

## OPTIMIERUNG MIT EVOLUTIONSSTRATEGIEN IN DER PRODUKTIONSPLANUNG

PRAXISBEISPIEL: BETONFERTIGTEILWERK

Ronald Ruzicka, Simutech, Atzgersdorferstraße 32, 1230 Wien, Österreich

ronald.ruzicka@simutech.at

**Kurzfassung.** Optimierung in der Produktionsplanung ist im Bereich der Großteilfertigung in der Praxis noch selten anzutreffen. Die Gründe liegen hier nicht zuletzt an den Problemen mit der Erlangung günstiger Startwerte für die Optimierung, aber auch mit der Wahl der geeigneten Verfahren. Anhand eines Praxisbeispiels wird der gesamte Vorgang von der Situationserfassung bis zur fertigen Online-Optimierung mit Hilfe des Simulationswerkzeugs SIMUL\_R+ und basierend auf Evolutions-Algorithmen demonstriert. Der Betrieb konnte damit unter alleinigem Einsatz von Software ohne Baumaßnahmen eine Produktivitätssteigerung erzielen und verwendet die Kombination aus Leitstand und Simulation/Optimierung als tägliches Werkzeug.

### 1. Einleitung

Betrachtet man die Landkarte der diskreten Simulation, so gibt es in ihr noch einige Bereiche die man ohne weiteres - vorsichtig formuliert – als *grauschraffiert* bezeichnen könnte: in diesen Bereichen sind die Vorgangsweisen und verwendeten Methoden keineswegs eindeutig und klar gekennzeichnet. Je nach Moden werden diese Flecken bisweilen bunt eingefärbt, doch klare Konturen sind in ihnen nur schwach erkennbar.

Zu diesen „unbekannten“ Gebieten gehört sicher der Bereich der Optimierung. Haben sich im Bereich der kontinuierlichen Simulation einige Methoden als weitgehend immer Ziel führend herausgestellt, etwa die Methode des steilsten Anstiegs, so gibt es solche Platzhirsche in der diskreten Simulation nicht. Dies liegt einerseits an der Vielfältigkeit diskreter Modelle, andererseits natürlich am prinzipiellen Problem des diskontinuierlichen Verhaltens und der diskontinuierlichen Veränderungen in diskreten Modellen.

Wenn oben von „bunt eingefärbt“ die Rede war, so meinte dies, dass es auch für diese Problemfälle zu unterschiedlichen Zeiten unterschiedlich moderne Ansätze gab und gibt: so waren früher diskrete Adaptionen der Methode des steilsten Anstiegs im Einsatz. Man verwendete gerne Branch-and-Bound Verfahren. Heutzutage wird in der Praxis oft gerne „Design Of Experiments“ (DOE) - eine Hülle für unterschiedliche Verfahren - verwendet. Nicht zuletzt wird Monte-Carlo-Simulation – zufällige Parametersuche – eingesetzt.

### 2. Aller Anfang ist schwer

Das Basisproblem bei der Optimierung diskreter Systeme ist das Finden geeigneter Anfangswerte. Die meisten Verfahren bieten rudimentäre Ansätze, diese Suche zu unterstützen. Doch oft muss der Optimierende in diesem Bereich sehr Modell-bezogen arbeiten, das heißt eigene Verfahren entwickeln und Versuche durchführen [SCHW.1981] [GRÄF.1986].

Prinzipiell ist, um mögliche Anfangswerte abschätzen zu können, selbstverständlich auf die Natur des Problems Rücksicht zu nehmen: wie viele Parameter sind zu optimieren, welche Wertemenge können die Parameter annehmen.

Das zu lösende, praktische Problem, das hier beschrieben wird, basiert in der Grundvariante auf 50 zu variierenden Parametern und wächst sich in der vom Kunden endlich gewünschten Konfiguration auf etwa 700 Parameter aus. Manuelle Parameterschätzungen ohne Vorwissen sind also zum Scheitern verurteilt.

Um nun einmal nähere Aussagen tätigen zu können, seien hier das reale System und das abbildende Modell näher vorgestellt.

### 3. Realität ...

Simutech wurde von SAA Engineering GmbH, einer Firma, die sich auf die Planung von Betonfertigteilwerken spezialisiert hat, eingeladen, den laufenden Betrieb eines solchen Werkes durch Simulation zu begleiten und durch Optimierung die Abläufe zu verbessern [HANS.2003]. SAA Engineering hatte in einer bestehende Anlage von Heembeton (Lelystad, Niederlande) ein Leit- und Steuersystem für die Produktion installiert. Dieses Leitsystem bot für Heembeton erstmals die Möglichkeit, notwendige Basisinformationen über die Abläufe automatisch zu erfassen und umgekehrt von außen automatisch steuernd in das System einzugreifen.



Abb. 1 Betonfertigteile im Hausbau

Aufgrund des Booms für Fertigteilhäuser (siehe Abb. 1) und die dafür gegebenen saisonalen Bedingungen war es für Heembeton wichtig, ein flexibles Planungswerkzeug auch für Just-in-time-Produktion in die Hand zu bekommen. Just-in-time bezieht sich

hier im Normalfall auf eine Planungsphase von etwa zwei Wochen. Pro Tag werden im bezeichneten Werk Massivwände für zehn Einfamilienhäuser erzeugt.

Vor Beginn der Arbeit des Simulationsspezialisten war die Anlage (siehe Abb. 2) schon in Betrieb genommen.



Abb. 2 Heembeton: Ausschnitt der Fertigteilfabrik

An ca. 100 Stationen und Puffern werden Paletten bearbeitet: jede Palette trägt einen Betonfertigteil, der zuerst geschalt, mit Installationen versehen, gegossen, getrocknet, gekippt, entladen und gesäubert werden muss. Ein Palettenumlaufsystem schleust die Paletten durch die Anlage. Einige Bearbeitungsschritte können auf alternativen Pfaden durchgeführt werden. Zum Transport werden neben der Palettenanlage auch Quertransportkräne eingesetzt, die nach vorgegebenen Prioritäts- und Parkregeln Paletten von einer Reihe in eine andere befördern.

#### 4. ... und Modell

Die erste Aufgabe bestand nun darin, ein Modell zu entwickeln, das möglichst flexibel sein sollte. Das Modell beheimatet 100 Bearbeitungsstationen und Puffer und 8 Quertransporter, ist Ereignis-orientiert (DISCRETE Blöcke) in SIMUL\_R+ implementiert [RUZI.1988]. Die Flexibilität wurde dadurch erreicht, dass die Stationen in Tabellen formuliert sind und das Modell selbst aus nur 10 unterschiedlichen Ereignisklassen besteht.

Die Komplexität des Modells liegt darin, die vom Leitsystem vorgegebenen Ablaufpläne der Paletten (= Entities) mit all ihren Verzweigungsmöglichkeiten und Alternativpfaden zu implementieren. Die Pläne selbst werden automatisch aus der Centura-Datenbank des Leitsystems übernommen. Diese Datenbank stellt auch ganz allgemein die Schnittstelle zwischen Leitsystem und Simulation/Optimierung dar.

Besonders beachtet musste werden, dass in einigen Bereichen der Anlage eine automatische Steuerung implementiert ist, die ohne Zutun des Leitsystems selbständig Transporte vornimmt. Auch diese Steuerung findet sich im Modell wieder. Der Trockenbereich, in dem die Paletten eine bestimmte Mindestzeit verweilen müssen, dann aber wieder von

Stausituationen im Palettentransport abhängig sind, erfordert exakte Modellierung.

Sind die Ablaufpläne nun auch bekannt, so sind die einzelnen Verweildauern a priori nicht gegeben: Schalungen und das Einsetzen von Steckdosen z.B. sind manuelle Tätigkeiten – die für die Simulation hierzu benötigten Zeitwerte mussten erst in der Anlage von Station zu Station und Palettentype zu Palettentype gemessen werden.

Als realistisches System sind hierbei auch Schichtpläne tagesweise vorgegeben, die eingehalten werden müssen: zumindest was die Belegung der Stationen mit Personal betrifft; das Austrocknen des Betons hält sich an keine Schichten (was aber umgekehrt natürlich auch wieder berücksichtigt werden muss!).

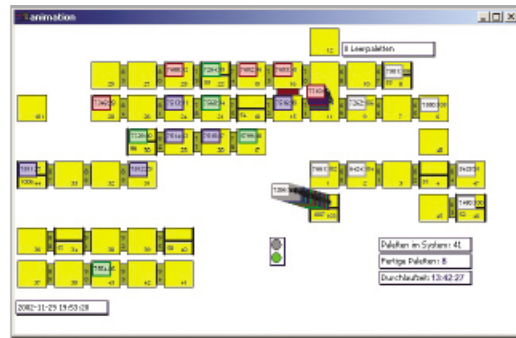


Abb. 3 Animationsbild der Anlage

Als besonders wertvoll hat sich die Entwicklung einer Animation herausgestellt, die parallel zur Simulation angezeigt wird und auch einige statistische Informationen enthält (siehe Abb. 3) – sowohl zur Validierung des Modells als auch zur Kommunikation mit dem Kunden.

Graue Elemente in Abb. 3 bezeichnen Paletten, die bereits zu Simulations-(Optimierungs-)start im System waren: diese Elemente werden vom Leitsystem mit übergeben, beeinflussen selber den Ablauf der Simulation und Optimierung, werden jedoch nicht selbst Gegenstand der Optimierung.

#### 5. Die Qual der Wahl

Der Wunsch des Kunden war – für den hier betrachteten ersten Schritt der Optimierungsaufgabe – eine Planungshilfe zu erhalten: jede Palette entspricht einem Auftrag; diese Aufträge müssen zu bestimmten Zieltagen fertig sein. Die Optimierung soll eine zeitoptimale Reihenfolge vorgeben, in der die Aufträge in das System geschleust werden (in der also Paletten im Umlaufsystem mit Aufträgen belegt werden). Einmal im System, erfolgt durch die erste Stufe der Optimierung keine weitere Veränderung des Ablaufes.

Die Permutationsmöglichkeiten der Aufträge geben hier den Parameterraum vor: jeder (Paletten-) Auftrag erhält eine Positionsnummer, die die Reihenfolge der Aufträge angibt. Betrachtet man die Menge der Positionsnummern als Parametermenge (diese Parameter sind nicht voneinander unabhängig!), so ergibt sich der Umfang der

Wertemenge für eine Tagesproduktion mit 50 Aufträgen zu  $10^{64}$  für zwei Wochen (Kundenwunsch!) zu  $10^{1689}$ .

Der Simulationsspezialist hat nun die Qual der Wahl: welches Optimierungsverfahren. Reine Monte Carlo Verfahren scheiden bei dieser Menge von Parametern aus.

Von vornherein wusste man nicht sehr viel über eine günstige Startreihenfolge: also wurde ein Verfahren gewählt, welches nicht so empfindlich gegenüber „Fehlern“ in einer günstigen Wahl der Anfangswerte ist. Hier bieten sich die Verfahren der Evolutionsstrategien an, auch genetische Verfahren genannt [RECH.1973] [GOLD.1989] [SCHW.1993] [RUZI.1994].

## 6. Optimierung! Aber wie?

Ausgehend von einer Grundpopulation (hier: einer Menge unterschiedlicher Anfangsreihenfolgen) werden Simulationsläufe durchgeführt. Danach erfolgt die Bewertung der Simulationsergebnisse (im Prinzip: je schneller fertig, desto besser). Die besten Individuen (Reihenfolgen) dürfen in der nächsten Generation wieder mitspielen – Selektion.

Neue Individuen werden durch Mutation (Änderung von einer Auftragsposition) und Rekombination (Mischen zweier Individuen) erzeugt. Selektion, Mutation und Rekombination erfolgen aber nicht prinzipiell mit den besten Individuen, sondern für bessere (auch „fittere“) Individuen nur mit größerer Wahrscheinlichkeit – gemäß einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Das Einstellen dieser Algorithmusparameter, wie des Umfangs der Population, der Anzahl der Selektionen, Mutationen und Rekombinationen und der Verteilungsfunktion sind ein wichtiger Aspekt, der durch Vorsimulationen vor Inbetriebnahme in Angriff genommen werden muss.

In einem Art Museum merkt sich der Algorithmus eine bestimmte Anzahl der bisher in der Optimierung besten Individuen.

Diverse Randbedingungen, wie etwa das Überschreiten der maximalen Zielzeit bei einem Auftrag, können über Straffunktionen eingebunden werden: das heißt, die Durchlaufzeit wird künstlich um einen festen Wert drastisch erhöht.

Geht man von einer Dauer von 1 s pro Simulationslauf (siehe Abb. 4, Abb. 5) pro Echttag aus, so wird man rasch vermuten, dass man ziemlich sicher nicht zur optimalsten Reihenfolge gelangen wird, wenn man die Menge der oben angegebenen Permutationen betrachtet und keinerlei Vorkenntnisse über günstige Reihenfolgen mit einfließen lässt.

Insbesondere ist für die Praxis von Bedeutung, dass die Optimierung nicht beliebig lange ablaufen kann: die betrieblichen Notwendigkeiten geben die Maximalzeiten vor.

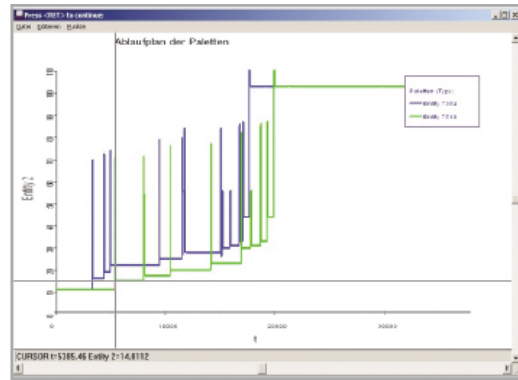


Abb. 4 Ablaufplan von Paletten (nach Simulationslauf)

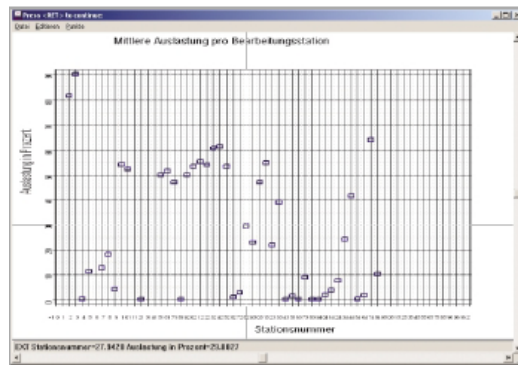


Abb. 5 Auslastungsprofil der Bearbeitungsstationen

## 7. Auf dem Boden der Realität

Welche Optionen bieten sich nun an?

Die erste und wichtigste Erkenntnis ist:

*Wir wollen – in angemessener Zeit - besser werden.*  
Das hohe Ziel des reinen Optimums ist in der betrieblichen Praxis nicht berechenbar. Punkt.

Primär heißt dies, wir lassen die Optimierung so lange laufen, wie wir Zeit haben und verwenden dann das bis dahin erzielte optimale Ergebnis.

Diese Erkenntnis und die angegebene Vorgangsweise ist aber geradezu ideal für Algorithmen nach Evolutionsstrategien: die Erfahrung zeigt, dass diese selbst in schwierigen Anfangssituationen meist zu Beginn rasch besser werden, dann länger – ohne viel Verbesserung – „herumsuchen“ und dann erst spät in die Nähe des Optimums wandern – das Verbleiben in einem stabilen Optimum widerspricht ohnehin den Evolutionsstrategien.

## 8. Nutze das Wissen, nutze die Zeit

Nach obiger eher ernüchternder Erkenntnis (siehe 6) und der Konsequenz daraus (siehe 7) versucht man die Infrastruktur rund um die Optimierung zu verbessern.

Man spricht einmal mit den Leuten vor Ort, etwa dem Schichtmeister, der ja schon aktuell den Betrieb

laufen lassen musste – und es kristallisierten sich in etwa zehn optimale Reihenfolgen heraus, in die der Schichtmeister aufgrund seiner langjährigen Erfahrung bei bestimmten Auftragskonstellationen (Palettentypen) umsortieren würde.

Diese Erfahrung wird in so genannten OptiSets gespeichert.

Andererseits betrachtet man Auftragsituationen der letzten Zeit (z.B. des letzten Jahres) und führt Offline-Optimierungsläufe durch. Die Ergebnisse speichert man ebenfalls in OptiSets – genau genommen wird die Zusammenstellung der Aufträge und die dann ermittelte optimale Reihenfolge gemerkt.

Kommt nun aktuell eine Auftragsmenge herein, sucht man in dieser nach bekannten Mustern und sortiert die Teilmengen gemäß den OptiSets um – als Basis für den Optimierungslauf. Sicher, dies ist eine heuristische Herangehensweise – in der Praxis aber wirkungsvoll.

## 9. Mehrklassengesellschaft

Eine weitere Vereinfachung bietet sich insoweit an, als man die Anzahl der Parameter senkt, indem man Blöcke gleicher Aufträge als ein Ganzes betrachtet und Permutationen innerhalb eines Blockes nicht durchführt. Prinzipiell gibt es nun aber meist keine identischen Aufträge (nach dem Motto: die eingebauten Stecker in der Betonwand liegen immer woanders!) – also sollte man nach *möglichst gleichen* Aufträgen suchen.

Man bildet Klassen (siehe Abb. 6) von Aufträgen, die nach ähnlichen Ablaufplänen/Produktionsplänen erzeugt werden. Die Praxis bildete dann 9 Klassen heraus, nach denen die Klassenbildung vorgenommen wurde.

Durch die Klassenbildung sinkt die Anzahl der Parameter teilweise drastisch, was eine wesentlich geringere Optimierungszeit bei gleichem Ergebnis oder besserer Konvergenz der Optimierung bei gleicher Dauer zur Folge hat.

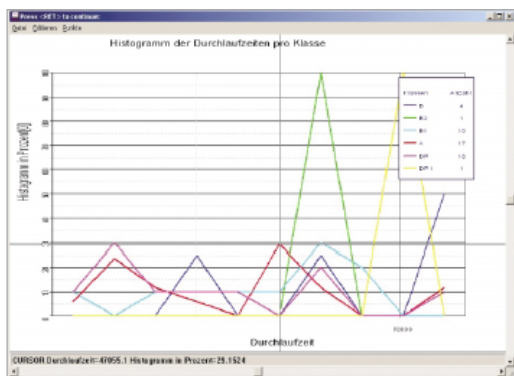


Abb. 6 Durchlaufzeitenhistogramm nach Klassen

## 10. Die Praxis

In der Praxis läuft nun der Simulations-Command-Interpreter auf einem eigenen Simulations-PC und erhält vom Leitstand aus seine Aufgaben zugeteilt.

Die Kommunikation erfolgt über Datenbanktabellen. Via Datenbank werden sowohl die durchzuführenden Aufgaben, als auch die Ablaufpläne und Aufträge zum Simulationsrechner, als auch die Ergebnisse, wie die optimale Reihenfolge rück übergeben - offline in OptiSets und Online in den Leitstand.

Als Befehle stehen zur Verfügung:

- Offline-Optimierung (lange Zeitdauer) mit/ohne Speicherung der Ergebnisse in OptiSets
- Online-Optimierung (schnelle Optimierung) mit direkter Übergabe der Ergebnisse in den Leitstand und weiter an den Prozess
- Simulation mit/ohne Optimierung: ausgehend von der aktuellen Belegung in der Anlage werden neue Aufträge eingeplant und Was-Wäre-Wenn-Analysen durchgeführt (Frage etwa: Geht sich dieser ad-hoc Auftrag noch bis heute Abend aus?)

Der Bediener erhält auch während des Optimierungslaufes immer Auskunft über die bis jetzt gefundene optimalste Lösung und die Verbesserung und kann die Optimierung jederzeit stoppen, wenn er mit dem Resultat zufrieden ist. Die umgebenden Prozesse, wie die automatische Übernahme in das Leitsystem, laufen dann wie gewohnt weiter.

Das Leitsystem ist in einem Automatikmodus (*Online-Optimierung*) im Stande, durch Vergleich von Anlagendaten mit Daten aus vorhergehenden Simulations- und Optimierungsläufen zu große Abweichungen von der optimalen Vorgabe zu erkennen – bedingt etwa durch Fehler der Arbeiter, Maschinenausfälle, Abweichungen zwischen angenommenen und tatsächlichen Bearbeitungsdauern - und startet selbsttätig eine Grob-Optimierung, deren Ergebnisse wieder in den Echtbetrieb einfließen [RUZI.1991].

## 11. Ergebnisse

Aufgrund der vielen Einschränkungen durch feste Ablaufpläne und der „Behinderung“ von neuen Aufträgen durch bereits im System befindliche alte Aufträge war allgemein mit keiner sehr großen Verbesserung gerechnet worden.

Doch zeigte die Praxis, dass die Produktion – alleine durch das Hilfsmittel Simulation und Optimierung und durch alleiniges Ändern der Reihenfolge des Einführens der Aufträge in die Anlage - im Durchschnitt um 3 Prozent verbessert wurde. Dies bedeutet eine Produktivitätssteuerung um 1-2 Paletten pro Schicht, bzw. in manchen Fällen bis zu eine Stunde Zeitgewinn für eine Tagesproduktion!

Aus Sicht des Simulationsexperten ist es interessant, ein vollständig integriertes System geschaffen zu haben, das mit einer doch eher theoretischen Methode, wie der der Evolutionsstrategien, die noch dazu meist nur für kontinuierliche Systeme im Einsatz ist, in der Praxis Erfolg zu haben.

Aus Anwendersicht bedeutend ist, dass Simulation und Optimierung – weltweit erstmalig bei einer Betonfertigteilanlage – als integraler Bestandteil des Leitsystems gesehen werden können. Sie sind damit

– nicht zuletzt auf Grund der Onlineoptimierung - in den täglichen Betrieb voll eingebunden und bieten realen Gewinn für das Unternehmen.

## Literatur

- [RECH.1973] I.Rechenberg: *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, Stuttgart 1973
- [DEJO.1975] K.A.De Jong: *An analysis of the behaviour of a class of genetic adaptive systems*, Dissertation, University of Michigan, 1975
- [SCHW.1981] H.P.Schwefel: *Numerical Optimization of Computer Models*, Wiley, Chichester, 1981
- [GRÄF.1986] M.Gräff, I.Troch: *Die Berechnung von optimalen Steuerungen für dynamische Prozesse durch Parameteroptimierung*, Bericht Nr. 2/1986, Abt. Regelungsmathematik, Hybridrechen- und Simulationstechnik des Instituts E114, Technische Universität Wien, 1986
- [RUZI.1988] R.Ruzicka: *SIMUL\_R - eine Simulationssprache mit speziellen Befehlern zur Modelldarstellung und -analyse*, Informatik Fachberichte 179, Proceedings des 5. Symposiums Simulationstechnik, Springer, Aachen, 1988
- [GOLD.1989] D.E.Goldberg: *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison Wesley, Reading, MA, 1989
- [RUZI.1991] R. Ruzicka: *Online Simulation mit SIMUL\_R*; Fortschritte in der Simulationstechnik Band 4, Proceedings zur ASIM-Tagung 1991 in Hagen; Vieweg 1991
- [SCHW.1993] T.Bäck, U.Hammel, H.P.Schwefel: *Modelloptimierung mit evolutionären Algorithmen*, Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 6, Proceedings des 8. Symposiums Simulationstechnik, Vieweg, Berlin, 1993
- [RUZI.1994] R. Ruzicka: *Optimierung technischer Systeme mittels Evolutionsstrategien – ein Standardverfahren in SIMUL\_R*, Fortschritte in der Simulationstechnik Band 9, Proceedings zur ASIM-Tagung 1994 in Stuttgart, Vieweg 1994
- [HANS.2003] C. Hanser: *Rationalisierung durch Innovation – mit modernen Simulationsmethoden die Produktivität steigern*; BWI - BetonWerk International – Nr. 1 - Februar 2003