

## Berücksichtigung von Unsicherheiten in der unternehmensübergreifenden Planung von Prozessketten

# Prozesskettenplanung unter Unsicherheit

B. Denkena, M. Wichmann, S. Kettelmann

Die Planung von fertigungstechnischen Prozessketten über Unternehmensgrenzen hinweg ist aufgrund technologischer Wirkbeziehungen zwischen Prozessschritten eine große Herausforderung. In diesem Beitrag wird eine Planungsmethode vorgestellt, die mit dezentralen Modulen eine unternehmensübergreifende Optimierung der Fertigungskosten ermöglicht. Zusätzlich werden Unsicherheiten durch Modellfehler sowie externe Einflüsse in die Methode eingebunden. Dadurch wird eine kollaborative Planung umgesetzt, die zu robusten Ergebnissen führt.

## STICHWÖRTER

Fertigungsplanung, PPS (Produktionsplanung/-steuerung), Digitalisierung

## Process chain planning under uncertainty – Consideration of internal and external uncertainties during planning of process chains across companies

Planning of manufacturing process chains across companies is a great challenge due to technological interdependencies. This paper presents a planning method enabling cross-company manufacturing cost optimization with decentralized modules. In addition, uncertainties due to model errors as well as external factors made are integrated into the method. This allows for collaborative planning and leads to robust results.

## 1 Einführung

Produzierende Unternehmen sehen sich aufgrund steigender Ressourcen- und Energiepreise mit hohem Kostendruck konfrontiert. Dies führt zu der Notwendigkeit, Fertigungskosten gering zu halten. Mögliche Maßnahmen sind die Einsparung von Ressourcen und Energie sowie die Vermeidung von Ausschuss. Dazu müssen Randbedingungen eingehalten werden, die in der Regel in Form von Qualitätskriterien für Produkte vorliegen.

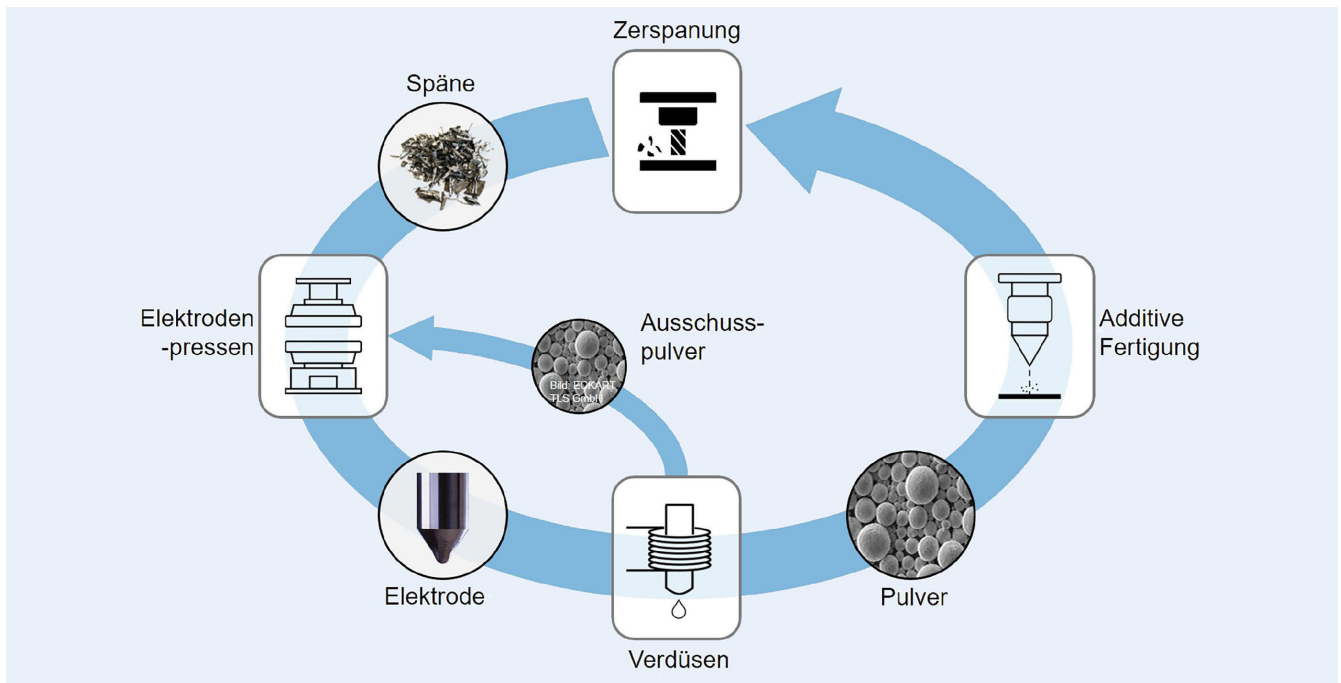
Zwischen den einzelnen Fertigungsprozessen in Prozessketten treten technologische Wirkbeziehungen auf, durch die sich die Prozesse gegenseitig beeinflussen. Dadurch wird die Einstellung von Prozessstellgrößen von den Auswirkungen auf nachfolgende Fertigungsschritte abhängig. Die Wirkbeziehungen können sowohl gegenläufige als auch komplementäre Effekte haben. Bei gegenläufigen Effekten bewirkt eine Anpassung des ersten Prozesses eine unvorteilhafte Auswirkung auf den Folgeprozess. Bei komplementären Effekten kann sich eine Anpassung des ersten Prozesses positiv auf den ersten Prozess sowie den Folgeprozess auswirken. Bei direkten Zusammenhängen wirkt sich die Prozessanpassung auf den unmittelbaren Folgeprozess aus, bei indirekten erst auf spätere Prozesse [1]. Eine Planung von Einzelprozessen ohne Berücksichtigung der Wirkbeziehungen kann folglich dazu führen, dass nur lokale Verbesserungen erzielt werden, für die Gesamtprozesskette jedoch kein positiver Effekt eintritt [2].

Die Einhaltung von Randbedingungen zur Vermeidung von Ausschuss kann durch das Festlegen von Spezifikationen bezie-

hungsweise Toleranzen für die (Zwischen-)Produkte der Prozesskette erreicht werden. Eine zu enge Auslegung kann jedoch zur Folge haben, dass das Kostenoptimum der Prozesskette nicht erreicht wird [3]. Folglich ist es notwendig, die Einzelprozesse aufeinander abzustimmen, um sowohl die Einhaltung von Randbedingungen als auch die Minimierung der Gesamtkosten sicherzustellen. Somit ergeben sich komplexe Problemstellungen, bei denen der Planungsaufwand durch Anwendung modellbasierter Planungsansätze reduziert werden kann.

Eine Abstimmung der Einzelprozesse über Unternehmensgrenzen hinweg ist vor allem in Produktionsnetzwerken möglich, erfordert jedoch Kooperation der beteiligten Unternehmen. Momentan erfolgt dies nur über die Festlegung starrer Toleranzen. Modellbasierte Planungsansätze erlauben in diesem Zusammenhang eine automatisierte Entscheidungsfindung beziehungsweise -unterstützung, um die Gesamtwirtschaftlichkeit zu erhöhen. Für Modelle, die physische Prozesse nachbilden, existieren jedoch verschiedene Fehlerquellen. Diese können zu Abweichungen zwischen vorhergesagten und realen Werten führen, was Unsicherheiten in der Planung zur Folge hat. Im weiteren Verlauf wird dies als „interne Unsicherheit“ bezeichnet. Es wird zwischen folgenden Fehlerquellen unterschieden [4]:

- Eingangsgrößen des Modells
- Modellinhärente Fehler
  - Residuale Schwankungen (bei mehrfacher Durchführung eines Prozesses mit den gleichen Einstellgrößen werden verschiedene Resultate beobachtet)
  - Messfehler in dem Modell zugrunde liegender Daten



**Bild 1.** Prozesskette zum Recycling von Titanspänen. Grafik: IFW

- Ungenaue Abbildung des physischen Prozesses durch das Modell (Fehler beispielsweise durch Interpolation zwischen Messpunkten)
- Parametrische Schwankungen (wenn nicht alle Parameter festgelegt werden können, die für die Beschreibung eines Prozesses notwendig sind, können verschiedene Resultate eintreten)
- Menschliche Fehler

Sowohl für die Einhaltung von Randbedingungen als auch für das Identifizieren des realen, prozesskettenübergreifenden Kostenoptimums müssen solche Unsicherheiten in den Planungsprozess integriert werden. Neben Modellfehlern beeinflussen auch Unsicherheiten über externe Einflüsse das Planungsergebnis. Solche unsicherheitsbehafteten Einflüsse können etwa Annahmen über Energiekosten oder Beschaffungskosten verwendeter Ressourcen sein. Für ein robustes Planungsergebnis werden diese externen Unsicherheiten sowie die internen Unsicherheiten in einen Planungsansatz integriert, welcher eine unternehmensübergreifende Prozesskettenplanung erlaubt. Hierzu wird eine repräsentative Prozesskette vorgestellt, die das Potenzial dieses Ansatzes veranschaulicht.

## 2 Prozesskette zum Recycling von Titanspänen

Der zu entwickelnde unternehmensübergreifende Planungsansatz wird anhand einer Prozesskette zum Recycling von Titanspänen zu Pulver für die additive Fertigung evaluiert (**Bild 1**).

Die Prozesskette stellt einen Ressourcenkreislauf des Titanwerkstoffs her und birgt vor dem Hintergrund der ökologischen Nachhaltigkeit ein hohes Potenzial für additive Fertigungsverfahren. Im Rahmen der Prozesskette werden die aus Fräsprozessen stammenden Titanspäne zunächst gereinigt und zusammen mit Titanpulver in eine flache, zylindrische Form (Pucks) gepresst. Die Pucks werden anschließend von einer Titanhülle umschlossen und heißisostatisch gepresst, um die Dichte zu erhöhen. Der

entstehende Titanzylinder wird mit dem Electrode-Induction-Melting-Inert-Gas-Atomization (EIGA)-Verfahren zu Pulver verdüst. Dieses Pulver soll den Standard Grade 5 erfüllen, um für die Luft- und Raumfahrt verwendet werden zu können. Der Standard definiert Obergrenzen für verschiedene Komponenten des Materials. So wird für Sauerstoff eine Obergrenze von 2000 ppm festgelegt, für Kohlenstoff ein Wert von 800 ppm [5]. Die Auswirkungen des Fräsprozesses auf die Änderung der Komponenten werden in [6] beschrieben. Als Zielgröße des Planungsproblems werden die resultierenden Fertigungskosten verwendet.

Im Folgenden werden die relevanten Wirkbeziehungen der Prozesskette kurz beschrieben: Die Kosten des Fräsprozesses ergeben sich aus elektrischer Energie für Antriebe und Peripheriegeräte sowie dem Verbrauch von Kühlschmierstoff (KSS) und Werkzeugen aufgrund von Verschleiß. Kosten wie Abschreibungen und Personal, die nur linear von der Prozessdauer abhängen, werden bei dieser Untersuchung nicht betrachtet.

Der Zustand der Späne (hier werden Sauerstoff- und Kohlenstoffgehalt berücksichtigt) ist von Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und Zahnvorschub  $f_z$  sowie KSS-Druck und Verschleißfortschritt des Werkzeugs abhängig. Die Kosten des Pressens der Elektrode ergeben sich aus der verwendeten elektrischen Energie sowie dem Ressourcenverbrauch durch Verwendung von Titanhüllen und Titanpulver. Die chemischen Eigenschaften des Materials sind abhängig von den Eigenschaften der Späne aus dem Fräsprozess sowie der Titanhülle und des gegebenenfalls beigemengten Titanpulvers.

Ein Überschreiten der Grade-5-Spezifikation führt dazu, dass das Pulver nicht mehr für Luftfahrtanwendungen geeignet ist. Hierdurch resultiert Materialausschuss und folglich vermeidbare Kosten. Überschreitungen können in einem definierten Rahmen durch Beimengen von Titanpulver ausgeglichen werden. Die Kosten des Verdüsenprozesses ergeben sich aus der Verwendung elektrischer Energie sowie dem Verbrauch von Schutzgas. Die chemischen Eigenschaften sind in geringem Maß von der Frakti-

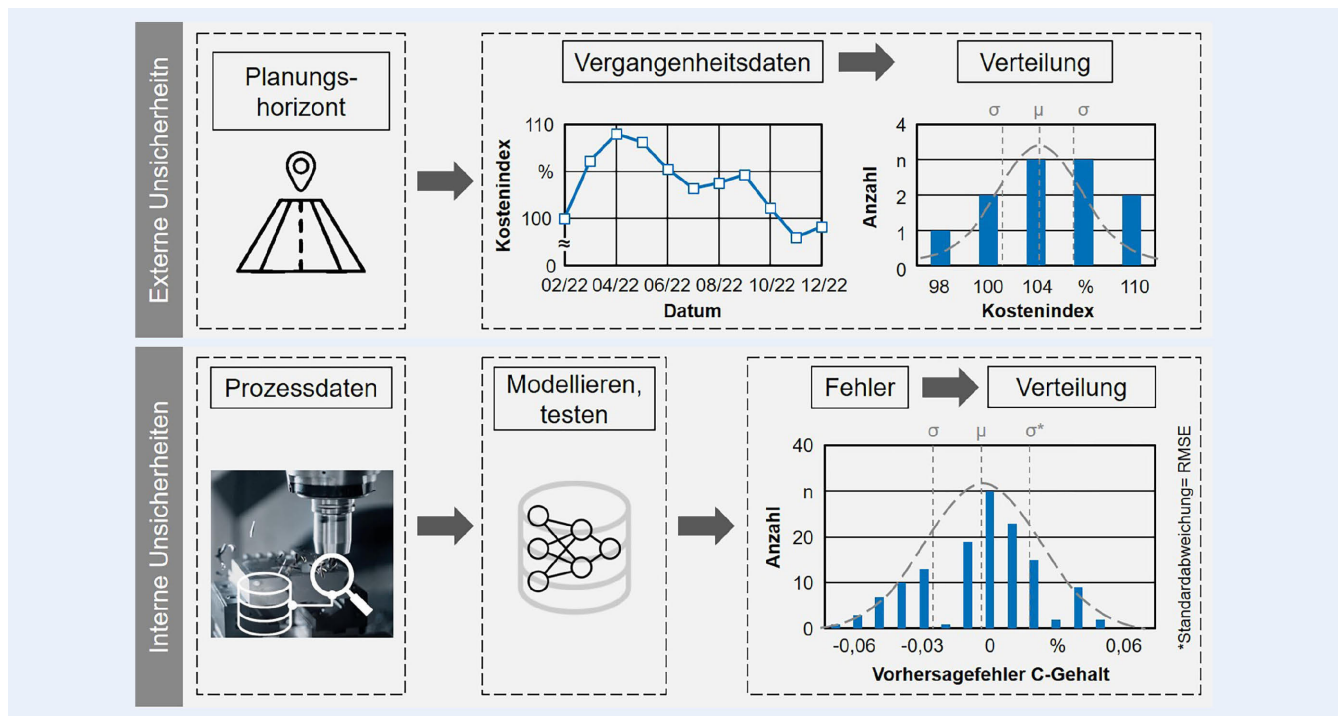


Bild 2. Vorgehen zur Unsicherheitsmodellierung. Grafik: IFW

onsgrößenverteilung des hergestellten Pulvers abhängig [7]. Diese ist wiederum von Material- und Gasstrom abhängig [8, 9]. Das Risiko des Materialausschusses kann durch Modellierung von Unsicherheiten verringert werden. Das im Folgenden beschriebene Vorgehen ist für jegliche Prozessketten mit technologischen Wirkbeziehungen einsetzbar.

### 3 Planungsansatz

#### 3.1 Modellierung von Unsicherheiten

Im Folgenden wird die Modellierung von Unsicherheiten beschrieben, um diese anschließend in eine unternehmensübergreifende Planungsmethode zu integrieren. Das Vorgehen ist in Bild 2 dargestellt.

Für externe Unsicherheiten muss zunächst ein Betrachtungszeitraum für Vergangenheitsdaten festgelegt werden. Als Beispiel sei hier die zeitliche Entwicklung von Ressourcenpreisen genannt. Die Festlegung erfolgt manuell, indem der Zeitraum identifiziert wird, der für die aktuelle Preisentwicklung charakteristisch ist (beispielsweise Zeitraum seit Beginn einer Ressourcenknappheit). Auf Grundlage der Daten wird der Erwartungswert sowie die Standardabweichung ermittelt. Anschließend wird geprüft, ob die Abweichungen vom Erwartungswert durch eine Verteilung beschrieben werden können.

Für die Modellierung interner Unsicherheiten werden Testdaten benötigt. Mithilfe des Vorhersagemodells werden für die Datenpunkte des Testdatensatzes die Zielgrößenwerte bestimmt. Anschließend werden die Vorhersage- mit den Messwerten verglichen und die Abweichung bestimmt. Wie bei den externen Unsicherheiten wird anschließend geprüft, ob die Abweichungen durch eine Verteilung modelliert werden können. In Bild 2 ist dies am Beispiel der Vorhersage des Kohlenstoffgehalts in Spänen aus dem Fräsprozess dargestellt. Mit den modellierten Unsicherheiten liegt eine schematische Beschreibung der Fehler von

Annahmen bei externen Faktoren sowie von Vorhersagemodellen vor. Diese werden in einen Ansatz zur unternehmensübergreifenden Planung eingebettet, um realitätsnahe Planung zu erreichen.

#### 3.2 Unternehmensübergreifender Planungsansatz

Die unternehmensübergreifende Planung von Prozessketten stellt einige Anforderungen an die eingesetzte Methode. Da bei unternehmensübergreifender Planung nicht angenommen werden kann, dass alle beteiligten Unternehmen sämtliche Informationen miteinander teilen, kann keine zentrale Planungsebene vorausgesetzt werden. Daher sind Ansätze, die auf eine zentrale Planungsebene zurückgreifen, zu vermeiden. Die zweite Anforderung ist die Minimierung des notwendigen Informationsaustauschs. Durch die prozessübergreifenden Wirkbeziehungen kann dieser aber nicht gänzlich vermieden werden. Folglich muss im Rahmen der Methodenentwicklung das Mindestmaß an ausgetauschten Informationen definiert werden (zum Beispiel Werkstoffeigenschaften).

Neben diesen Anforderungen, die sich aus dem Anwendungsfall unternehmensübergreifender Planung ergeben, muss die Funktionsfähigkeit der Planung gewährleistet sein. Dies umfasst die Abbildbarkeit prozessübergreifender Wirkbeziehungen sowie die Verfolgung einer gemeinsamen, unternehmensübergreifenden Zielstellung. Diese ist hier die Minimierung entstehender Kosten über die gesamte Prozesskette. Zusätzlich ist die Sicherstellung der Einhaltung von Randbedingungen von Bedeutung.

In Bild 3 ist ein Ansatz zur Optimierung unter Berücksichtigung prozessübergreifender Wirkbeziehungen dargestellt.

Dieser Ansatz enthält keine zentrale Planungsebene. Um das Teilen von Kosteninformationen über Unternehmensgrenzen hinweg zu vermeiden, können diese Werte anonymisiert werden, indem nur Informationen über eine Verbesserung oder Verschlechterung geteilt werden. Jedem der Prozesse liegt ein

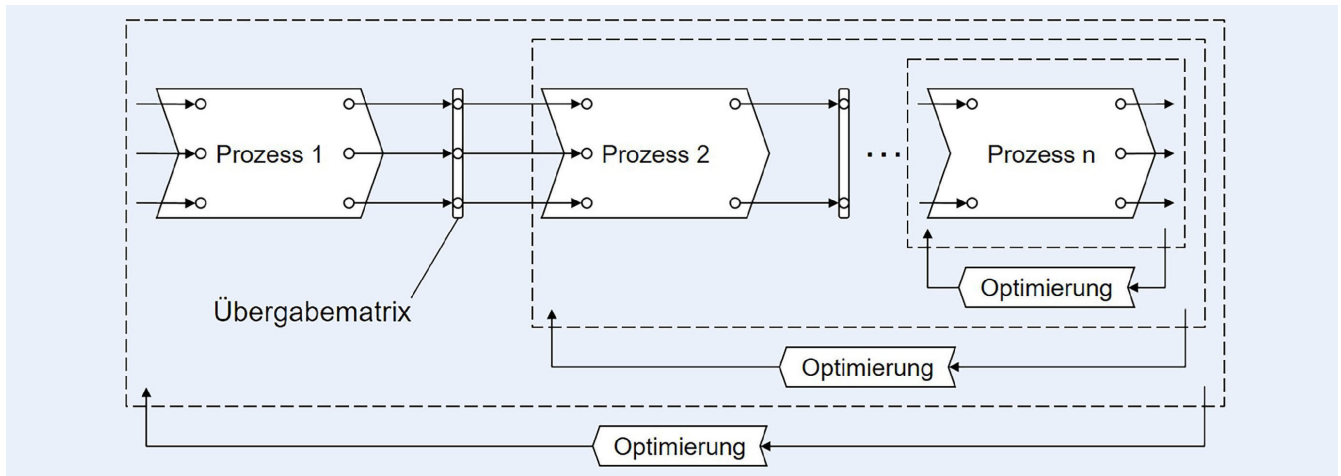


Bild 3. Unternehmensübergreifender Planungsansatz. Grafik: IFW

Prozessmodell zugrunde. Es erfolgt eine verschachtelte Planung durch iterative Optimierung, die aufgrund der Feedback-Schleifen eine Einbeziehung von vorangegangenen und nachfolgenden Prozessen erlaubt. Jeder Prozess ist von den eigenen Prozessstellgrößen ( $x_n$ ) sowie von den Auswirkungen auf die Folgeprozesse ( $y_n$ ) abhängig. Jeder Prozess erhält eine Übergabematrix vom vorangegangenen Prozess, die Informationen zum Zwischenprodukt enthält (wie geometrische Informationen oder Materialeigenschaften).

Anhand dieser Informationen wird ein Optimierungsprozess gestartet. Dies ermöglicht eine Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung des vorangegangenen Prozesses. In jeder Iteration des Optimierungsprozesses wird eine Übergabematrix erstellt, welche die resultierenden Informationen des neuen Zwischenprodukts enthält. Diese wird an den Folgeprozess weitergegeben, wodurch wiederum ein Optimierungsprozess initialisiert wird. Es resultiert eine verschachtelte Optimierung, deren Stufenanzahl der Prozessanzahl der Prozesskette entspricht:

$$\min_{x_1 \in X_1} f_1(x_1, y_1) \quad (1)$$

$$y_1 \in \arg \min_{x_2 \in X_2} f_2(x_2, y_2) \quad (2)$$

...

$$y_{n-1} \in \arg \min_{x_n \in X_n} f_n(x_n) \quad (3)$$

Für diesen Ansatz eignen sich besonders einzellösungsbasierte Optimierungsalgorithmen, da durch populationsbasierte Algorithmen der Rechenaufwand stark ansteigen würde.

Hier wird der Simulated-Annealing-Algorithmus [10] verwendet. Durch den stochastischen Anteil im Simulated Annealing wird der Algorithmus dazu befähigt, aus lokalen Optima herauszufinden. Im Falle unternehmensübergreifender Prozessketten führt dieser dezentralisierte Ansatz dazu, dass Entscheidungsfindungen (Prozessadaptionen) lokal im entsprechenden Unternehmen stattfinden können.

### 3.3 Einbindung modellierter Unsicherheiten

Der in Kapitel 3.2 beschriebene Planungsansatz hat zum Ziel, die Feinplanung sequenzieller Fertigungsprozesse aufeinander abzustimmen. Es wird also eine Entscheidungsfindung durchgeführt, bei der eine übergeordnete Zielgröße optimiert wird. Das

Ziel der Einbindung von Unsicherheiten ist eine Planung, die das Worst-Case-Szenario innerhalb der definierten Unsicherheitsgrenzen berücksichtigt. Somit wird die Planung realitätsnäher, da bei Fertigungsprozessen unvorteilhafte Abweichungen zu Vorhersagewerten nicht zu vermeiden sind. Dies wird erreicht, indem an jeder Stelle, an der eine unsicherheits- oder risikobehaftete Größe berechnet wird, ein Local-Search-Verfahren initiiert wird (Bild 4).

Mit dem Local-Search-Verfahren wird das Worst-Case-Szenario für die globale Zielgröße innerhalb der Abweichungsgrenzen der entsprechenden unsicherheits- beziehungsweise risikobehafteten Größe ermittelt. Bei einer globalen Minimierung von Energie- und Ressourcenverbräuchen wird im Local-Search-Verfahren folglich innerhalb der Abweichungsgrenzen ( $-\Delta, \Delta$ ) der Maximalwert dieser Größe lokalisiert. Jeder Prozess ist neben den eigenen Stellgrößen  $x$  und den Auswirkungen auf Folgeprozesse  $y$  auch von der Höhe der Unsicherheit  $\delta$  abhängig. Die Abweichungsgrenzen können für die durch Verteilungen modellierten Unsicherheiten mithilfe von Konfidenzintervallen angepasst werden. Die Wahl eines höheren Konfidenzintervalls führt so zu einem robusteren Planungsergebnis, da auch stärkere Abweichungen vom Erwartungswert mit geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden. Es resultiert ein min-max-Optimierungsproblem, da die minimalen Kosten bei Betrachtung des Worst-Case-Szenarios gesucht werden. Das Problem hat für eine zweistufige Prozesskette mit einer Unsicherheit im ersten Prozess die folgende Form:

$$\min_{x_1 \in X_1} \max_{\delta \in \Delta} f_1(x_1, y_1, \delta) \quad (4)$$

$$y_1 \in \arg \min_{x_2 \in X_2} f_2(x_2) \quad (5)$$

## 4 Evaluierung

Die Evaluierung des vorgestellten Ansatzes wird anhand der in Kapitel 2 vorgestellten Prozesskette durchgeführt. Für die einzelnen Prozesse wurden Prozessmodelle erstellt, die relevante Prozessgrößen wie Ressourcenaufwände und Zustände von Werkzeugen (Verschleiß) sowie Material (chemische Zusammensetzung) vorhersagen. Hierbei wurde sowohl auf analytische als auch auf datenbasierte Regressionsmodelle zurückgegriffen. Komplexere Zusammenhänge wie die chemischen Materialeigenschaften

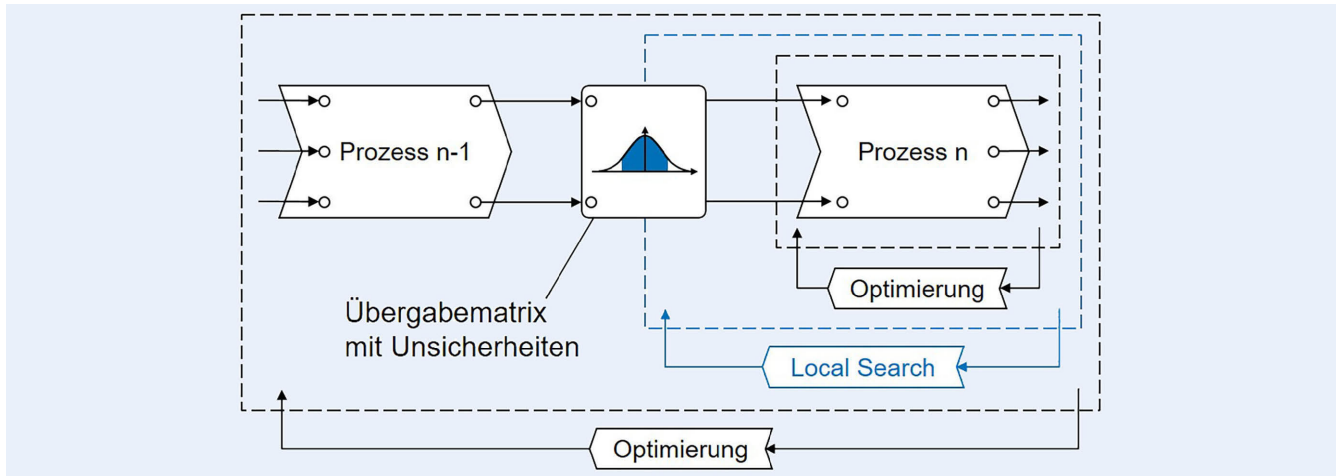


Bild 4. Einbindung modellierter Unsicherheiten in den Planungsansatz. Grafik: IFW

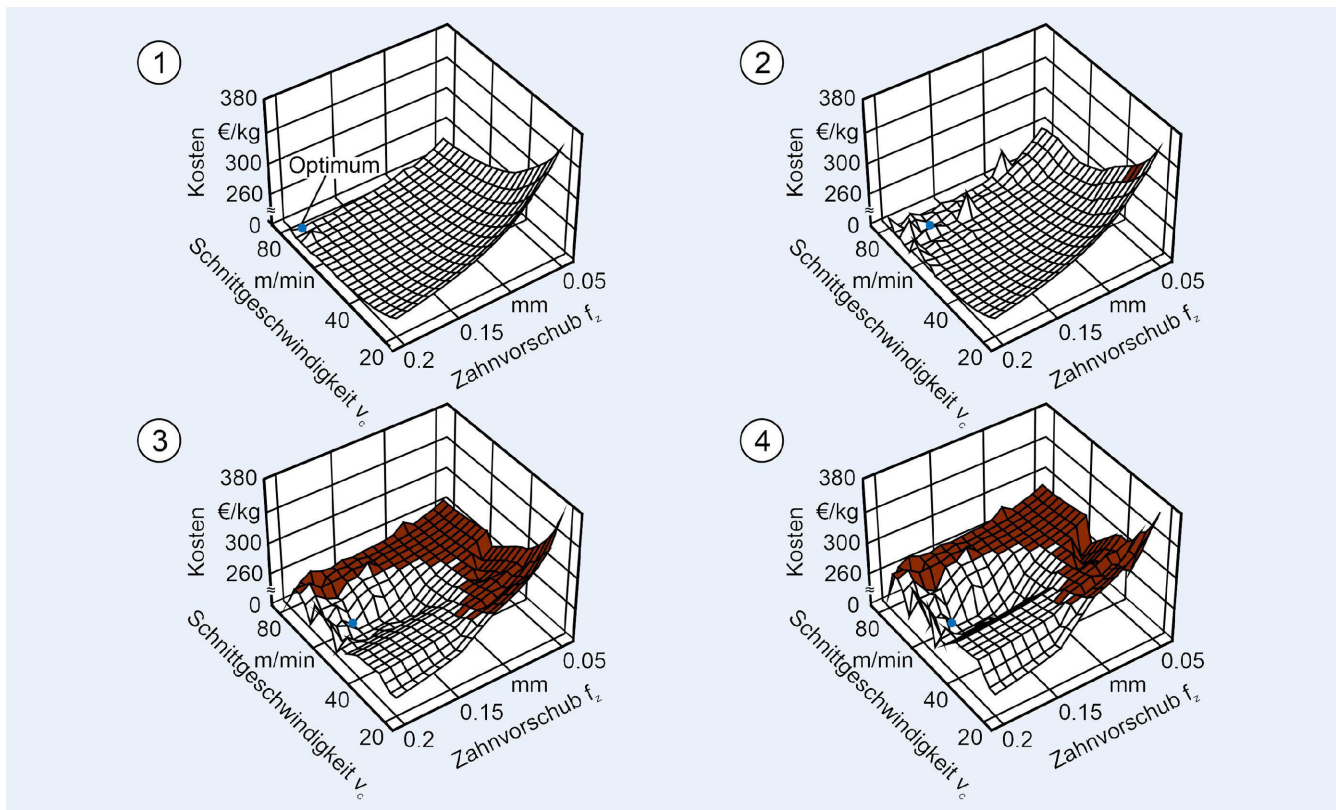


Bild 5. Zielfunktion des Fräsprozesses infolge der Unsicherheiten. Grafik: IFW

ten wurden durch eine Gauss-Prozess-Regression modelliert. Anschließend erfolgte eine Planung mit dem Ziel der Minimierung von Fertigungskosten über die gesamte Prozesskette. Für die Evaluierung wurden verschiedene Kombinationen auftretender Unsicherheiten berücksichtigt. Zunächst wurden die Auswirkungen der Unsicherheiten auf das Planungsproblem betrachtet.

In Bild 5.1 ist die Gestalt des Planungsproblems ohne Unsicherheiten dargestellt.

Das Planungsproblem bildet die Auswirkungen der Prozessstellgrößen Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  und Zahnvorschub  $f_z$  auf die Kosten der gesamten Prozesskette ab. Durch den Einfluss der Unsicherheit über den Werkzeugverschleiß im Fräsprozess (Bild 5.2) werden für einige Stellgrößenkombinationen die

Randbedingungen für die Grade-5-Spezifikation überschritten (rot eingefärbt) und es gibt lokale Peaks in der Zielgröße. Der zusätzliche Einfluss von Unsicherheiten über die Spaneigenschaften (Bild 5.3) erhöht die Komplexität stark. Das Planungsproblem ist nicht mehr konvex und es gibt einen großen Bereich des Lösungsraums, der nicht zulässig ist. Die weitere Berücksichtigung externer Unsicherheiten in Form eines schwankenden Titanpreises (Bild 5.4) führt dazu, dass Steigungen in der Zielfunktion größer werden.

Für jedes der vier Szenarien aus Bild 5 wurden Planungen mithilfe des vorgestellten Optimierungsansatzes durchgeführt, um die optimale Stellgrößenkombination zu lokalisieren. In Bild 6 ist

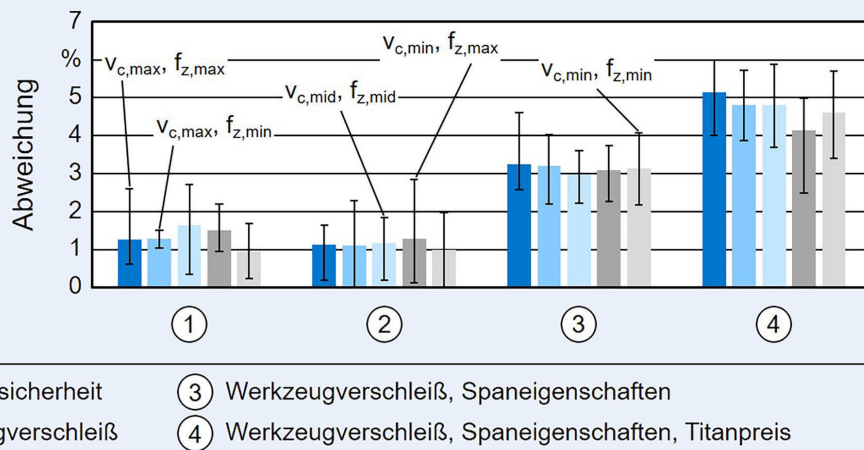


Bild 6. Planungsergebnisse der Optimierung des Fräsprozesses für verschiedene Unsicherheiten. Grafik: IFW

die Abweichung der Planungsergebnisse zum realen Optimum dargestellt.

Die Planung wurde mit 20 Iterationen durchgeführt und der Startpunkt der Optimierung innerhalb des festgelegten Suchraums der Stellgrößen  $v_c$  (Schnittgeschwindigkeit) und  $f_z$  (Zahnvorschub) variiert. Als Startpunkte wurden die Eckpunkte des Suchraums (Maximal- und Minimalwerte) sowie die Mitte des Suchraums erprobt. Jede Kombination aus Iterationsanzahl und Startpunkt wurde zehnmal durchgeführt, um die Wiederholgenauigkeit der Planungsmethode zu bewerten. Es ist erkennbar, dass sowohl bei der Planung ohne Unsicherheiten als auch mit nur einer Unsicherheit (Werkzeugverschleiß) die Lösung im Mittel nur eine Abweichung von etwa einem Prozent zum realen Optimum aufweist. Auch für die deutlich komplexeren Planungsprobleme (vergleiche Bild 5.3 und Bild 5.4) wurden durch eine automatisierte Entscheidungsfindung Abweichungen auf einem geringen Niveau von durchschnittlich 3 % beziehungsweise 4,5 % erreicht.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine steigende Anzahl von Unsicherheiten aufgrund der höheren resultierenden Komplexität des Planungsproblems eine höhere Iterationsanzahl des Planungsalgorithmus erfordert. Im Vergleich realisiert eine lokale Optimierung jeweils höhere Kosten durch Einstellung des höchsten Vorschubs und der höchsten Schnittgeschwindigkeit.

## 5 Fazit

Im Rahmen des durch das BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) geförderten Projekts „Return II“ wurde die dargestellte Methode zur unternehmensübergreifenden Planung entwickelt. Die Methode verzichtet auf eine zentrale Planungsinstanz, um die Notwendigkeit zum Teilen unternehmensinterner Informationen zu vermeiden. Zusätzlich wird die Qualität der erstellten Prozessmodelle (interne Unsicherheit) sowie getroffener Annahmen (externe Unsicherheit) in die Planung einbezogen, indem die Wahrscheinlichkeit von Abweichungen zum erwarteten Wert modelliert und im Planungsprozess berücksichtigt werden.

Im Rahmen der Evaluierung wurde die Planung für eine beispielhafte Prozesskette unter Berücksichtigung verschiedener Unsicherheiten durchgeführt. Dabei wurde beobachtet, dass eine steigende Anzahl von Unsicherheiten zu einem deutlich komple-

xeren Planungsproblem führt. Auch für den komplexesten Fall mit mehreren Unsicherheiten wurden Abweichungen des Planungsergebnisses zum realen Optimum von unter 5 % erreicht.

In weiteren Untersuchungen wird auch die Planung mit Blick auf die ökologische Nachhaltigkeit erforscht. Im Forschungsprojekt wird eine Planungsmethode zur Minimierung von Kosten und Ressourcen für unternehmensübergreifende Prozessketten entwickelt und untersucht. Für die unternehmensübergreifende Kooperation in der Praxis gilt es Anreizsysteme zu erarbeiten. Hier könnten Kostenausgleichsmechanismen dafür sorgen, dass global lohnende Prozessdurchführungen durch die weiteren angeschlossenen Partner subventioniert und der Gewinn verteilt wird. Als technische Infrastruktur bietet die vermehrte Verbreitung von digitalen Zwillingen das Potenzial den Datenaustausch dezentral zu koordinieren.

### FÖRDERHINWEIS

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts „Return II“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes.

### Literatur

- [1] Henning, H.: Modellbasierte Prozess-Adaption in der Feinplanung fertigungstechnischer Prozessketten. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2012
- [2] Denkena, B.; Henjes, J.; Henning, H.: Simulation-based dimensioning of manufacturing process chains. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4 (2011), pp. 9–14
- [3] Langwiler, A.: Fehlerfortpflanzung, Simulation und Optimierung von Prozessketten anhand der gebauten Nockenwelle. Zürich: Züricher Schriften zur Produktionstechnik 2011
- [4] Kennedy, M.; O'Hagan, A.: Bayesian calibration of computer models. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology) 3 (2001), pp. 425–464
- [5] ASTM B265–13ae1: Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Strip, Sheet, and Plate. Conshohocken, PA: ASTM International, 2013
- [6] Denkena, B.; Krödel, A.; Pyczak, F. et al.: Recycled Titanium Chips as Initial Product for the Atomisation Process of Powders for Additive Manufacturing to Increase Resource Efficiency. MIC Procedia (2021), pp. 89–97

- [7] Heidloff, A.; Rieken, J.; Anderson, I. et al.: Advancements in Ti Alloy Powder Production by Close-Coupled Gas Atomization. Proceedings of Powder Met (2011), pp. 1–14
- [8] Yule, A.; Dunkley, J.: Atomization of Melts: For Powder Production and Spray Deposition. Michigan: Clarendon Press 1994
- [9] Lubanska, H.: Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. JOM (1970) 2, pp. 45–49
- [10] van Laarhoven, P.J.M.; Aarts, E.H.L.: Simulated Annealing. In: Simulated Annealing – Theory and Applications. Dordrecht: Springer Verlag 1987, pp. 7–15



Prof. Dr.-Ing. **Berend Denkena**  
Foto: IFW

Dr.-Ing. **Marcel Wichmann**

**Simon Kettelmann**, M.Sc.

Institut für Fertigungstechnik  
und Werkzeugmaschinen (IFW)  
Leibniz Universität Hannover  
An der Universität 2, 30823 Garbsen  
Tel. +49 511 / 762-18351  
kettelmann@ifw.uni-hannover.de  
www.ifw.uni-hannover.de

LIZENZ



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