

# **Methode zur Stoff- und Energieflussbilanzierung von Prozessketten**

## *(Method for material and energy flow balancing of process chains)*

Neugebauer, R.<sup>1</sup>; Schieck, F.<sup>1</sup>; Göschel, A.<sup>1</sup>; Schönherr, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

### **Abstract**

Die deutsche Industrie- und Forschungslandschaft nimmt in Bezug auf das Thema Energie- und Ressourceneffizienz eine Spitzenposition ein. Deutsche Unternehmen bedienen mit ihren Produkten, Technologien und Produktionsprozessen ca. 20 % des Weltmarktes für Energie- und Ressourceneffizienz. Um dieser Führungsposition gerecht zu werden, ist die nachhaltige Entwicklung von Standards und Methoden zwingend erforderlich. Im vorliegenden Artikel wird eine Methode zur Berechnung und Bewertung von Prozessen und Prozessketten hinsichtlich Energie und Ressourceneffizienz vorgestellt. Mit Hilfe von vier Vorgehensschritten wird der Weg von der „realen Welt“ bis zur quantitativen Berechnung und qualitativen Bewertung von Stoff- und Energieströmen aufgezeigt. Am Beispiel der Prozesskette des Presshärtens wird die Methode veranschaulicht und verifiziert. Die Anwendung der Vorgehensweise ermöglicht die systematische Erfassung der Prozesskette des Presshärtens sowie die anschließende ganzheitliche Strukturierung der erfassten Prozesskette in einem Modell. Damit kann zunächst der Energie- und Stoffbedarf einzelner Prozessschritte berechnet werden, um dann in einem nächsten Schritt die gesamte Prozesskette zu bilanzieren. Diese Energie- und Stoffstrombilanz bildet die Grundlage für die Gestaltung neuer als auch die Verbesserung bestehender Prozessketten. Durch die Definition einer einheitlichen, repräsentativen Maßzahl, der Energiekennzahl, sind energiebezogene Prozesskettenvergleiche möglich. Die Vision besteht darin, dem Anwender ein Werkzeug zur Verfügung zu stellen, welches aus verschiedenen Prozessschritten und -ketten die unter energetischen Aspekten empfohlenen Varianten detektiert.

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-105232>

*Regarding the subject of energy and resource efficiency, German industry and research has a leading position. German companies serve about 20 % of the global market for energy and resource efficient products, technologies and production processes. In order to cope with the leading position, the development of appropriate methods and standards is mandatory. In this article, such method for the calculation and evaluation of processes and process chains with specific regard to energy and resource efficiency is presented. In four steps, the way from the "real world" to the quantitative calculation and qualitative evaluation of material and energy flows is presented. Using the example of the process chain for press hardening, the method is demonstrated and verified. First, the energy demand of the individual process steps and subsequently, of the entire process chain are calculated. The energy and material balance forms the basis for the development and improvement of process chains, respectively. By defining a consistent, representative measure – the energy measure – energy-related process chain comparisons are possible. The vision is to provide a tool detecting/recommending the most energy efficient process steps and process chains.*

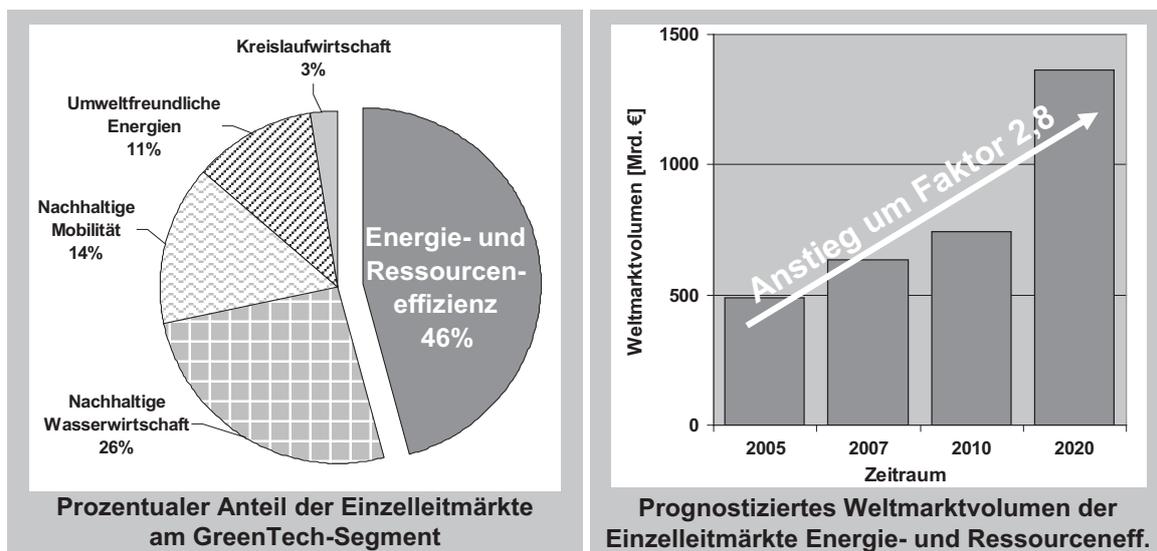
**Keywords:**

Material- und Energiefluss, Prozesskette, Presshärten  
*material and energy flows, process chain, press hardening*

## **1 Energie- und Ressourceneffizienz als führendes Handlungsfeld der Produktionstechnik**

Die Produktionstechnik mit den Hauptbereichen Fertigungstechnik, Verfahrenstechnik und Energietechnik kann einen wesentlichen Beitrag zur Lösung des Konflikts zwischen steigendem Energieverbrauch und gleichzeitiger Ressourcenverknappung leisten. Durch die Entwicklung von energie- und ressourceneffizienten Verfahren und Produkten können einerseits umweltfreundliche Standards definiert und andererseits deren technische Umsetzung und Einhaltung ermöglicht werden. Somit nimmt die Produktionstechnik für beide Aspekte, die Schaffung von Bemessungsgrundlagen und die Realisierung dieser, eine Schlüsselposition zur Lösung des Energiekonfliktes ein. Erste konkrete Schritte in Richtung Energie- und Ressourceneffizienz im Bereich der Produktionstechnik wurden bereits getan: GreenTech. Diese Branche ist eine Zusammenführung verschiedener Einzelleitmärkte wie z. B. Energie- und Ressourceneffizienz, umweltfreundliche Energien, nachhaltige Mobilität und Kreislaufwirtschaft. Sie weist mittlerweile ein globales Weltmarktvolumen von circa 1,4 Billionen Euro auf und ordnet sich damit in die Reihe der Schlüsselindustrien wie Automobilbau, Chemie und Elektrotechnik ein

[1]. Auch zukünftig wird GreenTech im Bereich der Produktionstechnik eine richtungsweisende Position einnehmen. Prognosen gehen davon aus, dass sich das Weltmarktvolumen bis ins Jahr 2020 auf circa 3,1 Billionen Euro verdoppeln wird [1].



**Bild 1:** Einordnung der Einzelleitmärkte Energie- und Ressourceneffizienz [1]

Eine herausragende Rolle spielen dabei die Einzelleitmärkte „Energieeffizienz“ sowie „Rohstoff- und Materialeffizienz“. Zurzeit nehmen diese Bereiche einen Volumenanteil von über 45 % ein (Bild 1). Bis zum Jahr 2020 wird erwartet, dass in diesen Segmenten eine Verdopplung des Umsatzes auf insgesamt circa 1,3 Billionen Euro stattfindet [1]. Dadurch wird innerhalb des GreenTech das Thema Energie- und Ressourceneffizienz zum führenden Handlungsfeld.

## 2 Energie- und Ressourceneffizienz durch Prozessoptimierung

Zur Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz im Kontext der Produktionstechnik werden vordergründig zwei Strategien verfolgt [1, 2]:

- die Produktoptimierung, d. h. die Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz von Produkten bzw. Erzeugnissen, und
- die Prozessoptimierung einschließlich intelligenter Steuerungen, d. h. die Reduzierung des Energie- und Ressourcenverbrauchs von Produktionsprozessen.

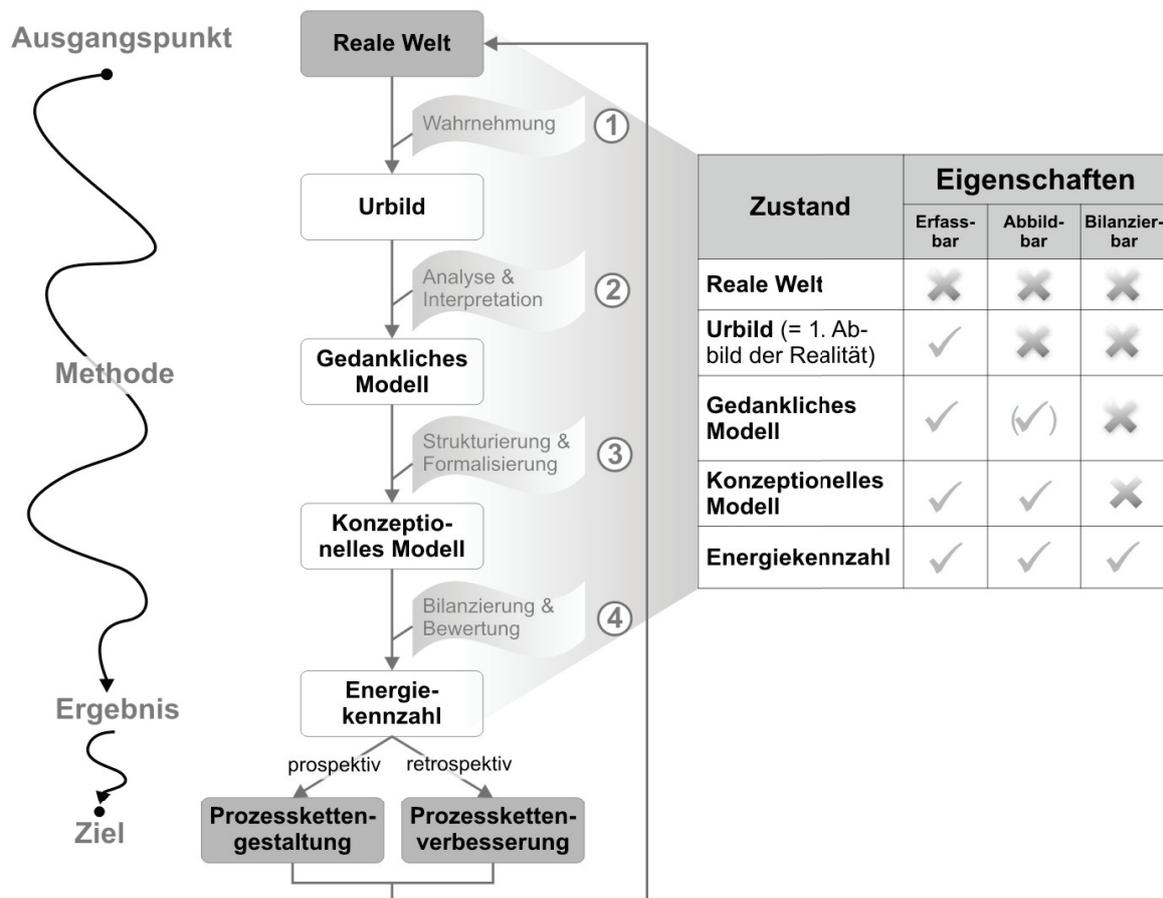
Die Strategie der energie- und ressourceneffizienten Erzeugnisse wird bei Gütern wie z. B. weißer Ware, Motoren, Pumpen sowie Heiz- und Kühlsystemen bereits

erfolgreich verwirklicht. Die Produktoptimierung wird momentan, im Gegensatz zur prozessualen Optimierung, mit sehr konkreten Vorgehensweisen und Verbesserungsansätzen verfolgt. Dagegen können detaillierte Maßnahmen oder Methoden zur Prozessoptimierung nur an vereinzelt Beispielen verdeutlicht und Verbesserungspotentiale mit Werten beziffert werden. Als zurzeit häufig gewählter Ansatzpunkt für prozessuale Optimierungen gilt die Erzeugung, Verarbeitung und Speicherung von Druckluft. Die Firma BOGE Kompressoren hat nachgewiesen, dass eine Reduzierung des Druckluftverbrauchs um 30 % durch Bündelung verschiedener Verbesserungsmaßnahmen wie z. B. Substitution der bestehenden Druckluftanlage und Überprüfung des Leitungsnetzes auf Leckage möglich ist [3].

Im vorliegenden Artikel steht die Strategie der Prozessoptimierung, verdeutlicht am Beispiel der Prozesskette des Presshärtens, im Fokus der Untersuchungen. Die Presshärteprozesskette weist ein enormes Verbesserungspotential auf, da das Verfahren erst in jüngster Zeit in die Serienproduktion überführt wurde [4]. Im seriennahen Produktionsablauf greift daher noch häufig das Prinzip „Trial and Error“, wodurch sich dementsprechend für eine systematische Prozessauslegung und -gestaltung unter Aspekten der Energie- und Ressourceneffizienz ein großer Handlungsspielraum bietet. Ein weiterer Aspekt zur Prozessverbesserung basiert darauf, dass Presshärten als sehr energieintensiv einzustufen ist. Dies ist vor allem den hohen Umformtemperaturen von 900 – 950 °C geschuldet. Als weiteres weißes Forschungsfeld werden Konzepte zur Energierückgewinnung und zur Nutzung von alternativen Ressourcen angesehen.

### **3 Darstellung der entwickelten Methode**

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik (eniPROD)“ wurde am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik eine Methode zur Energie- und Stoffflussbilanzierung entwickelt. Ziel ist es, Prozesse und Prozessketten hinsichtlich deren Energie- und Ressourceneffizienz quantitativ zu bewerten. Darauf aufbauend wird die Vergleichbarkeit von Prozess- und Prozesskettenvarianten ermöglicht und somit die energie- und ressourcensensitive Planung und Gestaltung von Prozessen und Prozessketten realisiert (prospektive Prozesskettengestaltung). Auch die retrospektive Verbesserung von bestehenden Prozessen und Prozessketten wird wesentlich erleichtert, da erste Verbesserungsansätze detektiert werden können. Das Potenzial solcher prozessualen Verbesserung wird mit einem Wert von 30 % beziffert, was dementsprechend eine Reduzierung der Energiekosten des Unternehmens von durchschnittlich 27 % bewirkt [5, 6]. Demzufolge ist eine Methode zur Planung und Gestaltung sowie Verbesserung von Prozessketten hinsichtlich Energie- und Ressourceneffizienz sowohl aus ökologischen als auch aus ökonomischen Gründen verstärkt anzustreben und voranzutreiben.



**Bild 2:** Entwickelte Methode zur Energie- und Stoffflussbilanzierung

Die Methode zur Energie- und Stoffflussbilanzierung besteht aus vier Arbeitsschritten (Bild 2). Ausgangspunkt der entwickelten Vorgehensweise ist die reale Welt, welche als die Wirklichkeit im Sinne der Summe alles Vorhandenen und Gegenständlichen im Unterschied zum lediglich Gedachten oder Vorgestellten verstanden wird [7]. Aufgrund ihrer Komplexität ist sie weder umfassend erfass- und darstellbar noch ganzheitlich bilanzierbar. Über die **Wahrnehmung** (1), das heißt die bewusste und unbewusste Informationsgewinnung und -verarbeitung mit Hilfe der Sinne, generiert der Mensch ein gedankliches Urbild. Dieses Urbild stellt ein erstes Abbild der Realität dar, welches durch das Wissen und die Erfahrung sowie die Wertevorstellungen des Rezipienten geprägt ist. Dieses bildet die Grundlage für den Vorgehensschritt **Analyse und Interpretation** (2). Dabei werden verschiedene Methoden sowie Hilfsmittel genutzt, um das bewusste Erfassen und Verstehen der Realität zu ermöglichen. Das auf diese Art und Weise entstandene gedankliche Modell beinhaltet einerseits die Beurteilung des Ist-Zustandes und andererseits die dafür ausschlaggebenden Ursachen. Darauf aufbauend wird eine systematische und methodische Modellierung des gedanklichen Modells durch den Schritt **Strukturierung**

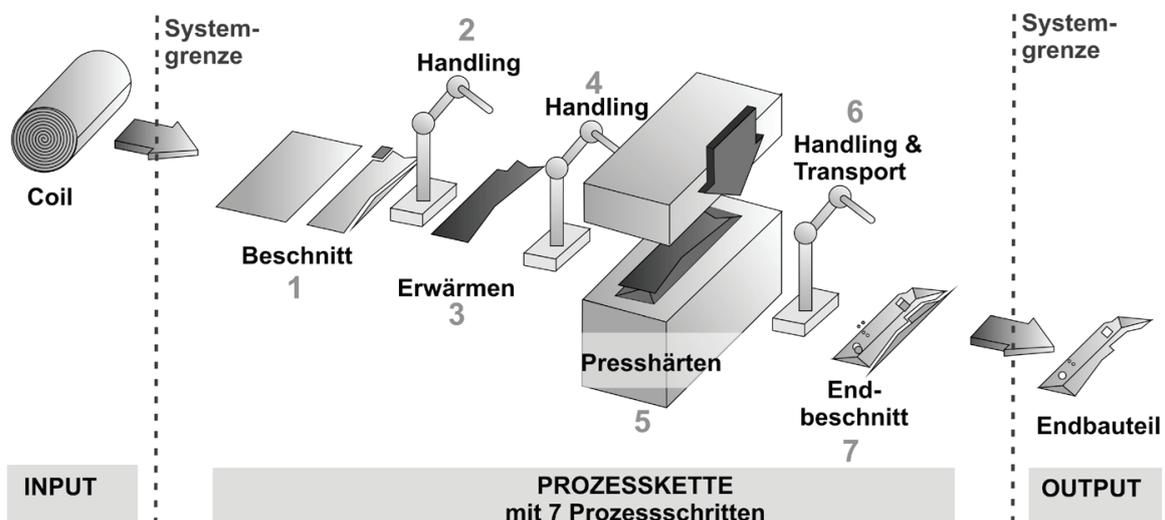
**und Formalisierung** (3) vorgenommen. Das entstandene konzeptionelle Modell bietet die Möglichkeit einer logischen Zuordnung von Prozesselementen (z. B. elektrische Energie, Werkzeuge, Rohstoffe, Produkte, ...) zu einer definierten Modellstruktur (Input, Output, Einflussfaktoren, Hilfsobjekte). Dadurch dient es als Basis für den anschließenden Vorgehensschritt **Bilanzierung und Bewertung** (4), welcher Algorithmen, Berechnungsvorschriften oder Bilanzmodelle nutzt, um eine sogenannte Energiekennzahl zu berechnen. Diese Maßzahl ist eine Kenngröße für die Energie- und Ressourceneffizienz des Prozesses und der Prozesskette und legt somit die Grundlage für prospektive Gestaltungs- oder retrospektive Verbesserungsaufgaben.

### 3.1 Wahrnehmung der „realen Welt des Presshärtens“

Im ersten Schritt der entwickelten Methode wird auf die Wahrnehmung der Realität, also die bewusste und unbewusste Feststellung des Ist-Zustandes sowie die Gewinnung von Informationen, fokussiert. Dabei kommt diesem Vorgehensschritt eine entscheidende Rolle zu, denn das entwickelte gedankliche Gerüst an Informationen und Fakten legt die Basis für alle weiteren Schritte. Der Vorgang der Wahrnehmung, z. B. von Prozessketten im industriellen Umfeld der Produktherstellung, kann durch verschiedene Hilfsmittel aus dem Gebiet der Erhebungstechniken unterstützt werden. Eine wesentliche Bedeutung kommt dabei der Befragung, Beobachtung und Auswertung von Informationsbeständen zu [8]. Zudem tragen arbeitsorganisatorische Methoden wie beispielsweise Methods-Time Measurement (MTM) zur Entwicklung eines Grundverständnisses hinsichtlich der Arbeitsabläufe bei.

Die Prozesskette des Presshärtens kann im industriellen Umfeld der Rohkarosserieherstellung untersucht werden. Sie ist essentiell geprägt durch die Zusammenführung der Prozessschritte Umformung und Wärmebehandlung. In diesem zum Prozessschritt Presshärtens verknüpften Vorgang wird ein über Austenitisierungstemperatur erwärmtes Halbzeug, z. B. eine Formplatte oder ein Rohr, in ein gekühltes Umformwerkzeug eingebracht und anschließend in einem Prozessschritt umgeformt als auch abgeschreckt. Durch Presshärtens werden Bauteile mit sehr hohen Zugfestigkeiten erzielt, die vorrangig im Automobilbau, z. B. als A- und B-Säulenverstärkung, Dachrahmen oder Tunnel, eingesetzt werden. Der Prozessschritt Presshärtens wird durch die vorgelagerten Prozessschritte der Halbzeugbereitstellung, z. B. die Herstellung einer Formplatte oder eines Rohrabchnittes (Beschnitt) sowie optional die Fertigung einer Vorform, ergänzt. Essentielle Bedeutung hat zudem der Prozessschritt Erwärmung des Halbzeuges. Vervollständigt wird die Bauteilfertigung durch die Nachfolgeoperationen, wie z. B. Bauteilendschnitt und Reinigung. Die Verknüpfung der einzelnen Prozessschritte zu einer Prozesskette wird durch entsprechende Handlings- und Transportschritte realisiert.

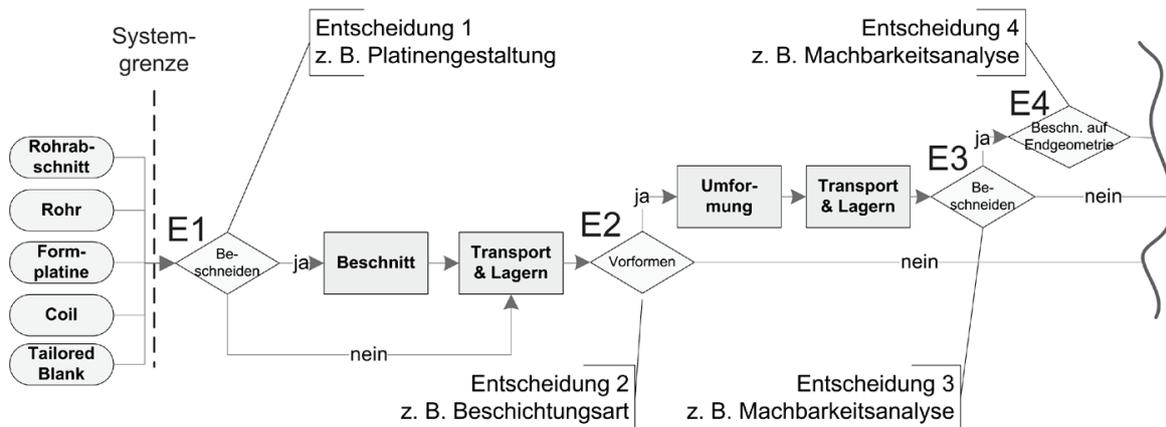
Exemplarisch für die Prozessketten des Presshärtens wird schematisch in Bild 3 die direkte Presshärtprozesskette für die Herstellung von offenen Profilbauteilen vorgestellt. Dabei besteht der Gesamtvorgang der Produktherstellung aus sieben einzelnen Prozessschritten. Hinsichtlich Energie- und Ressourceneffizienz kommt den Prozessschritten Erwärmen (3), Handling (4), Presshärten (5) sowie Endbeschnitt (7) eine besondere Bedeutung zu, da diese als sehr energie- und ressourcenintensiv einzustufen sind. Verbesserungspotentiale werden hier insbesondere im Zusammenhang mit dem Handling warmer Teile, der Senkung der Erwärmungs- respektive der Umformtemperatur, der Anwendung neuer Erwärmungs- und Beschnittkonzepte sowie der Energierückgewinnung gesehen.



**Bild 3:** Exemplarische Prozesskette: direktes Presshärten

### 3.2 Interpretation und Analyse der Prozesskette Presshärten

Der Vorgehensschritt „Analyse und Interpretation“ hat das Ziel, den wahrgenommenen Ist-Zustand hinsichtlich Korrelationen und Kausalitäten vertiefend zu untersuchen. Dadurch wird das erworbene Überblicksverständnis zu einem detaillierten Gesamtbild und Ursache-Wirkungs-Verständnis weiterentwickelt. Hierfür werden einerseits heuristische Prinzipien genutzt, wie z. B. das Bilden von Analogien, das Betrachten von Extremwerten oder die Fallunterscheidung. Aber auch konventionelle Analysemethoden wie z. B. die ABC-Analyse oder die Portfolio-Analyse kommen zum Einsatz. Im praxisnahen Umfeld können zudem Datenanalysen mit statistischer Auswertung Transparenz schaffen und zum Verständnis der Realität beitragen. Durch diese vielfältigen Informationen wird das Urbild konkretisiert und in das gedankliche Modell des Ist-Zustandes überführt.



**Bild 4:** Prozesskettenplan mit Entscheidungsknoten (Auszug)

Die Analyse und Interpretation der Presshärteprozesskette fokussiert auf den Betrachtungsraum Pressenlinie im Presswerk, wodurch die Prozesskette klar abgegrenzt ist. Zur Herstellung eines pressgehärteten Endbauteiles für die Rohkarosserie können 126 unterschiedliche Prozessketten definiert werden. Diese werden vom Stand der Technik (z. B. Feldanalysen) für verschiedene Referenzbauteile (z. B. B-Säule, Tunnel, Dachrahmen) abgeleitet. Zur Systematisierung dieser Prozesskettenvarianten wurde ein Prozesskettenplan mit Entscheidungsknoten, welche als Verzweigungsstellen fungieren, entwickelt (Bild 4). Ausgehend von fünf verschiedenen Halbzeugen (Coil, Formplatte, Rohr, Rohrabschnitt, Tailored Blank) müssen zur Festlegung einer geeigneten Prozesskette acht Entscheidungen getroffen werden. Diese hängen technologisch maßgeblich ab von:

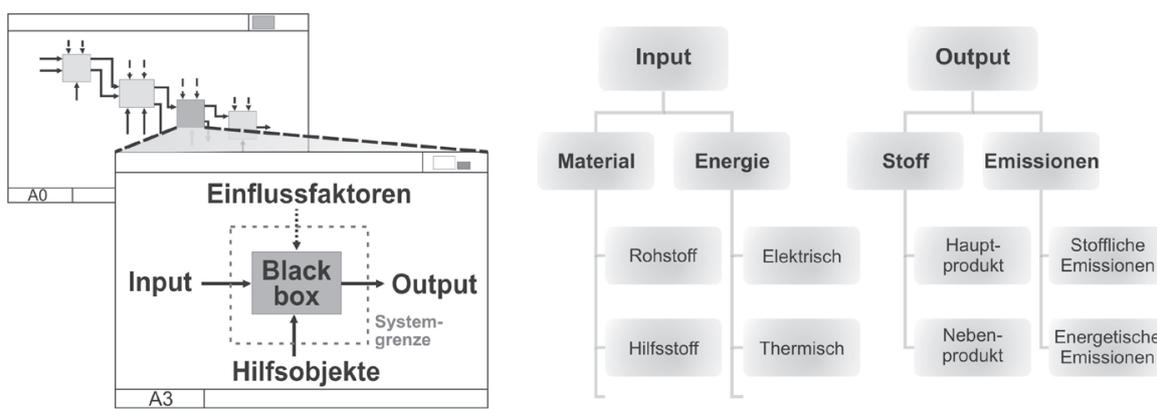
- der Bauteilkomplexität (Ziehtiefe, Blechdicke, Art der Formelemente, ...),
- der Beschichtungsart (Zink, Aluminium-Silizium, ...),
- der Gradierung des Bauteils (lokal veränderte Bauteilfestigkeit, ...) und
- der Art des Ausgangsmaterials (Coil, Formplatte, Rohr, Tailored Blank, ...).

Die systematische Untersuchung des Prozesskettenplans zeigt, dass 65 % der Prozessschritte unterstützenden Charakter besitzen (z. B. Handlungsschritte). Technologisch erforderlich sind lediglich 20 % der Prozessschritte, bspw. die Erwärmung oder die Umformung. Die Bedeutung dieser prozentualen Verteilung hinsichtlich Energie- und Ressourcenbedarf der Prozessschritte wird mithilfe einer ABC-Analyse deutlich. Es zeigt sich, dass die technisch notwendigen Prozessschritte rund 60 % des Energie- und Ressourcenbedarfs benötigen. Eine Senkung dieses Energie- und Ressourcenbedarfs ist vor allem durch technische Weiterentwicklungen zu erzielen, wie z. B. durch die Verbesserung des Wirkungsgrades von Maschinen und Anlagen oder die Reduzierung der energetischen Verluste (Abwärme). Der Anteil der unterstützenden Prozessschritte am Energie- und Ressourcenbedarf (circa 20 %) kann beispielsweise durch gezielte Maßnahmen der Prozesskettengestaltung reduziert werden. Ansätze hierfür sind insbesondere die Prozessschrittin-

tegration, z. B. einen in die Umformung integrierten Beschnitt, und die Prozessschritteliminierung, beispielsweise die Vermeidung der Vorformherstellung.

### 3.3 Strukturierung und Formalisierung der Prozesselemente des Presshärtens

Der Vorgehensschritt „Strukturieren und Formalisieren“ ermöglicht die Umsetzung des gedanklichen Modells in ein konzeptionelles Modell. Voraussetzung hierbei ist, dass eine geeignete Struktur mit einer systematischen Zuordnung und konsistenten Klassifizierung von Elementen zur Verfügung steht. Für die Konzeption und Visualisierung von hierarchisch gegliederten, komplexen Prozessketten auf der Ebene der Stoff- und Energieströme wurde eine Modellstruktur auf der Basis der Structured Analysis and Design Technique (SADT) entwickelt (Bild 5, links) [9, 10]. Eine weitere Detaillierung der Strukturelemente (Input, Output, Hilfsobjekte, Einflussfaktoren) ist jedoch erforderlich, um eine Verbindung der konkreten Prozesselemente (z. B. Hilfsstoffe, Ausgangsmaterial, Werkzeuge, elektrische Energie, Abwärme) zur übergeordneten Struktur zu realisieren. In der Literatur sind Klassifizierungen für Prozesselemente in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen hinlänglich bekannt. Beispielweise werden in der Betriebswirtschaftslehre die Gutenbergschen Produktionsfaktoren oder die Input-Output-Betrachtungen bei der Flusskostenrechnung herangezogen [11, 12]. Auch aus dem Bereich des Umweltmanagements sind Klassifikationen bekannt, deren Aufbau stark durch die ökologische Sichtweise (Zuordnung von Elementen wie z. B. Abfällen, Abwasser oder Emissionen in die Atmosphäre) geprägt ist [13, 14]. Die entwickelte Klassifikation verbindet diese Betrachtungsweisen und beinhaltet somit betriebswirtschaftliche (Produktionsfaktoren), ökologische (Energie und Ressourcen sowie Emissionen) als auch technische Prozesselemente (z. B. Betriebsmittel, Material, Einflussfaktoren) (Bild 5, rechts).



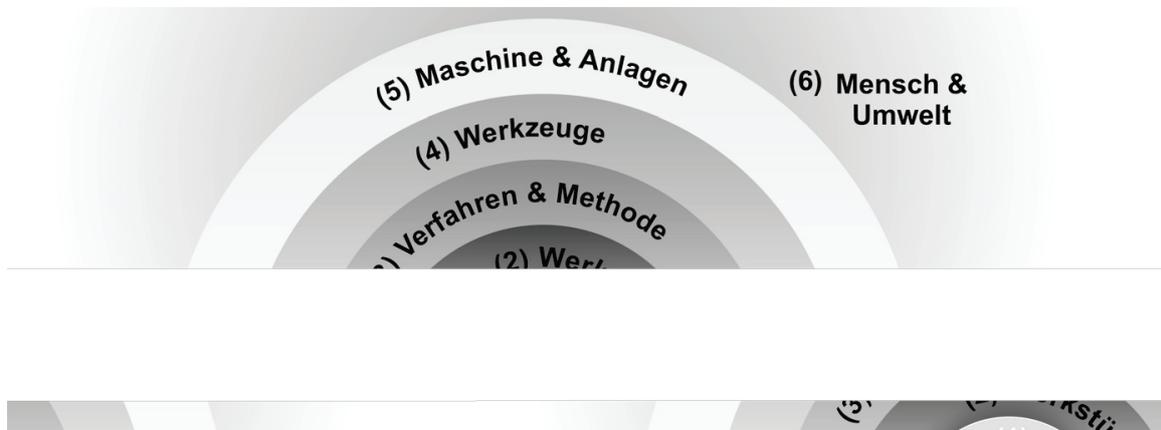
**Bild 5:** Konzeptionelles Modell und Klassifizierung (Auszug)

Das konzeptionelle Modell nutzt die vier Strukturelemente Input, Output, Hilfsobjekte und Einflussfaktoren als 1. Ordnungsebene. In der 2. und 3. Ordnungsebene werden diese Strukturelemente weiter detailliert. Dabei werden unter Input alle Materialien oder Energien klassifiziert, die zur Realisierung des Prozesses erforderlich sind und verbraucht werden. Die eingebrachten Materialien und Energien werden im Prozess zu Produkten und Emissionen transformiert. Diese verlassen das System als Output. Als Hilfsobjekte werden die materiellen und immateriellen Betriebsmittel sowie der Mensch eingeordnet. Im Unterschied zum Input bzw. Output werden diese nicht aufgebraucht, sondern stehen für eine wiederholte Durchführung des Prozesses zur Verfügung. Unter dem Begriff Einflussfaktoren sind die Signale zusammengefasst, die als Prozessparameter vorgegeben werden (Führungsgrößen) bzw. die als Störung auf den Prozess wirken (Störgrößen). Am Beispiel der Presshärtprozesskette wurde das konzeptionelle Modell validiert. Z. B. wird das Blech-Coil als stofflicher und die elektrische Energie als energetischer Input systematisiert. Des Weiteren werden das Umformwerkzeug und die Presse als materielle Betriebsmittel den Hilfsobjekten und die Umformtemperatur als Führungsgröße den Einflussfaktoren zugeordnet. Seitens Output werden der Kategorie Produkte das beschnittene Endbauteil (Hauptprodukt) und die Beschnittabfälle (Nebenprodukte) zugeteilt. Als energetische Emissionen wird z. B. die Abwärme bei der Bauteilerwärmung definiert.

### **3.4 Bewertung des Energiebedarfs von Prozessketten des Presshärtens**

Im abschließenden Vorgehensschritt „Bilanzierung und Bewertung“ kann unter Beachtung des Bewertungs- und Berechnungszieles sowie auf Basis des erstellten konzeptionellen Modells aus einer breiten Palette von Hilfsmitteln und Werkzeugen gewählt werden. Darunter fallen u. a. Entscheidungs- und Bewertungsmethoden, Lösungsalgorithmen und Heuristiken sowie Berechnungsvorschriften und Bilanzierungsansätze.

Das Ziel der aufgezeigten Methode ist die Bilanzierung von Stoff- und Energieströmen bei Prozessketten, wobei momentan auf die Berechnung des Energieflusses fokussiert wird. Zur Anwendung kommt ein entwickeltes Vollschalenmodell, welches auf Basis des ideellen Energiebedarfs (Ebene 1) über verschiedene Korrektorebenen (Ebene 2 - 6) eine Energiekennzahl für einen konkreten Prozessschritt bestimmt (Bild 6). Diese Energiekennzahl gibt Aufschluss über den tatsächlichen Energiebedarf des Prozesses. Dieser setzt sich aus der jeweils benötigten Prozessenergie und der aus der Grundlast der Maschinen und Anlagen (Peripherie) resultierenden Energiemenge zusammen.



**Bild 6:** Vollschalenmodell zur Bilanzierung von Prozessschritten

Durch die Bilanzierung einzelner Prozessschritte auf Basis des Vollschalenmodells entstehen separate Prozessschritt-Module. Mit deren Hilfe kann die jeweilige Energiekennzahl in Abhängigkeit der Einflussgrößen und -parameter (z. B. Werkstück- und Werkzeuggeometrie, tribologische Bedingungen) berechnet werden. Die verfahrensspezifischen Prozessschritt-Module werden unter Zuhilfenahme des Prozesskettenplans zu einer Prozesskettenbilanz verknüpft. Diese Bilanz erlaubt die Bestimmung der spezifischen Energiekennzahl, welche einen quantitativen Vergleich verschiedener Prozesskettenvarianten ermöglicht.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Bestimmung der Energiekennzahl ist auf einer abstrakten Ebene die Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Prozessschritten und -ketten realisierbar. Dadurch sind vergleichende Betrachtungen von verschiedenen Fertigungstechnologien, z. B. Laserbeschnitt versus Hartbeschnitt, unter dem Aspekt der jeweils benötigten Energiemenge möglich. Darüber hinaus können Prozesskettenalternativen energetisch bewertet und verglichen werden. Dies kann wiederum zur Priorisierung von Prozesskettenvarianten dienen. Bezüglich des Verfahrens Presshärten können demzufolge Prozesskettenvarianten zur Herstellung eines Bauteils gegeneinander abgewogen und die energetisch zu bevorzugenden Lösungsalternativen detektiert werden. Dadurch finden auch bisher offene Fragen ihre Beantwortung, wie z. B., ob das Herstellen einer Vorform ganzheitlich betrachtet eine energetisch ungünstige Prozesskette bedingt. Dem Technologen steht damit einerseits ein effektives Hilfsmittel zur Analyse und Interpretation des Ist-Zustandes zur Verfügung, welches die gezielte Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen und dementsprechend die Ausschöpfung von Einsparpotenzialen ermöglicht. Andererseits kann die aufgezeigte Methode zur planerischen Gestaltung von Prozessketten genutzt werden. Zudem stellt sie ein strategisches Werkzeug zur Entscheidungsfin-

dung dar, da das Detektieren von Forschungs- und Entwicklungspotenzialen unterstützt wird. Darüber hinaus werden vielfältige Anknüpfungspunkte zu weiteren Aufgaben des Managements gegeben. Im Rahmen der Ökobilanzierung oder des Qualitätsmanagements kann die Methode zur Lösung der jeweiligen Aufgaben einen wesentlichen Beitrag leisten. Des Weiteren bildet die allgemeingültige Herangehensweise der Methode ein Gerüst, welches auf weitere Prozessketten der Produktionstechnik übertragen werden kann. Der Grundstein hierfür wurde durch die Überführung der Prozessmodule in eine Software-Bibliothek gelegt. Eine kontinuierlichen Erweiterung dieser, wie z. B. um Verfahren zum Trennen und Fügen, ist verstärkt voranzutreiben. Durch die Anwendung der Methode im Rahmen der Produktionstechnik wird ein Weg aufgezeigt, sich dem Ziel der energie- und ressourceneffizienten Prozesse und Prozessketten methodisch und systematisch anzunähern. Dabei wird die Vision eines flexiblen und umfangreichen Anwenderwerkzeugs im Fokus der weiteren Bestrebungen stehen.

### Acknowledgment

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD<sup>®</sup>).



### Literaturangaben

- [1] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.): GreenTech made in Germany 2.0 – Umwelttechnologieatlas für Deutschland, Verlag Franz Vahlen GmbH, München, 2009*
- [2] *Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Hrsg.): Energieeffizienz in der Produktion, Untersuchung zum Handlungs- und Forschungsbedarf, 2008*
- [3] *Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (Hrsg.): Unternehmenserfolg durch Energieeffizienz, F.a.Z.-Institut, Frankfurt, M., 2008*
- [4] *Karbasian, H.; Tekkaya, A. E.: A review on hot stamping. In: Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(15), S. 2103-2118*

- [5] Tzscheutschler, P.; Nickel, M.; Wernicke, I.; et al: *Energieverbrauch in Deutschland*. In: *BWK - Das Energie-Fachmagazin*, 2009, 61(6), S. 6-14
- [6] Neugebauer, R. (Hrsg.): *Ressourceneffizienz in der Produktion-JETZT!*, 9. *Karlsruher Arbeitsgespräche Produktionsforschung*, Karlsruhe, 11.-12. März 2008
- [7] *Bibliografisches Institut; F.A. Brockhaus (Hrsg.): Online Enzyklopädie*, 2010, URL: <http://www.brockhaus-encyklopaedie.de>, 06.01.2011
- [8] *Bundesministerium des Innern (Hrsg.): Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung*, Berlin, 2007, URL: [www.orghandbuch.de/cln\\_170/nn\\_414290/OrganisationsHandbuch/DE/ohb\\_\\_pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/ohb\\_pdf.pdf](http://www.orghandbuch.de/cln_170/nn_414290/OrganisationsHandbuch/DE/ohb__pdf,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/ohb_pdf.pdf) [26.07.2010]
- [9] Göschel, A.; Sterzing, A.; Schönherr, J.: *Systembetrachtungen von Prozessketten der Blechwarmumformung in Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz*. In: Neugebauer, R. (Hrsg.), *Tagungsband des 1. Internationalen Kolloquiums des Spitzentechnologieclusters eniPROD*, *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach, S. 747-767
- [10] Vogel-Heuser, B.: *Systems software engineering*, Oldenbourg-Industrieverlag, München, 2003
- [11] Rogalla, Ch.; Engemann, M.; Butterbrodt, D.; et al.: *Umweltmanagementsysteme*, 11. Aktualisierung, WEKA-Media, Kissing, 2004
- [12] Kiener, S.: *Produktions-Management*, 8. Aufl., Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2006
- [13] Kramer, M.; Brauweiler, J.; Helling, K.: *Internationales Umweltmanagement - Umweltmanagementinstrumente und -systeme*, Bd. 2, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2003
- [14] Schwister, K.: *Taschenbuch der Umwelttechnik*, Fachbuchverlag Leipzig, München, Wien, 2003