

Simulationsbasierte Optimierung von Farbgebungsanlagen

Simulation-based Optimization of Paint Shops

Marco Lemessi

Deere & Company European Office, Mannheim (Germany)
LemessiMarco@JohnDeere.com

Simeon Rehbein, Thomas Schulze

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg (Germany)
Simeon.Rehbein@st.ovgu.de, tom@iti.cs.uni-magdeburg.de

Abstract: The strategic planning of paint shops concerning a good factory layout is in reality influenced by several factors and restrictions. Hence classical mathematical optimization methods do not work properly due to the high level of complexity in factory planning. Recently simulation-based optimization has been becoming more and more common because simulation has more freedom in terms of system modeling. This paper presents the goals, restrictions and constraints for the simulation-based optimization of a factory layout alternative, bounded by a given painting process. We present the modeling environment and model generation with a generic strategy as well as an iterative heuristic optimization approach to improve a start layout alternative generated in the factory planning process.

1 Motivation

Die Nutzung von Simulationsmodellen zur betrieblichen Planungsunterstützung ist seit vielen Jahren bewährt. Dabei werden unterschiedliche Varianten durchgerechnet und auf der Grundlage des Ergebnisvergleiches die entsprechenden Varianten bewertet. In den letzten Jahren wuchs das Interesse an simulationsbasierter Optimierung. Grund dafür ist unter Anderem, dass reale betriebliche Entscheidungsprobleme oft durch ein hohes Maß an Komplexität gekennzeichnet sind und sich nicht analytisch oder durch Enumeration lösen lassen (WEIGERT u.a. 2008). Anwendungsgebiete sind sowohl in dem strategisch konzeptionellen Fabrikplanungsprozess (GÜRKAN 2000), als auch in der operativen Produktionssteuerung zu finden (WEIGERT u.a. 2008; KOHN u.a. 2009). Ziele des Einsatzes von simulationsbasierter Optimierungstechniken sind unter Anderem Verbesserung betrieblicher Abläufe und Reduzierung von Investitionskosten und Planungszeiten. Dabei steht oft das

Finden von "guten" und nicht immer der optimalen Variante im Vordergrund. Die verwendeten Optimierungsmethoden erstrecken sich von klassischen Methoden aus dem OR bis hin zu applikationsspezifischen Heuristiken. Dabei sollen "gute" Ergebnisse in kurzer Zeit berechnet werden können (WIEDEMANN u.a. 2003).

Die Planung von Farbgebungsanlagen ist ein komplexer Prozess. Ein Ziel bei der Dimensionierung derartiger Anlagen ist es, einen definierten Durchsatz beispielsweise in Teilen pro Tag oder Woche zu erreichen. Auf Grund der großen Teilevielfalt und unterschiedlichen Tagesprogrammen können diese Ergebnisse auf analytischem Weg nur sehr grob geschätzt werden. Daher werden Simulationsmodelle verwendet, die eine wesentlich exaktere Schätzung der benötigten Kennzahlen ermöglichen. Dieses gewünschte Ziel lässt sich mit unterschiedlichen Dimensionierungsvarianten erreichen, wobei die Anzahl der möglichen Varianten sehr groß ist. Das Ziel der Planung ist es nun, die Variante zu finden, die auf der einen Seite den geforderten Durchsatz garantiert und auf der anderen Seite mit minimalen Investitionskosten errichtet werden kann.

Aus diesem Grund wurde zur Unterstützung der Planung von Farbgebungsanlagen für ein existierendes generisches Simulationsmodell ein Optimierungs-Commander entwickelt, der selbstständig die zu untersuchenden Dimensionierungsvarianten aussucht und bewertet, sowie den Optimierungsvorgang nach entsprechenden Abbruchkriterien beendet. Die durchzuführenden Abläufe werden vor dem Nutzer verborgen. Ein dazugehöriges Interface mit grafischer Oberfläche gestattet einen nutzerspezifischen Zugang.

2 Generische Modellierung von Farbgebungsanlagen

Eine Farbgebungsanlage wird als Fördersystem (Power and Free Conveyor) betrachtet, in dem verschiedene Teiltypen auf Ladungsträgern durch das System geschleust werden. Zur Beschreibung des methodischen Vorgehens bei der Simulation von Farbgebungsanlagen sei auf (WILLIAMS 1997) verwiesen. Das zugrundeliegende Modell ist als Graph mit gerichteten Mehrfachkanten und Knoten zu betrachten. Abbildung 1 zeigt eine schematische Sicht auf die Modellstruktur.

Die Knoten im Netzwerk werden als Stationen und die Kanten als Pfade bezeichnet. An den Stationen werden dabei konkrete Arbeitsschritte vollzogen, wie die Be- und Entladung der Ladungsträger, oder Wertschöpfungsprozesse entsprechend den Erfordernissen der Teile. Des Weiteren bewegen sich die Ladungsträger auf den Pfaden, denen Bearbeitungsbereiche, wie Trockenöfen, zugeordnet werden können.

Die Grundidee eines generischen Simulationsmodells ist es, dass zur Laufzeit des Modells aus einer Modellklassen-Bibliothek die benötigten Objekte generiert und instanziiert werden, sowie die Simulation angestoßen wird. Bei der hier angewandten generischen Modellierung ist das konzeptuelle Modell vollständig in einer Datenbank gespeichert. Beim Start des Simulationsprogrammes wird die Datenbank ausgelesen und die entsprechenden aktiven und passiven Modellierungsobjekte aus einer entsprechenden Klassenbibliothek instanziiert. Danach erfolgt der Start des Simulators. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass nur ein konzeptuelles Modell erstellt werden muss und die Generierung des eigentlichen Simulationsmodells automatisch

erfolgt. Im vorliegenden Fall wird als Simulationssystem SLX von der Wolverine Software Corporation genutzt.

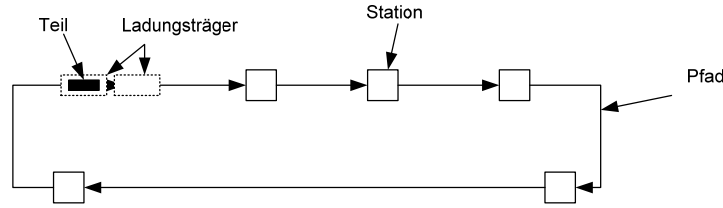


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Simulationsmodells

3 Optimierungsziel und -funktion

Die Anzahl der Ladungsträger und die notwendigen Längen der Pfade beeinflussen wesentlich die Investitionskosten einer Farbgebungsanlage. Das Optimierungsziel lässt sich somit als Minimierung der Investitionskosten in Abhängigkeit von den Kriterien minimale Investitionskosten für die Ladungsträger und minimale Investitionskosten für die Pfade beschreiben. Die Optimierungsalternative A_j besteht somit aus den Variablen $nL_{j,i}$ und $nP_{j,k}$, wobei $nL_{j,i}$ die Anzahl der Ladungsträger für den Ladungsträgertyp i und $nP_{j,k}$ die Länge für den Pfad k in der Alternative j darstellen.

$$A_j = \begin{pmatrix} nL_{j,i} \\ nP_{j,k} \end{pmatrix}, \text{ mit } j = 1 \dots m \text{ und } i = 1 \dots y \text{ und } k = 1 \dots z, \text{ wobei } y \text{ die Anzahl der}$$

Ladungsträgertypen und z die Anzahl der Pfade widerspiegelt.

$$nL_{j,i} \in \mathbb{N} \quad j=1\dots m \text{ und } i=1\dots y, \quad nP_{j,k} \in \mathbb{R}^+ \quad j=1\dots m \text{ und } k=1\dots z \quad \text{und } m, y, z \in \mathbb{N}.$$

Des Weiteren bezeichnet IK_j die benötigten Investitionskosten für eine Alternative j bestehend aus:

- Dem Produkt aus den Investitionskosten IKC_i für einen Ladungsträger des Typs i und seiner Anzahl $nL_{j,i}$ über alle Ladungsträgertypen y und
- Dem Produkt aus den Investitionskosten $IKPL_k$ für eine Längeneinheit des Pfades k und seiner Längen $nP_{j,k}$ über alle Pfade z .

$$\text{Mit } IK_j \in \mathbb{R}^+ \forall j=1\dots m, \quad IKC_i \in \mathbb{R}^+ \forall i=1\dots y \quad \text{und} \quad IKPL_k \in \mathbb{R}^+ \forall k=1\dots z.$$

Ziel der Optimierung ist daher eine Alternative j zu finden, die die Kostenfunktion K minimiert.

$$\min \rightarrow IK_j = K(A_j) = \sum_i^y IKC_i \cdot nL_{j,i} + \sum_k^z IKPL_k \cdot nP_{j,k} \quad (1)$$

Als lineare Nebenbedingungen gelten:

1. Die minimale Länge eines Pfades ist c_k und darf nicht unterschritten werden.

$$c_k \leq nP_{j,k} \quad \forall k=1\dots z, \forall j=1\dots m \quad \text{und} \quad c_k \in \mathbb{R}^+ \quad (2)$$

2. Der aus der Simulation resultierende Produktionsdurchsatz $PD_{j,q}$ für jeden Produkttyp q , hat dem vorgebenden Zieldurchsatz ZD_q für jeden Teiletyp q zu entsprechen. In diesem Zusammenhang wird der zu erreichende Durchsatz für jeden Teiletyp in Teilen pro Zeiteinheit spezifiziert. Für die während der Optimierung erzeugten Alternativen A_j werden mehrere Simulationsläufe durchgeführt. Dies ermöglicht eine statische Auswertung, basierend auf dem Mittelwert und dem sich ergebenden Konfidenzintervall, bei gegebenen Konfidenzniveau. Das Ergebnis der Auswertung ist der Produktionsdurchsatz $PD_{j,q}$, für jeden Teiletyp q . Φ stellt in diesem Zusammenhang die Transformation von A_j , durch die mehreren Läufe, dar. Als Ergebnis der Transformation von A_j ergeben sich die gemittelten und auf Konfidenz überprüften Produktionsdurchsätze $PD_{j,q}$ und somit gilt:

$$\Phi(A_j) = PD_{j,q} \geq ZD_q \forall q = 1 \dots w, \forall j = 1 \dots m \text{ mit } PD_{j,q} \in R^+ \text{ und } ZD_q \in R^+, \quad (3)$$

wobei w der Anzahl der Produkttypen entspricht.

Eine Alternative j ist somit dann erfolgreich/valide, wenn beide Restriktionen (2) und (3) erfüllt sind.

4 Optimierungungsverfahren

Das verwendete Optimierungsverfahren ist ein heuristisches Verfahren. Während der Optimierung sind beide Kriterien zu erfüllen. Im entsprechenden Algorithmus werden die Parameter für beide Kriterien nicht gleichzeitig sondern sequentiell verändert. Zuerst werden die Pfadlängen $nP_{j,k}$ über alle Pfade optimiert unter konstanten $nL_{j,i}$. Erst wenn keine Verbesserung entsprechend der Randbedingungen der Pfadlängen mehr erreicht werden kann, erfolgt die Optimierung der Anzahl der Ladungsträger $nL_{j,i}$ unter nun konstanten Pfadlängen.

Ein Zyklus durch diese Sequenz wird als "Loop" bezeichnet. Während der Optimierung können mehrere Loops durchlaufen werden. So kann die Minimierung der Pfadlängen einen neuen Ausgangszustand erzeugen, der wiederum durch eine erneute Reduzierung der Anzahl der Ladungsträger verbessert werden kann. Kann keine Reduzierung der beiden Kriterien mehr erfolgen, so wird die Optimierung abgebrochen.

Abbildung 2 zeigt den Ablauf der Teiloptimierung für die Reduzierung der Ladungsträger. Auch ist es möglich nur, eines der beiden Kriterien zu optimieren. In diesem Fall werden keine multiplen Loops durchgeführt.

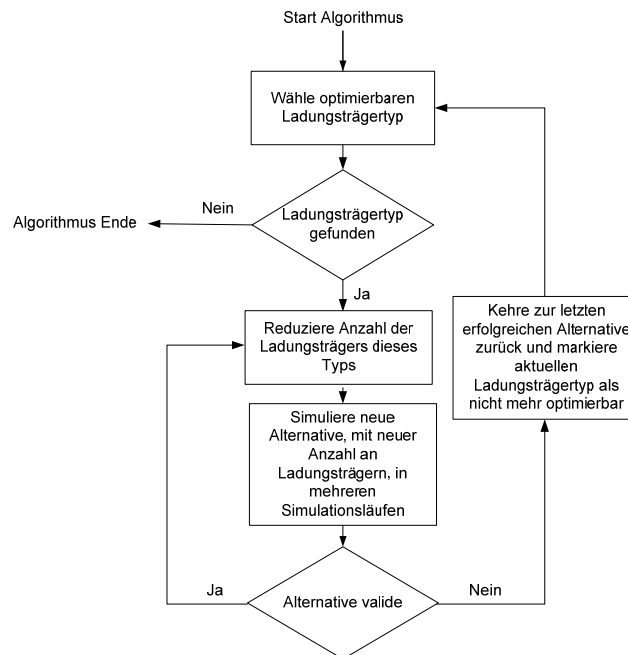


Abbildung 2: Darstellung des Optimierungsalgorithmus für die Ladungsträgerreduktion

5 Ausführungsgeschwindigkeit der Optimierung

Eine Anforderung an die IT-Lösung ist, dass die Optimierung in einer "akzeptablen" Zeit durchgeführt wird. Es sind häufig 80 bis 100 Varianten durchzurechnen, wobei aufgrund der Stochastik in den Eingangsdaten für jede Alternative durchschnittlich 30 Läufe zu berechnen sind. Es ergibt sich als grober Schätzwert eine Anzahl von 2700 Läufen ($90 \cdot 30$), die in Verbindung mit einer Optimierung auszuführen sind. Unter den Annahmen, dass die Optimierung innerhalb von 8 Stunden beendet sein soll und die Simulationsläufe sequentiell ausgeführt werden, ergibt sich eine mittlere Rechenzeit von 11 Sekunden pro Lauf. Dieses Zeitlimit stellt eine wesentliche Anforderung an die Implementierung der Optimierungslösung dar.

Der generische Modellierungsansatz erlaubt ein einfaches Adaptieren des erzeugten Modellquellcodes hinsichtlich der Rechengeschwindigkeit. Alle nicht für Optimierung notwendigen Verarbeitungsschritte, wie Ausgabe von speziellen Ergebnisdateien und die Berechnung von Animationsinformationen, werden nicht ausgeführt.

Des Weiteren werden das Lesen von nichtveränderbaren Eingabeparametern und das Instanzieren von stationären Objekten nur einmal ausgeführt. Nach einem Lauf werden temporäre Objekte vernichtet und stationäre Objekte werden mit entsprechenden Methoden zurückgesetzt, als auch die entsprechenden Zufallszahlengeneratoren neu initialisiert.

Durch die oben geschilderten Maßnahmen konnte die Ausführungsgeschwindigkeit für einen Lauf um 8 % erhöht werden.

6 Nutzerunterstützung bei der Optimierung

Eine weitere Anforderung ergibt sich aus der Sicht des Nutzers, der bei der Durchführung der Optimierung unterstützt werden muss. (WIEDEMANN u.a. 2003). Das bedeutet im Einzelnen, dass die notwendigen Aktivitäten, wie die Bewertung von Varianten, die Bestimmung einer neuen Variante, der Abbruch der Simulationsläufe für eine Variante und der Abbruch der Optimierung "automatisch", d.h. vor dem Nutzer verborgen, ablaufen.

Die Nutzerführung zur Optimierung wurde in eine bestehende graphische Benutzerschnittstelle zur SLX-basierten Modellgenerierung von Farbgebungsanlagen integriert. Diese Softwarekomponente wird als Optimierungs-Commander bezeichnet. Dieser Commander hat die Aufgabe, den Nutzer bei der Konfiguration, der Durchführung und Auswertung bzw. Interpretation der Optimierung zu unterstützen. So werden beispielsweise vor dem Start der Optimierung festgelegt, welche Pfade optimierbar sind im Sinne der 1. Nebenbedingung und welcher maximale Zieldurchsatz durch das System erreicht werden soll.

7 Beispiel

Im Weiteren soll ein Anwendungsfall beschrieben werden, bei dem der obige Optimierungs-Commander eingesetzt wird, um den Fabrikplanungsprozess zu unterstützen. Die zu optimierende Farbgebungsanlage befindet sich in der konzeptionellen Planungsphase, in der die entsprechenden Förderstrecken zu dimensionieren und das Fabriklayout hinsichtlich der Farbgebungsanlage zu planen ist. Die Ausgangsparameter des Modells sind in Tabelle 1 dargestellt.

Parameter	Wert
Anzahl der Pfade	56
Gesamtlänge des Fördersystems	384,17[m]
Anzahl der Ladungsträger	80
Soll-Produktion (Über alle TeileTypen)	2330 [Teile/Woche]

Tabelle 1: Ausgangsparameter des zu optimierenden Modells

Eine schematische Sicht auf das Modell zeigt Abbildung 3. Das Modell besteht aus einem geschlossenen Kreislauf und jeweils aus einem Bereich für die Be- und Entladestationen, an dem die Ladungsträger beladen bzw. entladen werden. Die Funktionseinheiten entlang der gerichteten Kanten sind in dieser Ansicht nicht dargestellt, da diese für die Optimierung eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Durchführung der Optimierung nimmt eine Gesamtrechenzeit von ca. 4,5 Stunden in Anspruch. Während der Optimierung werden 72 valide Alternativen gefunden, die dem geforderten Soll-Produktionsdurchsatz entsprechen, wobei für jede Alternative zwischen 10 und 15 Läufe durchgeführt werden. Die erreichte Endvariante der Optimierung reduziert die Ausgangsvariante um eine Förderstreckenlänge von 148 m und 16 Ladungsträger. Diese Änderung führt zu einer deutlichen Verringerung der Investitionskosten. Die optimierten Bereiche sind in Abbildung 3 mit Ellipsen hervorgehoben.

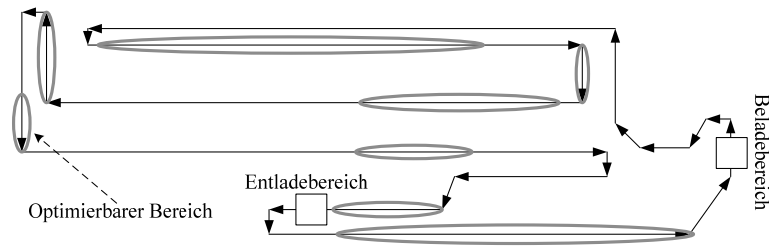


Abbildung 3: Modellbespiel mit optimierten Bereichen

Die im Zuge der Optimierung iterativ erreichten Reduzierungen sind in Abbildung 4 aufgezeigt. In einer ersten Phase werden die Pfadlängen bei konstanter Anzahl der Ladungsträger reduziert (siehe Abbildung 4, Alternative 49). Anschließend erfolgt bei konstanter Pfadlänge eine Reduzierung der Ladungsträger bis zur Alternative 62. Da beide Optimierungskriterien verbessert sind, wird ein zweiter Loop durchgeführt, wobei auch in diesem Loop beide Kriterien verbessert werden. Eine Terminierung erfolgt nach Alternative 72, da keine weitere Verbesserung der beiden Kriterien erreicht werden kann.

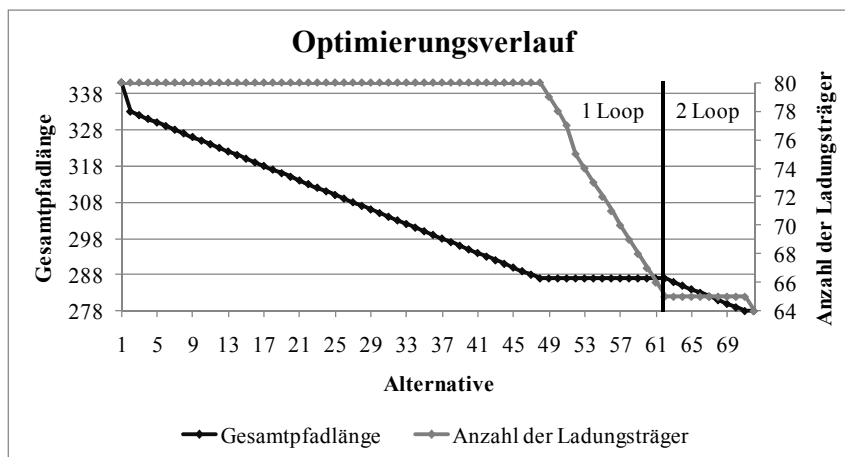


Abbildung 4: Optimierungsverlaufs

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt die simulationsbasierte Optimierung von Farbgebungsanlagen. Der verwendete heuristische Optimierungsalgorithmus minimiert die Investitionskosten in Abhängigkeit von den Kosten für die Ladungsträger und Pfade im Fördersystem. Dieser Algorithmus wurde als Ergänzungskomponente für ein existierendes, graphenbasiertes Simulationsmodell für Farbgebungsanlagen entwickelt. Er lässt sich auf andere Simulationsmodelle, die einen vergleichbaren Modellierungsansatz verwenden, übertragen. Zur Unterstützung des Anwenders wurden die mit der simulationsbasierten Optimierung notwendigen Aktionen in einem graphischen

Nutzerinterface gekoppelt. An einem realen Beispiel wird die Wirksamkeit des Algorithmus aufgezeigt.

In der aktuellen Implementierung werden die Investitionskosten nur mittelbar berücksichtigt. Im Ergebnis weiterführender Arbeiten werden diese Kosten unmittelbar berücksichtigt und das "optimierte" Layoutschema wird automatisch generiert und angezeigt.

Literatur

- GÜRKAN, Gül: Simulation optimization of buffer allocations in production lines with unreliable machines. In: *Annals of Operations Research*, New York, 3(2000)1-4, S. 177-216.
- KOHN, Robert; NOACK, Daniel; MOSINSKI, Marcin; ZHOU, Zhugen; ROSE, Oliver: Evaluation of Modeling, Simulation and Optimization Approaches for Work Flow Management in Semiconductor Manufacturing. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference; Energy Alternatives*. Hrsg.: Rossetti, M. D.; HILL, R. R.; JOHANSSON, B.; DUNKIN, A.; INGALLS, R. G. New York, NY: Association for Computing Machinery Order Department; Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2009, S. 1592-1600.
- WEIGERT, Gerald; HENLICH, Thomas; KLEMMT, Andreas: Methoden zur Modellierung und Optimierung von Montageprozessen. In: *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*. Hrsg.: RABE, M. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, 2008, 479-488.
- WIEDEMANN, Thomas; KRUG, Wilfried: Actual and Future Options of Simulation and Optimization. In: *Manufacturing, Organization and Logistics. Proceedings 15th European Simulation Symposium*. Delft: SCS Europe, 2003, S. 627-637.
- WILLIAM, Edward; SADAKANE, Shigeru: Simulation of a paint shop power and free line. In: *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. Hrsg.: ANDRADÓTTIR, S.; HEALY, K. J.; WITHERS, D. H.; NELSON, B. L. New York: Association for Computing Machinery, 1997, S. 727-732.