

## Quantitative Bewertung der Nachhaltigkeit von Innovationen

# Ökologische Innovationsbewertung am Beispiel von Tailored Forming

J. Schneider, M. Schmidt, P. Nyhuis

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Entwicklung von Innovationen ist für Unternehmen essenziell. Der Druck, schneller Innovationen auf den Markt zu bringen, erfordert eine frühzeitige Bewertung des ökonomischen Mehrwerts. In diesem Beitrag wird eine quantitative Methode zur Bewertung nachhaltiger Werttreiber vorgestellt und auf die Innovation „Tailored Forming“ angewandt. Die Auswertung zeigt Optimierungspotenziale auf, mit denen die Innovation aus einer nachhaltig wertorientierten Perspektive verbessert werden kann.

### STICHWÖRTER

Produktionsmanagement, Nachhaltigkeit, Technologietransfer

## Quantitative assessment of innovation sustainability - Ecological innovation assessment based on Tailored Forming

**ABSTRACT** Businesses need to develop innovations. The pressure to accelerate market entry requires an early assessment of their economic value. This article introduces a quantitative method for evaluating sustainable value drivers applied to the innovation „Tailored Forming.“ The evaluation reveals optimization potential to enhance innovation from a sustainability-driven, value-oriented perspective.

## 1 Einleitung

In den vergangenen Jahren wurde in Wissenschaft und Praxis intensiv über die Bedeutung von Unternehmen als Treiber von Innovation diskutiert [1]. Innovationen stellen einen wesentlichen Faktor für den Unternehmenserfolg dar und bieten ein beträchtliches Potenzial zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit [2]. Die Entwicklung von Innovationen ermöglicht es Unternehmen, neuartige Produkte zu schaffen, die kostengünstiger, nachhaltiger und schneller zu produzieren sind [3]. Im Rahmen der Entwicklung von Innovationen, wie beispielsweise der Innovation des Tailored Formings (siehe zum Beispiel [4]), standen umfassende Forschung und kontinuierliche Verbesserung im Mittelpunkt. Die Evaluierung der allgemeinen Vorteilhaftigkeit von Innovationen erweist sich insbesondere in frühen Entwicklungsphasen als essenziell, da potenzielle Anpassungen sowohl am Produkt selbst als auch am für dessen Herstellung erforderlichen Produktionsprozess noch mit geringerem Aufwand und Kosten realisiert werden können [5]. Der Innovationsentwicklungsprozess lässt sich in drei Phasen unterteilen: die Ideenfindungsphase, die Inkubationsphase und die Skalierungsphase. Die Ideenfindungsphase stellt die Anfangsphase des Innovationsentwicklungsprozesses dar, der als zweck- und/oder mittelinduzierte Suche nach und Vorauswahl von Ideen definiert werden kann. In der zweiten Phase, der sogenannten Inkubationsphase, erfolgt die Festlegung der wichtigsten Funktionen der Innovation. Die finale Phase des Innovationsprozesses ist die Markteinführung. [6] In der Ideenfindungs- sowie der Inkubationsphase, die nachfolgend als frühe Entwicklungsphasen von Innovationen bezeichnet werden, ist eine Abschätzung beziehungsweise Bewertung der Vorteilhaftigkeit sowie das Ableiten erforderlicher Verbesserungspotenziale unerlässlich.

Die aktuelle Herausforderung bei diesem Vorgehen besteht in der Ermittlung und Feststellung der Vorteile der Innovation sowie in der Evaluierung, ob diese Vorteile in Wettbewerbsvorteile für das betrachtete Unternehmen transformiert werden können. In der wissenschaftlichen Literatur wurden bereits mehrere Methoden zur qualitativen Bewertung von Wettbewerbsvorteilen entwickelt und beschrieben [7–9]. Neben ökonomischen (siehe zum Beispiel [7]) und produktionslogistischen (siehe zum Beispiel [8]) Bewertungsansätzen werden auch einzelne ökologische (siehe zum Beispiel [9]) Innovationsbewertungsmethoden vorgestellt, die meist jedoch Stoffströme analysieren und den ökonomischen Mehrwert nicht berücksichtigen. Nachhaltigkeit stellt einen wesentlichen Aspekt der langfristigen Unternehmensstrategie dar, dessen Relevanz in der Praxis zunehmend anerkannt wird [10]. Obgleich sich eine wachsende Anzahl von Unternehmen der Herausforderung stellt, den Nutzen von Investitionen in nachhaltige Innovationen zu bewerten, besteht dennoch ein Bedarf an der Entwicklung quantitativer Bewertungsmethoden, um die Auswirkungen der Nachhaltigkeit in den frühen Phasen der Innovation auf monetärer Ebene zu quantifizieren. Nachhaltigkeit wird als ein Entwicklungsprozess verstanden, der die gegenwärtigen Bedürfnisse befriedigt, ohne die Fähigkeit der nachfolgenden Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen [11]. In Anbetracht der zunehmenden Relevanz nachhaltigen unternehmerischen Handelns ist eine Evaluierung von Innovationen anhand der ihnen zugrunde liegenden ökologischen Werttreiber unerlässlich. Diese Entwicklung ist zum einen auf den wachsenden Druck von Kunden und Politikern zurückzuführen [12]. Ein weiterer Faktor ist die intrinsische Motivation, die von ökologischen Verbesserungen ausgeht und Innovationen antreibt [12, 13]. Des Weiteren ist es aus nachhaltiger und wertorientierter Perspektive unerlässlich,

den wirtschaftlichen Erfolg einer Innovation anhand der eingesetzten Ressourcen zu evaluieren, um deren Nutzenpotenziale bereits in frühen Entwicklungsphasen zu ermitteln. Das übergeordnete Ziel sämtlicher Forschungsaktivitäten, insbesondere im Bereich der Ingenieurwissenschaften, muss stets der Transfer in die Praxis sein, wobei die Ergebnisse dieses Forschungsbeitrags unterstützend wirken sollen.

Der Economic Value Added (EVA) stellt ein Leistungsmaß dar, das zur Bewertung des Nutzens von Innovationen verwendet wird, indem der Residualgewinn über den Kapitalkosten ermittelt wird [14]. Daher stellt es ein wertvolles Instrument zur Bewertung des Potenzials von Innovationen in einem frühen Entwicklungsstadium dar [8]. Die vorliegende Untersuchung verfolgt das Ziel, die Dimension der Nachhaltigkeit in den Prozess der quantitativen Innovationsbewertung zu integrieren, deren Bedeutung in jüngster Zeit erheblich zugenommen hat. Um das definierte Ziel zu erreichen, wird eine umfassende Methodik zur quantitativen Bewertung von Innovationen herangezogen. Diese erlaubt neben einer Bewertung aus produktionslogistischer und wirtschaftlicher Perspektive auch die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten im EVA. Die eigens entwickelte qualitative Methodik (siehe [9]) wird durch geeignete Gewichtungssparameter ergänzt, um eine Grundlage für die quantitative Bewertung von Innovationen in frühen Entwicklungsphasen zu schaffen. Die dafür erforderlichen quantitativen Daten können beispielsweise durch Experteninterviews mit Beteiligten am Innovationsentwicklungsprozess erfasst werden. Nach erfolgter Entwicklung des Bewertungsmodells, wird die Methodik zur ökologischen Innovationsbewertung auf die Innovation „Tailored Forming“ angewendet. Die Anwendung des Bewertungsmodells erlaubt eine Evaluierung desselben sowie eine Einschätzung der potenziellen Rentabilität von Investitionen in die Tailored Forming-Technologie im Vergleich zur konventionellen Produktionsmethode.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Economic Value Added

Die Bewertung des allgemeinen Nutzens einer Innovation sowie die Überprüfung ihres Mehrwerts und die Unterstützung ihres Transfers in die Praxis erfordern die Anwendung wirtschaftlicher Bewertungsansätze [15, 16, 8]. Das vorrangige Ziel aller Ingenieurdisziplinen besteht in der Übertragung von Wissen in die Industrie [17]. Dies kann folglich nur erreicht werden, wenn eine Innovation klare Vorteile gegenüber dem Stand der Technik aufweist und einen wirtschaftlichen Mehrwert bietet [18, 8]. Ein Ansatz zur Leistungsmessung stellt eine Variante des Residualeinkommens dar, die als EVA bezeichnet wird [18, 17]. EVA stellt eine wesentliche Kennzahl im Rahmen des wertorientierten Managements dar und findet Verwendung bei der Bewertung der wirtschaftlichen Gesamtrentabilität einer Innovation [18, 8]. Der durch die Innovation generierte Restgewinn wird durch ihn gemessen [14, 18]. Diese Metrik genießt in der Finanzwelt breite Anerkennung [18] und wurde bereits in der Produktions- und Logistikbranche angewendet [7–9]. Zu den angewandten Methoden zählen die Steigerung der Effizienz, um den Nettogewinn zu verbessern, die Senkung der Lieferkosten sowie die Auslagerung an externe Dienstleister zur Kostensenkung [8]. In einem sogenannten Treiberbaum setzten *Kennemann et al.* [8] den EVA mit Werttreibern der Produktionslogistik auf sechs Ebenen (siehe **Bild 1**) in Relation. Die finanziellen Auswirkungen von Verände-

rungen der Logistikleistung und der -kosten werden unter Berücksichtigung mehrerer logistischer und produktionsbezogener Faktoren evaluiert. Der Treiberbaum veranschaulicht, dass der EVA die Differenz zwischen dem operativen Gewinn vor Steuern und den Kapitalkosten darstellt [18, 8]. Die für die Produktionslogistik verantwortlichen Treiber sind auf den Ebenen fünf und sechs angeordnet. Die fünfte Ebene des EVAs umfasst beispielsweise die Umsatzkosten, die sich aus der Summe der Material-, Logistik- und Fertigungskosten ergeben. In Konsequenz dessen führt die Erhöhung der Umsatzkosten zu einer Reduktion des Ergebnisses vor Steuern. Folglich ist ein hoher Umsatzkostenanteil mit einem niedrigen EVA verbunden. Des Weiteren enthält der Treiberbaum eine Transferfunktion (TF), die die Auswirkungen von Produktionsmaßnahmen auf logistische Ziele, wie beispielsweise Lieferzeit und Liefertreue, sowie letztlich auf den EVA bewertet. Es kann festgehalten werden, dass ein höherer EVA-Wert grundsätzlich vorzuziehen ist, weshalb Maßnahmen, die zu einer Erhöhung des EVAs führen, als positiv zu bewerten sind [14]. In einer Erweiterung des Treiberbaums durch *Demke et al.* [7] wurden monetäre Einflussgrößen einbezogen, wobei der Fokus auf Herstellungs- und Materialkosten lag. Die Auswahl der Kostentreiber erfolgte, da sie unabhängig von den Interaktionen der Elemente der innerbetrieblichen Lieferkette (Beschaffung, Produktion und Versand) sind. Eine umfassende Erläuterung des erweiterten Modells findet sich in [7]. In ihrer Untersuchung erweiterten *Schneider et al.* [9] den Treiberbaum um eine ökologische Dimension und fokussieren sich aus selbigem Grund auf die Herstellungs- und Materialkosten. Der entwickelte Ansatz basiert auf einer qualitativen Bewertungsmethode für Innovationen, um dem Mangel an quantitativen Daten in frühen Entwicklungsphasen entgegenzuwirken.

Die Erhöhung des EVAs kann grundsätzlich in drei Fällen erfolgen, die in **Bild 2** schematisch dargestellt sind. Der EVA kann zum einen durch eine Verbesserung des Net Operating Profit After Taxes (NOPAT) beziehungsweise eine Erhöhung der Profitabilität erreicht werden. Eine Optimierung kann beispielsweise durch eine Erhöhung der Prozesseffizienz oder durch die Optimierung einzelner Bestandteile der innerbetrieblichen Lieferkette erreicht werden. Wie in **Bild 1** dargestellt, wirken die beiden Knoten „Material“ und „Fertigung“ auf der sechsten Ebene des Treiberbaums, die von *Demke et al.* [7] und *Schneider et al.* [9] betrachtet wurde, negativ auf den NOPAT. Folglich kann festgehalten werden, dass eine Verbesserung des EVAs mit einer Reduktion der beiden Kostenarten einhergehen muss. Der zweite dargestellte Fall ist das profitable Wachstum, das beispielsweise auf die Erschließung neuer Märkte oder die Übernahme konkurrierender Unternehmen zurückzuführen ist und somit positiv auf die Größe des betrachteten Unternehmens einwirkt. Der dritte Fall wird durch die Reduzierung der Kapitalkosten beschrieben, die sich beispielsweise aus verbesserten Ratings oder einer optimierten Zinskapitalstruktur ergeben. Im Rahmen der nachfolgenden Ausarbeitungen erfolgt eine Betrachtung unter dem Fokus der Erhöhung der Profitabilität.

### 2.2 Qualitative Innovationsbewertung aus ökologischer Sicht

Wie in der Einleitung beschrieben, konzentriert sich dieser Beitrag auf die quantitative Bewertung von Innovationen aus ökologischer Sicht. Hierfür haben *Schneider et al.* [9] mit ihrem

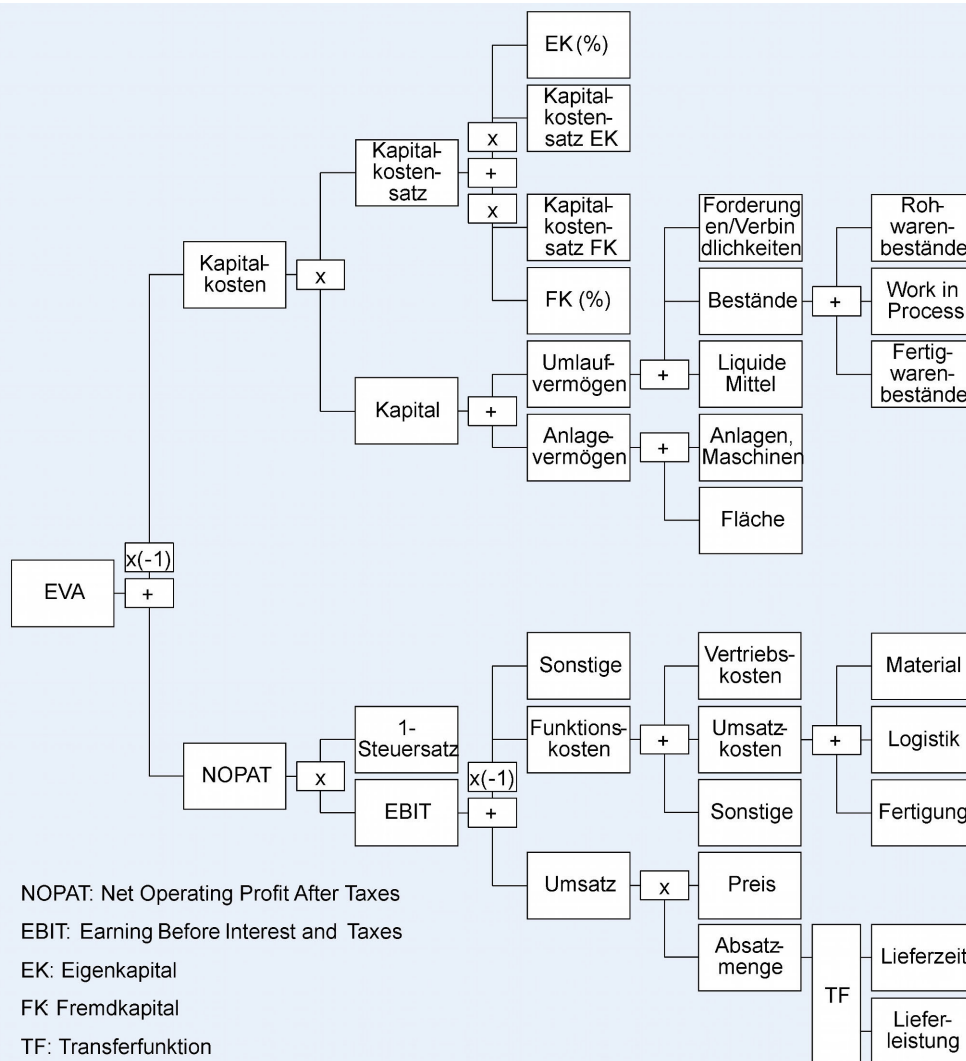


Bild 1. EVA Treiberbaum. Grafik: erstellt nach [8]

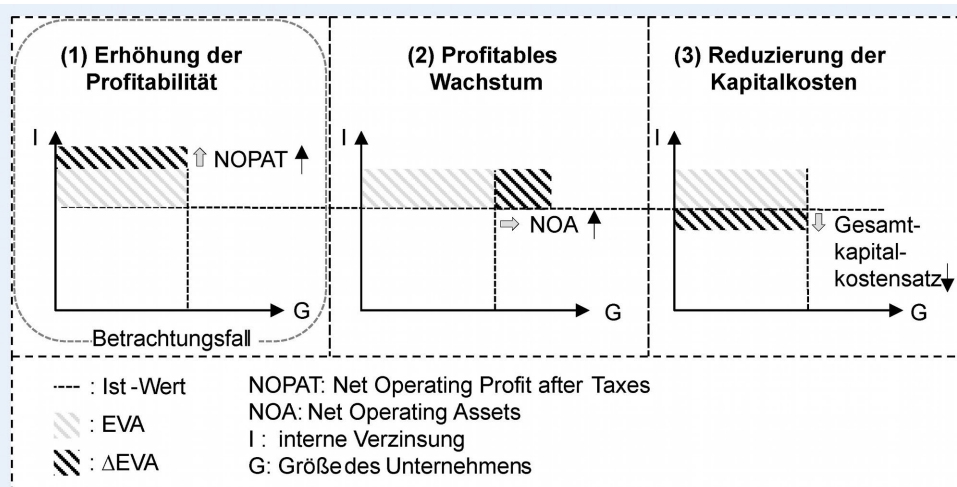


Bild 2. Einflussgrößen zur positiven Beeinflussung des EVAs. Grafik: erstellt nach [3]

qualitativen Wirkmodell eine wesentliche Grundlage geschaffen. Nachhaltigkeit, die in der industriellen Praxis zu einer wichtigen Säule geworden ist, wird in dem Beitrag von Schneider et al. [9] in

eine qualitative Methodik zur monetären Bewertung nachhaltiger Werttreiber von Innovationen integriert. Das Verfahren orientiert sich an dem in Bild 1 dargestellten EVA-Treiberbaum, um eine

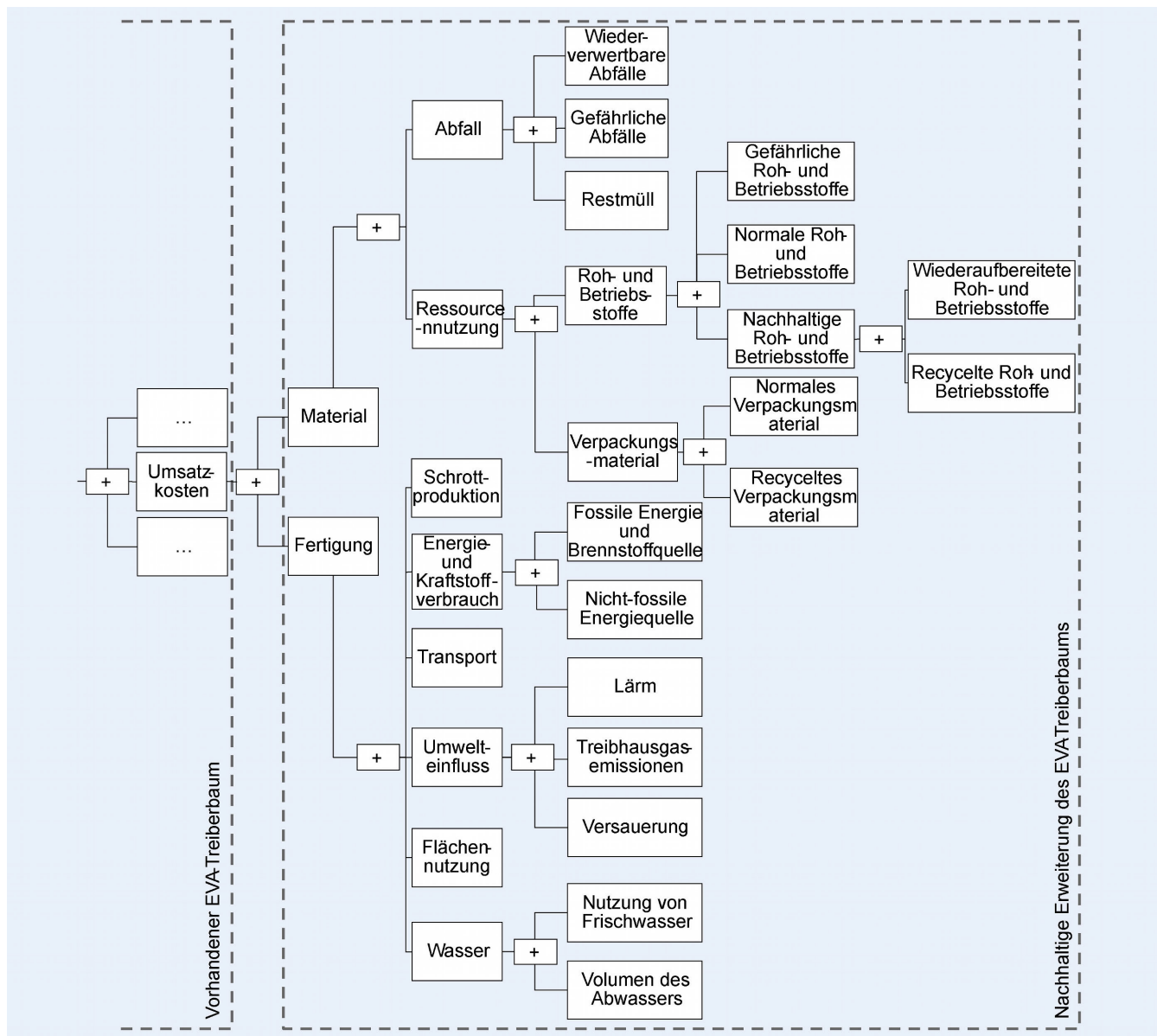


Bild 3. Ökologische Erweiterung des EVA Treiberbaums [9]. Grafik: eigene Darstellung

Barwertorientierung bei der Innovationsbewertung zu gewährleisten. Durch eine systematische Literaturrecherche wurde der Treiberbaum weiter systematisiert und eine Verbindung zwischen den nachhaltigen Werttreibern und dem EVA hergestellt, um ein literaturbasiertes Wirkmodell zu entwickeln. Ein gewichtetes Scoring-Modell (WSM) kompensiert die eingeschränkte Datenlage, um eine qualitative Bewertung zu ermöglichen. In Bild 3 ist das qualitative Wirkungsmodell als Erweiterung dargestellt.

Insgesamt wurden 19 Werttreiber identifiziert und den beiden Wurzelkonten „Material“ und „Fertigung“ des von Kennemann *et al.* [8] entwickelten Treiberbaums zugeordnet. Siehe [9] für einen detaillierten Einblick in die systematische Literaturanalyse und die genaue Verortung der Werttreiber im Treiberbaum. Die finale Bewertung basiert auf den Formeln 1 und 2 [7, 19].

$$WSM_{Score, dec} = \sum_{j=1}^2 IF_{j, dec} * w_j \quad (1)$$

$$WSM_{Score, inc} = \sum_{j=1}^2 IF_{j, inc} * w_j \quad (2)$$

$WSM_{Score, dec}$ : WSM-Score der Kostensenkung

$WSM_{Score, inc}$ : WSM-Score der Kostensteigerung

$j$ : Kriterium

$IF_{j, dec}$ : Anzahl der innovationsgetriebenen Einflussfaktoren, die zu einer Kostensenkung führen

$IF_{j, inc}$ : Anzahl der innovationsgetriebenen Einflussfaktoren, die zu einem Kostenanstieg führen

$w_j$ : Gewicht der Bedeutung des j-ten Kriteriums



Dabei werden die Häufigkeiten von Kostensteigerungen ( $IF_{j,inc}$  beziehungsweise -senkungen ( $IF_{j,dec}$ ) im Vergleich zum aktuellen Produkt, dessen Ablösung durch die Innovation angestrebt wird, betrachtet und mit einem Gewicht ( $w_j$ ) bewertet. In ihrem Anwendungsbeispiel für die Gewichtung von Herstellungs- und Materialkosten (j) nehmen *Schneider et al.* [9] ein Niedriglohnland sowie ein Produkt mit hohen Materialkosten an. Dies führt zu einer Gewichtung der Herstellungskosten von 20 % und einer Gewichtung der Materialkosten von 80 %. Die nachfolgenden Beschreibungen zielen darauf ab, das qualitative Wirkmodell zu einem quantitativen Modell zu erweitern. Die Erweiterung des Modells erfordert zunächst die Aufbereitung der in Gleichung 1 und Gleichung 2 dargestellten Gewichtungen der einzelnen Kriterien. Dies muss so erfolgen, dass sämtliche in Bild 3 verorteten Werttreiber, die jeweils in spezifischen Einheiten gemessen werden, in einen monetären Wert überführt werden können. Auf diese Weise ist eine quantitative Bestimmung der Umsatzkosten (siehe Bild 3) möglich. Des Weiteren ist es erforderlich, die Annahme aufzubrechen, dass lediglich die Anzahl der innovationsgetriebenen Einflussfaktoren, die eine Senkung beziehungsweise Steigerung von Kosten zur Folge haben, Gegenstand der Betrachtung ist. Stattdessen ist es notwendig, den tatsächlichen Werten Rechnung zu tragen und diese in die Bewertung einfließen zu lassen.

### 3 Entwicklung eines qualitativen Bewertungsmodells

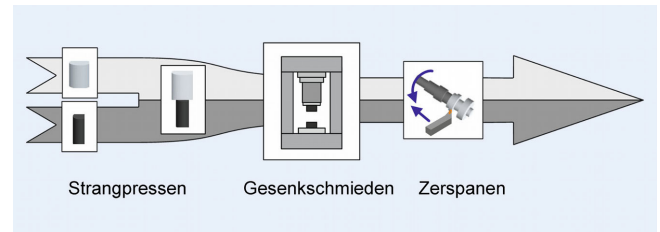
Im nachfolgenden Abschnitt erfolgt die Weiterentwicklung des in Abschnitt 2.2 beschriebenen qualitativen Bewertungsmodells zu einem quantitativen Modell. Dadurch soll der Aussagegehalt für die Bewertung von Innovationen in frühen Entwicklungsphasen erhöht werden. In der Entwicklung des qualitativen Bewertungsmodells wurde von *Schneider et al.* [9] der Ansatz verfolgt, dass die exakte Messung des EVAs von untergeordneter Bedeutung und lediglich die Veränderung in der Zukunft für eine Investitionsentscheidung in eine Innovation von Relevanz ist. Die vorliegende Annahme soll dahingehend aufgebrochen werden, dass die einzelnen Werttreiber in Bild 3 mit spezifischen Gewichten in einen monetären Wert umgerechnet und zu den Umsatzkosten kumuliert werden. Im Folgenden wird in Abschnitt 3.1 die Identifikation geeigneter Gewichtungen der verschiedenen Werttreiber vorgenommen, um schließlich in Abschnitt 3.2 ein adäquates Bewertungstool zu entwickeln.

#### 3.1 Gewichtung der verschiedenen Werttreiber

Für die qualitative Bewertung ist es erforderlich, die Gleichungen 1 und 2, die derzeit lediglich einen Anstieg und eine Reduktion von Umsatzkosten für die beiden Kriterien Material- und Fertigungskosten betrachten, derart anzupassen, dass tatsächliche Werte der einzelnen Werttreiber betrachtet werden können. Gleichung 3 fasst die erforderlichen Anpassungen zusammen [19].

$$WSM_{Score} = \sum_{j=1}^n a_j * w_j \quad (3)$$

$WSM_{Score}$ : WSM-Score



**Bild 4.** Prozesskette zur Herstellung einer zweistoffigen Welle mittels Tailored Forming [4, 33]. Grafik: eigene Darstellung

j:	Kriterium
n:	Anzahl an Kriterien
$a_j$ :	Ist-Wert des j-ten Kriteriums
$w_j$ :	Bewertungsgewicht des j-ten Kriteriums

In Bezug auf den vorliegenden Fall lässt sich die Anzahl der Kriterien (n) auf insgesamt 19 festlegen, wodurch eine Betrachtung sämtlicher von *Schneider et al.* [9] als relevant identifizierter Werttreiber möglich wird. Die Ist-Werte ( $a_j$ ) der 19 Kriterien müssen im Rahmen der Innovationsbewertung in der entsprechenden Einheit erfasst werden. Hierzu können zum Beispiel Experteninterviews durchgeführt werden. Um diese Kriterien einheitlich in einen Geldwert in Euro zu überführen, werden im Folgenden Gewichtungen ermittelt, die eine Umrechnung erlauben:

1. Wiederverwendbare Abfälle	(0,1 €/kg)
2. Gefährliche Abfälle	(1,5 €/kg)
3. Restmüll	(0,2 €/kg)
4. Gefährliche Roh- und Betriebsstoffe	-
5. Normale Roh- und Betriebsstoffe	-
6. Wiederaufbereitete Roh- und Betriebsstoffe	-
7. Recycelte Roh- und Betriebsstoffe	-
8. Normales Verpackungsmaterial	-
9. Recyceltes Verpackungsmaterial	-
10. Transport	(1,5 €/km)
11. Fossile Energie und Brennstoffquellen	(0,3 €/kWh)
12. Nicht fossile Energie und Brennstoffquellen	(0,02 €/kWh)
13. Nutzung von Frischwasser	(2,5 €/m³)
14. Volumen des Abwassers	(3,0 €/m³)
15. Lärm	(40 €/dB) – ab 55 dB
16. Treibhausgasemissionen	(40 €/tCO <sub>2</sub> e)
17. Versauerung	(2,9 €/kg)
18. Flächennutzung	(100 €/m²)
19. Schrottproduktion	-

In der obigen Auflistung wurden die 19 Werttreiber den entsprechenden Kostensätzen zugeordnet. Für die Kategorien Roh- und Betriebsstoffe, Verpackungsmaterial sowie Schrottproduktion wurden bewusst keine Kostensätze hinterlegt, da diese spezifisch von der betrachteten Innovation sind. Bei den übrigen Werttreibern wurden identifizierte Mittelwerte hinterlegt. In Bezug auf die drei Abfallarten (Punkte 1 bis 3) wurden bei den Kostensätzen die mittleren Entsorgungskosten pro Kilogramm berücksichtigt. Wie aus der Auflistung ersichtlich wird, liegen die Kosten für wiederaufbereitbare Abfälle bei 0,1 €/kg, für Restmüll bei 0,2 €/kg und für gefährliche Abfälle bei 1,5 €/kg. [21, 20] Die Verrechnung der innerbetrieblichen Transporte erfolgt mit einem

mittleren Kostensatz von 1,5 €/km [22,23]. In Bezug auf fossile Brennstoffquellen wurde ein Mittelwert aus den Preisen für unter anderem Braunkohle, Gas etc. gebildet, wodurch sich ein Preis von 0,3 €/kWh ergibt [24]. Im Hinblick auf die nicht fossilen Brennstoffe wurde ein Mittelwert gebildet, der unter anderem Solarenergie und Windenergie umfasst. Der Mittelwert beläuft sich auf 0,02 €/kWh [24]. Eine detaillierte Aufgliederung der einzelnen Energiequellen wurde bewusst nicht vorgenommen, da eine derart detaillierte Aufgliederung in Industrieunternehmen in der Regel nicht möglich ist. In Bezug auf die Nutzung von Frischwasser lässt sich ein Wert von 2,5 €/m<sup>3</sup> und hinsichtlich der Abwasserentsorgung ein Wert von 3,0 €/m<sup>3</sup> ermitteln [26, 25]. Die Berechnung des Gewichtungswerts für Lärm erfolgt ab dem Überschreiten eines Schwellwerts von 55 dB. Dabei wird ein Wert von 40 €/dB zugrunde gelegt. Für Geräusche, die unterhalb des Schwellwerts liegen, kann ein negativer Einfluss auf die Umwelt ausgeschlossen werden. [27] In Bezug auf die Gewichtung von Treibhausgasen wird ein Mittelwert von 40 € pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent zugrunde gelegt [29, 28]. Im Hinblick auf die Versauerung von Gewässern und Böden, die beispielsweise durch hohe schwefelhaltige Emissionen in die Umwelt bedingt sind, wird eine Gewichtung von 2,9 €/kg angenommen [30]. Darüber hinaus wird für die Flächennutzung ein Preis von circa 100 €/m<sup>2</sup> unterstellt, da durch die Belegung von Flächen negative Auswirkungen auf die Umwelt entstehen [31]. Durch diese Umrechnungsfaktoren der einzelnen Werttreiber konnten die Bewertungsgewichte ( $w_j$ ) in Formel 3 identifiziert werden. Die entsprechenden Ist-Werte ( $a_j$ ) sind in einem nächsten Schritt mit den Prozessexperten der betrachteten Innovation festzulegen.

### 3.2 Entwicklung eines Bewertungstools

Die qualitative Bewertung ökologischer Werttreiber soll durch die Entwicklung eines Tools sowohl für die Praxis als auch für die Forschung einfach anwendbar gemacht werden. Von Kennemann *et al.* [8] wurde ein Excel-Tool entwickelt, das sich auf die in Bild 1 dargestellten Zusammenhänge beschränkt. Im Rahmen der Weiterentwicklung wurde bewusst die Entscheidung getroffen, das Modell in eine Python-Umgebung zu überführen und dort die in Abschnitt 3.1 beschriebene Erweiterung zu implementieren. Diese Entscheidung wurde getroffen, weil die Python-Umgebung im Vergleich zu Excel eine bessere Erweiterbarkeit gewährleistet, die Möglichkeit bietet, das Verfahren in einen Software-Demonstrator zu überführen, und bessere Schnittstellenlösungen bietet, zum Beispiel für das Einlesen von Eingabedateien. Die Entwicklung des Bewertungstools wurde mithilfe der beiden Bibliotheken Tkinter und NumPy in Python durchgeführt. Tkinter ist die Standard-GUI-Bibliothek (Graphical User Interface) für Python und ermöglicht die Erstellung von Desktop-Anwendungen mit grafischer Benutzeroberfläche. NumPy (Numerical Python) ist eine Bibliothek für wissenschaftliches Rechnen in Python und bietet Unterstützung für große, mehrdimensionale Arrays und Matrizen sowie eine Vielzahl mathematischer Funktionen zur Durchführung von Operationen auf diesen Arrays. Die Implementierung des Tools erfolgte in einer Darstellungsweise, die eine Ähnlichkeit mit dem Treiberbaum in Bild 1 sowie der ökologischen Erweiterung in Bild 3 aufweist. Dabei wurde eine hierarchische Struktur verwendet, in der die einzelnen Werttreiber als Input eingefügt werden müssen. Durch die in Abschnitt 3.1 aufgeführten Umrechnungsfaktoren erfolgt nach Eingabe der Inputwerte eine

automatische Transformation der Werttreiber in einen monetären Wert, sodass im Fall der ökologischen Bewertung ein quantitativer Wert für die Umsatzkosten berechnet werden kann.

## 4 Evaluation des Bewertungsmodells anhand der Innovation Tailored Forming

Dieser Abschnitt verfolgt zwei spezifische Ziele. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfolgt zunächst eine Bewertung der Innovation des Tailored Forming. In der dritten Förderperiode erfolgt im Sonderforschungsbereich (SFB) 1153, der sich mit der Tailored Forming-Technologie befasst, die Entwicklung diverser belastungsangepasster hybrider Komponenten. Das übergeordnete Ziel des SFB 1153 besteht in der Entwicklung einer neuartigen Prozesskette zur Herstellung hybrider Massivbauteile unter Verwendung gefügter Halbzeuge. Der beschriebene Ansatz zielt darauf ab, effektivere Komponenten zu entwickeln, die die erforderlichen Anforderungen der verschiedenen strukturellen und funktionalen Bereiche erfüllen, die mit den derzeit aus Monomaterialien verfügbaren nicht zu erreichen sind [4]. In diesem Abschnitt erfolgt eine Betrachtung der zweistofflichen Welle aus Stahl und Aluminium als konkretes Produkt unter Zuhilfenahme des Bewertungsmodells. Die Welle wurde für die Analyse ausgewählt, da sie bereits in den ersten beiden Förderperioden des SFB 1153 Gegenstand umfangreicher Forschung war. Im Folgenden wird das in Abschnitt 3 entwickelte Bewertungsmodell in der Praxis evaluiert. Die für die monetäre Bewertung erforderlichen Daten wurden durch Experteninterviews innerhalb der relevanten Teilprojekte, die an der Prozesskette der zweistofflichen Welle im SFB 1153 beteiligt sind, erhoben.

Der Herstellungsprozess der Welle umfasst drei verschiedene Stufen [32]. Im ersten Schritt des Herstellungsprozesses erfolgt die Herstellung einer Materialverbindung zwischen Stahl und Aluminium mittels Strangpressen [33]. Die im Rahmen des SFB 1153 entwickelten Verfahren der seitlichen Winkel-Coextrusion dienen der Verbindung eines starren Stahlverstärkungselements mit einer Aluminiumlegierung. Der Gesenkschmiedeprozess beginnt, sobald die beiden zu verbindenden Werkstücke eine stoffliche Einheit gebildet haben. Das übergeordnete Ziel dieses Prozessschrittes besteht in der prozesssicheren Herstellung von Hybridbauteilen durch eine gezielte Steuerung des Werkstoffflusses [34]. Im dritten Prozessschritt erfolgt die Konturbearbeitung in Form der spanenden Bearbeitung. Als finaler Schritt innerhalb der Prozesskette ist die spanende Bearbeitung zu nennen, die maßgeblichen Einfluss auf die Oberflächen- und Randzonen von Massivbauteilen ausübt [35]. Die Prozesskette, die die drei Teilschritte umfasst, ist in Bild 4 dargestellt.

Im Rahmen von Experteninterviews wurden die relevanten Werttreiber – sofern zu dem frühen Innovationszeitpunkt in den Teilprojekten des SFB 1153 erfassbar – einer wertmäßigen Betrachtung unterzogen. Im Folgenden werden die Ergebnisse präsentiert und mit dem in Abschnitt 3.2 vorgestellten Bewertungsmodell ausgewertet. Die vorliegende Untersuchung basiert auf der Prämisse, dass eine präzise Messung der einzelnen Einflussfaktoren zwar mit höchstmöglicher Genauigkeit erfolgen sollte, eine exakte Messung zum frühen Innovationszeitpunkt jedoch von sekundärer Bedeutung ist. Im Mittelpunkt stehen vielmehr die durch die Messung gewonnenen Managementaktivitäten, die eine wesentliche Grundlage für die weitere Innovationsplanung und Entscheidungsfindung hinsichtlich etwaiger Anpassungen

sungen bilden. Auf Basis der identifizierten Verbesserungsmaßnahmen können diese Aktivitäten schließlich umgesetzt werden.

Im Rahmen des Strangpressens wird auf der Seite der Materialkosten ein Prozessbolzen mit einem Durchmesser von 142 mm und einer Länge von 200 mm aus einer EN AW-6082 Aluminiumlegierung verwendet, der als Verstärkung dient. Als weitere Ressourcen werden ein Element aus Stahl mit einem Durchmesser von 45,2 mm und einer Länge von 3000 mm, Kühlschmiermittel, Natronlauge zum Freiätzen des Presswerkzeugs sowie Bremsenreiniger genutzt. Auf der anderen Seite entstehen Abfälle in Form von Spänen des Pressbolzens sowie des Verstärkungselements und Natronlauge mit gelöstem Aluminium. Im Bereich der Fertigungskosten wurde ein Energieverbrauch in Höhe von 805,4 kWh ermittelt, der aus nicht fossilen Energiequellen bezogen wird. Darüber hinaus wird eine Flächennutzung von 25 m<sup>2</sup> sowie eine Lautstärke von im Mittel 90 dB während des Strangpressvorgangs berücksichtigt. Im Anschluss erfolgt der Gesenkschmiedevorgang, durch den das vom Strangpressen bereitgestellte Halbzeug seine finale Form erhält. In erster Linie entstehen die Kosten auf Seiten der Fertigung. Während des Prozessschrittes werden circa 0,37 kWh Energie aus nicht fossilen Energiequellen verbraucht. Darüber hinaus werden 13 m<sup>3</sup> Frischwasser genutzt. Während des Prozesses herrscht eine mittlere Lautstärke von 105 dB und es wird eine Flächennutzung von 20 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt. Der finale Schritt der betrachteten Prozesskette ist das Zerspanen. Im Rahmen dieses finalen Prozessschrittes erfolgt die Fertigung der Endkontur des Halbzeugs. Im Rahmen der Experteninterviews konnte ein Energieverbrauch von 0,9 kWh erfasst werden. Des Weiteren wurde Kühlschmiermittel in einer Menge von circa 2 Litern eingesetzt. Als Abfall fallen circa 0,71 kg Aluminium- und Stahlspäne an. Während des Prozesses wird eine mittlere Lautstärke von 90 dB erreicht, wobei eine Flächennutzung von 10 m<sup>2</sup> zugrunde gelegt wird. Die übrigen in Bild 3 dargestellten und im Python-Bewertungsmodell implementierten Werttreiber konnten zum derzeitigen Zeitpunkt nicht im SFB 1153 erfasst werden, weshalb sie nicht in die Evaluation einbezogen wurden.

Die Auswertung der mittels Tailored Forming Technologie hergestellten Wellen erfolgt unter Zuhilfenahme des Python-Bewertungsmodells. Hierbei ergibt sich ein Wert von 10.137 € für die Umsatzkosten. Bei der Interpretation dieses Wertes ist jedoch zu beachten, dass in der vorliegenden Betrachtung die Lärmkosten und die Flächennutzungskosten auf ein einziges Produkt umgelegt werden. In der Realität würden sich diese Kosten auf eine Vielzahl von Produkten verteilen, so dass die Aussage, dass die Herstellung einer Welle so teuer ist, nicht zutrifft. Unter der Annahme, dass sowohl die Lärm- als auch die Flächennutzungskosten auf eine Vielzahl von Produkten verteilt würden, lägen die Umsatzkosten für eine Welle bei circa 237 € und damit deutlich niedriger. Dieser Wert kann als Referenzwert für die Forschung im Bereich der Innovation des Tailored Formings herangezogen werden, um die Auswirkungen zukünftiger Anpassungen auf die Umsatzkosten im Detail zu überprüfen. Im Rahmen von Innovationsanpassungen erweisen sich höhere Werte als präferabel, da sie sich in einer negativen Korrelation zu den Umsatzkosten und folglich dem EVA befinden. Demgemäß sollte eine Fokussierung auf diese Werte erfolgen. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Veränderung der Umsatzkosten und somit des EVAs durch

gezielte Anpassungen an der Innovation zu evaluieren, anstatt sich auf die absolute Höhe zu konzentrieren, wie es in der Praxis häufig der Fall ist.

## 5 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse im Kontext ihrer potenziellen Anwendungen in unternehmerischen und wissenschaftlichen Umgebungen erörtert. Aus unternehmerischer Perspektive stellt der präsentierte Ansatz eine Lösung für die Problematik der Evaluierung von Innovationen in frühen Entwicklungsstadien unter Zuhilfenahme quantitativer Daten dar. Der Ansatz kann als Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten dienen, insbesondere im Hinblick auf die Bewertung von Anpassungen von Innovationen auf einer monetären Ebene sowie die Vorteilhaftigkeit solcher Anpassungen. Das übergeordnete Ziel besteht in der Identifikation aktueller Schwachstellen, die zu einer Erhöhung der Umsatzkosten in Bezug auf Material- und Herstellungskosten und damit zu einer Verringerung des EVAs führen. Auf Basis dieser Erkenntnisse können anschließend Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet werden. Für Unternehmen, die ihre Entwicklungsaktivitäten produktiv halten wollen, können sich diese Methoden als vorteilhaft erweisen. In Bezug auf die Innovation des Tailored Formings können die in Abschnitt 4 beschriebenen und ausgewerteten Daten für Anpassungen genutzt werden. So lässt sich beispielsweise ableiten, dass das Strangpressen ein sehr energieintensiver Prozess ist, wodurch sich durch etwaige Anpassungen der ökonomische Mehrwert erhöhen lässt. Unternehmen können sich auf dem heutigen volatilen Markt einen Wettbewerbsvorteil verschaffen, indem sie frühzeitig einen gezielten Entwicklungsansatz für Innovationen mit positivem EVA verfolgen.

Im Rahmen der Diskussion des wissenschaftlichen Mehrwerts wurde in diesem Beitrag ein Wirkungsmodell präsentiert, das die Zusammenhänge zwischen den nachhaltigen Werttreibern von Fertigung und Materialien auf mehreren Ebenen aufzeigt. Der Fokus bestehender Modelle in der Literatur, wie beispielsweise [7, 8], konzentriert sich in erster Linie auf die wirtschaftlichen und logistischen Dimensionen. Der ökologischen Dimension wird dabei nur eine untergeordnete Rolle beigemessen. Demgegenüber wird im vorliegenden Modell der Fokus um die ökologische Dimension erweitert. Des Weiteren können die dargestellten Zusammenhänge über die Innovationsbewertung hinaus auch auf andere Bereiche, wie beispielsweise Nachhaltigkeitsaudits, angewendet werden. Wie bereits im Kontext von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten von Unternehmen angedeutet, kann das vorgestellte Wirkungsmodell dazu genutzt werden, Innovationen von Forschungseinrichtungen voranzutreiben. Der hier vorgestellte Ansatz erlaubt es Forschungseinrichtungen, den Prozess der Forschung und Entwicklung in den Anfangsphasen der Innovation zu beschleunigen und die Technologie anschließend durch die Generierung eines höheren EVA in ein Stadium der Industrialisierung zu überführen (vgl. Abschnitt 1). Der für die Bewertung nachhaltiger Innovationen entwickelte Ansatz stellt Forschern sowie Fachleuten einer bestimmten Prozessinnovation ein Instrument zur Identifikation von Hebeln für die Industrialisierung von Prozessinnovationen zur Verfügung. Im Hinblick auf die Evaluierung der aus dem SFB 1153 hervorgegangenen Welle können sämtliche monetär signifikanten Einflussfaktoren, wie sie in Ab-

schnitt 4 beschrieben wurden, als potenzielle Hebel zur Optimierung identifiziert werden. Die genannten Hebel können während der Inkubationsphase (siehe Abschnitt 1) dazu genutzt werden, einen Informationsvorsprung zu erlangen, um die effiziente Vorbereitung der Innovation auf die Skalierungsphase oder Markteinführung zu erleichtern.

## 6 Schlussbemerkungen und künftige Forschungsagenda

Im Rahmen des Beitrags wurde ein Wirkungsmodell zur quantitativen Bewertung ökologischer Werttreiber von Innovationen in frühen Entwicklungsstadien präsentiert. Der bestehende EVA-Treiberbaum, der bislang lediglich eine quantitative Bewertung ökonomischer und logistischer Werttreiber von Innovationen sowie eine qualitative Bewertung ökologischer Werttreiber ermöglichte, wurde somit um eine weitere Komponente ergänzt, um eine ganzheitliche und effiziente End-to-End-Innovationsbewertung zu ermöglichen. Die Erweiterung wurde durch das Hinzufügen weiterer Gewichtungen im EVA-Treiberbaum sowie die Entwicklung eines ganzheitlichen Bewertungsmodells realisiert. Im Hinblick auf die nachhaltigen Werttreiber sowie das Grundmodell von Kennemann *et al.* [8] erfolgte die Bewertung von Innovationen unter Zuhilfenahme eines Python Tools, wobei die ökologischen Werttreiber, die sich auf die Herstellungs- und Materialkosten auswirken, Berücksichtigung fanden. Die praktische Anwendbarkeit sowie die Relevanz der Forschung in der realen Welt wurden durch die Evaluation des entwickelten Bewertungsmodells zur quantitativen Bewertung von Innovationen anhand der Innovation des Tailored Formings demonstriert. Die für die Bewertung erforderlichen Daten wurden im Rahmen des SFBs 1153 durch Experteninterviews erhoben. Die Auswertung ermöglichte die Identifikation eines Benchmarkwerts, der als Referenzwert für Anpassungen an der Innovation herangezogen werden kann. Des Weiteren ermöglicht das entwickelte Bewertungsmodell eine detaillierte Auswertung der aktuellen Vorteilhaftigkeit, wodurch etwaige Schwachstellen identifiziert und Verbesserungen abgeleitet werden können. Dies erfolgt auf Basis der im Modell integrierten Kostenaufstellung sowie der detaillierten Auflistung der Treiber im EVA-Treiberbaum. Im Rahmen weiterer Forschungsaktivitäten könnte eine vollständige Innovationsbewertung aus ökonomischer, ökologischer und logistischer Sicht mit dem entwickelten Bewertungsmodell und dem programmierten Tool vorgenommen werden. Dieser Beitrag fokussierte sich auf das erweiterte quantitative Vorgehen ökologischer Innovationsbewertungen. Des Weiteren ist es erforderlich, die Kosten, die allgemein bei der Nutzung anfallen, beispielsweise die Kosten für Lärm und Flächen-nutzung (vgl. Abschnitt 4), auf eine ganzheitliche Prozesskette zu übertragen. Dies ist notwendig, um eine Fehlinterpretation der bisherigen Beschreibungen in Abschnitt 4 zu vermeiden, aus denen der falsche Eindruck entstehen könnte, dass die gesamten Umsatzkosten für ein Bauteil anfallen.

Die quantitative Erweiterung der ökologischen Dimension des EVA-Treiberbaums, die von Schneider *et al.* [9] in qualitativer Hinsicht vorgedacht wurde, in Verbindung mit dem von Kennemann *et al.* [8] vorgeschlagenen Basismodell und der von Demke *et al.* [7] entwickelten ökonomischen Erweiterung stellt einen wesentlichen Beitrag zur umfassenden Bewertung von Innovationen in ihren Anfangsstadien in einem End-to-End-Ansatz dar.

## FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB 1153 - 252662854

## Literatur

- [1] Stock, T., Obenaus, M., Slaymaker, A., Seliger, G., 2017. A Model for the Development of Sustainable Innovations for the Early Phase of the Innovation Process. *Procedia Manufacturing* 8, 215–222.
- [2] Paul, G., 1995. Innovation and Competitive Advantages. OECD - Economics Department Working Papers.
- [3] Grundel, T., 2011. Der EVA als Management- und Bewertungsinstrument, Springer, Wiesbaden, 283 pp.
- [4] Uhe, J., Behrens, B.-A., 2019. Manufacturing of Hybrid Solid Components by Tailored Forming, in: Wulfsberg, J.P., Hintze, W., Behrens, B.-A. (Eds.), *Production at the leading edge of technology*. Springer, Berlin, pp. 199–208.
- [5] Müller, E., 2013. Qualitätsmanagement für Unternehmer und Führungskräfte: Was Entscheider wissen müssen. Springer Gabler, Berlin, 133 pp.
- [6] O'Reilly, C., Binns, A.J.M., 2019. The Three Stages of Disruptive Innovation: Idea Generation, Incubation, and Scaling. *California Management Review* 61 (3), 49–71.
- [7] Demke, T.M., Emminghaus, N., Overmeyer, L., Kaierle, S., Klose, C., Thüer, S.E., Denkena, B., Bergmann, B., Schaper, F., Nyhuis, P., Kuprat, V.K., 2023. Approach for the monetary evaluation of process innovations in early innovation phases focusing on manufacturing and material costs. *Production Engineering* 18 (1), 169–189.
- [8] Kennemann, M., Wriggers, F.S., Nyhuis, P., 2009. Economic production identifying optimal economical and logistical measures, in: IEEE, *International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Beijing, pp. 434–437.
- [9] Schneider, J., Westing, J., Schmidt, M., Nyhuis, P., Kuprat, V.K., 2024. Assessing the Ecological Value: Monetizing Process Innovations in Tailored Forming. *Advanced Engineering Materials*.
- [10] Contini, G., Peruzzini, M., 2022. Sustainability and Industry 4.0: Definition of a Set of Key Performance Indicators for Manufacturing Companies. *Sustainability* 14 (17), 11004.
- [11] Moore, J.E., Mascarenhas, A., Bain, J., Straus, S.E., 2017. Developing a comprehensive definition of sustainability. *Implementation science* 12 (1), 110.
- [12] Jelsma, J., 2003. Innovating for Sustainability: Involving Users, Politics and Technology. *Innovation: The European Journal of Social Science Research* 16 (2), 103–116.
- [13] Tsetse, E.K.K., Adams, R., Elliot, E.A., Downey, C., 2024. Environmental sustainability and customer experience in emerging markets. *Business Strategy and the Environment*.
- [14] Grant, J.L., 1996. Foundations of EVA™ for Investment Managers. *The Journal of Portfolio Management* 23 (1), 41–48.
- [15] Adams, R., Bessant, J., Phelps, R., 2006. Innovation management measurement: A review. *International Journal of Management Reviews* 8 (1), 21–47.
- [16] Frederiksen, M.H., Knudsen, M.P., 2017. From Creative Ideas to Innovation Performance: The Role of Assessment Criteria. *Creativity and Innovation Management* 26 (1), 60–74.
- [17] Manfredi Latilla, V., Frattini, F., Messeni Petruzzelli, A., Berner, M., 2018. Knowledge management, knowledge transfer and organizational performance in the arts and crafts industry: a literature review. *Journal of Knowledge Management* 22 (6), 1310–1331.
- [18] Grant, J.L., 2003. *Foundations of economic value-added*. Wiley, Hoboken, 324 pp.
- [19] Granig, P., 2007. Innovationsbewertung: Potentialprognose und -steuerung durch Ertrags- und Risikosimulation. Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 238 pp.
- [20] Bilitewski, B., Härdtle, G., Marek, K., 2000. *Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre*. Springer, Berlin, 729 pp.



- [21] Fresner, J., Bürki, T., Sittel, H.H., 2014. Ressourceneffizienz in der Produktion: Kosten senken durch Cleaner Production. Symposion-Publ, Düsseldorf, 303 pp.
- [22] Bräklings, E., Lux, J., Oidtmann, K., 2020. Logistikmanagement: Mit Logistik-Power schnell, schlank und fehlerfrei liefern. Springer Gabler, Wiesbaden, Heidelberg, 274 pp.
- [23] Klaus, P., Krieger, W., Krupp, M., 2012. Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse, Springer Gabler, Wiesbaden, 647 pp.
- [24] International Energy Agency (IEA), 2024. EU energy policy: Delivering secure, sustainable and affordable energy for European citizens and businesses. [https://energy.ec.europa.eu/index\\_en](https://energy.ec.europa.eu/index_en). Accessed 9 October 2024.
- [25] Umwelt Bundesamt. Behandlung von Abwasser. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/abwasser>. Accessed 9 October 2024.
- [26] Umwelt Bundesamt, 2024. Wasserressourcen und ihre Nutzung. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung>. Accessed 9 October 2024.
- [27] Schreckenber, D., Benz, S., Kuhlmann, J., 2019. Lärmbelastungssituation in Deutschland. Umweltbundesamt.
- [28] Mahler, D., 2024. Forschen für die Energiewende. <https://www.ise.fraunhofer.de/>. Accessed 9 October 2024.
- [29] Zimmel, R., 2024. Value beyond the hype. <https://www.mckinsey.com/>. Accessed 9 October 2024.
- [30] European Environment Agency, 2014. Costs of air pollution from European industrial facilities: An updated assessment. Publications Office, Luxembourg, 151 pp.
- [31] Groot, R. de, Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., Christie, M., Crossman, N., Ghermandi, A., Hein, L., Hussain, S., Kumar, P., McVittie, A., Portela, R., Rodriguez, L.C., Brink, P. ten, van Beukering, P., 2012. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. Ecosystem Services 1 (1), 50–61.
- [32] Goldstein, R., Behrens, B.-A., Duran, D., 2017. Role of Thermal Processing in Tailored Forming Technology for Manufacturing Multimaterial Components, in: Proceedings from the 29th Heat Treating Society Conference and Exposition. Heat Treat, Ohio, USA. ASM International, pp. 172–179.
- [33] Behrens, B.-A., Klose, C., Chugreev, A., Thüer, S.E., Uhe, J., 2018. Numerical investigations on the lateral angular co-extrusion of aluminium and steel. AIP Conference Proceedings 1960 (1), 30001.
- [34] Quentin, L., Beermann, R., Brunotte, K., Behrens, B.-A., Kästner, M., Reithmeier, E. Concept of a control system based on 3D geometry measurement for open die forging of large-scale components, in: Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology, p. 12.
- [35] Budde, L., Prasanthan, V., Merkel, P., Kruse, J., Faqiri, M.Y., Lammers, M., Kriwall, M., Hermsdorf, J., Stonis, M., Hassel, T., Breidenstein, B., Behrens, B.-A., Denkena, B., Overmeyer, L., 2022. Material dependent surface and subsurface properties of hybrid components. Production Engineering 16 (5), 647–659.





**Jonas Schneider, M. Sc.** 

Foto: Uni Hannover/IFA  
 schneider@ifa.uni-hannover.de  
 Tel +49 511 762 3390

**Prof. Dr.-Ing. habil.  
 Matthias Schmidt** 

**Prof. Dr.-Ing. habil.  
 Peter Nyhuis** 

Leibniz Universität Hannover  
 Institut für Fabrikanlagen und Logistik (IFA)  
 An der Universität 2, 30823 Garbsen  
 www.ifa.uni-hannover.de

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons  
 Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)