

Multikriterielle Entscheidungsunterstützung für die Synthese von Herstellprozessen zur Fertigung funktional gradierter Bauteile

Multi-criteria decision support for the manufacturing process synthesis of functionally graded components

Vinzent Rudtsch, Jürgen Gausemeier, Marcus Petersen, Heinz Nixdorf Institut,
Lehrstuhl für Produktentstehung, Universität Paderborn (Germany),
vinzent.rudtsch@hni.upb.de, juergen.gausemeier@hni.upb.de,
marcus.petersen@hni.upb.de

Abstract: Functional gradation denotes a continuous distribution of properties over at least one spatial dimension of a component made of single material. This distribution is tailored with respect to the later intended application of the component. The improved material utilization enables light weight design and reduced resource consumption, thus offering an alternative for modern composite materials. To support the production planner in setting up the required manufacturing processes, this contribution proposes a multi-criteria decision-support approach that is based upon a framework for the computer-aided planning and optimisation of functionally graded components. The obtained ranking of possible process chains then allows the production planner to select the best alternative.

1 Einleitung und Problemanalyse

In diesem Beitrag wird eine Methodik zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung für die Synthese von Herstellprozessen zur Fertigung von funktional gradierten Bauteilen vorgestellt. Funktionale Gradierung ist die gezielte und reproduzierbare Modifikation der Mikrostruktur eines Werkstoffs zur Einstellung von makroskopischen Bauteileigenschaften (bspw. Härte oder Zähigkeit). Ziel ist ein definierter Verlauf der Mikrostrukturänderung über mindestens eine räumliche Dimension. An unterschiedlichen Stellen im Bauteil entstehen scheinbar widersprüchliche Eigenschaften, die die spätere Funktion des Bauteils bestmöglich unterstützen (Steinhoff et al. 2009).

Beispiele für die Verwendung funktional gradierter Bauteile finden sich u. a. im Automobilbereich. So müssen Türinnenverkleidungen aus Kunststoff im Fall eines seitlichen Aufpralls einen Teil der Energie durch Verformung aufnehmen, dürfen dabei aber keinesfalls die Insassen verletzen. Um einen gewünschten Verformungs-

verlauf der Türinnenverkleidung während eines Unfalls zu gewährleisten, muss das Bauteil an exakt vordefinierten Stellen genau spezifizierte Materialeigenschaften aufweisen. Durch die Gradierung, z. B. der Bauteilhärte über den Bauteilquerschnitt, wird die Funktion des Bauteils wesentlich beeinflusst. Die Türinnenverkleidung wandelt sich so von einem rein dekorativen Element zu einem Funktionselement der passiven Fahrzeugsicherheit.

Bauteile mit funktional gradierten Eigenschaften stellen eine ressourcenschonende Alternative zu modernen Verbundwerkstoffen dar. Die Herstellung erfordert jedoch komplexe Herstellprozesse, die beispielsweise auf thermo-mechanisch gekoppelten Phänomenen basieren. Um das volle Potential von funktionaler Gradierung zu erschließen, bedarf es somit innovativer Methoden zur Planung und Optimierung der erforderlichen Herstellprozessketten. Im Rahmen der Optimierung werden dabei die Prozessparameter für jeden einzelnen Prozessschritt prozessübergreifend und im Kontext der gesamten Herstellprozesskette simulativ optimiert. Die dafür notwendigen Simulationen erfordern eine Vielzahl komplexer Rechenoperationen, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten. Dies führt zu einem hohen Zeit- und Ressourcenaufwand für die Planung und Optimierung jeder möglichen Fertigungskette (Biermann et al. 2012).

In Abbildung 1 sind beispielhaft die Simulationsergebnisse für den Fertigungsschritt „Pressen“ dargestellt. Diese wurden mit Hilfe einer sog. Monte-Carlo-Simulation ermittelt, die statistische Unsicherheiten durch eine hohe Anzahl von Zufallsexperimenten berücksichtigt (Andrieu et al. 2003). Die Monte-Carlo-Simulation verdeutlicht, dass die Presskraft in bestimmten Temperaturbereichen (um 170°C und 190°C) stark schwankt. Durch technische Restriktionen der Werkzeugmaschine ist eine Regelung der Temperaturführung jedoch nicht hinreichend genau möglich, den für eine maximale Presskraft optimalen Temperaturbereich um 180°C einzuhalten.

Der Prozess erfüllt zwar die Bauteilspezifikation, ist aber aufgrund der geringen Prozessrobustheit und der daraus resultierenden Ausschussquote beispielsweise nicht für die industrielle Massenproduktion geeignet. Dementsprechend würden Fertigungsketten, die auf diesem Prozessschritt basieren, in der weiteren Prozessplanung nicht mehr verfolgt werden.

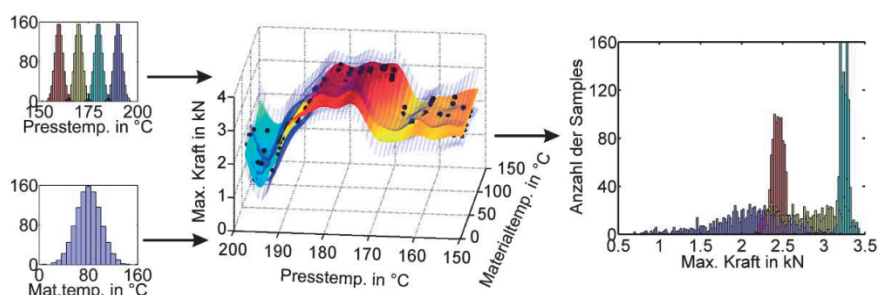


Abbildung 1: Ergebnisse der Simulation zur Bestimmung der Presskraft in Abhängigkeit von Press- und Materialtemperatur (nach Biermann et al. 2012)

Schon aus Kostengründen ist es sinnvoll, die Anzahl an potentiellen Lösungsalternativen frühzeitig zu verringern und nicht alle technisch möglichen

Prozessketten zu simulieren. Diese Verkleinerung des Lösungsraums muss unter Berücksichtigung bauteilindividueller Zielkriterien (z.B. Prozessrobustheit, Ressourceneffizienz etc.) durchgeführt werden.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Methodik zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung basiert auf einer Planungsumgebung zur rechnerunterstützten Planung, Simulation und Optimierung von Herstellprozessketten für funktional gradierte Bauteile. Die Planungsumgebung wird daher im folgenden Kapitel 2 näher erläutert, um darauf aufbauend in Kapitel 3 den Ablauf des multikriteriellen Entscheidungsverfahrens zu verdeutlichen. Kapitel 4 fasst den beschriebenen Ansatz zusammen und zeigt Potentiale für die Weiterentwicklung der Methodik auf.

2 Prozessketten für funktional gradierte Bauteile

Im folgenden Kapitel werden die Besonderheiten bei der Planung und Optimierung von Herstellprozessketten für funktional gradierte Bauteile erläutert. Dazu wird zunächst eine beispielhafte Herstellprozesskette beschrieben und anschließend die Planungsumgebung für funktional gradierte Bauteile vorgestellt.

2.1 Beispielhafte Herstellprozesskette

Die Herstellprozessketten für Bauteile mit gradierten Eigenschaften sind durch starke Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie zwischen den Fertigungsprozessen und den einstellbaren Bauteileigenschaften charakterisiert. Um diese Abhängigkeiten zu verdeutlichen, wird im Folgenden eine beispielhafte Prozesskette zur Herstellung von gradierten Polymerwerkstoffen wie z. B. Rohbauteile zur Fertigung von Türinnenverkleidungen vorgestellt. Die Eigenverstärkung der Polymerwerkstoffe basiert dabei auf hochverstreckten thermoplastische Bändchen oder Fasern, die in einer Matrix eingebettet sind und eine Orientierung auf makro-molekularer Ebene durch Festphasen- oder Schmelzedeformation aufweisen. Durch diese Eigenverstärkung reagieren die Bändchen oder Fasern empfindlich auf Druck- und Temperatureinwirkungen, wodurch eine Grädierung des Bauteils ermöglicht wird (Bledzki et al., 2011).

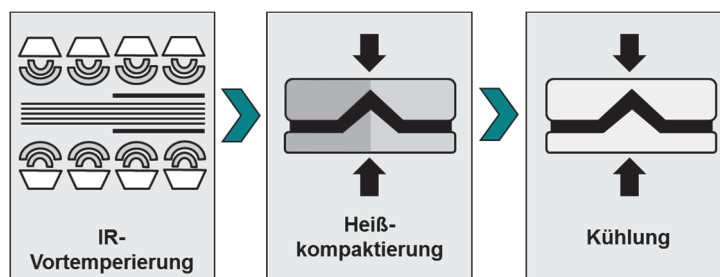


Abbildung 2: Beispielhafte Herstellprozesskette für eigenverstärkte und gradierte Polymerwerkstoffe

Abbildung 2 zeigt die beispielhafte Prozesskette zur Herstellung von gradierten Polymerwerkstoffen, wobei die hochverstreckten Bändchen oder Fasern zunächst in einer Infrarot-Vorheizstation durch Maskierbleche gezielt vortemperiert werden.

Anschließend wird diese thermische Gradierung mithilfe eines speziellen Presswerkzeugs um eine mechanische Gradierung erweitert. Das Werkzeug besitzt dazu eine spezielle Dreiecksgeometrie, die eine lokale Reduktion der Presskraft ermöglicht. Die Kühlungsphase als letzter Prozessschritt ist unter anderem notwendig, um das Bauteil entformen zu können (Paßmann 2010).

2.2 Planungsumgebung für funktional gradierte Bauteile

Die Planungsumgebung unterstützt den Planungsprozess von der Bauteilbeschreibung bis zur Spezifikation der Herstellprozesskette und besteht aus den drei Modulen „Bauteilbeschreibung“, „Expertensystem“ sowie „Modellbildung und Prozesskettenoptimierung“ (siehe Abbildung 3).

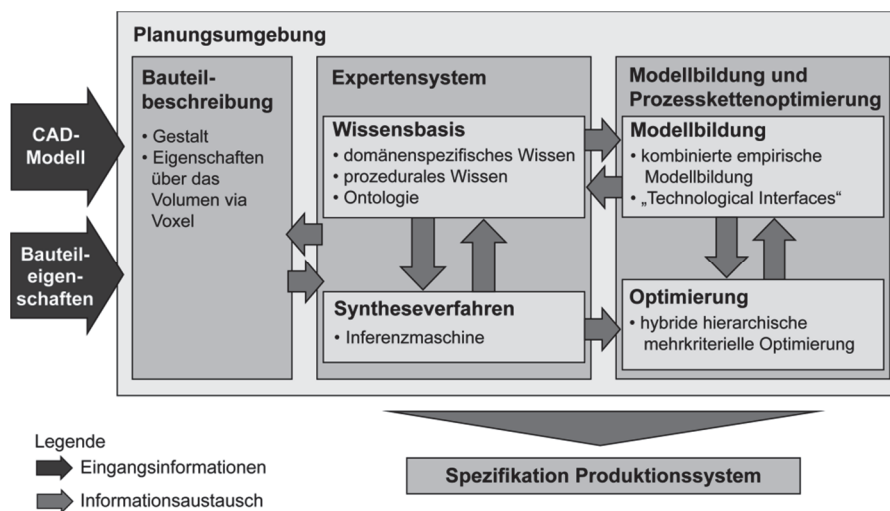


Abbildung 3: Softwarearchitektur der Planungsumgebung

Im Rahmen des Moduls „Bauteilbeschreibung“ wird das CAD-Modell mit Hilfe der Voxeltechnik erweitert, um die dreidimensionalen Gradierungsinformationen in das Bauteilmodell integrieren zu können (Bauer et al. 2011). Das Modul „Expertensystem“ besteht aus einer Wissensbasis und einem Syntheseverfahren. Die Wissensbasis enthält alle Informationen bezüglich der Herstellverfahren und den Eigenschaften von funktional gradierten Bauteilen. Dazu gehören beispielsweise Informationen zur Abhängigkeit der Härte einer Türinnenverkleidung von der Vorheiztemperatur des Werkstoffs vor der Umformung. Diese Informationen müssen in der Wissensbasis strukturiert und zueinander in Beziehung gesetzt werden, um eine automatisierte Auswertung zu ermöglichen. Ebenso müssen auch die Wechselwirkungen zwischen dem Bauteil und den eingesetzten Herstellprozessen sowie zwischen den verschiedenen Herstellprozessen selbst berücksichtigt werden. Zu diesen Zwecken wird eine Ontologie eingesetzt. Das Syntheseverfahren schlägt anschließend auf Grundlage der Wissensbasis mögliche Prozessketten zur Herstellung eines funktional gradierten Bauteils vor (Gausemeier et al. 2010).

Nachdem mehrere Herstellprozessketten synthetisiert wurden, erfolgt die Parameteranpassung durch das Modul „Modellbildung und Prozesskettenoptimierung“. Dazu werden die Prozessparameter der Prozessketten durch die in der Wissensbasis hinterlegten DACE-Modelle (Design and Analysis of Computer Experiments) in Hinblick auf die Bauteilspezifikation optimiert (Wagner et al. 2008). Ziel ist eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen den in der Bauteilbeschreibung vorgegebenen Eigenschaftsverläufen und den realen Prozessergebnissen. Danach kann die Prozesskette ausgewählt werden, die aus Sicht des Planers den bestmöglichen Kompromiss zwischen den quantitativen Eigenschaften des Bauteils sowie der Erfüllung qualitativer Fertigungskriterien bildet.

Abschließend wird dem Planer die gewählte Herstellprozesskette zur Fertigung des Bauteils unter Einbezug der simulativ optimierten Prozessparameter mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS (Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems) anschaulich dargestellt (Gausemeier et al. 2011). Die Spezifikation besteht aus einem Prozess- sowie einem Ressourcendiagramm. Das Prozessdiagramm stellt die Prozesskette als Folge einzelner Prozessschritte mit definierten Ein- und Ausgangsobjekten dar und im Ressourcendiagramm werden den einzelnen Prozessschritten Ressourcen zur Realisierung zugeordnet.

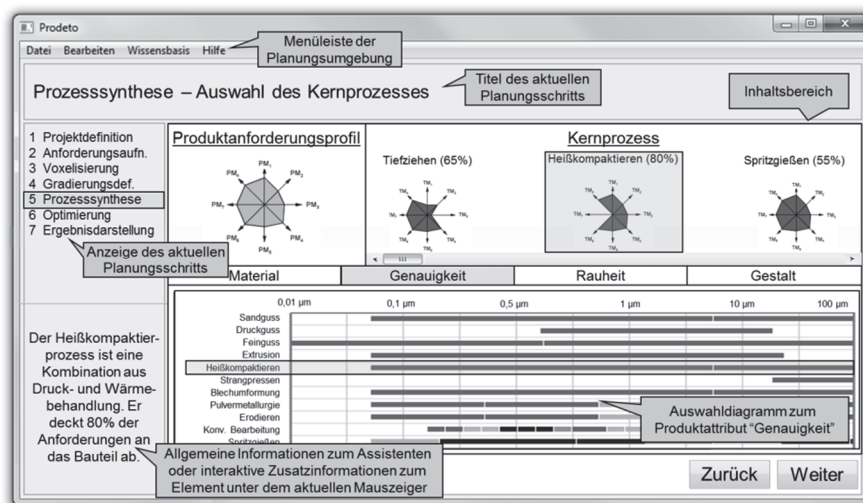


Abbildung 4: Screenshot des Planungsassistenten

Zur Verbesserung der Anwendbarkeit wurde ein Planungsassistent entwickelt, der den Nutzer durch den kompletten Planungsprozess der Planungsumgebung führt und bei der Eingabe der erforderlichen Daten und Informationen unterstützt. Der Assistent besteht aus sieben Schritten, wobei im ersten Schritt der Projektname eingegeben und das CAD-Modell hochgeladen wird. Im zweiten Schritt, der Anforderungsaufnahme, charakterisiert der Planer das zu verwendende Material, da dies die zur Verfügung stehenden Prozessalternativen determiniert und die Anforderungen an das Bauteil festlegt. Zu den Anforderungen zählen bspw. die Oberflächenrauheit oder die Genauigkeit, wobei auch diese Informationen für die Prozessketten synthese benötigt

werden. Anschließend wird das zuvor hochgeladene CAD-Modell in Volumenelemente (sog. Voxel) unterteilt, damit im folgenden Schritt der dreidimensionale Eigenschaftsverlauf im Inneren des Bauteils beschrieben und genau definiert werden kann. Davon ausgehend werden im fünften Schritt Prozessketten zur Herstellung des Bauteils gebildet. Dazu werden alle zuvor angegebenen Informationen in einem Anforderungsprofil zusammengetragen und darauf aufbauend der Prozess als Kernprozess ausgewählt, der die meisten Anforderungen erfüllt (siehe Abbildung 4). Die vom Kernprozess noch nicht vollumfänglich erfüllten Anforderungen werden anschließend durch Auswahl und Verknüpfung neuer Prozesse versucht minimiert. Dabei gilt es die im Expertensystem abgebildeten Wechselwirkungen zu berücksichtigen und sofern zwei Prozessschritte der aktuellen Prozesskette inkompatibel sind, zwei neue Prozessketten mit jeweils nur einem der beiden Schritte abzuleiten. Die einzelnen Prozessparameter der Prozessketten werden in Schritt 6 optimiert, wobei die Prozesskette, die alle Anforderungen am besten erfüllt, im letzten Schritt des Assistenten mit Hilfe der Spezifikationstechnik CONSENS dem Anwender zur weiteren Planung bereitgestellt wird.

3 Multikriterielle Entscheidungsunterstützung

Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Entscheidungssituation charakterisiert, um anschließend relevante Entscheidungskriterien zu identifizieren und das Vorgehen bei der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung anhand eines Beispiels zu beschreiben.

3.1 Anforderungen an die Entscheidungsunterstützung

Nachdem verschiedene Prozesskettenalternativen durch das Expertensystem vorgeschlagen wurden, ist es notwendig die am besten geeignete Prozesskette in Hinblick auf die nicht im CAD-Modell spezifizierten Anforderungen zu ermitteln. Bis zu diesem Punkt wurde jede Prozesskette unter Berücksichtigung aller technischen Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten bei der Produktion eines einzelnen Werkstücks ermittelt. Obwohl dieses Vorgehen bei der Fertigung von wissenschaftlichen Demonstratoren bzw. Kleinserien die gewünschten Resultate erzielt, sind für industriell relevante Fertigungsmengen verstärkt Faktoren der nachhaltigen Produktion zu berücksichtigen. Besonders bei komplexen Produkten wie funktional gradierten Bauteilen ist es entscheidend, die exakte Reproduzierbarkeit der Bauteileigenschaften auch für höhere Produktionsvolumina gewährleisten zu können. Um das volle Potential der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung auszunutzen, müssen neben den technisch quantifizierbaren Angaben auch qualitative Kriterien berücksichtigt werden, die bei isolierten Planungsentscheidungen wie die Materialauswahl bisher nicht einbezogen werden (Huang et al. 2011).

3.2 Entscheidungskriterien

Eine der wesentlichen Herausforderungen besteht für Unternehmen heutzutage darin, eine nachhaltige Produktion im Sinne der Triple Bottom Line zu etablieren, d. h. gleichzeitig ökonomische, ökologische und soziale Anforderungen zu erfüllen (Elkington 1998). Da die Entwicklung und Herstellung funktional gradierten Bauteile sehr kostenintensiv ist, müssen für eine ökonomische Nachhaltigkeit Produktionsvolumina in industriell relevanten Mengen erzielt werden. Höhere

Produktionsmengen gehen jedoch im Allgemeinen mit steigenden Schadstoffemissionen sowie erhöhtem Effizienzdruck auf die Mitarbeiter einher. Da solche gegenläufigen Effekte in einer nachhaltigen Produktion untereinander ausgeglichen sein sollen, muss für jede neue Produktionsaufgabe ein individuelles Optimum gefunden werden. Um diese verschiedenen Anforderungsarten optimal auszubalancieren, wurde ein Kriteriensatz für jeden der drei Bereiche gemäß der Triple Bottom Line definiert. Die Kriterien basieren auf empirischen Erfahrungswerten sowie Expertenwissen und wurden in Hinblick auf eine nachhaltige Produktion von funktional gradierten Bauteilen im industriellen Maßstab ausgewählt.

Ökonomische Kriterien

- Durchschnittliche Durchlaufzeit eines Bauteil in der Prozesskette
- Bestände von fertigen und unfertigen Bauteilen in der Produktion
- Platzbedarf an begrenzten Pufferressourcen, z. B. Arbeitsflächen
- Flexibilität hinsichtlich Änderungen in der Kundenachfrage
- Varianz der Bauteilqualität innerhalb einzelner Produktions-Chargen

Ökologische Kriterien

- Energieeffizienz der Prozesskette
- Abfall- und Ausschussmengen
- Emission von Luftschadstoffen
- Recycling-Möglichkeiten der Prozessmedien
- Anteil umweltschädlicher Chemikalien, z. B. für Beschichtungen

Soziale Kriterien

- Emission von Giftstoffen und Vibrationen
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Arbeitsumgebung
- Kompatibilität der Prozesskette zu ergonomischen Anforderungen

Für jedes Kriterium muss darüber hinaus eine funktionale Metrik definiert werden, die mindestens zwei diskrete Zustände spezifizieren kann. Da verschiedene Ansätze zur Differenzierung diskreter Zustände von Entscheidungskriterien existieren, ist unter Umständen eine Anpassung der ausgewählten Metrik für ein Kriterium bei neuen Entscheidungssituationen erforderlich.

3.3 Bewertungsmethode

Mit einem festgelegten Satz geeigneter Entscheidungskriterien und verschiedenen Prozessketten muss zur Auswahl der favorisierten Alternative eine Entscheidungsmethode festgelegt werden. Beim Vergleich verschiedener Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung hat der Analytic Hierarchy Process (AHP) die besten Ergebnisse für die vorliegende Problematik der Prozesskettenauswahl erzielt. Der AHP ist ein matrizenorientierter Ansatz für komplexe Entscheidungsprobleme, der auf dem paarweisen Vergleich von Kriterien und den zur Verfügung stehenden Alternativen basiert (Saaty und Vargas 2012). In Hinblick auf die bereits erwähnten Unterschiede in den Eigenschaften der Entscheidungskriterien sprechen drei Hauptgründe für den Einsatz des AHP bei der Auswahl von Herstellprozessketten:

- Mathematische Formalisierung des Entscheidungsprozesses erhöht die Akzeptanz der Ergebnisse bei den Beteiligten signifikant
- Automatisierte Konsistenzprüfungen der Eingabewerte reduzieren die Anfälligkeit des Verfahrens gegenüber Fehlern der Anwender
- Transformation qualitativer Kriterien in quantitative Skalen ist nicht notwendig

Im nächsten Abschnitt wird das prinzipielle Vorgehen der Prozesskettenauswahl mit Hilfe des AHP anhand eines Beispiels demonstriert.

3.4 Gewichtung von Kriterien und Bewertung der Alternativen

In Kapitel 1 wurde bereits dargestellt, wie die Gradierung die Funktionalität von Türinnenverkleidungen erhöhen kann. Deshalb wird im Folgenden die Prozesskettenauswahl für dieses Bauteil exemplarisch demonstriert. Jede der von der Planungsumgebung vorgeschlagenen Herstellprozessketten besteht aus einer Reihe von Aufheiz-, Abkühl- und Bearbeitungsschritten. Die verschiedenen Alternativen unterscheiden sich dabei insbesondere hinsichtlich Anzahl und Reihenfolge der Prozessschritte sowie deren Parameter, welche simulativ optimiert wurden.

Für den paarweisen Vergleich der Kriterien und Alternativen wird beim AHP üblicherweise eine linguistische Skala genutzt, die sich von gleichbedeutend bis dominierend erstreckt. Jedem Punkt auf der Vergleichsskala ist ein numerischer Wert zugeordnet, z. B. bedeutet 1 gleichbedeutend und 9 dominierend, wobei alle Werte dazwischen die jeweiligen Abstufungen repräsentieren. Für das vorliegende Anwendungsbeispiel wird der Einfachheit halber angenommen, dass die Skala von 1 bis 5 verläuft, wobei 5 absolute Dominanz und 3 mittlere Überlegenheit ausdrückt. Dem unterlegenen Kriterium wird dabei der reziproke Wert $1/5$ bzw. $1/3$ zugeordnet.

Zur Prozesskettenauswahl werden beim AHP folgende drei Schritte durchlaufen:

1. *Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien bezüglich des Ziels*

Für das vorliegende Demonstrationsbeispiel wird vereinfachend angenommen, dass nur drei der vorgestellten Entscheidungskriterien zur Prozesskettenauswahl für den AHP betrachtet werden: „Durchschnittliche Durchlaufzeit eines Bauteil in der Prozesskette“ (DLZ), „Energieeffizienz der Prozesskette“ (EE) sowie „Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Arbeitsumgebung“ (TLA). In Tabelle 1 ist die relative Wichtigkeit der drei Kriterien nach dem paarweisen Vergleich dargestellt:

Tabelle 1: Matrix der relativen Kriteriengewichtung zur nachhaltigen Produktion einer funktional gradierten Türinnenverkleidung

| Relative Kriteriengewichtung | Ökonomisches Kriterium | Ökologisches Kriterium | Soziales Kriterium |
|------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| | DLZ | EE | TLA |
| DLZ | 1 | 3 | 5 |
| EE | 1/3 | 1 | 2 |
| TLA | 1/5 | 1/2 | 1 |

Die für den AHP durchgeführte Berechnung des Eigenvektors der Matrix ergibt die Rangfolge der Kriterien hinsichtlich ihrer Wichtigkeit für das übergeordnete Ziel:

1. DLZ – 64,8 %
2. EE – 22,9 %
3. TLA – 12,3 %

Der AHP ermöglicht darüber hinaus die Bewertung der Gewichtungsmatrix mit einem Inkonsistenzfaktor der auf dem Eigenwert der Matrix beruht. Im vorliegenden Fall der Tabelle 1 beträgt der Inkonsistenzfaktor 1,9 % und ist damit unauffällig, da der AHP ausreichend robust ist, um Inkonsistenzen bis zu 10 % zu tolerieren.

2. Paarweiser Vergleich zur Gewichtung der Kriterien bezüglich des Ziels

Sobald die Kriteriengewichtung festgestellt wurde, werden alle Alternativen in Bezug auf jedes Kriterium paarweise miteinander verglichen. Für das vorliegende Demonstrationsbeispiel wird vereinfachend von zwei verschiedenen Prozessketten A und B ausgegangen, die sich in Reihenfolge und Parameter der Prozessschritte unterscheiden. Während Prozesskette A auf eine schnelle und flexible Fertigung abzielt, ist Prozesskette B äußerst energieeffizient und bietet eine angenehmere Arbeitsumgebung für die Werker. Die zwei Prozessketten werden dann für alle drei Kriterien auf Basis der eingeführten linguistischen Skala miteinander verglichen.

Tabellen 2-4: Bewertung aller Alternativen bzgl. der definierten Kriterien

| DLZ | A | B | EE | A | B | TLA | A | B |
|-----|-----|---|----|---|-----|-----|---|-----|
| A | 1 | 3 | A | 1 | 1/5 | A | 1 | 1/4 |
| B | 1/3 | 1 | B | 5 | 1 | B | 4 | 1 |

Da die Bewertungen in den Tabellen 2-4 für jedes Kriterium nur zwei Alternativen enthält, ist die Inkonsistenz automatisch 0 % und daher unauffällig.

3. Bildung der konsolidierten Rangfolge

Mit einer vollständigen Bewertung aller Alternativen für jedes Kriterium und der Gewichtung aller Kriterien zueinander, berechnet der AHP die konsolidierte Rangfolge der Alternativen auf Basis einer Reihe von Matrizenmultiplikationen. Eine detaillierte Darstellung des Vorgehens wird von Saaty und Vargas (2012) beschrieben. Für das Demonstrationsbeispiel ergibt sich folgende Rangfolge:

1. Herstellprozesskette B – 58,7 %

2. Herstellprozesskette A – 41,3 %

In diesem Fall würde Prozesskette B ausgewählt werden, da die Nachteile in der Durchlaufzeit verglichen mit Prozesskette A durch weit überlegene Energieeffizienz und deutlich bessere Arbeitsbedingungen für die Angestellten kompensiert werden. Bei eventuell auftretenden Unsicherheiten während der Kriteriengewichtung oder dem Vergleich der Alternativen sollte eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden. Zu diesem Zweck werden die Kriteriengewichte sowie die Bewertungen der Alternativen innerhalb des Unsicherheitsbereichs variiert. Falls das Endergebnis dadurch stark beeinflusst wird, müssen zusätzliche Informationen über die Entscheidungssituation eingeholt bzw. weitere Kriterien in Erwägung gezogen werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Funktional gradierte Bauteile bilden eine neue Möglichkeit für individuell an den Einsatzzweck angepasste Produkte. Zur Planung, Simulation und Optimierung der dafür erforderlichen Herstellprozessketten wurde eine Planungsumgebung vorgestellt und um eine Methodik zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung ergänzt. Der Ansatz wurde anschließend am Beispiel einer Herstellprozesskette für eine funktional gradierte Türinnenverkleidung demonstriert. Aufgrund der mathematischen Formalisierung des AHP wird die Akzeptanz der Ergebnisse bei den Anwendern deutlich erhöht, indem der Anteil von Zufalls-Entscheidungen transparent verringert wird. Die mathematischen Prinzipien sind jedoch nicht selbsterklärend, so dass es erforderlich ist die Hintergründe des Verfahrens offen zu kommunizieren, um Missverständnisse zu vermeiden. In Zukunft soll die Entscheidungsunterstützungskomponente stärker mit der Prozesskettensimulation gekoppelt werden, um Simulationsergebnisse automatisiert in den Bewertungsprozess einfließen zu lassen. Darüber hinaus wird die Wissensbasis um weitere Prozessschritte ergänzt und die Ontologie erweitert, um zunehmend komplexere Herstellprozessketten realisieren zu können.

Literatur

- Andrieu, C.; de Freitas, N.; Doucet, A.; Jordan, M. I.: An Introduction to MCMC for Machine Learning. Machine Learning, Volume 50, 2003.
- Bauer, F.; Dettmer, D.; Gausemeier, J.: Feature-based component description for functional graded parts, in: Proc. 4th Int'l. Conf. Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2011), Oct. 2-5th 2011, Montreal, Canada, S. 239-244.
- Biermann, D.; Gausemeier, J.; Heim, H.-P.; Hess, S.; Petersen, M.; Ries, A.; Wagner, T.: Computer-Aided Planning and Optimisation of Manufacturing Processes for Functional Graded Components, in: Proc. 1st Int'l. Conf. Thermo-Mechanically Graded Materials, Oct. 29-30th 2012, Kassel, Germany, S. 195-200.
- Bledzki, A. K.; Ries, A.; Paßmann, D.: Functional graded self-reinforced polypropylene sheets, Polimery 56 (2011), S. 369-374.
- Elkington, J.: Accounting for the Triple Bottom Line, in: Measuring Business Excellence, Vol. 2 (3) (1998), S. 18-22.

- Gausemeier, J.; Bauer, F.; Dettmer, D.; Reyes-Perez, M.: Planning of Manufacturing Processes for Graded Components. In: Proc. 1st Int'l. Conf. Product Property Prediction – P3, Apr. 12-13th 2010, Dortmund (Germany), S. 177-187.
- Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Kahl, S.; Nordsiek, D.: Integrative Development of Product and Production System for Mechatronic Products. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 27 (4) (2011), S. 772-778.
- Huang, H.; Zhang, L.; Liu, Z.; Sutherland, J. W.: Multi-criteria decision making and uncertainty analysis for materials selection in environmentally conscious design. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, February 2011, Vol. 52 (5-8), S. 421-432.
- Paßmann, D.: Prozessinduzierte Gradierung eigenverstärkter Polypropylen-Faserverbunde beim Heißkompaktieren und Umformen. Dissertation, Kassel, Universität Kassel (2010).
- Saaty, T.L.; Vargas, L.G.: Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 175 (2010)
- Steinhoff, K.; Maier, H. J.; Biermann, D.: Functionally Graded Materials in Industrial Mass Production. Auerbach: Verlag Wissenschaftliche Scripten 2009.
- Wagner, T.; Passmann, D.; Weinert, K.; Biermann, D.; Bledzki, A. K.: Efficient modeling and optimisation of the property gradation of self-reinforced polypropylene sheets within a thermo-mechanical compaction process. In: Proc. 6th CIRP Int'l. Conf. Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME 2008), Naples (Italy), July 23-25th 2008, S. 447-452.