

Optimierte Auswahl von Fabrikelementen

Antonio Kreß* und
Joachim Metternich

Bei der Planung von Fabriken bestimmt die geeignete Auswahl der Fabrikelemente, wie gut eine Fabrik ihren geplanten Zweck erfüllt. Die Herausforderung bei den Auswahlentscheidungen besteht darin, die bestmögliche Auswahl in Bezug auf ein geplantes Ziel zu treffen, während gleichzeitig bestimmte Restriktionen, wie z. B. bei Budget oder Flächen, eingehalten werden müssen. In der Regel werden die Entscheidungen zur Auswahl von Fabrikelementen für jeden Fabrikbereich separat getroffen. Dabei wird entweder intuitiv oder auf der Basis von Heuristiken vorgegangen. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie die Auswahl auf Basis eines ganzheitlichen Optimierungsansatzes erfolgen kann, durch das eine nutzenoptimale Fabrikkonfiguration unter Betrachtung vorab definierter Budgets ermöglicht wird. Darüber hinaus werden ein einfaches, vierstufiges Vorgehen sowie ein softwarebasiertes Konfigurationssystem vorgestellt. Das Optimierungsmodell wurde genutzt, um die Forschungs- und Lernfabrik FlowFactory des Forschungsinstituts PTW zu konfigurieren.

Einleitung und Problemstellung

Bei der Planung von Fabriken werden Entscheidungen zur Auswahl von Fabrikelementen häufig isoliert voneinander getroffen. Die Verwendungsdauer der angeschafften Fabrikelemente beträgt meist mehrere Jahre bis teilweise Jahrzehnte. In dieser Zeit bestimmen einmal getroffene Entscheidungen maßgeblich die Qualität, Kosten, Liefertreue und Wandlungsfähigkeit einer Produktion. Dabei stehen für jeden Fabrikbereich meist mehrere Alternativen zur Verfügung: Im Bereich der Fräs-

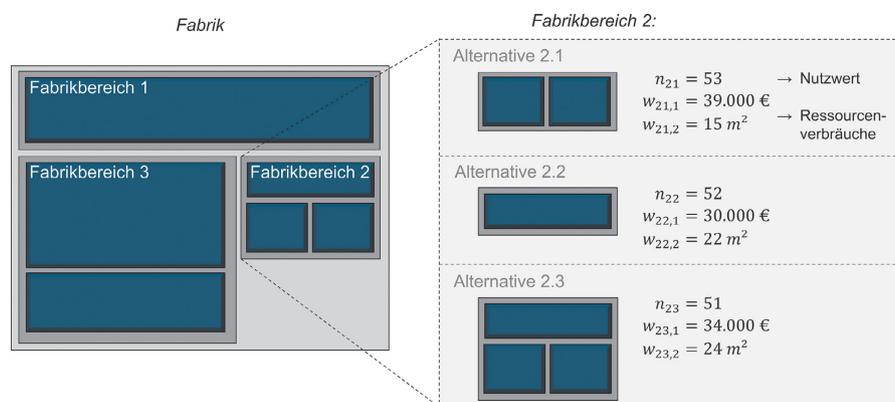


Bild 1. Problemstellung zur Auswahl an Fabrikelementen

* Korrespondenzautor

Dr.-Ing. Antonio Kreß; PTW an der Technischen Universität Darmstadt; Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt; Tel.: +49 (0) 6151 8229-654, E-Mail: A.Kress@PTW.TU-Darmstadt.de

Weiterer Autor

Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich; PTW an der Technischen Universität Darmstadt

Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer-Review).

Urheberrechtlich geschützt / In Copyright <https://rightsstatements.org/page/InC/1.0/>

bearbeitung könnten beispielsweise kleinere und günstigere Fräsbearbeitungszentren alternativ zu einer großen kostenintensiven Fräsmaschine angeschafft werden. Eine Alternative kann demnach auch mehrere Fabrikelemente enthalten. Bild 1 verdeutlicht diese Problemstellung am Beispiel von drei Fabrikbereichen mit je drei Alternativen, die einen unterschiedlich hohen Nutzen n_{ij} , unterschiedlich hohe Kosten $w_{ij,1}$ und unterschiedlich hohe Flächen

$w_{ij,2}$ aufweisen – mit insgesamt 27 Kombinationsmöglichkeiten. In der Realität werden wesentlich mehr Fabrikbereiche betrachtet und es liegen mehr Alternativen je Fabrikbereich vor: Bei zehn Fabrikbereichen mit je fünf Alternativen existieren bereits über 9 Millionen Kombinationsmöglichkeiten. Es wird deutlich, dass es sich bei der Auswahl von Fabrikelementen um eine sehr komplexe Aufgabe handelt, die der Mensch nur zufällig optimal lösen kann. Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz löst dieses Problem durch die Anwendung von Optimierungsalgorithmen.

Bisherige Ansätze zur Auswahl von Fabrikelementen

Unter Fabrikelementen werden in diesem Beitrag jegliche Betriebsmittel verstanden, die innerhalb der Fabrik für die Produktion zum Einsatz kommen. Zur Auswahl von Fabrikelementen ist zwischen praktischen und wissenschaftlichen Ansätzen zu unterscheiden. Nach dem Fabrikplanungsprozess der VDI 5200 ist die Auswahl von Fabrikelementen der vierten Phase – der Detailplanung – zuzuordnen [1].

Praktische Ansätze gehen in der Regel intuitiv vor, d. h. in Projektteams wird für jeden Fabrikbereich – ohne den Einsatz quantitativer Verfahren – eine Alternative auf Basis von Gruppendiskussionen und Meinungen ausgewählt.

Die bisher veröffentlichten wissenschaftlichen Ansätze lehnen sich an Modellen der multikriteriellen Entscheidungsfindung an. So wurden bisher die Verfahren wie Analytical Hierarchy Process [2], Analytical Hierarchy Network [3] und TOPSIS [4] zur Auswahl von Fabrikelementen angewendet. *Wiendahl et al.* schlagen vereinfacht eine Nutzwertanalyse vor [5]. Jedes dieser Verfahren betrachtet allerdings lediglich einen Fabrikbereich gleichzeitig – wie z. B. einen Bereich für Fräsmaschinen, einen Bereich für die Montage usw. Dadurch können einerseits übergeordnete Restriktionen – z. B. ein Gesamtbudget oder die Fabrikabmessungen – nicht betrachtet werden, es sei denn, diese werden vorher aufgeteilt. Andererseits besteht keine Garantie, dass man ein ganzheitliches Optimum für die Fabrik erreicht: Trifft man für jeden Fabrikbereich separat Entscheidungen, entstehen lokale Optima, die in Summe nicht das bestmögliche Ergebnis ergeben.

Optimierungsmodell zur Auswahl von Fabrikelementen

Zur Ermittlung eines objektiveren Ansatzes, mit dem die gesamte Fabrik betrachtet werden kann, eignen sich Optimierungsmodelle. Diese bestehen aus drei Bestandteilen: den Entscheidungsvariablen, der Zielfunktion sowie den Restriktionen [6]. Die Entscheidungsvariable soll angeben, welche Alternative an Fabrikelementen ausgewählt wurde. Hierzu eignet sich eine Binärvariable x_{ij} , die den Wert 1 annimmt, wenn die Alternative j im Fabrikbereich i ausgewählt wurde, und entsprechend den Wert 0, wenn nicht. Mithilfe der Zielfunktion soll die bestmögliche Auswahl an Fabrikelementen ermittelt werden können. Das heißt, dass der gesamte Nutzen aller ausgewählten Alternativen maximal sein sollte. Dieser gesamte Nutzen N setzt sich aus dem Summenprodukt der einzelnen Nutzwerte n_{ij} und den Entscheidungsvariablen x_{ij} zusammen. Vereinfacht ausgedrückt erhöht jedes eingesetzte Fabrikelement den Nutzen der Fabrik:

$$N = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J n_{ij} x_{ij} \rightarrow \max \quad (1)$$

Die einzelnen Nutzwerte n_{ij} können zum Beispiel mit einer Nutzwertanalyse berechnet werden. In dieser werden ausgehend von den Fabrikzielen Bewertungskriterien abgeleitet und gewichtet. Die Nutzwert n_{ij} ergibt sich dann aus dem Summenprodukt dieser Gewichtungen mit dem Erfüllungsgrad hinsichtlich der Bewertungskriterien.

Bezüglich der Restriktionen sollte zum einen das Summenprodukt aus den einzelnen (finanziellen oder baulichen) Ressourcenverbräuchen $w_{ij,r}$ und den Entscheidungsvariablen x_{ij} eine bestimmte Kapazitätsgrenze C_r nicht überschreiten: Beispielsweise sollte die Summe der Kosten kleiner

oder gleich dem verwendbaren Budget sein. Zum anderen sollte für jeden Fabrikbereich i nur eine Alternative j ausgewählt werden:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_{ij,r} x_{ij} \leq C_r \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad (3)$$

Zusätzlich sollten die einzelnen Abmessungen der Fabrikelemente betrachtet werden. Beim Optimierungsmodell handelt es sich, anlehnend an das Facility Layout Problem, um ein Facility Configuration Problem. Weitere Details zur Modellierung der Abmessungen sowie ein exakter Algorithmus zur Lösung des Facility Configuration Problems finden sich in *Kress (2022) [7]*.

Vorgehen zur praktischen Anwendung

Wie lässt sich nun das Optimierungsmodell in der Praxis anwenden? Hierzu wird im Folgenden ein einfaches Vorgehen vorgestellt, das in Bild 2 dargestellt ist und bereits zur Konfiguration von Lernfabriken genutzt wurde [8].

Im ersten Vorgehensschritt werden die Anforderungen an die Fabrikkonfiguration ermittelt, die sich einerseits in Muss- und andererseits in Kann-Anforderungen unterteilen. Grundsätzlich leiten sich die Anforderungen aus den übergeordneten Rahmenbedingungen (wie einem verfügbaren Gesamtbudget oder der bebaubaren Fabrikfläche), aus den herzustellenden Produkten oder den zur Herstellung benötigten Prozessen ab. Auch Unsicherheiten zum Budget oder Make-or-Buy-Entscheidungen können berücksichtigt werden. Am Ende des ersten Vorgehensschritts sind alle Anforderungen ermittelt.

Im zweiten Vorgehensschritt werden aus den Muss-Anforderungen mögliche Al-



Bild 2. Vorgehen zur Auswahl an Fabrikelementen

Summary			
Product	Product 2		
Σ Utility	6221	91,61%	
Σ Costs	99.639,53 €	99,64%	
Σ Area	249,05	41,86%	

Details					
Factory area	Chosen alternative	Utility	Costs	Area	Rank
Factory area 2.1	Alternative 2.1.1	679	10.101,06 €	34,34	1
Factory area 2.2	Alternative 2.2.3	492	5.707,51 €	18,70	3
Factory area 2.3	Alternative 2.3.2	657	16.197,91 €	34,69	2
Factory area 2.4	Alternative 2.4.1	679	11.556,71 €	24,36	1
Factory area 2.5	Alternative 2.5.1	679	9.347,88 €	29,28	1
Factory area 2.6	Alternative 2.6.1	679	5.142,02 €	28,58	1
Factory area 2.7	Alternative 2.7.1	679	11.403,28 €	22,46	1
Factory area 2.8	Alternative 2.8.4	341	1.431,82 €	23,37	4
Factory area 2.9	Alternative 2.9.2	657	14.465,71 €	16,16	2
Factory area 2.10	Alternative 2.10.1	679	14.285,63 €	19,10	1

Bild 3. Konfigurations-system zur Auswahl von Fabrikelementen [7]

Calculate configuration
Set layout
Calculate smaller configuration
Calculate feasible configuration
Compare

Criteria	Utility
Interaction capability	97%
Implementation of design principles	87%
Integrability of errors	97%
Closeness to reality	97%
Actuality	93%
Innovation	93%
Universality	87%
Modularity	93%
Mobility	73%
Compatibility	90%
Scalability	97%
Sustainability	93%
Preparation effort	90%

alternativen für die jeweiligen Fabrikbereiche identifiziert. Hierzu werden zunächst aus den zu berücksichtigenden Prozessen Fabrikbereiche hergeleitet. Die potenziellen Alternativen bestehen, wie bereits erwähnt, aus einem oder mehreren Fabrikelementen. In diesem Schritt werden die notwendigen Informationen für die baulichen und finanziellen Ressourcen der Alternativen eingeholt. Make-or-Buy-Entscheidungen können durch eine entsprechende zusätzliche Alternative ohne Nutzen, Kosten und Fläche abgebildet werden.

Im dritten Vorgehensschritt erfolgt die Bewertung der identifizierten Alternativen. Hierfür eignet sich eine Nutzwertanalyse [5, 9], in der alle Alternativen auf Basis festgelegter und gewichteter Kriterien einheitlich bewertet werden. Geeignete Kriterien werden aus den Zielen der Fabrikplanung bzw. aus den Kann-Anforderungen im ersten Vorgehensschritt hergeleitet. Beispiele für Kriterien können der Einsatz von Technologien [10] sowie die Wandlungsbefähiger (Universalität, Modularität, Kompatibilität, Skalierbarkeit, Mobilität) [5] sein. Diese können mit einem Paarvergleich gewichtet werden [11].

Im vierten Vorgehensschritt erfolgt die tatsächliche Auswahl durch die Anwendung von Lösungsalgorithmen [7]. In diesem Rahmen wurde ein Branch-and-Bound-Algorithmus entwickelt, der die ex-

akte Lösung des Facility-Layout-Problems finden kann. Im Gegensatz zum Brute-Force-Ansatz werden nicht alle möglichen Lösungen untersucht, der Algorithmus identifiziert weite Teile des Lösungsraums, die nicht optimal sein können. Außerdem kann das Ergebnis durch die Variation der Gewichtungswerte (aus dem dritten Vorgehensschritt), des Budgets und weiteren Eingabewerten analysiert werden, wie die praktische Anwendung im Folgenden zeigt. Dabei wird beispielsweise ersichtlich, mit welchem zusätzlichen Budget die nächstbessere Konfiguration ermöglicht wird. Außerdem kann eine effiziente Abwägung zwischen höchstmöglichen Nutzen und den Kosten getroffen werden. Auf Basis dieser Analysen verbessert sich die Entscheidungsfindung.

Software basiertes Konfigurationssystem

Das Optimierungsproblem sollte im vierten Vorgehensschritt nicht manuell gelöst werden, da dies zu fehleranfällig ist und eine zu lange Zeit in Anspruch nehmen würde. Aus diesen Gründen wurde ein softwarebasiertes Konfigurationssystem entwickelt, in welchem die Optimierungsalgorithmen hinterlegt sind [7]. Nachdem die benötigten Daten eingegeben wurden, kann die optimale Konfiguration ermittelt

bzw. analysiert werden. Bild 3 zeigt das ermittelte Ergebnis eines fiktiven Anwendungsfalls. Im oberen Bereich sind der relative Nutzen der gesamten Konfiguration sowie die Summe der Kosten und Flächen angegeben. Im mittleren Bereich werden die ermittelten Alternativen mit den entsprechenden Nutzenwerten, Kosten und Flächen angezeigt. Im unteren Bereich finden sich einerseits die Erfüllungsgrade der einzelnen Kriterien sowie ein Layout als ersten Entwurf.

Anwendung in der FlowFactory

Die optimierte Auswahl wurde zur Konfiguration der Forschungs- und Lernfabrik FlowFactory des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der TU Darmstadt eingesetzt. In der FlowFactory entsteht eine für Forschung und Transfer genutzte kundenindividuelle, schlanke Produktion auf dem neuesten Stand der Technik. Bild 4 zeigt eine Nutzen-Budget-Kurve, die bei der Anwendung des Vorgehens erstellt wurde. Dabei wurden für einen bestimmten Bereich des Budgets jeweils optimale Fabrikkonfigurationen mit den entsprechenden Nutzwerten ermittelt. So ist ersichtlich, wie sich der optimale Nutzen im Verhältnis zum eingesetzten Budget verändert.

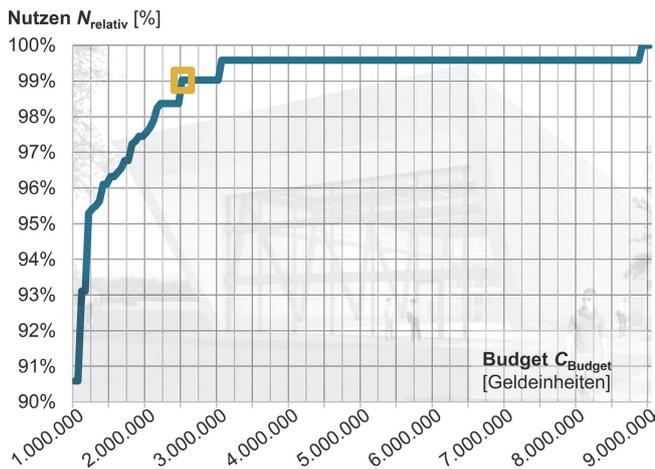


Bild 4. Nutzen-Budget-Kurve bei der Anwendung der optimierten Auswahl

In der Darstellung wird deutlich, dass der Nutzen zunächst bei einem verhältnismäßig kleinen Budget stark wächst und anschließend immer mehr Budget zur Nutzensteigerung notwendig ist. Bei der Fabrikkonfiguration zeigt sich demnach der Pareto-Effekt.

Zusammenfassung

Während bisher Investitionsentscheidungen für Fabrikelemente subjektiv und nicht ganzheitlich betrachtet wurden, wird in diesem Beitrag ein Vorgehen gezeigt, wie diese Entscheidungen algorithmenbasiert und unter Berücksichtigung sämtlicher Randbedingungen getroffen werden können. Weitere Details zum Vorgehen, der Anwendung in der FlowFactory sowie einem entwickelten Konfigurationssystem lassen sich aus Kress (2022) entnehmen [7]. Das dargestellte Vorgehen wurde für eine weitere industrielle Lernfabrik sowie zur Rekonfiguration einer bestehenden Fabrik angewendet. Es kann also auch für Investitionsentscheidungen im Brownfield verwendet werden, wenn beispielsweise einzelne Fabrikbereiche aufgewertet werden sollen. Im Vergleich zum intuitiven Vorgehen entsteht ein höherer Anwendungsaufwand nur im Fall nicht recherchierter jedoch relevanter Daten. Mithilfe der optimierten Auswahl an Fabrikelementen ist nun möglich, das Produktionssystem zukünftiger Fabriken optimiert und objektiv zu gestalten.

Literatur

1. Verein Deutscher Ingenieure e. V.: VDI 5200 Blatt 1: Fabrikplanung – Planungsvorgehen. Beuth Verlag, Berlin 2011

2. Ayağ, Z. : A Hybrid Approach to Machine-tool Selection through AHP and Simulation. International Journal of Production Research 45 (2007) 9, S. 2029–2050 DOI:10.1080/00207540600724856

3. Paramasivam, V.; Senthil, V.; Ramasamy, N.R.: Decision Making in Equipment Selection – An Integrated Approach with Digraph and Matrix Approach, AHP and ANP. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 54 (2011) 9-12, S. 1233–1244 DOI:10.1007/s00170-010-2997-4

4. Athawale, V.M.; Chakraborty, S.: A TOPSIS Method-based Approach to Machine Tool Selection. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Dhaka, Bangladesh, January 9–10, 2010

5. Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Reichardt, J.: Handbuch Fabrikplanung – Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Carl Hanser Verlag, München 2014 DOI:10.3139/9783446437029.fm

6. Sioshansi, R.; Conejo, A.J.: Optimization in Engineering – Models and Algorithms. Springer International, Cham 2017 DOI:10.1007/978-3-319-56769-3

7. Kreß, A.: Methodik zur Konfiguration von Lernfabriken für die schlanke Produktion. Zugl.: Dissertation, PTW der TU Darmstadt 2022; Shaker Verlag, Düren 2022

8. Kreß, A.; Metternich, J.: Procedure for the Configuration of Learning Factories – Application in Industry and Comparison. In: Proceedings of the 12th Conference on Learning Factories (CLF 2022), April 11, 2022, S. 1–6. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4071863> or DOI:10.2139/ssrn.4071863

9. Zionts, S.; Wallenius, J.: An Interactive Multiple Objective Linear Programming Method for a Class of Underlying Nonlinear Utility Functions. Management Science 29 (1983) 5, S. 519–529 DOI:10.1287/mnsc.29.5.519

10. Kreß, A.; Metternich, J.: Einsatz von digitalen Technologien in Lernfabriken – Use Cases der

Prozesslernfabrik „Center für industrielle Produktivität“. Factory Innovation (2022) [im Druck]

11. Bradley, R. A.; Terry M. T.: Rank Analysis of Incomplete Block Designs – The Method of Paired Comparisons. Biometrika 39 (1952) 3-4, S. 324–345 DOI:10.1093/biomet/39.3-4.324

Die Autoren dieses Beitrags

Dr.-Ing. Antonio Kreß, geb. 1989, studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit der technischen Fachrichtung Maschinenbau an der Technischen Universität Darmstadt. Er ist seit 2017 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am PTW in der Forschungsgruppe „Center für industrielle Produktivität“ der Technischen Universität Darmstadt und promovierte im Jahr 2022 im Bereich Produktionsmanagement.

Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich, geb. 1968, ist Institutsleiter des Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) an der Technischen Universität Darmstadt und leitet die Forschungsgruppen „Center für industrielle Produktivität“ und „Management industrieller Produktion“.

Abstract

Optimized Selection of Factory Elements. In factory planning, the appropriate selection of factory elements determines how well a factory fulfills its intended purpose. The challenge in making selection decisions is to make the best possible selection in relation to a planned target, while at the same time meeting certain restrictions, such as on budget or floor space. In general, factory element selection decisions are made separately for each factory area. This is done either intuitively or on the basis of heuristics. In this paper, we show how the selection can be based on a holistic optimization approach, which enables a utility-optimal factory configuration considering predefined budgets. In addition, a simple four-step approach and a software-based configuration system are presented. The optimization model was used to configure the research and learning factory FlowFactory of the research institute PTW.

Schlüsselwörter

Fabrikplanung, Fabrikelemente, Betriebsmittel, Entscheidungsproblem, Optimierungsmodell

Keywords

Factory Planning, Factory Elements, Equipment, Decision Problem, Optimization Model

Bibliography

DOI:10.1515/zwf-2023-1026
 ZWF 118 (2023) 3; page 111 – 114
 © 2023 Walter de Gruyter GmbH,
 Berlin/Boston, Germany
 ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896