

Produktion und Standortwahl mathematisch optimieren

Mithilfe algorithmischer Berechnungen können produzierende Unternehmen Anwendungen zur Entscheidungsunterstützung entwickeln

Wolfgang Schmidt und Maximilian Lorse, X-INTEGRATE GmbH

In der Industrial 4.0-Ära werden viel mehr Daten als bisher in die Produktionsplanung und die Auswahl geeigneter Fertigungs- und Lagerorte eingegeben. An welchem Standort welches Produkt wann produziert werden sollte, lässt sich angesichts der Vielzahl an entscheidungsrelevanten Daten am besten mithilfe mathematischer Methoden errechnen. Hier ist vor allem die Lineare Programmierung zu nennen, deren Einsatz anhand von Praxisbeispielen in diesem Beitrag beschrieben wird. Technische Plattform ist das IBM Decision Optimization Center, auf dem Softwarepartner unter Einbeziehung des gesamten Produktions- und Logistiknetzwerks Anwendungen für bessere Entscheidungen in allen Bereichen der Produktions- und Standortoptimierung erstellen können.

Erhöhung der Standortauslastung

Voraussetzung für eine effiziente Produktion ist, Produktionspotenziale innerhalb der Standorte eines Unternehmensnetzwerks miteinander abzugleichen. Sonst droht der Fall, dass am Standort A die Maschinen stillstehen und zur gleichen Zeit Standort B mit seiner Produktion bei den Aufträgen nicht mehr hinterherkommt. Um diesen Fall zu verhindern, lässt sich mit mathematischen Modellen auf Basis zur Verfügung stehender Ressourcen und der aktuellen Auftragslage errechnen, an welchem Standort ein bestimmtes Produkt produziert werden sollte. Hierfür muss wiederum das komplette Produktions- und Logistiknetzwerk des Unternehmens einbezogen werden.

Sind Geschäftsprozesse nicht transparent oder schlecht aufeinander abgestimmt, kann es leicht zu Lieferverzug kommen. Der Einsatz eines mit mathematischen Methoden arbeitenden Produktionsplanungstools, das den Produktionsprozess kontinuierlich überwacht, kann dies verhindern. Dem Kunden kann das Unternehmen auf diese Weise in Echtzeit konkrete Zusagen zum avisierten Liefertermin geben. Bei trotzdem auftretenden Verzögerungen bei der Zulieferung kann mithilfe der IT hinter dem Produktionsprozess eine genauere zeitliche Antwort gegeben werden. So wird die Produktion trotz des Lieferverzugs nicht unterbrochen. Die digitale Abstimmung setzt vielmehr die freie-

wordenen Ressourcen für neue Kurzaufträge und Produktion mit höherer Priorität ein. Ein anderer Kunde kann dann früher beliefert werden.

Das Ziel einer mit mathematischen Methoden durchgeführten Produktionsplanung ist letzten Endes die Einhaltung betriebswirtschaftlicher Kennzahlen: Minimierung der Gesamtkosten, Gewinnmaximierung und die Optimierung unternehmensspezifischer Key Performance Indikatoren. Die aus der Produktionsplanung resultierenden Ergebnisse lassen sich in der Folge als Blaupause für die weitere Planung verwenden. Bereits im Verlaufe der Planungen kann das Unternehmen in kurzer Zeit mehrere Szenarien vergleichen und schneller auf Veränderungen reagieren.

Probleme lösen mit linearer Optimierung

Für Produktionsplanung, Standort- und Transportroutenoptimierung sowie verschiedenste Scheduling-Probleme hat sich die lineare Programmierung (LP) als mathematische Methode bewährt.

Um unter allen gültigen Ergebnissen das Beste zu bestimmen, wird in einem linearen Programm eine lineare Zielfunktion definiert, angelehnt an

Mathematical Methods for Optimizing Production Processes and Site Selection

In the Industrial 4.0 era, much more data is entered into production planning and the selection of suitable production and storage locations than before. In view of the large number of decision-relevant data, it is best to use mathematical methods to calculate which product should be produced at which location and when. In this context, linear programming is of particular importance. The article describes its use by means of practical examples. On IBM Decision Optimization Center as technical platform, software partners can create applications for better decisions in all areas of production and location optimization, including the entire production and logistics network.

Keywords:

production planning, transport route, constraint programming, linear optimization, supply chain management



Wolfgang Schmidt ist Geschäftsführer der X-INTEGRATE GmbH aus Köln.



Maximilian Lorse ist Optimization & SCM Engineer der X-INTEGRATE GmbH.

wolfgang.schmidt@x-integrate.com
www.x-integrate.com

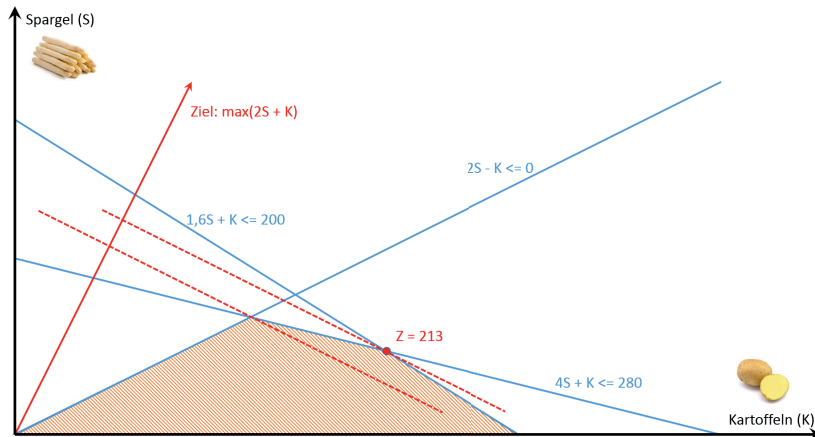


Bild 1: Exemplarische Anwendung der linearen Programmierung.

die für die fachliche Fragestellung relevanten Key Performance Indicator (KPI). Diese können zum Beispiel Betriebskosten oder der zu erwartende Profit sein, aber auch Kundenzufriedenheit, sofern diese sich mit Zahlen messen lässt.

Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass das Ergebnis fachlich valide ist, also dass z.B. Kapazitäten eingehalten werden. Die Rahmenbedingungen des realen Problems müssen dazu in dem LP als Constraints erfasst werden. Diese Kombination aus Bedingungen und Zielen, das mathematische Modell, kann nun mit gängigen Algorithmen zur Lösung von LPs, wie dem Simplex-Verfahren oder der Innere-Punkte-Methode, gelöst werden.

Heutige Implementierungen dieser Verfahren (z.B. IBM CPLEX, Gurobi) bieten eine sehr hohe Performance (aktuelle Performance Benchmarks werden z.B. auf der Webseite von Hans D. Mittelmann [1] oder Michael Trick [2] zur Verfügung gestellt). Da es zusätzlich meist deutlich einfacher ist, ein Problem als LP zu formulieren, anstatt einen eigenen Lösungsalgorithmus mit hoher Performance zu finden, wird lineare Optimierung in vielen Optimierungsprojekten erfolgreich eingesetzt.

Maximierung oder Minimierung linearer Funktionen

Ein Anwendungsbeispiel kann die lineare Programmierung verdeutlichen: Ein Bauer hat die Wahl, ob er sein Feld mit Kartoffeln oder mit Spargel bepflanzt. Spargel könnte er für 2,00 € und Kartoffeln für 1,00 € pro Kilogramm verkaufen. Für den Spargel benötigt man 1,6 m² Anbaufläche und er hat einen zeitlichen Aufwand von etwa vier Minuten pro kg. Bei den Kartoffeln wird 1 m² bei einem Aufwand von einer Minute benötigt. Aus Erfahrungswerten weiß der Bauer, dass die Menge an Kartoffeln nicht kleiner sein darf als die doppelte Menge des Spargels. Außerdem ist die gesamte An-

baufläche auf 200 m² beschränkt und neben allen anderen Arbeiten bleiben dem Bauern 280 Minuten Zeit für beide Produkte. Das Ziel ist selbstverständlich, den Gewinn zu maximieren.

Wählt man nun die Variablen S als Spargel und K als Kartoffel, ergibt sich daraus die Zielfunktion $Z(S, K) = 2S + K$, die zu maximieren ist.

Die Nebenbedingungen lauten:

$$1,6S + K \leq 200,$$

$$4S + K \leq 280,$$

$$2S - K \geq 0,$$

und selbstverständlich, da man keine negative Menge anbauen kann:

$$S \geq 0,$$

$$K \geq 0.$$

Das Optimum findet sich nun somit bei einem Anbau von 33 1/3 kg Spargel und 146 2/3 kg Kartoffeln. Dann sind alle Nebenbedingungen erfüllt und der erwartete Gewinn mit $Z(33 \frac{1}{3}, 146 \frac{2}{3}) = 213$ € maximiert.

Im allgemeinen Fall gibt es mit angemessenen Nebenbedingungen eine (oder mehrere) optimale Lösung(en) für das Modell, die auch „Extremwert unter bestimmten Bedingungen“ genannt wird. Eine lineare Funktion auf einer unbeschränkten Menge hat üblicherweise kein Maximum oder Minimum. Aber wenn die Menge durch passende lineare Nebenbedingungen beschränkt wird, ist die Existenz des Optimums garantiert. Es kann auch vorkommen, dass die Nebenbedingungen sich widersprechen. In diesem Fall ist der Lösungsraum eine leere Menge.

Entscheidungsunterstützende Anwendungen für die Produktions- und Standortoptimierung unter Einsatz mathematischer Methoden werden üblicherweise auf speziellen Plattformen wie etwa dem „IBM Decision Optimization Center“ entwickelt. Unter Einsatz des analytischen Toolkits IBM ILOG CPLEX Optimization Studio kann ein IBM-Partner Optimierungsmodelle mithilfe linearer/quadratischer Programmierung, gemischt ganzzahliger Programmierung, Constraintprogrammierung und Constraint-basierender Zeitplanung (constraint-based scheduling) schnell entwickeln und bereitstellen. Marktführende Solver-Engines werden dabei mit einer nahtlos integrierten Entwicklungsumgebung und Modellierungssprache kombiniert. Zu den Solver Engines mit der höchsten Performance zählen IBM CPLEX [3] und Gurobi [4].

Constraint Programmierung

Bei Fragestellungen, die mit linearer Programmierung nicht bzw. nur umständlich abzu-

bilden sind oder es aufgrund der Menge an Kombinationsmöglichkeiten aufwändig ist, zu gültigen Lösungen zu gelangen, bietet sich eine Alternative an: Constraint Programming (CP). CP ist beschrieben als die Identifizierung von zulässigen Lösungen aus einer sehr großen Menge an Kandidaten. Es setzt verstärkt auf kombinatorische Verfahren und wird besonders häufig im Scheduling-Bereich eingesetzt, also bei der Erstellung von Zeitplänen. Genutzt wird es u. a. bei der Berechnung von Transportrouten oder Schichtplänen.

Als Beispiel für eine sehr große Menge an Kandidaten sei ein Schichtplan mit vier Beschäftigten, drei Schichten pro Tag und sieben Arbeitstagen zu nennen. Pro Tag beträgt die Anzahl der möglichen Zuordnungen $4 * 3 * 2 = 24$, denn der ersten Schicht können vier Arbeiter zugeteilt werden, der zweiten dann noch drei und der dritten zwei. Für eine Woche ergeben sich somit insgesamt $24 \text{ hoch } 7$, also über 4,5 Milliarden mögliche Zuordnungen. Da meist weitere Bedingungen wie eine maximale Wochenarbeitszeit oder ein Fachkraftbedarf für besondere Schichten hinzukommen, müssen die Tage auch gemeinsam betrachtet werden.

Plattformen wie das IBM Decision Optimization Center bieten für solche Fragestellungen eine einheitliche Modellierungssprache an, mit der sowohl LP- als auch CP-Modelle erstellt werden können. Diese Sprache bietet beim Einsatz von CP darüber hinaus weitere Möglichkeiten, Intervallvariablen, Permutationen und weitere kombinatorische Bedingungen direkt abzubilden. So kann das passendere Verfahren ausgewählt und bei Bedarf auch beide kombiniert werden, z. B. um mithilfe von CP zu einer Menge von gültigen Lösungen zu gelangen, aus denen dann mit LP die beste Lösung ermittelt wird.

Auswahl von Standorten unterliegt zahlreichen Variablen

Nach Darstellung der Optimierung der Produktionsprozesse soll ein besonderer Einsatzzweck mathematischer Methoden im Folgenden am Beispiel des Supply Chain Management (SCM) dargestellt werden. Die richtige Auswahl und Auslastung einzelner Unternehmensstandorte ist ein wichtiger Ansatzpunkt für erfolgreiches SCM. Innerhalb einer Reihe produzierender Werke und Lieferanten, die zwischen Warenlagern und Filialen unterwegs sind, entscheidet die Bestimmung optimaler Standorte sogar über den Unternehmenserfolg. Hier drängen sich mathematische Methoden geradezu auf. Mit ihnen gelingt es, innerhalb kurzer Zeit die besten Vorschläge für neue Standorte zu generieren.

Die Wahl des idealen Standorts für ein neues Warenlager ist abhängig davon, wo sich Fabrikationsstandorte, Lieferanten und die zu beliefernden Filialen befinden. Hier ist abzuwägen: Ist das Lager nah am Zulieferer, verkürzen sich die Anfahrtswege, kann flexibler produziert werden. Spontaner Bedarf der Filialen kann andererseits nicht so gut abgedeckt werden. Genau umgekehrt verhält es sich mit Standorten, die in Nähe der Filiale liegen.

Ungeachtet solch theoretischer Überlegungen sind bei der Standortwahl natürlich raumplanerische Aspekte zu bedenken. Nicht jede am grünen Tisch als ideal befundene Lokalität ist verfügbar. Der Platz ist nicht unbegrenzt und man muss sich an der bestehenden Bebauung orientieren. Je nachdem wie groß das gewählte Grundstück ist und ob gegebenenfalls bereits existierende Gebäude gekauft werden können, ist zu überlegen, ob parallel andere Standorte geschlossen werden sollten. Auch stellt eine Fabrik ganz andere Anforderungen an Geografie und Geologie als Lagerhallen oder Filialen. Diese sind bei der Suche nach einer optimalen Lösung zu beachten.

Angesichts der heterogenen Aspekte, die hier zu beachten sind, und der Kombinationsmöglichkeiten, die am Ende zur optimalen Lösung führen, stößt ein Unternehmen mit traditionellen Methoden schnell an seine Grenzen. Um schnell zu den besten Vorschlägen hinsichtlich der Standortwahl zu kommen, bieten sich daher mathematische Modelle an. Die Firma X-INTEGRATE hat auf Basis der IBM-Plattform Decision Optimization Center die Software Supply Chain Optimizer (SCO) entwickelt. Sie überprüft vorliegende Produktions- und Transportpläne auf ihre Machbarkeit und optimiert sie hinsichtlich Gesamtkosten und Gewinn. Der Anwender kann zusätzlich sein existierendes Netzwerk aus Fabriken, Filialen, Lagern und Kunden damit modellieren. Über flexible Parameter gibt er die Konditionen ein, die bei der Standortwahl zu beachten sind. Auch die Zielvorgabe der Optimierung lässt sich darstellen. Dies kann zum Beispiel eine Kostenreduktion für Transporte sein, die Gewinnmaximierung oder das Erreichen einer bestimmten Bedarfsabdeckung.

Software berechnet verschiedenste Parameter

Basis der Berechnung einer bestmöglichen Lieferkette ist die Eingabe verschiedener Parameter durch den Anwender. So wählt er für Transporte Ober- und Untergrenzen aus und berücksichtigt auf diese Weise ortsbedingte

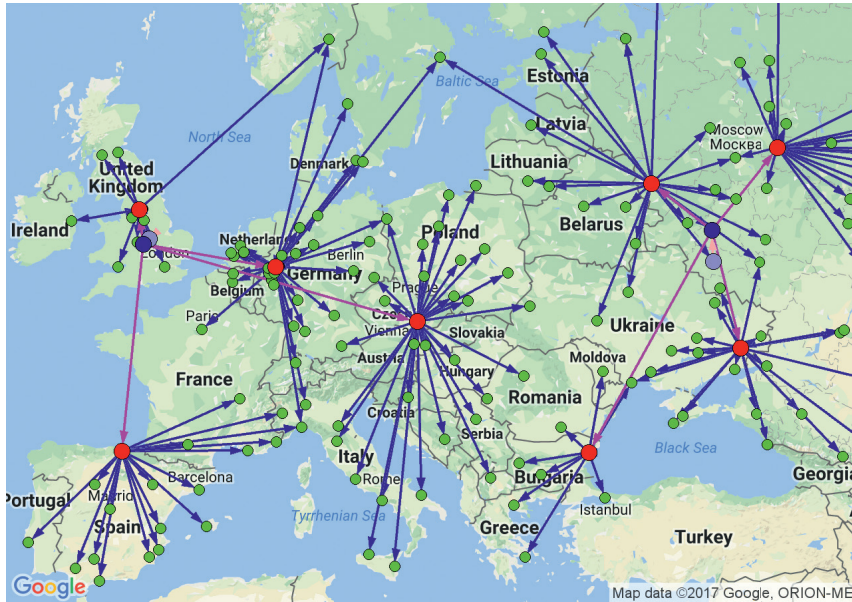


Bild 2: Standortoptimierung von Filialen innerhalb des Supply Chain Managements.

Kapazitäten. Solche können sich aus einer limitierten Anzahl an auf einer Route einzusetzenden Transportern ergeben. Die für die Produktherstellung erforderlichen Komponenten – und welche Nebenprodukte entstehen – bildet der Anwender über Stücklisten sowie Zuliefer- und Nebenprodukte ab. Mittels Gruppierungen werden Produktionslinien, Lager, Fabrikationsstandorte, Kunden und Zeitperioden nach bestimmten Eigenschaften eingeordnet und Bedingungen sowie Kosten für Teilmengen definiert. Standorte werden nach Postleitzahl und weiteren Eigenschaften in Zonen und Zonengruppierungen aufgegliedert. Auf diese Weise lassen sich zu erwartende Kosten und sonstige Bedingungen für einen Standort in Abhängigkeit seiner jeweiligen Region berechnen.

Ein weiterer Parameter, der in die Software eingegeben wird, ist der Kunden-Servicelevel. Darüber definiert der Anwender, welcher Anteil am gesamten Bedarf innerhalb bestimmter Zeitgrenzen oder vorgegebener Distanz erfüllt sein muss. Beispiel: 50 Prozent der Produkte sollen den Kunden nach 60 Kilometern bzw. innerhalb von acht Stunden erreichen. Verschiedene Optionen für Produktionslinien und Warenlager erleichtern die Entscheidung nicht nur darüber, ob ein Standort eröffnet wird, sondern auch, welche der möglichen Optionen (Lagerfläche, maximale Produktionskapazität etc.) am sinnvollsten ist.

Distanzen und Transitzeiten berechnen

Mithilfe von Tabellen für Zulieferer und deren Produktangebote plant und optimiert der Anwender über die Software den Einkauf von Rohstoffen und Halbfertigprodukten. Um Risiken bei der Lieferung minimal zu halten, kann regionsbezogen angegeben werden, dass eine

bestimmte Komponente stets von mehreren Zulieferern bezogen wird. Schließlich werden in die Software Entfernungen und Transitzeiten zwischen Standorten eingegeben. Entweder in Kombination aus Straßennetz und Luftlinie oder sie werden individuell den örtlichen oder regionalen Gegebenheiten angepasst.

Sind alle Parameter eingegeben, errechnet die Software auf ihrer Basis alle zur Verfügung stehenden Optionen der Standortwahl oder der Lieferkette. Das Unternehmen kann diese untereinander vergleichen und erhält in kurzer Zeit Antworten auf die wichtigsten Fragen.

Zum Netzwerk:

- Welche Standorte eignen sich generell?
- Welchem Standort sollte unter Berücksichtigung aller Parameter und des Geschäftsziels der Vorzug gegeben werden?
- Wie wirkt es sich auf die Erreichung des Geschäftsziels aus, wenn Alternativen (welche?) gewählt werden?
- Wie wirken sich abweichende Bedingungen auf existierende Standorte von Werken und Lagern aus?
- Wäre die Umsiedlung eines Standorts lohnenswert, damit Kapazitäten auch zukünftig ausgenutzt werden können?

Zur Lieferkette:

- Welche Transportwege sollen genutzt werden?
- Wo bestehen Engpässe in der Produktion, der Lagerung und dem Transport?
- Mit welcher Lagerhaltung ergibt sich eine bestmögliche Balance zwischen der Minimierung von Lagerungskosten und einem geringen Risiko eines Lieferausfalls?
- Von welchen Zulieferern sollen Rohstoffe und Bauteile erhalten werden?
- Wie soll auf kurzfristige Einflüsse von außen schnellstmöglich reagiert werden?

Die beschriebenen Verfahren zur Produktionsplanung und Standortoptimierung mittels mathematischer Modelle können auch kombiniert werden. Dafür müssen in die Berechnung Aspekte beider Modelle einfließen. Auf diese Weise kann das Unternehmen parallel entscheiden, welche potenziellen Standorte für Produktion und Lager operieren und welche Transportrouten es zu nutzen gilt, damit die Produktions- und Transportplanung für die gewählten Standorte so effizient wie möglich wird.

Schlüsselwörter:

Produktionsplanung, Transportroute, Constraint Programmierung, Lineare Optimierung, Lieferkettenmanagement

Literatur

- [1] Mittelman, H. D.: Benchmarks for Optimization Software. URL: <http://plato.asu.edu/bench.html>, Abrufdatum 15.11.2017.
- [2] Easton, K; Nemhauser, G; Trick, M: The Traveling Tournament Problem: Description and Benchmarks. Berlin Heidelberg 2001. URL: <http://mat.tepper.cmu.edu/trick/ttp.pdf>, Abrufdatum 15.11.2017.
- [3] IBM: IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. URL: <http://www-03.ibm.com/software/products/de/ibmilogcplexoptistud>, Abrufdatum 15.11.2017.
- [4] Gurobi: Gurobi Optimization. URL: <http://www.gurobi.com>, Abrufdatum 15.11.2017.