Matthias Maßmann

Kapazitierte stochastisch-dynamische Facility-Location-Planung

GABLER EDITION WISSENSCHAFT

Produktion und Logistik

Herausgegeben von
Professor Dr. Wolfgang Domschke,
Technische Universität Darmstadt,
Professor Dr. Andreas Drexl,
Universität Kiel,
Professor Dr. Bernhard Fleischmann,
Universität Augsburg,
Professor Dr. Hans-Otto Günther,
Technische Universität Berlin,
Professor Dr. Christoph Haehling von Lanzenauer,
Freie Universität Berlin,
Professor Dr. Karl Inderfurth,
Universität Magdeburg,
Professor Dr. Klaus Neumann,
Universität Karlsruhe,
Professor Dr. Christoph Schneeweiß,
Universität Mannheim (em.),
Professor Dr. Hartmut Stadtler,
Technische Universität Darmstadt,
Professor Dr. Horst Tempelmeier,
Universität zu Köln,
Professor Dr. Gerhard Wäscher,
Universität Magdeburg

Kontakt: *Professor Dr. Hans-Otto Günther, Technische Universität Berlin, FG BWL – Produktionsmanagement, Wilmersdorfer Str. 148, 10585 Berlin*

Diese Reihe dient der Veröffentlichung neuer Forschungsergebnisse auf den Gebieten der Produktion und Logistik. Aufgenommen werden vor allem herausragende quantitativ orientierte Dissertationen und Habilitationsschriften. Die Publikationen vermitteln innovative Beiträge zur Lösung praktischer Anwendungsprobleme der Produktion und Logistik unter Einsatz quantitativer Methoden und moderner Informationstechnologie.

Matthias Maßmann

Kapazitierte stochastisch-dynamische Facility-Location-Planung

Modellierung und Lösung
eines strategischen
Standortentscheidungsproblems
bei unsicherer Nachfrage

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. Heinz D. Mathes

Deutscher Universitäts-Verlag

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dissertation Universität Frankfurt a.M., 2005

1. Auflage April 2006

Lektorat: Brigitte Siegel / Nicole Schweitzer

Der Deutsche Universitäts-Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.duv.de

Umschlaggestaltung: Regine Zimmer, Dipl.-Designerin, Frankfurt/Main
Druck und Buchbinder: Rosch-Buch, Scheßlitz
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier
Printed in Germany

ISBN-10 3-8350-0221-X
ISBN-13 978-3-8350-0221-0

Geleitwort

Die Analyse von Problemen der Standortwahl war schon immer ein Bereich intensiver Forschung in den Wirtschaftswissenschaften. Seit den klassischen Ansätzen, wie etwa die "von Thünen'schen Ringe" oder das "Steiner-Weber Modell", ist eine nahezu unüberschaubare Vielzahl von Publikationen entstanden, die sich mit unterschiedlichen Schwerpunkten den verschiedenen Facetten dieses Problems widmeten. Standen dabei zunächst meist nur Entscheidungen bezüglich einzelner Standorte im Mittelpunkt der Überlegungen, so kann man in jüngster Zeit eine deutliche Veränderung in der Fokussierung der Analyse in Richtung auf Standortnetzwerke beobachten.

Die generelle Problemstellung bei der Planung solcher Netzwerke, die gegenwärtig die Forschung dominiert, lässt sich dabei wie folgt skizzieren: Für eine gegebene Konfiguration von Produktionsstandorten ist zu entscheiden, ob und zu welchem Zeitpunkt an vorgegebenen potentiellen Standortalternativen neue Produktionsstätten mit a-priori festgelegten Kapazitäten eröffnet, ob und zu welchem Zeitpunkt bestehende Produktionsstätten geschlossen, und wie die Materialflüsse (Warenflüsse) zwischen den eingerichteten Produktionsstätten und den Nachfragern zu jedem Zeitpunkt gestaltet werden sollen. Diese letzte Entscheidung ist dabei für Standortnetzwerke von besonderer Bedeutung, da sich der wirtschaftliche Nutzen einer gewählten Konfiguration im Zeitablauf nicht nur von den Kosten der Errichtung und den Einsparungen durch Schließung von Produktionsstätten abhängt, sondern vor allem von den "Betriebskosten des Netzes" (Produktions-, Lager- und Transportkosten) beeinflusst wird.

Problemstellungen dieser Klasse gehören zu den Entscheidungsproblemen der strategischen Ebene, die sich insbesondere durch ihren vergleichsweise langfristigen Planungshorizont, die damit einhergehende Unsicherheit der relevanten Planungsinformationen und eine starke zeitliche Interdependenz der zu treffenden Teilentscheidungen charakterisieren lassen. Ihre modellmäßige Abbildung und Analyse erfordert folglich zwingend den Einsatz dynamisch-stochastischer Konzepte. Vor diesem Hintergrund entwickelt der Autor ein stochastisches Entscheidungsmodell zur Ermittlung einer langfristigen Standortstrategie. Stochastisches Element seines Modells bilden die Bedarfsmengen der einzelnen Nachfrager in den Perioden des Planungszeitraums, die durch Markov-Ketten abgebildet werden. Zur numerischen Berechnung optimaler Lösungen schlägt er die Lagrange-Relaxation in Kombination mit der stochastisch-dynamischen Optimierung vor: Durch Relaxation der Nachfragebedingung des Modells lässt sich nämlich zeigen, dass bei bekannten (hier stochastischen) Lagrange-Parametern das Gesamtproblem in so viele unabhängige Teilprobleme wie existierende Standorte separiert werden kann. Für diese Teilprobleme werden dann mit Hilfe der stochastisch-dynamischen Optimierung, deren Einsatz sich aufgrund der Markov-Eigenschaft der Nachfrage anbietet, für jeden Planungszeitpunkt und für jeden Standort vergleichsweise einfache und plausible Regeln abgeleitet, die zu entscheiden gestatten, ob zum jeweiligen Zeitpunkt eine Öffnung, Schließung oder Beibehaltung des jeweiligen Zustands zu erfolgen hat. Zur Bestimmung der Lagrange-Parameter selbst wird die konvexe Hülle der Restriktionen des Ausgangsproblems analytisch erzeugt und anschließend dualisiert. Durch Nutzung der spezifischen Problemstruktur des Duals lassen sich dabei dessen optimale Lösungen, die für das Primal benötigten optimalen Lagrange-Parameter, ohne aufwendige Numerik "quasi durch Inspektion" ableiten.

Die vorliegende Arbeit stellt damit nicht nur einen beeindruckenen Beitrag zur Weiterentwicklung der Forschung im Bereich Facility-Location-Planning dar. Darüber hinaus liefert sie einen konzeptionell und methodisch geschlossenen Ansatz zur Analyse moderner Standortplanungsprobleme, der auf der Basis kommerzieller Soft-Ware unschwer zur numerischen Lösung praktischer Fragestellungen verwendet werden kann.

Heinz D. Mathes

Vorwort

Standortentscheidungen gehören zu den wichtigsten strategischen Entscheidungen eines Unternehmens. Den Anstoß, mich mit diesen Standortentscheidungen zu beschäftigen, bekam ich durch die Mitarbeit an einem Forschungsprojekt eines großen deutschen Automobilherstellers, in dem es darum gehen sollte, die bestehende Standortstruktur zu untersuchen und potentiell zu schließende Standorte zu identifizieren. Mein Vorschlag war, verschiedene Entscheidungsmodelle zur Standortplanung zu sichten und zu überprüfen, welche auf die vorliegende Situation anwendbar sind.

Die Entscheidungsträger dieses Automobilherstellers machten jedoch schnell klar, daß sie sich bei der Standortplanung lieber auf ihr Bauchgefühl als auf Modelle verlassen, und so wurde das Projekt sehr schnell begraben. Mein Interesse an Standortplanungsmodellen war jedoch geweckt, so habe ich diesen Weg weiterverfolgt. Das Ergebnis ist die vorliegende Arbeit, die während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur für Produktionswirtschaft entstand und vom Fachbereich Wirtschaftswissenschaften der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main als Dissertation angenommen wurde.

Die Entstehung dieser Arbeit haben viele begleitet und unterstützt, bei denen ich mich herzlich bedanken möchte. An allererster Stelle ist mein Doktorvater, Herr Prof. Dr. Heinz D. Mathes, zu nennen. Seiner Beharrlichkeit ist es zu verdanken, daß ich nach Frankfurt gekommen bin. Er hatte stets ein offenes Ohr für alle Fragen und wies mir in kritischen Momenten den richtigen Weg. Er hat an seinem Lehrstuhl eine kooperative und kreative Atmosphäre geschaffen, ideale Rahmenbedingungen also für das Gelingen einer Arbeit. Meinen Dank kann ich nur andeuten.

Gleichfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Heinrich Rommelfanger für die kurzfristige Übernahme des Korreferats. Nie werde ich seinen Ausspruch "Aber dafür werde ich doch bezahlt!" vergessen. Herrn Prof. Dr. Roland Eisen danke ich für die sofortige Bereitschaft, an meiner Prüfungskommission teilzunehmen.

Herrn Prof. Dr. Heinz Isermann danke ich für die bestimmte und souveräne Art und Weise, in der er den Vorsitz der Prüfungskommission ausgeübt hat. Damit hat auch er einen großen Beitrag zum Gelingen meiner Promotion geleistet.

Natürlich gibt es noch weitere Menschen, die jeder auf seine Art einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben. Ihnen allen möchte ich versichern, ich habe ihre Hilfe nicht vergessen und schätze sie sehr, und ich möchte mich bei ihnen allen herzlich bedanken.

Matthias Maßmann

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Symbolverzeichnis

Abschnitt 3.3.4

Eindimensionale Größen

i	Zeilenindex
d	vorgegebener Wert
p	vorgegebene Wahrscheinlichkeit

Vektoren

b	Begrenzungsvektor
c	Vektor der Zielfunktionskoeffizienten
$\tilde{h}$	zufallsbehafteter Begrenzungsvektor
$\tilde{q}$	zufallsbehafteter Bewertungsvektor
x	Vektor der Entscheidungsvariablen
$\tilde{y}$	Vektor zufallsbehafteter Entscheidungsvariablen

Matrizen

A	technologische Matrix
$\tilde{T}$	zufallsbehaftete technologische Matrix
W	technologische Matrix

Funktionen

$E(\cdot)$	Erwartungswert
$\tilde{Q}(\cdot)$	recourse function
$Q(\cdot)$	Erwartungswert von $\tilde{Q}(\cdot)$
$z_{\cdot}(\cdot)$	Zielfunktion eines Optimierungsproblems

Abschnitte 3.4.3 und 3.4.4

Mengen

I	Menge potentieller Standorte
I_c	Menge potentiell zu schließender Standorte
I_o	Menge potentiell zu öffnender Standorte
J	Menge aller Kunden
K	Menge möglicher Szenarien
S	Menge möglicher Umweltzustände

Indizes

i	Standort
j	Kunde
k	Szenario
s	Umweltzustand
t	Periode, $t = 1, \ldots, T$

Modellparameter

a_i	Kapazität von Standort i
b_j	Nachfrage von Kunde j
c_{ij}	Transportkosten pro Mengeneinheit von i nach j
c_{ij}^t	Transportkosten pro Mengeneinheit von i nach j in Periode t
d_j	Nachfrage von Kunde j
d_j^k	Nachfrage von Kunde j bei Szenario k
f_i	Einrichtungskosten von Standort i
f_i^t	Einrichtungskosten von Standort i in Periode t
g_i	Betriebskosten von Standort i pro Kapazitätseinheit
π_k	Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario k
π_s	Eintrittswahrscheinlichkeit von Umweltzustand s
p_j	Erlös pro Mengeneinheit bei Kunde j
p_s	Anzahl geöffneter Standorte bei Umweltzustand s
x_{ij}	Anteil der Nachfrage von j, die i befriedigt
x_{ij}^k	Anteil der Nachfrage von j, die i bei Szenario k befriedigt
x_{ijs}	Anteil der Nachfrage von j, die i bei Umweltzustand s befriedigt
x_{ij}^t	Anteil der Nachfrage von j, die i in Periode t befriedigt
y_i	Binärvariable zur Standorteinrichtung
y_{is}	Binärvariable zur Standorteinrichtung in Umweltzustand s
z_i^t	Binärvariable zur Standorteinrichtung in Periode t

Funktion

$F(\cdot)$	Zielfunktion eines Optimierungsproblems

Abschnitt 4.2

Mengen

M	kompakte Menge
X	diskrete Menge
Y	beliebige Menge

Indizes

i	Summationsindex
k	Iteration des Subgradienten-Verfahrens
k	Szenario
s	Umweltzustand
t	Periode, $t = 1, \ldots, T$

Eindimensionale Größen

α_i	Gewichte einer Konvexkombination
α_k	skalarer Parameter von Iteration k des Subgradientenverfahrens
t_k	Schrittweite von Iteration k des Subgradientenverfahrens

Vektoren

b	Begrenzungsvektor
b_1	Begrenzungsvektor
b_2	Begrenzungsvektor
c	Vektor der Zielfunktionskoeffizienten
λ	Vektor der Lagrange-Parameter
λ^*	optimaler Lagrange-Vektor
$\lambda^{(k)}$	Lagrange-Vektor in Iteration k des Subgradientenverfahrens
m_c	Lösung der Optimierung über $Conv(M)$
m_e	Lösung der Optimierung über M
m_i	Element von M
u	Vektor von Dualvariablen
u^*	dual optimale Lösung
v	Vektor von Dualvariablen
v^*	dual optimale Lösung
w	Vektor von Dualvariablen
x	Vektor der Entscheidungsvariablen
x^*	primal optimale Lösung
x_i	Element von Y
$x_{e,i}$	Extrempunkt von Y
$x^{(k)}$	Optimallösung in Iteration k des Subgradientenverfahrens

Funktion

$v.(\cdot)$	Zielfunktion eines Optimierungsproblems

Abschnitt 4.3

Indizes

n	Anzahl der Stufen eines Markov-Prozesses
t	Zeitindex

Größen der stochastischen Modellierung

α_t	Parameter der Autoregression
$(\varepsilon_t)_t$	weißes Rauschen
i	Zustand der Zufallsvariablen
j	Zustand der Zufallsvariablen
k	Zustand der Zufallsvariablen
p_{ijt}	Übergangswahrscheinlichkeit in Periode t
$p_{ij}^{(n)}$	n-stufige stationäre Übergangswahrscheinlichkeit
$(X_t)_t$	Folge von Zufallsvariablen

Funktionen

$c(\cdot)$	Autokovarianz
$r(\cdot)$	Autokorrelation

Abschnitt 4.4

a	Aktion
A	Akionenraum
i	Zustand des Systems
j	Zustand des Systems
n	Index der Stufen
$p(i, a, j)$	Wahrscheinlichkeit eines Übergangs von i nach j bei Aktion a
$r(i, a)$	Gewinn der aktuellen Periode bei Zustand i und Aktion a
$v_{n+1}(i)$	erwarteter maximaler Gewinn der letzten $n + 1$ Perioden

Abschnitte 4.6 bis 4.11

Mengen

I	Menge potentieller Standorte
I_c	Menge potentiell zu schließender Standorte
I_o	Menge potentiell zu öffnender Standorte
J	Menge aller Kunden
K	Menge möglicher Szenarien

Indizes

i	Standort
j	Kunde
k	Szenario
l	Szenario
n	Anzahl der Stufen eines Markov-Prozesses
t	Periode, $t = 1, \dots, T$

Modellparameter

a_i	Kapazität von Standort i
$\tilde{a}_{it}$	Betriebs- und Aktionskosten von Standort i in Periode t
c_{ij}	Transportkosten pro Mengeneinheit von i nach j
$d_{jt}(k)$	Nachfrage von Kunde j in Periode t bei Szenario k
$\underline{f_i}$	Einrichtungskosten von Standort i
$\overline{\overline{f}}_i$	Schließungskosten von Standort i
g_i	Betriebskosten von Standort i pro Kapazitätseinheit
$\pi_t(k)$	Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenario k in Periode t
p_j	Erlös pro Mengeneinheit bei Kunde j
$x_{ijt}(k)$	Anteil der Nachfrage von j, die i in Periode t bei Szenarion k befr
y_{it}	Binärvariable zur Einrichtung von Standort i in Periode t
z_{it}	Binärvariable zum Betrieb von Standort i in Periode t

Größen des Lösungsverfahrens

α	Skalar
F_K	optimaler Zielfunktionswert der Konvexifizierung
λ_j	deterministischer Teil des stochastischen Lagrange-Parameters λ
$\lambda_{jt}(k)$	stochastischer Lagrange-Parameter
$p^{(n)}(k,l)$	n-stufige stationäre Übergangswahrscheinlichkeit von k nach l
φ_{it}	Dualvariable
$\psi_{ijt}(k)$	Dualvariable
$u_{jt}(k)$	Dualvariable
$v_{it}(k)$	Dualvariable
w_{it}^c	Dualvariable
w_{it}^o	Dualvariable
y	Aktion einer Öffnung bzw. Schließung
z	Zustand eines Standortes

Funktionen

$F_{\cdot}(\cdot)$	Zielfunktion eines Optimierungsproblems
$r_{it}(\cdot)$	maximaler Gewinn von Standort i in Periode t
$R_{it}(\cdot)$	maximaler erwarteter Gewinn von Standort i ab Periode t

Abkürzungsverzeichnis

AK	Autokorrelation
AR(p)	autoregressiver Prozeß der Ordnung p
CFLP	capacitated facility location problem
(D)	duales Optimierungsroblem von (P)
DCPLP	dynamic capacitated plant location problem
DUFLP	dynamic uncapacitated facility location problem
EH	Einzelhandel
et al.	et alii
GfK	Gesellschaft für Konsum-, Markt und Absatzforschung
(GL)	Lagrange-Relaxation von (GP)
(GLD)	Lagrange-Dualproblem von (GP)
(GP)	diskretes primales Optimierungsproblem
i.d.R.	in der Regel
i.e.S.	im engeren Sinne
(KGD)	duales Optimierungsroblem von (KGP)
(KGP)	Konvexifizierung von (GP)
(L)	Lagrange-Relaxation von (P)
LEH	Lebensmittel-Einzelhandel
LP	lineare Programmierung
Mio	Millionen
OR	Operations Research
o.V.	ohne Verfasser
PAK	partielle Autokorrelation
S.	Seite
u.B.v.	unter Beachtung von
UFLP	uncapacitated facility location problem