Forming*. In Proceedings of the 5th International Conference on Thermomechanical Processing, Milan, Italy, 6–28 October 2016.
- Behrens et al. 2019 BEHRENS, B.-A.; BREIDENSTEIN, B.; DURAN, D.; HERBST, S.; LACHMAYER, R.; LÖHNERT, S.; MATTHIAS, T.; MOZGOVA, I.; NÜRNBERGER, F.; PRASANTHAN, V.; SIQUEIRA, R.; TÖLLER, F.; WRIGGERS, P.: *Simulation-Aided Process Chain Design for the Manufacturing of Hybrid Shafts*. In: *HTM Journal of Heat Treatment and Materials* 74 (2019), Nr. 2, S. 115-135. DOI: 10.3139/105.110378.
- Blohm et al. 2018 BLOHM, T.; NOTHDURFT, S.; MILDEBRATH, M., OHRDES, H.; RICHTER, J.; STONIS, M.; LANGNER, J.; SPRINGER, A.; KAIERLE, S.; HASSEL, T.; WALLASCHEK, J.; OVERMEYER, L.: *Investigation of the Joining Zone of Laser Welded and Cross Wedge Rolled Hybrid Parts*. In: *International Journal of Material Forming* 11 (2018), Nr. 6, S. 829-837. DOI: 10.1007/s12289-017-1393-0.
- Boothroyd 1994 BOOTHROYD, G.: *Product Design for Manufacture and Assembly*. In: *Computer-Aided Design* 26 (1994), Nr. 7, S. 505-520. DOI: 10.1016/0010-4485(94)90082-5.
- Brockmüller et al. 2017 BROCKMÖLLER, T.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.: *An approach to analyse the potential of tailored forming by TRIZ Reverse*. In Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) (2017), Vol 4: Design Methods and Tools, Vancouver, Canada, 21-25.08.2017.
- Brockmüller et al. 2020 BROCKMÖLLER, Tim; SIQUEIRA, Renan; GEMBARSKI, Paul Christoph; MOZGOVA, Iryna; LACHMAYER, Roland: *Computer-Aided Engineering Environment for Designing Tailored Forming Components*. In: *Metals* (2020), 10(12), 1589. DOI: 10.3390/met10121589.
- Chugreeva et al. 2018 CHUGREEVA, A.; MILDEBRATH, M.; DIEFENBACH, J.; BARROI, A.; LAMMERS, M.; HERMSDORF, J.; HASSEL, T.; OVERMEYER, L.; BEHRENS, B.-A.: *Manufacturing of High-Performance Bi-Metal Bevel Gears by Combined Deposition Welding and Forging*. In: *Metals* 8 (2018), Nr. 898, S. 1-11. DOI: 10.15488/4634.
- Dostatni et al. 2016 DOSTATNI, Ewa; DIAKUN, Jacek; GRAJEWSKI, Damian; WICHNIAREK, Radoslaw; ANNA, Karwasz: *Multi-agent system to support decision-making process in design for recycling*. In *Soft Computing* (2016), 20(11): 4347-4361. DOI: 10.1007/s00500-016-2302-z.
- Gembarski 2018 GEMBARSKI, Paul Christoph: *Komplexitätsmanagement mittels wissensbasiertem CAD—Ein Ansatz zum unternehmenstypologischen Management konstruktiver Lösungsräume*. Leibniz Universität Hannover, Institut für Produktentwicklung und Gerätebau, Dissertation, 2018.
- Gembarski 2020a GEMBARSKI, Paul Christoph: *On the conception of a Multi-Agent Analysis and Optimization Tool for Mechanical Engineering Parts*. In: G. Jezic, J. Chen-Burger, M. Kusek, R. Sperka, R. Howlett, and L. Jain (Hrsg.): *Agents and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications, Smart Innovation, Systems*

- and Technologies* (2020), vol. 186.2020, pp. 93-102, 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-5764-4\_9.
- Gembarski 2020b  
GEMBARSKI, Paul Christoph: *Modeling the Portfolio of capabilities for product variant creation and assessment*. In: Proceedings of the 9th International Conference on Mass Customization and Personalization – Community of Europe (MCP - CE 2020), 2020.
- Huang et al. 2016  
HUANG, George Q.: *Design for X - Concurrent engineering imperatives*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1996.
- Kleemann et al. 2017  
KLEEMANN, S.; FRÖHLICH, T.; TÜRCK, E.; VIETOR, T.: *A Methodological Approach Towards Multi-Material Design of Automotive Components*. In: *Procedia CIRP* 60 (2017), S. 68-73. DOI: 10.1016/j.procir.2017.01.010.
- Lachmayer et al. 2017  
LACHMAYER, Roland; GEMBARSKI, Paul Christoph; GOTTWALD, Philipp; LIPPERT, René Bastian: *The potential of product customization using technologies of additive manufacturing*. In *Managing Complexity* (2017), pp. 71-81. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-29058-4\_6.
- Milisavljevic-Syed et al. 2019  
MILISAVLJEVIC-SYED, Jelena; COMMURI, Sesh; ALLEN, Janet K.; MISTREE, Farrokh: A method for the concurrent design and analysis of networked manufacturing systems. In: *Engineering Optimization* (2019), 51:4, 699-717. DOI: 10.1080/0305215X.2018.1484121.
- Özbayrak et al. 2004  
ÖZBAYRAK, M.; AKGÜN, M.; TÜRKER, A.K.: *Activity-based Cost Estimation in a Push/Pull Advanced Manufacturing System*. In: *Journal of Production Economics* 87 (2004), S. 49-65. DOI: 10.1016/S0925-5273(03)00067-7.
- Sheveleva et al. 2020  
SHEVELEVA, T.; KOEPLER, O.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.; AUER, S.: *Development of a Domain-Specific Ontology to Support Research Data Management for the Tailored Forming Technology*. In *Procedia Manufacturing* (2020), Vol. 52, 2020, pp. 107-112. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.11.020.
- Siqueira et al. 2019  
SIQUEIRA, R.; MOZGOVA, I.; LACHMAYER, R.: *An interfacial zone evolutionary optimization method with manufacturing constraints for hybrid components*. In *Journal of Computational Design and Engineering* (2019), Vol. 6, Issue 3, pp. 387–397. DOI: 10.1016/j.jcde.2018.10.003
- Stokes 2001  
STOKES, M.: *Managing engineering knowledge: MOKA: methodology for knowledge based engineering application*, London: Professional Engineering Publishing, 2001.
- Suh 2005  
SHU, Nam Pah: *Complexity: theory and applications*. Oxford: Oxford University Press on Demand, 2005.
- Vajna et al. 2018  
VAJNA, S.; WEBER, C.; ZEMAN, K.; HEHENBERGER, P.; GERHARD, D.; WARTZACK, S.: *CAX für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung*. 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2018.