

Wirtschaftliche Bewertung von Prozesskettenvarianten am Beispiel von Strukturbauteilen

(Economical appraisal of process chain alternatives for structure components)

Götze, U.¹; Zönnchen, S.¹, Schönherr, J.²

¹ TU Chemnitz, Professur Unternehmensrechnung und Controlling

² Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

Abstract

Um alternative fertigungstechnische Prozessketten zur Herstellung innovativer Produkte zielgerichtet gestalten und steuern zu können, ist es erforderlich, diese einer frühzeitigen wirtschaftlichen Bewertung zugänglich zu machen. Eine solche Bewertung von Prozessketten soll sowohl die fundierte und zielgerichtete Auswahl aus potenziellen Ausgestaltungsvarianten von Fertigungsprozessen bzw. -ketten ermöglichen als auch Hinweise auf Verbesserungsbedarfe oder -potenziale vermitteln, die durch technische und/oder betriebswirtschaftliche Maßnahmen zu decken bzw. zu erschließen sind. Im vorliegenden Beitrag soll daher eine Methodik zur wirtschaftlichen Bewertung von Prozessketten vorgestellt und deren Anwendung am Beispiel der Herstellung von Strukturbauteilen mittels Presshärten demonstriert werden.

The purposeful designing and controlling of alternative industrial process chains for the production of innovative products necessitates an economical appraisal already in early stages. Such appraisal must enable an informed and goal-oriented selection of potential alternative processes and process chains. Beyond that, it must provide indications of demands for or potentials of improvement which can be reached by technical and/or management measures. Against this background, the paper will introduce a methodology for an economical appraisal of process chains and demonstrate its application using the example of the manufacturing of structure components by press hardening.

Keywords:

Prozess(ketten)bewertung, Strukturbauteil, Presshärten

process (chain) appraisal, structure component, press hardening

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013.

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

1 Problemstellung und Zielsetzung

Um neue Technologien einsetzen sowie innovative Werkstoffe, Bauteile und Produkte verwirklichen zu können, müssen in der industriellen Fertigung neue Prozessketten konzipiert und realisiert werden. So bedingen neuartige Werkstoffe, Produkttechnologien und Produkte veränderte Anforderungen an die Produkterstellung. Die Neuauslegung von Prozessketten dient dann dazu, diese Anforderungen zu erfüllen und zugleich eine wirtschaftliche bzw. effiziente Ausführung der Fertigungsprozesse zu erreichen. Auch der Einsatz neuer Prozesstechnologien geht i. d. R. mit weitgehend veränderten Prozessketten einher.

Da aber für die Fertigung von Produkten oder Halbzeugen zumeist mehrere verschiedenartige Prozessketten in Betracht kommen und außerdem vor der Einführung innovativer Fertigungsprozesse generell eine Abschätzung ihrer Wirtschaftlichkeit erfolgen sollte, wird eine Methodik benötigt, die in der Lage ist, vorhandene und frühzeitig (im Entwicklungsprozess) auch potenzielle neue Prozessketten einer wirtschaftlichen Bewertung zu unterziehen. Hierbei ist insbesondere die Bestimmung der durch Ausgestaltungsvarianten von Prozessketten verursachten (Herstell) Kosten zu priorisieren, da diese in hohem Maße für den Erfolg oder Misserfolg eines Produktes verantwortlich sind. Die Bewertung von Prozessketten dient somit als Entscheidungsgrundlage, um die wirtschaftliche Variante der Produkterstellung zu ermitteln. Darüber hinaus können durch Offenlegung der Kosten einzelner Prozesse Verbesserungspotenziale oder -bedarfe aufgezeigt werden [1].

Das existierende Instrumentarium zur Bewertung von Prozessketten kann noch nicht als ausgereift angesehen werden. So werden zwar in der ingenieurwissenschaftlichen Literatur einige Ansätze vorgeschlagen, die in unterschiedlichem Ausmaß auch eine wirtschaftliche Bewertung von Prozessketten vorsehen [2-8] – diese fokussieren aber meist in erster Linie die technische Ausgestaltung sowie die Wahl technischer Parameter von Prozessketten. Von betriebswirtschaftlicher Seite liegen kaum Untersuchungen vor, die einen Beitrag zur Bewertung und Gestaltung von Prozessketten leisten können.

Eine Ausnahme stellt ein betriebswirtschaftlich geprägter Ansatz für die Ermittlung der Kosten von Prozessketten und die darauf basierende Beurteilung und Analyse von deren Wirtschaftlichkeit dar (siehe dazu [9, 10]). Im vorliegenden Beitrag soll dieser Ansatz aufgegriffen, vorgestellt und auf ein Fallbeispiel angewendet werden. Dazu werden zunächst die grundlegenden Betrachtungsobjekte „Prozess“ und „Prozesskette“ abgegrenzt. Anschließend wird, auf Basis der hierfür zugrunde gelegten Anforderungen, die Bewertungsmethodik überblicksartig dargestellt und dabei deren Vorgehensweise erläutert, um sie dann auf das Beispiel der Herstellung von Strukturbauteilen anzuwenden. Zur Herstellung derartiger Bauteile kommen verschiedenartige Prozessketten des Presshärtens (Blechwarmumformung) in Betracht, von denen die Prozessketten des direkten Presshärtens mit Laserbe-

schnitt sowie mit Hartbeschnitt wirtschaftlich bewertet werden sollen. Darüber hinaus sollen aus den Bewertungsergebnissen Handlungsempfehlungen für eine weitere Verbesserung der Prozessketten abgeleitet werden.

2 Prozesse und Prozessketten als Betrachtungsobjekte

Da in der Literatur bezüglich des Verständnisses der Betrachtungsobjekte „Prozess“ und „Prozesskette“ keine Einigkeit herrscht und zudem in Unternehmen vielfältige Formen hiervon existieren, ist zunächst zu klären, welches Verständnis dieser Betrachtungsobjekte hier zugrunde gelegt wird und auf welche Arten von Prozessen und Prozessketten sich die Ausführungen beziehen.

Unter einem *Prozess* wird ein Vorgang verstanden, welcher eine inhaltliche und sachlogische Folge der Erfüllung von Funktionen darstellt, mittels derer aus einem Input ein Objekt mit spezifischen Eigenschaften (Output) erzeugt werden soll. Bei diesem kann es sich allgemein um ein physisches Objekt, Informationen etc. handeln; die insgesamt im Rahmen des Prozesses zu erfüllende Aufgabe kann unter anderem die Transformation, der Transport und die Speicherung des Objektes sein [1, 11-14]. Im vorliegenden Beitrag soll jedoch ausschließlich die Transformation physischer Objekte von Interesse sein: Es werden technologische Prozesse betrachtet, bei denen unter Einsatz von spezifischen Ressourcen (materielle) Bauteile oder Halbzeuge als Output erbracht werden [1].

Prozesse können häufig nicht isoliert voneinander analysiert werden. So stellt der Output eines Prozesses zumeist den nötigen Input eines sich anschließenden Prozesses dar. In Verbindung damit existieren weitere Wechselwirkungen bezüglich der wirtschaftlichen und technischen Parameter vor- und nachgelagerter Prozesse. Insgesamt liegt oft eine sequenzielle Aneinanderreihung von einzelnen Prozessen vor, die als *Prozesskette* bezeichnet werden kann. Die einzelnen Prozesse in einer solchen Prozesskette stehen in einem sachlich-logischen und zeitlichen Zusammenhang zueinander und dienen gemeinsam der Erstellung eines spezifischen Bauteils, Produktes etc. [8, 9, 11, 14-18].

Die Analyse, Bewertung und Gestaltung von Prozessen und Prozessketten kann grundsätzlich mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden auf verschiedenen Ebenen erfolgen. So sind Prozessketten und Prozesse in unterschiedlicher Form hierarchisch strukturierbar [9, 14, 17, 19-21]. Dabei lässt sich beispielsweise eine Prozesskette wie „Karosseriebleche pressen“ zum einen in die Prozesse „Blechzuschnitt“, „Handling“, „Umformung“ und „Bauteilbeschnitt“ untergliedern und zum anderen selbst der übergeordneten Prozesskette „Karosserie fertigen“ zuordnen.

Im Rahmen dieses Beitrages soll die Prozesskette die höchste Ebene der Prozesshierarchie repräsentieren. Diese lässt sich bei höherer Detaillierung weiter in einzelne Prozesse, Subprozesse sowie Aktivitäten zerlegen (vgl. Bild 1; in diesem werden jeweils weitere, nicht aus dem vorherigen Element hervorgehende Inputs einer Prozesskette, eines Prozesses etc. vereinfachend vernachlässigt). Die Transformation des Inputs in einen bestimmten Output wird demnach auf tieferen Hierarchieebenen mit zunehmender Differenzierung und Detaillierung betrachtet; die technisch-wirtschaftlichen Zusammenhänge werden dabei präziser untersucht sowie die jeweiligen Inputs und Outputs innerhalb der Prozesskette weiter spezifiziert.

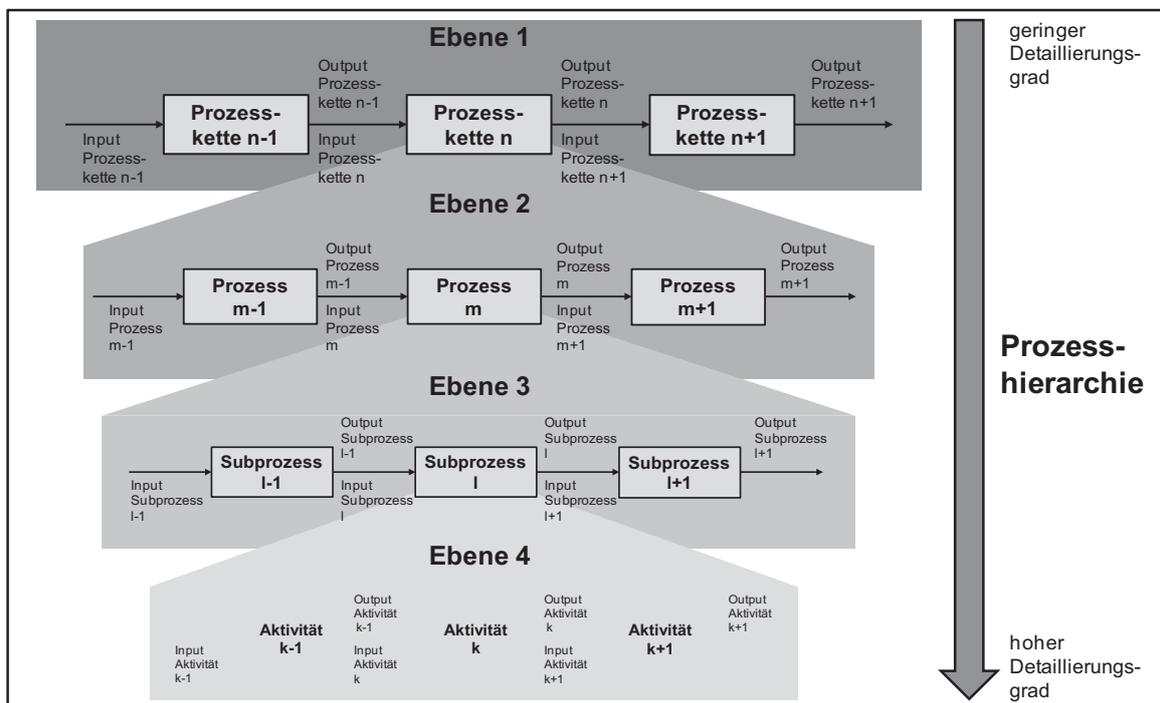


Bild 1: Aufbau einer Prozesshierarchie

3 Methodik zur Prozesskettenbewertung

An eine aussagekräftige Prozesskettenbewertung sind – wie generell an entscheidungsvorbereitende Rechnungen – die Anforderungen der Transparenz, Verständlichkeit, Wirtschaftlichkeit des Bewertungsvorganges sowie einer hohen Aussagekraft der Bewertungsergebnisse [9] zu stellen. In diesem Abschnitt soll nun eine Methodik zur Prozesskettenbewertung vorgestellt werden, deren Nutzung aufgrund ihrer kostenrechnerischen Fundierung sowie Strukturiertheit dazu beitragen kann, diese Anforderungen auf hohem Niveau zu erfüllen.

Bevor diese Methodik jedoch näher beschrieben wird, sei erwähnt, dass nachfolgend allein die Zielgröße Kosten der Bewertung von Prozessketten zugrunde gelegt

werden soll und damit Erlöse vernachlässigt werden. Dies ist unter der hier getroffenen Annahme gerechtfertigt, dass der Output nahezu identische Eigenschaften aufweist. Damit ist aus wirtschaftlicher Perspektive allein die Kostenhöhe entscheidungsrelevant.

Welche Arten von Kosten (oder den damit verbundenen Auszahlungen) für die Bewertung relevant sind und welche Methoden sich für deren Bestimmung eignen, hängt vor allem vom Betrachtungszeitraum ab. So sind insbesondere bei Einführung neuer oder grundlegenden Änderungen bestehender Prozessketten auch Vorlaufkosten (inkl. Anschaffungskosten von Betriebsmitteln) und Nachlaufkosten (für Entsorgung, Demontage etc.) relevant und daher in adäquate langfristige Lebenszykluskostenrechnungen einzubeziehen (vgl. dazu [5]). Hier soll jedoch eine kurzfristig ausgerichtete Entscheidungsfindung unterstellt werden, bei der die Kosten einer Betrachtungsperiode das Wirtschaftlichkeitskriterium darstellen. Eine entsprechende Entscheidungssituation liegt dann vor, wenn die Wirkungen der Prozesskettengestaltung auf einen relativ kurzen Zeitraum beschränkt sind. Bei Existenz längerfristiger Wirkungen sind zwar grundsätzlich langfristige (Lebenszyklus-)Rechnungen vorzuziehen, die in kurzfristigen Rechnungen ermittelten Kosten stellen aber eine Datengrundlage hierfür dar, lassen sich zudem als Näherungswerte nutzen (oft sind die Wirkungen der Einführung neuartiger oder veränderter Prozessketten bereits nach einer Periode absehbar) und sind schließlich besser kommunizierbar als Zahlungsgrößen.

In Abhängigkeit von den gewählten Fertigungstechnologien und den auf deren Basis gestalteten Prozessketten variieren vor allem die Material- und Fertigungskosten, sodass diese die Wirtschaftlichkeit einer Prozesskette maßgeblich bestimmen und nachfolgend im Fokus stehen. Relevante Ansätze für deren Berechnung entstammen vor allem aus der Produktions- und Kostentheorie sowie der Kostenrechnung [9]. Einen in besonderem Maße für die Prozesskettenbewertung geeignet erscheinenden Ansatz stellt die Bezugsgrößenkalkulation in der speziellen Form einer Maschinenstundensatzrechnung und eingebettet in eine Zuschlagskalkulation dar. Gerade angesichts der Anlagenintensität vieler technologischer Prozesse hängen diverse Kostenkomponenten besonders von der Nutzung entsprechender Anlagen bzw. Maschinen ab, die dann über die Bezugsgröße „Maschinenstunden“ annähernd verursachungsgerecht Produkten zugerechnet werden können. Daher lassen sich die bei Nutzung einer spezifischen Prozesskettenvariante zur Erstellung eines definierten Outputs entstandenen (bei vergangenheitsorientierter Analyse) oder zu erwartenden (bei einer entscheidungsvorbereitenden Planrechnung) (Herstell-)Kosten mit relativ hoher Aussagekraft ermitteln. Zudem ist das der Kostenrechnung entstammende Verfahren relativ leicht nachvollziehbar und flexibel anwendbar (für einen Vergleich und eine Beurteilung bestehender kostenorientierter Ansätze siehe [9]).

Nachdem nun die Wahl des Rechnungskonzeptes sowie der Betrachtungszeitraum festgelegt wurden, soll im Folgenden die Methodik zur Prozesskettenbewertung zunächst überblicksartig dargestellt werden. Kern der Methodik ist ein Vorgehensmodell (Bild 2), dessen einzelne Schritte nachfolgend kurz erläutert werden.

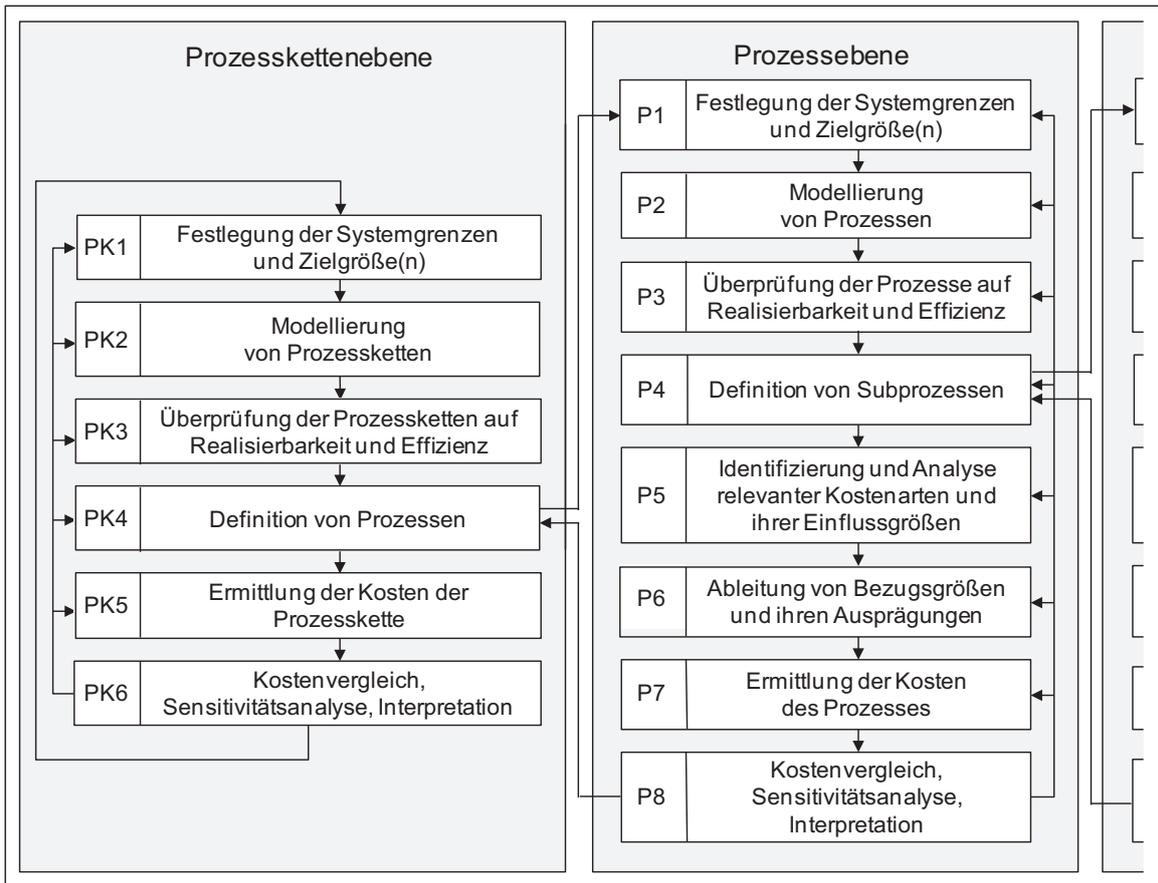


Bild 2: Vorgehensmodell zur wirtschaftlichen Bewertung von Prozessketten [9, 22]

Das vorgeschlagene Vorgehensmodell korrespondiert mit dem Problem- und Strukturierungsprozess der VDI-Richtlinie 2221 [22], der eine Aufspaltung des Gesamtproblems in Teil- und Einzelprobleme sowie die darauf folgende Synthese der Einzellösungen zur Gesamtlösung vorsieht. Dem entsprechend umfasst auch das Vorgehensmodell mehrere Ebenen. Gemäß der in Abschnitt 2 vorgenommenen Unterteilung kann bzw. muss die Bewertung auf unterschiedlichen Ebenen der Prozesshierarchie durchgeführt werden. Auf der „übergeordneten“ Prozesskettenebene sollen alternative Prozessketten hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit beurteilt werden. Diese ist auch abhängig von der Ausgestaltung einzelner Prozesse (und ggf. Teilprozesse) im Rahmen der jeweiligen Prozessketten sowie den entsprechenden Entscheidungen (u. a. über einzusetzende Verfahren sowie ggf. den Aufbau notwendiger Kapazitäten inkl. des technologischen Know-hows). Die Konse-

quenzen dieser Entscheidungen sind daher in die Bewertung von Prozessketten einzubeziehen.

Die *Festlegung der Systemgrenzen und Zielgröße(n) (PK1)* bildet nun den Ausgangspunkt für die Bewertung einer Prozesskette. Dabei ist zu bestimmen, für welche Abschnitte neu zu gestaltender oder zu verändernder Wertschöpfungsketten Prozesskettenalternativen zu erarbeiten und zu bewerten sind, wobei das vorliegende Entscheidungsproblem und der aus diesem resultierende Bewertungsbedarf den Ausgangspunkt darstellen. Des Weiteren sind die Anforderungen an Arten und Mengen der Outputgüter festzulegen [23], da der angestrebte Prozessoutput die Basis sowohl für die Konfiguration der Prozesskette als auch für die entsprechenden Kostenermittlungen darstellt. Wie bereits dargelegt, wird hier von der Annahme eines (annähernd) gleichen Outputs der Prozesskette, daraus resultierend identischer (Prozessketten-)Erlöse (bzw. -Nutzen) sowie einer kurzfristigen Betrachtung ausgegangen (siehe ausführlicher [9]).

Im Anschluss daran ist die *Modellierung der Prozessketten (PK2)* vorzunehmen. Für den abgegrenzten Bereich werden somit eine oder mehrere Prozessketten, die zu dem angesprochenen Output führt bzw. führen, unter Einbeziehung der verarbeiteten Werkstoffe in Form von Halbzeugen, Zwischen- und Fertigerzeugnissen sowie der Beziehungen zwischen diesen modelliert. Dafür kann auf verbale, tabellarische, grafische oder algebraische Beschreibungen der (ggf. mehrstufigen) Input-Output-Beziehungen bzw. aufeinanderfolgenden Ereignisse und Zustände zurückgegriffen werden [8, 21, 24, 25].

Anschließend werden diese *Prozessketten auf Realisierbarkeit überprüft (PK 3)* und dabei aufgrund mangelnder Verfügbarkeit notwendiger Ressourcen und Kompetenzen oder aus technologischen Gründen nicht realisierbare oder technisch „ineffiziente“, d. h. bezüglich des Verhältnisses von Input und Output von anderen dominierte, Prozessketten eliminiert. Dies reduziert die Gesamtzahl der zu bewertenden alternativen Prozessketten und verbessert die Wirtschaftlichkeit des Bewertungsvorgangs.

Bei Schritt *PK4 „Definition von Prozessen“* werden auf Basis der Ergebnisse von PK2 und PK3 und nach deren Prüfung und ggf. Verfeinerung die einzelnen Prozesse definiert, die die Prozesskette bilden. (Damit wird hier ein top down-Vorgehen der Prozessstrukturierung unterstellt, alternativ ist auch ein bottom up-Ansatz oder Gegenstromverfahren denkbar). Dieser Schritt stellt somit den Anknüpfungspunkt zur Prozessebene dar, in der tieferegehende Analysen erfolgen.

Auf der *Prozessebene* insgesamt ist eine Modellierung, Analyse und schließlich Bewertung der einzelnen Prozesse vorzunehmen. Die Kosten der (ausgewählten) Prozesse gehen anschließend in die Kostenermittlung auf Prozesskettenebene ein. Lassen es die angestrebte Aussagekraft und die Wirtschaftlichkeit der Bewertung sinnvoll erscheinen, sollten weitere Modelle (bzw. Modellebenen) zur Analyse und

Bewertung von untergeordneten Teilprozessen, Arbeitsgängen, Aktivitäten etc. gebildet werden

Die ersten vier Schritte der Prozessbewertung, *P1-P4*, ähneln denen der Prozesskettenebene. Besonders zu beachten ist aber die Problematik, dass einzelne Prozessvarianten zu einem unterschiedlichen Output führen können und dieser sich auf vorgelagerte oder nachfolgende Prozesse auswirkt, indem er bspw. eine spezifische Art der Durchführung dieser Prozesse bedingt.

Die konkrete Kostenermittlung erfolgt primär auf der Prozessebene (oder den angesprochenen untergeordneten Ebenen). Daher werden die entsprechenden Schritte unter Bezugnahme auf die Prozessebene erläutert.

In *P5*, der *Identifizierung und Analyse relevanter Kostenarten und ihrer Einflussgrößen*, ist zum einen zu hinterfragen, welche Arten von Ressourcen bzw. Produktionsfaktoren (z. B. Werkstoffe/Material, Betriebsmittel, Personal) vom jeweiligen Prozess beansprucht werden, um davon ausgehend die maßgeblichen Kostenarten zu bestimmen. Zum anderen sind die relevanten Kosteneinflussgrößen zu identifizieren. Hierzu kann grundsätzlich eine Vielzahl technischer, ökonomischer und weiterer Größen zählen, die sich – nicht überschneidungsfrei – in primär input-, throughput- und outputbezogene Größen untergliedern lassen (Bild 3).

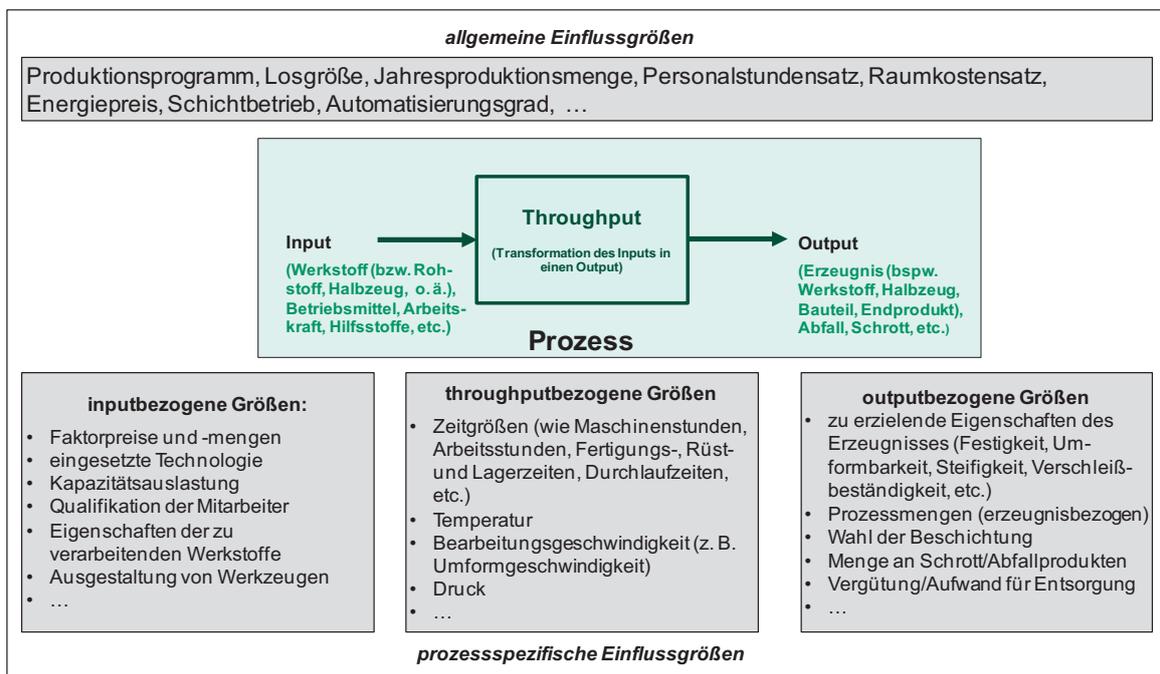


Bild 3: Typische Einflussgrößen der Kosten eines Prozesses

Im Einzelfall, d. h. prozessspezifisch, ist dann jeweils zu hinterfragen, von welcher oder welchen Einflussgröße(n) die verschiedenen relevanten Kosten mit welcher Intensität abhängen, und dann abzuwägen, inwiefern und in welcher Weise diese Einflussgrößen in die Kostenermittlung einbezogen werden.

Aufbauend auf den im vorherigen Schritt erzielten Ergebnissen, können nun im Schritt *P6* „Ableitung von Bezugsgrößen“ die Größe(n), die die höchste Korrelation bzw. den stärksten vermuteten Ursache-Wirkungs-Zusammenhang mit dem Kostenanfall aufweist bzw. aufweisen, als Bezugsgröße(n) herangezogen werden. Bezugsgrößen sind erforderlich, um einerseits den Prozessoutput messen und andererseits die Prozesskosten in Abhängigkeit von diesem planen, kontrollieren sowie verrechnen und damit die durch die entsprechenden Prozesse verursachten Verbrauchsvorgänge abbilden zu können [26]. Des Weiteren sind in diesem Schritt die spezifischen Ausprägungen der Bezugsgrößen zu bestimmen. (siehe ausführlicher [9])

Im Schritt *P7* „Ermittlung der Kosten eines Prozesses“ sind nun auf Basis der Bezugsgröße(n) und ihrer Ausprägungen sowie unter Einbeziehung der anderen relevanten Kosteneinflussgrößen die Kosten des Prozesses zu planen bzw. zu ermitteln (zu detaillierten Ausführungen in Bezug auf die Kostenermittlung siehe [9]). Die hierfür relevanten Daten können zum Teil direkt der betrieblichen Kostenrechnung entnommen werden, z. B. spezifische Kostenarten aus der Kostenartenrechnung sowie Verrechnungs- oder Zuschlagssätze aus der Kostenstellenrechnung. Zum Teil bilden die Daten der Kostenrechnung aber auch nur die Basis für die bezugsgrößenabhängige Berechnung oder Schätzung prozessspezifischer Kostengrößen – u. a. dann, wenn neuartige bzw. modifizierte Prozessvarianten (ggf. unter Rückgriff auf existierende) zu bewerten sind.

Oftmals wird es sich anbieten, für die Ermittlung der Kosten von (Fertigungs-)Prozessen eine Bezugsgrößenkalkulation, im Speziellen in Form der Verrechnung der maschinenabhängigen Kosten auf Basis von Bearbeitungs- bzw. Fertigungszeiten, durchzuführen. Dazu wird für den entsprechenden Prozess ein spezifischer Maschinenstundensatz (K_{MH}) gebildet. Zu dessen Ermittlung werden die gesamten maschinenabhängigen Kosten – Abschreibungen (K_A), kalkulatorische Zinsen (K_Z), Energiekosten (K_E), Raumkosten (K_R), Instandhaltungskosten (K_I), sonstige Kosten (K_S), bspw. für Kühl- und Schmierstoffe, sowie maschinenspezifische Werkzeugkosten (K_{WZ}) – durch die gesamte produktive Zeit der Anlage (T_{LA}) dividiert (Formel 1).

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_E + K_R + K_I + K_S + K_{WZ}}{T_{LA}} \quad (1)$$

Durch multiplikative Verknüpfung des Maschinenstundensatzes mit der prozessspezifischen Bearbeitungszeit, welche als hier primär relevante Kosteneinflussgröße die Bezugsgröße bildet, können auf diesem Wege die maschinenabhängigen Fertigungsgemeinkosten ermittelt werden, die durch die Ausführung des Prozesses „verursacht“ werden. Daneben sind die Lohnkosten bzw. Fertigungseinzelkosten des Prozesses zu bestimmen, die sich aus den Stundensätzen sowie den zuzu-

rechnenden Arbeitsstunden ergeben. Ggf. kommen die Kosten prozessbezogener Materialeinsätze hinzu.

Diese Prozesskosten können dann im Schritt „*Kostenvergleich, Sensitivitätsanalyse, Interpretation*“ (P8) zu einem Kostenvergleich zwischen verschiedenen Prozessalternativen und zur darauf basierenden (vorläufigen) Auswahl einer oder mehrerer wirtschaftlich vorteilhaften(r) Alternative(n) herangezogen werden. Mittels Sensitivitätsanalysen lässt sich anschließend überprüfen, in welcher Weise die ermittelten Prozesskosten und die vorteilhafte Prozessalternative von den einzelnen Einflussgrößen abhängig sind. So ist es möglich, besonders relevante Größen zu identifizieren und deren im Hinblick auf die Vorteilhaftigkeit einer Prozessvariante maximal zulässige Abweichungen zu ermitteln.

Die Ergebnisse, insbesondere die vorteilhafte(n) Prozessalternative(n) und deren Prozesskosten, gehen dann in die *Ermittlung der Kosten der Prozesskette* (PK5) ein. Die Kosten einer Prozesskette (K_{PK}) umfassen erstens die Summe der Kosten der in die Prozesskette eingehenden Prozesse. Des Weiteren sind zweitens die Kosten der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (und ggf. ihrer Bereitstellung, d. h. inklusive relevanter Materialgemeinkosten) einzubeziehen, die im Rahmen der Prozesskette zur Erstellung des gewünschten Outputs verarbeitet bzw. benötigt und für die gesamte Prozesskette bereitgestellt werden (die auf einzelne Prozesse bezogenen Materialeinsätze sollten auf der Prozessebene berücksichtigt werden).

Schließlich sind ggf. Sondereinzelkosten der Fertigung (z. B. für Spezialwerkzeuge) oder Restfertigungsgemeinkosten (wie z. B. Hilfslöhne, Gehälter oder Sozialkosten), die keinem Prozess direkt zuordenbar und nicht von der Maschinenlaufzeit abhängig sind, zu erfassen. Zusammenfassend ergibt sich das in Bild 4 dargestellte Schema zur Ermittlung der Kosten einer Prozesskette bzw. des in ihr hervorgebrachten Outputs.

Die Kosten der Prozessketten bilden letztlich die Basis für die abschließenden *Kostenvergleiche, Sensitivitätsanalysen und Ergebnisinterpretationen* (PK6) auf der Prozesskettenebene. Dabei ergibt sich aus dem Kostenvergleich die vorteilhafte Prozesskettenalternative. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen ist es möglich, zu untersuchen, wie sich eine Veränderung der Einflussgrößen auf die Kosten der Prozesskette auswirkt. Auf diesem Wege können die Größen ausgemacht werden, die das größte Optimierungs- bzw. Effizienzsteigerungspotenzial bergen. Des Weiteren ist es denkbar, die Prozessmengen zu berechnen, bei denen sich die Prozessketten indifferent verhalten („kritische Mengen“). Auf den im Rahmen dieser Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen aufbauend, können dann aus wirtschaftlicher oder aber technologischer Sicht Maßnahmen erarbeitet werden, die entweder am zu fertigenden Output (Produkt oder Bauteil, Losgröße), am Input (Werkstoff oder Halbzeug) oder an den Prozessen selbst ansetzen und im Ergebnis eine Kostenreduktion der gesamten Prozesskette bewirken. Ein Beispiel hierfür ist

ein durch Konstruktionsänderungen bewirkter verbesserter Materialausnutzungsgrad.

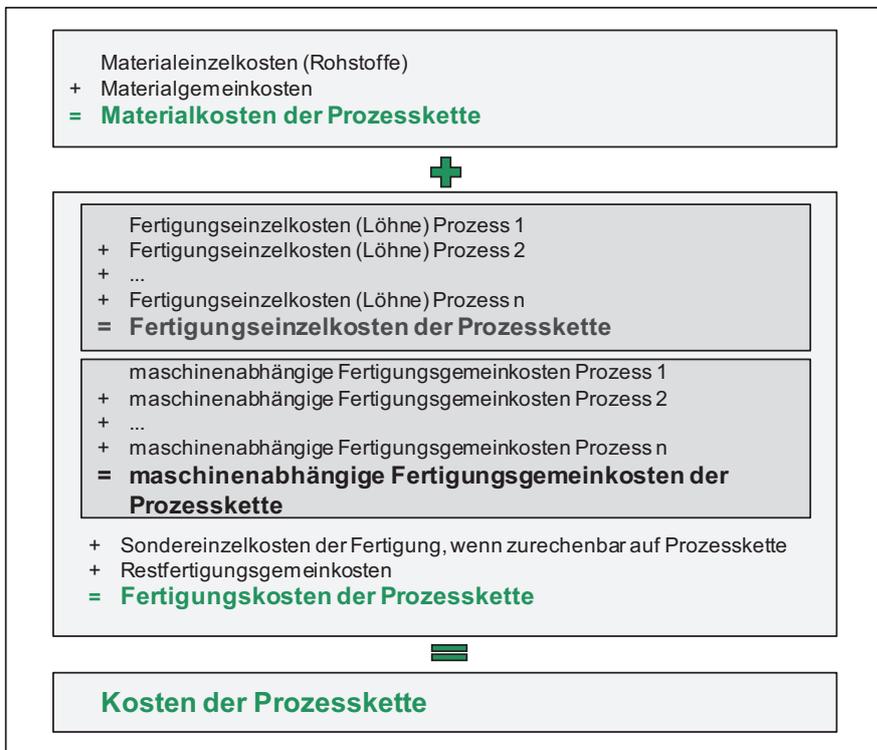


Bild 4: Ermittlung der Kosten von Prozessketten

Nachdem nun die Methodik überblicksartig vorgestellt worden ist, sollen im folgenden Abschnitt deren Anwendung zur Kostenermittlung für Prozessketten des Presshärtens zur Herstellung von Strukturbauteilen und die dabei erzielten wesentlichen Resultate aufgezeigt werden.

4 Anwendung der Methodik

4.1 Herstellung von Strukturbauteilen durch Presshärten

Die in modernen Rohkarosserien eingesetzten Strukturbauteile müssen höchsten Anforderungen hinsichtlich Gewicht (Leichtbau), Festigkeit, Crashperformance sowie Modularität und Kosten genügen. Hierfür werden spezielle Werkstoffe wie zum Beispiel der Mangan-Bor-legierte Vergütungsstahl 22MnB5 eingesetzt, die jedoch einen eigens abgestimmten Fertigungsprozess erfordern. Solch ein erst seit kurzem in die Serienproduktion überführter Fertigungsprozess ist das sogenannte Press- bzw. Formhärten. Er hebt sich gegenüber der konventionellen Fertigung von Strukturbauteilen dadurch ab, dass vor der eigentlichen Formgebung eine Erwärmung der Platine erfolgt und eine Kombination von Formgebung und Wärmebe-

handlung (Abschreckhärtung) im gekühlten Umformwerkzeug stattfindet. Durch Presshärten können Strukturbauteile mit sehr hohen Zugfestigkeiten (bis zu 1900 MPa), einem lokal angepassten Festigkeitsprofil (gradierte Bauteileigenschaften) und gleichzeitig geringer Blechdicke hergestellt werden. Charakteristische pressgehärtete Strukturbauteile sind zum Beispiel Dachrahmen, Stoßfänger, Schweller, A-, B-, C-Säule und Tunnel (Bild 5).

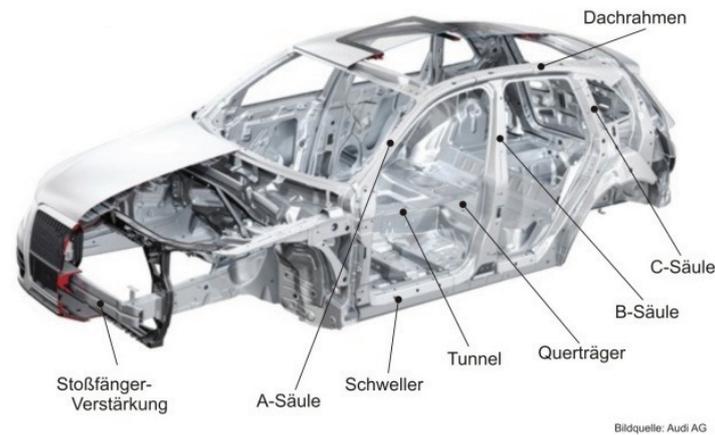


Bild 5: Pressgehärtete Strukturbauteile

Zur Herstellung eines pressgehärteten Strukturbauteils können über 120 verschiedene Prozessketten definiert werden, da allein fünf unterschiedliche Ausgangszustände des Materials (z. B. Coil, Formplatte, Tailored Blank) zur Verfügung stehen (Bild 6). Des Weiteren ergibt sich diese Anzahl durch die Abhängigkeit von verschiedenen technologischen Entscheidungen, wie zum Beispiel über die Notwendigkeit zur Herstellung einer Vorform oder die geeignete Art des Bauteilbeschnitts. Aufgrund der Vielzahl von Prozesskettenvarianten sind Aussagen über deren Wirtschaftlichkeit bisher schwierig. Die vorgestellte Methode leistet damit einen Beitrag, die wirtschaftlichste Presshärteprozesskette zu detektieren und Kostentreiber beim Presshärten aufzudecken.

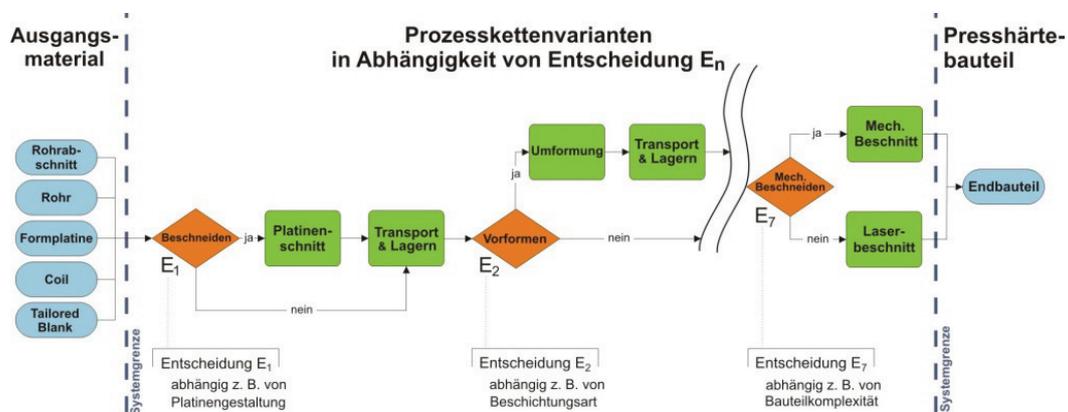


Bild 6: Prozesskettenvarianten zur Herstellung von pressgehärteten Strukturbauteilen

4.2 Ausgangssituation und getroffene Annahmen

Die Methodik zur wirtschaftlichen Bewertung von Prozesskettenvarianten soll am Bauteil „pressgehärtete B-Säulenverstärkung“ demonstriert werden (Bild 7). Ziel ist es dabei, die resultierenden Herstellkosten und die Wirtschaftlichkeit von zwei Prozesskettenvarianten zu untersuchen sowie Verbesserungspotenziale aufzuzeigen.



Bild 7: Pressgehärtete B-Säulenverstärkung [27]

Die beiden zu bewertenden Prozessketten gehen von einem beschichteten Coil aus, aus welchem in einem ersten Prozess (Platinenschnitt) eine Formplatte hergestellt wird. Im Anschluss daran wird die Formplatte in einem Rollenherdofen erwärmt, mittels Roboter entnommen und in das Presshärtewerkzeug eingelegt. Hierbei kommt ein Mehrfachwerkzeug zum Einsatz, wodurch mit einem Pressenhub zwei Bauteile hergestellt werden können. Nach der Entnahme der pressgehärteten Bauteile aus der Presse werden diese auf ihre Endgeometrie beschnitten. Dabei unterscheiden sich die beiden untersuchten Prozessketten maßgeblich durch die Art des finalen Bauteilbeschnitts (Bild 6, Entscheidung E₇). Zum einen kann die Endkontur des Bauteils durch mechanisches Scherschneiden (Hartbeschnitt) erreicht (Bild 8, links) und zum anderen kann dessen finale Geometrie durch Laserstrahlschneiden erzielt werden (Bild 8, rechts). Die Vorteile des Hartbeschnitts gegenüber dem Laserstrahlschneiden sind u. a. die wesentlich geringeren Prozesszeiten und die höhere Energie- und Ressourceneffizienz des Verfahrens. Jedoch stellt das Laserstrahlschneiden ein sehr flexibles und werkzeugungebundenes Fertigungsverfahren dar.

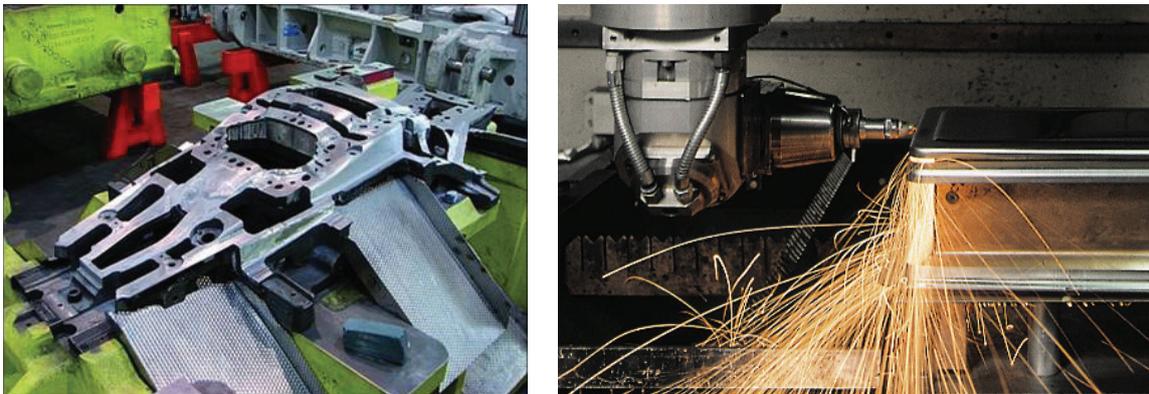


Bild 8: Werkzeugunterteil für mechanisches Beschneiden (li.) [28]; 3D-Laserstrahlschneiden (re.) [29]

Zur Ermittlung der Herstellkosten der pressgehärteten B-Säulenverstärkung wird eine tägliche Produktionsmenge von 6.400 Bauteilen (ohne Ausschuss) im Dreischichtbetrieb angenommen. Es ist weiter davon auszugehen, dass die erforderlichen Anlagen neu beschafft werden und dass i. d. R. pro Prozess eine Anlage zur Realisierung der Produktionsmenge bei 25 s Taktzeit ausreichend ist. Das Laserstrahlschneiden bildet hierbei die Ausnahme, da aufgrund der langen Prozesszeiten von 120 s neun Laseranlagen nötig sind. In der Berechnung der Herstellkosten werden Kostenpositionen wie z. B. die Warenträger für den Ofentransport, die Kühlanlage für die Werkzeugkühlung und die Lagerkosten vernachlässigt. Tabelle 1 zeigt ausgewählte Ausgangsdaten für die Berechnung der Herstellkosten.

Tabelle 1: Ausgangsdaten für die Ermittlung der Herstellkosten

Ausgangsdaten	
Produktionsmenge [Stück/Tag]	6.400
Arbeitsstunden [h/Jahr]	6.000
Lohnsatz für Personal [€/h]	35
Materialpreis [€/kg]	1
Zinssatz [%]	7
Raumkostensatz [€/m ²]	160
Energiepreis [€/kWh]	0,08 (Strom); 0,03 (Erdgas)
Nutzungsdauer [Jahre]	15 (Anlagen); 7 (Werkzeuge)

4.3 Ermittlung und Analyse der Herstellkosten

Auf Grundlage der in Abschnitt 3 vorgestellten Methode und der vorangegangenen Festlegungen werden nachfolgend die Berechnungsergebnisse hinsichtlich der maschinenabhängigen Fertigungsgemeinkosten, Personalkosten und Materialkos-

ten für die Herstellung einer pressgehärtete B-Säulenverstärkung mittels Presshärten dargestellt (Tabelle 2).

Die Analyse der in Tabelle 2 aufgeführten Kosteneinflussgrößen und Kostenarten, untergliedert nach Prozessen, ermöglicht erste Aussagen über die gebundenen Kapazitäten und wesentlichen Kostentreiber des Presshärtens. Der maschinelle Kapazitätsbedarf für das Presshärten wird anhand der Maschinenauslastung deutlich. Es zeigt sich, dass bei der vorgegebenen Produktionsmenge die Laserschneidanlagen den „Flaschenhals“ der Prozesskette bilden. Im Gegensatz dazu weisen die Anlagen für den Platinienschnitt und Hartbeschnitt noch genügend freie Kapazitäten auf, um weitere Blechumformteile auf der entsprechenden Anlage zu fertigen und somit die maschinenabhängigen Fertigungsgemeinkosten und damit auch die Herstellkosten zu senken.

Tabelle 2: Übersicht zu ausgewählten Kostenarten und Kosteneinflussgrößen je Prozess

	PROZESS							
	Platinienschnitt	Handling	Erwärmung	Handling	Presshärten	Handling	Laserbeschnitt	Hartbeschnitt
Anlagenanzahl	1	2	1	1	1	2	9	1
Taktzeit [s]	2	25	25	25	25	25	120	4
Maschinenauslastung [%]	7	93	93	93	93	93	99	30
Abschreibung [T€/Jahr]	101,3	8,7	80	5,2	166,7	9,13	420	166,7
Raumkosten [T€]	5,6	9,6	25,6	4,8	1,6	9,6	72	1,6
Energiekosten [T€/Jahr]	3,9	20,3	117,3	10,1	58,7	20,3	25,6	5,2
Sonstige Kosten (Werkzeug, Hilfsstoffe, Instandhaltung, ohne kalkul. Zinsen,...) [T€/Jahr]	48,2	1,5	207,3	0,75	185,9	1,5	448,7	151,4
Maschinenstundensatz [€/h]	483,49	8,03	64,04	4,25	93,22	8,15	200,28	241,82
Fertigungsgemeinkosten [€/Bauteil]	0,13	0,03	0,22	0,03	0,32	0,03	0,74	0,27
Personaleinsatz	1	2					3,5	1
Personalkosten [€/Bauteil]	0,13	0,26					0,46	0,13
Bauteilgewicht [kg]					4,25			
Materialausnutzungsgrad [%]					70			
Materialkosten [€/Bauteil]					6,07			

Hinsichtlich der Kostentreiber rücken auch die Energiekosten für die Prozesse Erwärmung und Presshärten in den Fokus, auf welche in Summe allein bis zu 70 % der Gesamtenergiekosten entfallen können. Begründet werden kann dies beim Presshärten vor allem durch die permanente Kühlung des Werkzeuges und die hohe Anschlussleistung der Presse. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Herstellkosten sind die aufzuwendenden Raumkosten. Hierbei ist der Prozessschritt der Erwärmung herauszuheben, dessen Raumkosten mit bis zu 44 % einen maßgeblichen Anteil an den Gesamtraumkosten einnehmen können. Weitere essentielle Kostenpositionen sind die anfallenden Werkzeugkosten und Werkzeuginstandhaltungskosten beim Prozess Presshärten und Hartbeschnitt, die sich im Jahr auf bis zu 250.000 € belaufen können.

Darüber hinaus wird die Gesamtbilanz durch die Kosten für die benötigten Hilfsstoffe stark beeinflusst. Demzufolge können die jährlichen Kosten für z. B. die Schneidgase beim Prozess Laserstrahlschneiden oder das Erdgas bei der Erwärmung der Platine in Summe bis zu 350.000 € betragen. Zusammengefasst ergeben sich für die einzelnen Prozesse Maschinenstundensätze, die zwischen 4,25 €/h (für das Bauteilhandling aus dem Ofen) und aufgrund der geringen Auslastung 483,49 €/h für den Platinenschnitt betragen. Die unterschiedlichen Maschinenstundensätze schlagen sich auch in den Fertigungsgemeinkosten nieder, die zwischen 0,03 €/Bauteil für das Handling und 0,74 €/Bauteil für den Laserbeschnitt variieren. Die prozentuale Aufteilung der Fertigungsgemeinkosten für die Prozesskette Presshärten mit Laserbeschnitt setzt sich somit zusammen aus dem Anteil für den Platinenschnitt (9 %), die Erwärmung (15 %), das Presshärten (21 %), das Handling (je 2 %) und den Laserbeschnitt (49 %). Bei der Prozesskette Presshärten mit Hartbeschnitt sind ebenfalls die Erwärmung, das Presshärten und der Hartbeschnitt bei den Fertigungsgemeinkosten die dominierenden Kostenpositionen (Bild 9).

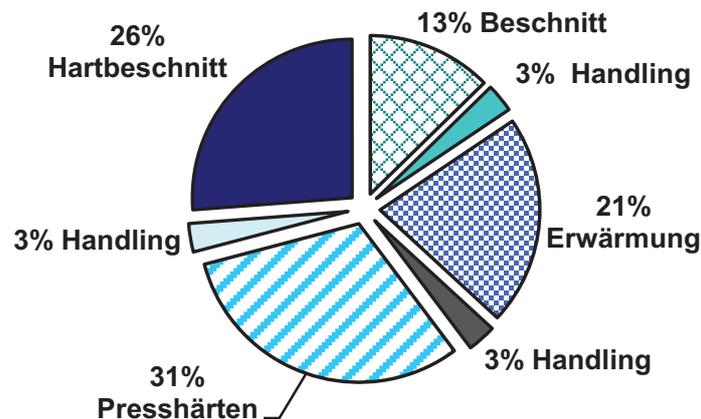


Bild 9: Prozentualer Anteil der einzelnen Prozesse an den Fertigungsgemeinkosten (Prozesskette mit Hartbeschnitt)

Ein Vergleich des Hartbeschnitts und Laserbeschnitts unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zeigt auf, dass die Raumkosten beim Hartbeschnitt circa 98 % geringer sind als beim Laserbeschnitt. Dies ist auf den geringen Platzbedarf für die Presse im Vergleich zu den notwendigen neun Laseranlagen zurückzuführen. Auch die Energiekosten sind beim Hartbeschnitt um circa 80 % geringer, was vor allem durch die geringere Anschlussleistung in Kombination mit der kurzen Prozessdauer begründet liegt. Herauszustellen sind auch die signifikant geringeren Kosten für die Werkzeuge beim Hartbeschnitt (circa 170 T€/Jahr) verglichen mit den Kosten für die Hilfsstoffe beim Laserbeschnitt (circa 450 T€/Jahr). Hierbei wird deutlich, dass einmalig anfallende Werkzeugkosten durch kontinuierlich anfallende Kosten für

Hilfsstoffe weit überstiegen werden können. Hinsichtlich der Personalkosten sind die Kosten für das Laserschneiden, wiederum bedingt durch die hohe Anzahl der zu betreuenden Anlagen, um den Faktor 3,5 höher als die Personalkosten beim Hartbeschnitt. Somit ist die Fertigung eines hartbeschnittenen Bauteils, welches in der Herstellung 7,62 €/Bauteil kostet als die wirtschaftlichere Prozesskettenvariante zu bezeichnen.

Nachfolgend wird in Bild 10 die anteilige Zusammensetzung der Herstellkosten für das Presshärten mit Hartbeschnitt aufgezeigt. Es wird deutlich, dass die Materialkosten mit einem Anteil von 61 % an den Herstellkosten die wesentliche Kostenposition bei der Produktion von pressgehärteten Strukturbauteilen darstellen. Eine Reduzierung des Materialeinsatzes ist z. B. durch die Erhöhung des Materialausnutzungsgrades oder die konstruktive Verbesserung der Bauteilgeometrie möglich.

Des Weiteren können technologische Verbesserungen, z. B. der Einsatz von platzsparenden Ofenkonzepten oder die Erhöhung der Energieeffizienz der Erwärmungsanlage, maßgeblich zur Senkung der Raum- bzw. Energiekosten und somit der Fertigungsgemeinkosten beitragen.

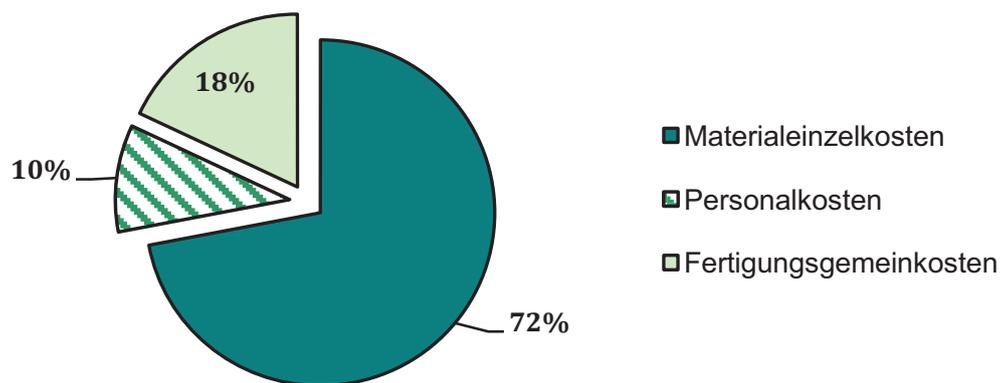


Bild 10: Prozentuale Aufteilung der Herstellkosten für das Presshärten mit Laserbeschnitt

Weiterführend lässt sich bei einem Vergleich der Prozesse Laser- und Hartbeschnitt auch die kritische Menge berechnen, bei welcher die Prozesskette mit dem Prozess Laserbeschnitt die bessere Alternative darstellt. Da beim Laserbeschnitt die Ausbringungsmenge je Anlage um ein Vielfaches geringer ist, muss bei steigender Produktionsmenge die Anlagenzahl sukzessive erhöht werden. Je Laserschneidanlage lassen sich maximal 180.000 Teile beschneiden. Die maximale zu beschneidende Menge beträgt, in Abhängigkeit vom „Flaschenhals“ Presshärten, bei einer Pressenstraße 1.728.000 Teile – diese lassen sich beim Hartbeschnitt auf nur einer Anlage realisieren. Der Untersuchungsbereich konzentriert sich daher auf eine Menge im Bereich $0 \leq x \leq 1.728.000$. In diesem ist jeweils ab einer zusätzlichen Menge von 180.000 Teilen eine weitere Laseranlage in die Berechnungen einzube-

ziehen. Bild 11 zeigt die in Abhängigkeit von der Produktionsmenge verursachten Kosten der Prozesse Laser- und Hartbeschnitt.

Es zeigt sich ein sprunghaftes Verhalten der Kosten des Laserbeschnitts. Sobald eine neue Anlage hinzukommt, steigen die Kosten je Bauteil aufgrund der zusätzlichen Abschreibungen, Zinsen und Betriebskosten. Je mehr Bauteile auf der weiteren Anlage beschnitten werden, desto höher ist die Auslastung, was wiederum eine Kostensenkung zur Folge hat. Vorteilhaft gegenüber dem Hartbeschnitt ist der Laserbeschnitt unter den gesetzten Prämissen, solange weniger als 180.000 Bauteile produziert werden. Sobald die Produktionsmenge diese Anzahl übersteigt, ist der Hartbeschnitt vorteilhaft. Grund hierfür sind die bereits angesprochenen mit zunehmender Anlagenzahl der Laserschneidanlagen deutlich steigenden anlagenabhängigen Kosten sowie die langen Bearbeitungszeiten, die rasch den Nachteil der hohen Anschaffungskosten der Presse für den Hartbeschnitt überkompensieren.

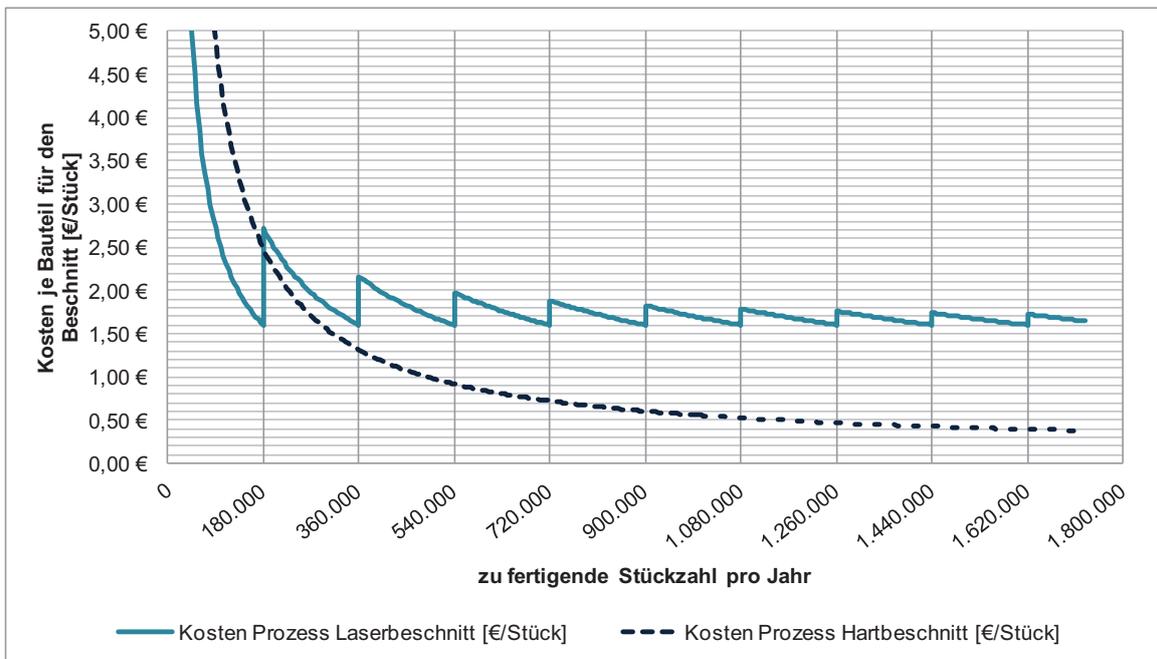


Bild 11: Vergleich der Kosten der Prozesse Laser- und Hartbeschnitt bei variierender Stückzahl

6 Fazit

Das Ziel des Beitrages bestand einerseits in der Vorstellung und andererseits in der praktischen Anwendung einer Methodik zur kostenorientierten Bewertung von neuartigen sowie bestehenden Prozessketten. Mit dieser Methodik sollen eine zielgerichtete Gestaltung und Steuerung fertigungstechnischer Prozessketten aus wirtschaftlicher Sicht ermöglicht werden, indem bereits frühzeitig im Entwicklungspro-

zess Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden, die wichtige Hinweise für die technologische Umsetzung geben können.

Aufgrund der unterschiedlichen existierenden Auffassungen wurden zunächst die grundlegenden Begrifflichkeiten „Prozess“ und „Prozesskette“ geklärt, um eine Grundlage für die folgenden Untersuchungen zu schaffen. Im Anschluss wurde eine geeignet erscheinende Methodik zur Prozesskettenbewertung vorgestellt, deren Kern ein Vorgehensmodell bildet, welches die Kostenermittlung von Prozesskettenalternativen zum Ziel hat. Um diesen Zweck zu erfüllen, wird, analog zum Problem- und Strukturierungsprozess der VDI-Richtlinie 2221, neben der Prozessketten- eine Prozessebene eingeführt, welche die Bestimmung der Kosten der einzelnen Prozesse bezweckt und deren Ergebnisse somit in die Kostenermittlung der Prozesskette einfließen. Für die Berechnung der Kosten auf Prozessebene wurde eine Bezugsgrößenkalkulation in Form einer Maschinenstundensatzrechnung vorgeschlagen, da diese die Möglichkeit bietet, für die anlagenintensiven fertigungstechnische Prozesse weitgehend verursachungsgerecht Kosten zu ermitteln. Letztlich lassen sich so die beste, d. h. wirtschaftlichste, Alternative bestimmen und die Ergebnisse der Bewertung weitergehend interpretieren, um u. a. Hinweise für technologische Verbesserungsbedarfe abzuleiten. Um die Vorgehens- und Wirkungsweise der Methodik zu verdeutlichen, wurde im letzten Teil des Beitrages die Anwendung am Beispiel der Herstellung pressgehärteter Strukturbauteile verdeutlicht. Dazu wurde das Verfahren des direkten Presshärtens betrachtet. Das Ziel war die Ermittlung der Kosten der gesamten Prozesskette sowie eines kostenbezogenen Alternativenvergleichs zwischen den Varianten Laser- und Hartbeschnitt des Prozesses „Bauteilbeschnitt“. Der Prozess bzw. die Prozesskette mit dem Hartbeschnitt erwies sich hierbei, unter den getroffenen Annahmen, als die wirtschaftlichere Variante.

Insgesamt wird somit im Rahmen des Beitrages ein schrittweises Vorgehen empfohlen, welches die Bewertung von technologischen Prozessketten ermöglicht und zudem die Chance bietet, Schwachstellen zu ermitteln und weitere Kostensenkungspotenziale zu identifizieren. Hinsichtlich der weiteren methodischen Ausgestaltung besteht allerdings noch Forschungsbedarf – insbesondere bezogen auf ein umfassendes Kostenmanagement von Prozessketten in frühen Phasen der Produkt- und Prozessgestaltung. Dies umfasst die Methodik der Kostenschätzung für innovative Prozesse (ausgehend von bisher existenten), die Einbeziehung qualitativer Aspekte sowie langfristig ausgelegte Lebenszyklusrechnungen für Prozessketten, die u. a. Investitionsbedarfe sowie Datenveränderungen im Zeitablauf berücksichtigen.

Acknowledgements

Die Autoren bedanken sich beim Europäischen Sozialfonds für die Förderung der Nachwuchsforschergruppe TranS-Ver sowie bei der europäischen Union (Europäi-

scher Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



Literaturangaben

- [1] Schuh, G.; Kampker, A.; Stich, V.; Kuhlmann, K.: Prozessmanagement. In: Schuh, G.; Kampker, A. (Hrsg.): Strategie und Management produzierender Unternehmen: Handbuch Produktion und Management 1, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin; Heidelberg, 2011, S. 327-382
- [2] Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung von Fertigungsfolgen, Diss., Shaker, Aachen, 2001
- [3] Willms, H.: Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen, Diss., Aachen 2008, <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus/volltexte/2008/2484/>, 2012
- [4] Abele, E.; Schrems, S.: Ressourcenorientierte Bewertung alternativer Prozessketten. In: ZWF, 2010, 105(6): 542-546
- [5] Aurich, J.C. et al.: Abschätzung der Lebenszykluskosten neu entwickelter Fertigungsprozesse. In: ZWF, 2009, 104(9): 720-724
- [6] Enge, D.: Entwicklung einer Gesamtmethodik zur virtuellen Planung und Bewertung von Prozessketten am Beispiel des Walzprofilierverfahrens, Diss., Shaker Verlag, Aachen, 2007
- [7] Denkena, B.; Schürmeyer, J.; Eikötter, M.: Berücksichtigung temporärer Effekte von Lebenszykluskosten in der Technologiebewertung. In: ZWF, 2010, 105(11), 959-963
- [8] Gausemeier, J.; Brökelmann, J.; Dettmer, D.: Fertigungsprozessplanung für gradierte Bauteile. In: ZWF, 2009, 104(11): 976-981
- [9] Götze, U.; Hache, B.; Schmidt, A.; Weber, T.: Methodik zur kostenorientierten Bewertung von Prozessketten der Werkstoffverarbeitung. In: MWT, 2011, 42(7): 647-657
- [10] Zönnchen, S.: Konzeption einer Methodik zur Analyse und Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Prozesskettenvarianten am Beispiel von Strukturbauteilen, unveröffentlichte Masterarbeit, TU Chemnitz, 2011

- [11] Becker, T.: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin; Heidelberg, 2008
- [12] DIN EN ISO 9000:2005-12: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [13] Großmann, K.; Wiemer, H.; Großmann, K.K.; Weller, J.: *Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten: Konzeption eines Beschreibungs- und Analysetools (Teil 2)*. In: ZWF, 2010, 105(11): 954-958
- [14] Nicolai, C.: *Prozessorganisation*. In: WISU, 2011, 40(5): 665-674
- [15] Denkena, B.; Tönshoff, H.K.: *Spanen – Grundlagen*, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin; Heidelberg, 2011
- [16] Klocke, F.: *In Prozeßketten denken und handeln*. In: *wt-Produktion und Management*, 1996, 86: 289
- [17] Großmann, K.; Wiemer, H.: *Modellierung der Prozesskette für textilverstärkte Verbund-Bauteile: Prozesscharakter, Modellanforderungen und Beschreibungsmittel (Teil 1)*. In: ZWF, 2007, 102(3): 111-115
- [18] Vahs, D.: *Organisation: Einführung in die Organisationstheorie und -praxis*. 6. Aufl., Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2007
- [19] Pielok, T.: *Prozeßkettenmodulation: Management von Prozeßketten mittels Logistic Function Deployment*, Verlag Praxiswissen, Dortmund, 1995
- [20] Dombrowski, U.; Horatzek, S.; Bothe, T.: *Erfolgreiche Prozessmodellierung*. In: ZWF, 2002, 97(11): 584-587
- [21] Großmann, K.; Wiemer, H.: *Reproduzierbare Fertigung in innovativen Prozessketten: Besonderheiten innovativer Prozessketten und methodische Ansätze für ihre Beschreibung, Analyse und Führung (Teil 1)*. In: ZWF, 2010, 105(10): 855-859
- [22] VDI 2221: *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*, VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, Beuth Verlag, Berlin, 1993
- [23] Götze, U.; Schmidt A.; Weber, T.: *Ansätze zur Einbeziehung von Kundenanforderungen und Erlösen in die Ermittlung und Steuerung von Werkstoffeffolgen*. In: MWT, 2010, 41(9), 784-794
- [24] Göschel, A.; Sterzing, A.; Schönherr, J.: *Systembetrachtungen von Prozessketten der Blechwarmumformung in Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz*. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): *Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik*, 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2010, S. 747-767

-
- [25] Dyckhoff, T.; Spengler, T.: *Produktionswirtschaft*, 2. Aufl., Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg, 2007
- [26] Horváth, P.; Mayer, R.: *Prozeßkostenrechnung – Konzeption und Entwicklung*. In: *krp*, 1993, Sonderheft 2, S. 15-28
- [27] ArcelorMittal: *Warmumformstähle*, www.arcelormittal.com/automotive/saturnus/sheets/E_DE.pdf, 2012
- [28] N.N.: *Beschnittwerkzeug*, www.form-werkzeug.de, 2011
- [29] Rieber GmbH & Co KG: *Laserschneiden*, www.riever.de/uploads/pics/IC-verfahrenstechn-3Dlaser-1.jpg, 2012