

Dynamic Pricing – State-of-the-Art

Jochen Gönsch, Robert Klein und Claudius Steinhardt

Zusammenfassung

Gegenstand des Dynamic Pricing ist die situative Anpassung von Angebotspreisen an im Zeitablauf variierende Rahmenbedingungen. Die hier seit einigen Jahren beobachtbare Intensivierung der wissenschaftlichen Auseinandersetzung hat es heute zu einem der methodisch fortgeschrittensten Forschungsgebiete an der Schnittstelle zwischen Operations Research, Marketing, Economics und E-Commerce werden lassen. Der vorliegende Beitrag liefert zunächst eine kompakte inhaltliche Einführung in die Grundlagen des Dynamic Pricing sowie in die elementaren mathematischen Modellierungsansätze. Zu ihrer Einordnung wird ein spezifischer Kriterienkatalog entwickelt. Dieser dient als Grundlage für die anschließende, umfassende Literaturanalyse, welche den Schwerpunkt des Beitrags bildet. Abschließend werden mögliche künftige Forschungspotenziale identifiziert.

Schlüsselwörter/Keywords: **Dynamic Pricing, Revenue Management, Optimierung / Optimization, State-of-the-Art**

JEL-Klassifikation: **M19**

Jochen Gönsch
jochen.goensch@wiwi.uni-augsburg.de

Prof. Dr. Robert Klein
robert.klein@wiwi.uni-augsburg.de

Claudius Steinhardt
claudius.steinhardt@wiwi.uni-augsburg.de

Lehrstuhl für Mathematische Methoden der Wirtschaftswissenschaften
Institut für Statistik und Mathematische Wirtschaftstheorie
Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät
Universität Augsburg
86135 Augsburg
Deutschland
<http://www.management-science.de>

1 Vorbemerkung

Durch den zunehmenden Wandel von Verkäufer- hin zu Käufermarkt sehen sich insbesondere Unternehmen des Dienstleistungssektors verstärkt mit neuen Herausforderungen bei den von ihnen verfolgten Preissetzungsstrategien konfrontiert. Während in der Vergangenheit die Möglichkeit bestand, Preise ausschließlich auf Grundlage der zurechenbaren Kosten festzulegen (*Cost-Plus Pricing*), ist heute eine Orientierung an den Strategien direkter Konkurrenten (*Market-Based Pricing*) sowie insbesondere an der Nachfrageseite (*Value Pricing*) unabdingbar (vgl. z.B. *Homburg/Krohmer* 2006, Kap. 12.3 oder *Phillips* 2005, S. 23 ff.). Preise können daher häufig nicht mehr statisch für den gesamten Lebenszyklus eines Produktes festgelegt werden, sondern sind vielmehr dynamisch im Zeitablauf an die jeweils aktuellen, situativen Rahmenbedingungen anzupassen. Mittlerweile wird die Fähigkeit eines Unternehmens, seine Preise innerhalb kürzester Zeit an sich verändernde Rahmenbedingungen anzupassen, in vielen Branchen des Dienstleistungsbereichs als der zentrale kritische Erfolgsfaktor angesehen (vgl. z.B. *Kretsch* 1995). Derartige intertemporale Preisvariationen werden mit dem Begriff *Dynamic Pricing* bezeichnet. Die Entwicklung zugehöriger Methoden hat sich insbesondere in den vergangenen beiden Jahrzehnten zunehmend als interdisziplinärer Gegenstand wissenschaftlicher Auseinandersetzung etabliert, wobei entsprechende Forschungsaktivitäten hauptsächlich den Disziplinen Operations Research, Marketing, Economics sowie E-Commerce zuzuordnen sind. Die Forschungsergebnisse sind in zahlreichen englischsprachigen Veröffentlichungen dokumentiert und wurden bereits vor einigen Jahren durch verschieden fokussierende Übersichtsartikel strukturiert. So identifizieren beispielsweise *Elmaghraby/Keskinocak* (2003) drei insbesondere für den Einzelhandel relevante Unterscheidungskriterien, anhand derer sie einschlägige Literatur einordnen. Weitere umfassende Übersichten zum Dynamic Pricing stammen z.B. von *Bitran/Caldentey* (2003) und *Chan et al.* (2004). Zudem existieren allgemeine Übersichtsarbeiten zum Thema Revenue Management, die sich in begrenztem Umfang auch mit dem Dynamic Pricing beschäftigen (vgl. z.B. *McGill/van Ryzin* 1999, *Tscheulin/Lindenmeier* 2003 und *Chiang et al.* 2007). Allerdings ist zu bemerken, dass gerade in jüngster Zeit eine Vielzahl relevanter Arbeiten entstanden ist, die noch keine ausreichende Berücksichtigung gefunden haben. So präsentieren etwa *Chiang et al.* (2007, S. 105 f.) aufgrund des übergreifenden Anspruchs ihrer Arbeit insgesamt nur sehr wenige aktuelle Publikationen zum Dynamic Pricing. Darüber hinaus existieren nahezu keine deutschsprachigen Veröffentlichungen in referierten Fachzeitschriften, die sich speziell mit der Thematik des Dynamic Pricing auseinandersetzen.¹

Der vorliegende Beitrag versucht diese Lücke zu schließen. Seine Zielsetzung ist zweigeteilt:

- Zum einen erhält der Leser eine kompakte inhaltliche Einführung in das Themenfeld Dynamic Pricing. Dazu werden in Abschnitt 2 die Grundlagen des Dynamic Pricing erläutert und in Abschnitt 3 wesentliche mathematische Modellierungsansätze vorgestellt sowie deren Anwendung illustriert.
- Zum anderen vermittelt der Beitrag dem Leser durch die systematische Aufarbeitung und Einordnung der existierenden, methodenorientierten Literatur zum Thema Dynamic Pricing einen Einblick in den aktuellen Stand der Forschung. Zu diesem Zweck wird in Abschnitt 4 zunächst ein spezifischer Kriterienkatalog entwickelt. Dieser – nach Kenntnisstand der Autoren erste umfassende Katalog speziell zur Klassifikation von Dynamic Pricing Modellierungsansätzen – dient als Grundlage für den eigentlichen Literaturüberblick in Abschnitt 5.

Die Arbeit schließt mit einem kurzen Resümee sowie einem Ausblick auf potenzielle, künftige Forschungsaktivitäten in Abschnitt 6.

2 Grundlagen des Dynamic Pricing

2.1 Definition und begriffliche Abgrenzung

In der einschlägigen Literatur existieren sehr wenige explizite Definitionen des Begriffs Dynamic Pricing. Vielmehr lässt sich die unterstellte Bedeutung häufig nur aus dem jeweiligen Kontext erschließen. In den meisten Fällen wird das Dynamic Pricing im Sinne einer rein anbieterseitigen, nicht verhandelbaren Preisvorgabe verstanden, die im Zeitverlauf „dynamisch“ variiert werden kann. In der englischsprachigen Literatur wird die Verwendung einer solchen Preisvorgabe als Posted Pricing oder Take-it-or-Leave-it Pricing bezeichnet (vgl. z.B. *Kephart et al.* 2000). Die Bandbreite möglicher Definitionen zeigen die folgenden vier Zitate aus Publikationen mit unterschiedlicher Zielsetzung und unterschiedlichem Anspruch auf (in der Reihenfolge ihrer Erwähnung: theoretisch-methodisch, populärwissenschaftlich, Überblicksarbeit, anwendungsbezogen):

- „Given an initial inventory of items and a finite horizon over which sales are allowed, we are concerned with the tactical problem of dynamically pricing the items to maximize the total expected revenue.“ (*Gallego/van Ryzin* 1994, S. 999),
- „[...] dynamic pricing – a business strategy in which prices are varied frequently by channel, product, customer and time.“ (*Kambil/Agrawal* 2001, S. 16),
- „[...] the problem faced by a seller who owns a fixed and perishable set of resources that are sold to a pricesensitive population of buyers. In this framework, where capacity is fixed, the seller is mainly interested in finding an optimal pricing strategy that maximizes the revenue collected over the selling horizon.“ (*Bitran/Caldentey* 2003, S. 203),
- „[...] we define [Dynamic Pricing] as changing prices over time without necessarily distinguishing between different types of customers [...].“ (*Biller et al.* 2005, S. 312).

Andere Autoren dehnen den Begriff auf eine Fülle weiterer innovativer Verkaufsmechanismen aus, welche die Interaktion zwischen Anbieter und Nachfrager in den Vordergrund stellen und so eine möglichst gute Annäherung existierender Einzelinteressen ermöglichen. Zu solchen Mechanismen zählen neben *1-zu-1 Verhandlungen* und *Tauschhandel* insbesondere verschiedene Formen der *Auktion*, die unter anderem für den Produktabsatz über das Internet eingesetzt werden (vgl. z.B. *Bichler/Werthner* 2000, *Kephart et al.* 2000, *Milgrom* 2000, *DiMicco et al.* 2001 und *Bichler et al.* 2002). Im Rahmen dieses Beitrags soll der Begriff in der zuerst erwähnten, eng gefassten Bedeutung verstanden werden. Dynamic Pricing lässt sich somit definieren als „das planvolle Vorgehen eines Anbieters, seine einseitigen Preisvorgaben zu (beliebigen) Zeitpunkten innerhalb des Verkaufsprozesses („dynamisch“) zu ändern, um so auf veränderte nachfrage- oder konkurrenzbezogene Rahmenbedingungen mit dem Ziel der Maximierung des Gesamterlöses zu reagieren“ (*Klein/Steinhardt* 2008, S. 176 f.).

Zur Abgrenzung des Dynamic Pricing vom eng verwandten Begriff des Revenue Managements ist zunächst festzuhalten, dass letzteres klassischerweise im engeren Sinne einer sog. Kapazitätssteuerung verstanden wird. Diese hat ihre historischen Wurzeln in der Passagierluftfahrt und basiert typischerweise auf einer segmentorientierten Preisdifferenzierung, welche versucht, unterschiedliche Präferenzen und damit Nutzenstrukturen von Nachfragern verschiedener Marktsegmente auszunutzen (vgl. *Faßnacht* 2003). Dabei werden für jede anzu-

bietende Kernleistung² – bei Fluggesellschaften beispielsweise dem Economy Class-Sitzplatz auf einer bestimmten Flugverbindung – durch Vorgabe sog. Fencingkriterien, z.B. eingeschränkte Stornierungsmöglichkeit oder Mindestaufenthalt, mehrere segmentspezifische Produkte abgeleitet und jeweils mit einem fixen Preis versehen. Der eigentliche Absatzprozess besteht dann in der operativen Kapazitätssteuerung, bei der über die Annahme oder Ablehnung von eingehenden Produkthanfragen entschieden wird, indem eine mengenmäßige – explizite oder implizite – Aufteilung der vorhandenen Ressourcen zu Produkten erfolgt (vgl. z.B. *Corsten/Stuhlmann* 1999, S. 85, *Kimes* 2000, S. 348, *Klein* 2001, S. 248 oder *Kimms/Klein* 2005, S. 5 ff.). Im Dynamic Pricing hingegen wird dem Anbieter ein gewisser monopolistischer Spielraum zugestanden, so dass er die Nachfrage nach seinen Produkten durch Variation der Preise beeinflussen kann. Den Produkten wird daher kein fester Preis zugeordnet. Stattdessen geht man davon aus, dass sich der Preis beliebig anpassen oder aus einer vorgegebenen Menge wählen lässt. Die Steuerung der Nachfrage erfolgt damit durch die Definition einer dynamischen Preisanpassungsstrategie für jedes Produkt und nicht über die Kontingentierung von Kapazitäten (vgl. z.B. *Maglaras/Meissner* 2006, S. 136, sowie *Talluri/van Ryzin* 2004, S. 175). Häufig wird dabei auch gänzlich auf die explizite Durchführung einer segmentorientierten Preisdifferenzierung verzichtet, so dass jeder Kernleistung genau ein Produkt entspricht. Dies lässt sich in der Passagierluftfahrt beispielsweise bei den sog. Low Cost Carriern beobachten, die auf keinerlei Fencingkriterien zurückgreifen. Stattdessen bieten sie jeden Flug zu genau einem Preis an, den sie über den gesamten Buchungszeitraum hinweg dynamisch variieren.

Dennoch ist aus methodischer Sicht eine trennscharfe Abgrenzung nur bedingt möglich. So lässt sich etwa die dynamische Preissetzung auch durch eine Kapazitätssteuerung in gewissem Umfang nachbilden, indem eine hinreichend große Anzahl unterschiedlich bepreister, ansonsten aber identischer Produkte definiert wird, zwischen denen die Kunden gemäß eines geeignet zu spezifizierenden Nachfragemodells wählen.

Es verwundert daher nicht, dass in der Literatur bezüglich der hierarchischen Einordnung des Revenue Managements und des Dynamic Pricing keine Einigkeit besteht. So betrachten in diesem Zusammenhang einige Autoren Dynamic Pricing und Revenue Management als gleichberechtigte, alternative Konzepte der Nachfragesteuerung (vgl. z.B. *Boyd/Bilegan* 2003, S. 1378 f.), während andere den Begriff des Dynamic Pricing in den Vordergrund stellen. Beispielsweise präsentieren *Bitran/Caldentey* (2003) ein generisches Pricing-Modell und zeigen, dass typische Modelle des klassischen Revenue Managements diesbezüglich lediglich einen Spezialfall darstellen. Dagegen erachten mittlerweile zahlreiche Autoren wie z.B. *Tscheulin/Lindenmeier* (2003) oder *Talluri/van Ryzin* (2004) das Dynamic Pricing als eine weitere mögliche Ausprägung eines verallgemeinerten Revenue Management Begriffs. Letztere, deren Betrachtungsweise hier gefolgt werden soll, unterscheiden dazu zwischen „Quantity-based Revenue Management“, also dem oben beschriebenen klassischen Revenue Management, und „Price-based Revenue Management“, zu dem das Dynamic Pricing gezählt wird.

2.2 Ziele

Wie im klassischen Revenue Management so besteht auch im Dynamic Pricing das Fundamentalziel in der Maximierung einer monetären Zielgröße, im Allgemeinen dem erzielbaren Gewinn. Geht man außerdem von fixen Angebotskapazitäten aus, so ergibt sich eine Deckungsbeitrags- bzw. bei geringen variablen Kosten approximativ eine reine Erlösmaximierung (vgl. *Klein* 2001, S. 250, sowie *Kimms/Klein* 2005). Zur Erreichung des Fundamentalziels kann die Anwendung von Verfahren des Dynamic Pricing gegenüber der

Verwendung fixer Angebotspreise aus zwei Gründen vorteilhaft sein (vgl. *Talluri/van Ryzin* 2004, S. 207, sowie *Klein/Steinhardt* 2008, S. 180 f.):

a) Erlösvorteil durch implizite zeitliche Preisdifferenzierung

Durch das Dynamic Pricing versucht der Anbieter, die sich im Verkaufszeitraum ggf. verändernde Preissensibilität bzw. Zahlungsbereitschaft der Kunden gewinnbringend auszunutzen. So legt er in Phasen, in denen die Nachfrage weitestgehend unelastisch reagiert, tendenziell höhere Preise fest als in Phasen elastischer Nachfrage. In diesem Sinne lässt sich Dynamic Pricing als spezielle, implizite Form der zeitlichen Preisdifferenzierung auffassen, mit der Besonderheit, dass sich diese auf den Zeitpunkt des Leistungserwerbs und nicht auf den Zeitpunkt der Leistungserstellung bezieht, falls beide – wie häufig beim Absatz von Dienstleistungen – zeitlich auseinanderfallen.

b) Erlösvorteil durch Reaktion auf zufällige Nachfrageschwankungen

Die Anwendung des Dynamic Pricing ermöglicht dem Anbieter, auf Schwankungen der Nachfrage zu reagieren. Tritt bei knapper Angebotskapazität eine unerwartet große Nachfrage auf, so wird er seine Preise – auch bei unveränderter Erwartung bezüglich der verbleibenden Nachfrage – tendenziell erhöhen; denn es stehen ihm für den weiteren Verkauf nur noch unerwartet wenige Einheiten zur Verfügung, die er potenziell auch zu einem höheren Preis als geplant vollständig absetzen kann. Entsprechend verhält es sich umgekehrt für den Fall, dass die Nachfrage unerwartet klein ausfällt.

2.3 Anwendungsgebiete

2.3.1 Einzelhandel

Das wohl typischste Anwendungsgebiet des Dynamic Pricing stellt der Einzelhandel dar. Neben zahlreichen Veröffentlichungen, die auf spezielle Analysen, Anwendungsfälle und Erfolge des Dynamic Pricing in diesem Kontext eingehen (vgl. z.B. *Pashigian* 1988, *Pashigian/Bowen* 1991, *Warner/Barsky* 1995, *Mantrala/Rao* 2001, *Heching et al.* 2002 sowie *Talluri/van Ryzin* 2004, Kap. 5.1.2 und 10.4), veranschaulichen auch die meisten eher methodisch orientierten Veröffentlichungen ihre Ausführungen am Beispiel des Handelssektors (vgl. z.B. *Bitran/Mondschein* 1993, *Feng/Gallego* 1995 und *Bitran/Mondschein* 1997). Dynamische Preisanpassungen werden dabei insbesondere im saisonalen Einzelhandel von Sport- oder Modeartikeln eingesetzt, mit dem Ziel, das fixe Anfangsinventar innerhalb der Saison erlösmaximal abzuverkaufen, da es danach praktisch wertlos wird. Auch Produkte, die aus anderen Gründen einem sehr kurzen Produktlebenszyklus unterworfen sind, wie z.B. High-Tech Artikel oder verderbliche Lebensmittel, eignen sich für die Anwendung des Dynamic Pricing.

Bei den erwähnten Beispielen ergeben sich in der Regel im Laufe des Verkaufszeitraums tendenziell kontinuierliche Preissenkungen, so dass man auch von *Markdown Pricing* spricht (vgl. z.B. *Phillips* 2005, Kap. 10). Grund hierfür ist vor allem eine über die Saison oder den Lebenszyklus hinweg kontinuierlich abnehmende Zahlungsbereitschaft der Käufer, die sich z.B. in der immer kürzer werdenden Restnutzungsdauer sowie der Ausdünnung des Angebotssortiments begründet (vgl. *Zhao/Zheng* 2000, S. 376). Darüber hinaus bestehen von Seiten der Händler häufig Schwierigkeiten hinsichtlich der Einschätzung existierender Zahlungsbereitschaften, so dass in der Hoffnung auf sog. *Hot Seller* mit vergleichsweise überhöhten Angebotspreisen begonnen wird, diese aber je nach Nachfrageentwicklung im weiteren Verlauf ggf. nach unten korrigiert werden müssen (vgl. *Feng/Gallego* 1995, S. 1372).

2.3.2 Fluggesellschaften

Ein weiterer wichtiger Anwendungsbereich des Dynamic Pricing besteht im Verkauf von Flugtickets. Insbesondere die bereits erwähnten, in den vergangenen Jahren zunehmend auf den Markt drängenden Low Cost Carrier nutzen das Dynamic Pricing als Alternative zum klassischen, mengenbasierten Revenue Management, dessen Umsetzung bei diesen Gesellschaften aufgrund fehlender Fencing-Kriterien zur Realisierung einer expliziten Preisdifferenzierung erschwert ist. So erlaubt beispielsweise der ausschließliche Verkauf von One-Way-Tickets, ein für Low Cost Carrier übliches Vorgehen, keine Fencing-Kriterien wie Wochenendbindung oder Mindestaufenthalt (vgl. *Klein/Steinhardt* 2008, S. 173). In der Literatur beschäftigt sich beispielsweise *Barlow* (2004) mit der Erlössteuerung bei Low Cost Carriern, die er am Beispiel des Unternehmens easyJet beschreibt. *Marcus und Anderson* (2008) stellen einen Dynamic Pricing Ansatz für Low Cost Carrier vor, der insbesondere auch die Konkurrenz zu höherpreisigen Anbietern berücksichtigt. Aber auch herkömmliche Fluggesellschaften versuchen ihrerseits, den Ansatz des Dynamic Pricing – nicht zuletzt aufgrund des Erfolges der Low Cost Carrier – in unterschiedlichem Umfang auf bestimmten Flugstrecken zu adaptieren (vgl. z.B. *Foran* 2003, *Anjos et al.* 2004, 2005 sowie *Donnelly et al.* 2004). Eine Übersicht zum Dynamic Pricing in der Luftfahrtindustrie im Allgemeinen geben *McAfee und te Velde* (2006), die darüber hinaus anhand beobachteter Preisverläufe den Einsatz des Dynamic Pricing im US-amerikanischen Markt untersuchen.

Im Gegensatz zum Einzelhandel sind beim Verkauf von Flugtickets im Buchungszeitraum steigende Preise charakteristisch (sog. *Markup Pricing*³). Dies liegt vorwiegend darin begründet, dass bei zahlungskräftigen Geschäftsreisenden erhebliche Valuationsrisiken (vgl. *Ng* 2007) bestehen und sie daher tendenziell kurzfristig buchen. So besteht im Fall nicht-stornierbarer Tickets zu Beginn des Buchungszeitraums für den Einzelnen tendenziell ein höheres Risiko, die Flugreise letztlich aus verschiedenen Gründen wie Krankheit, beruflichen Veränderungen o.ä. nicht antreten zu können. Preissensiblere Urlaubsreisende hingegen buchen frühzeitig, da bei Ihnen umgekehrt sog. Akquisitionsrisiken, wie das Risiko, dass die gewünschte Reise später ausgebucht ist, überwiegen. Nur mit Hilfe steigender Preise lassen sich folglich die unterschiedlichen Zahlungsbereitschaften beider Kundengruppen möglichst weitgehend abschöpfen. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass Preissenkungen im Verkaufszeitraum gegenüber Kunden, die bereits ein Ticket erstanden haben, allgemein nur schwer zu rechtfertigen sind (vgl. *Talluri/van Ryzin* 2004, S. 180 f.).

2.3.3 Weitere Anwendungsbereiche

Neben dem Einsatz im Einzelhandel und bei Fluggesellschaften bieten sich Methoden des Dynamic Pricing auch für weitere Branchen des Dienstleistungssektors an. So beschäftigen sich etwa *Gans/Savin* (2007) mit der Problemstellung eines Automobilvermieters, dynamisch die Angebotspreise für eintreffende *Walk-In* Kunden festzulegen und gleichzeitig über Annahme bzw. Ablehnung von Vertragskundenanfragen zu vorverhandelten Preisen zu entscheiden. *Schütze* (2008) belegt empirisch, dass auch in der Hotellerie auf Methoden des Dynamic Pricing zurückgegriffen wird, indem er Daten eines großen Hotelreservierungssystems auswertet. Auch die Automobilindustrie ist ein vielversprechendes Anwendungsgebiet des Dynamic Pricing. So formulieren *Biller et al.* (2005) für einen amerikanischen Automobilhersteller einen Ansatz zur Koordination von Produktions- und dynamischen Preisentscheidungen bei Anwendung eines Direct-to-Customer Vertriebsmodells. Hierbei identifizieren sie Erlössteigerungen gegenüber der Verwendung fixer Verkaufspreise von bis zu 7%. *Jerenz* (2008) beschäftigt sich in Kooperation mit einem deutschen Automobilhersteller mit der Anwendung des Dynamic Pricing für den Absatz von

Gebrauchtwagen. Allgemein gewinnt das Dynamic Pricing auch für die Sachgüterproduktion an Bedeutung. So verwenden beispielsweise *Hall et al.* (2008) einen Dynamic Pricing Ansatz, um in der Auftragsfertigung überschüssige Kapazitäten auszulasten. *Harvey et al.* (2004) schildern fallstudienartig die Einführung eines Dynamic Pricing Ansatzes im B-2-B Bereich in der Ölindustrie, wobei der zu bepreisende Mineralölvertrieb an Kraftwerke, Transportunternehmen, Distributoren etc. über eine Vielzahl geographisch verteilter Terminals erfolgt.

3 Grundmodelle des Dynamic Pricing

Ergänzend zu den Ausführungen des vorherigen Abschnitts wird im Folgenden in die quantitative Modellierung von Dynamic Pricing Problemen eingeführt, um ein grundlegendes Verständnis der Wirkungszusammenhänge sowie der resultierenden Preissetzungspolitiken zu vermitteln. Ausgangspunkt dafür ist ein einzelnes, abzusetzendes Produkt mit einer fixen Angebotskapazität C , die innerhalb eines begrenzten, ebenfalls fixen Verkaufszeitraums zur Verfügung steht und danach verfällt. Der Verkaufszeitraum sei in T diskrete Perioden $t = T, \dots, 1$ unterteilt, die rückwärts beginnend mit Periode T und endend mit Periode 1 indiziert werden. Jeweils zu Beginn einer Periode erfolgt eine Preisentscheidung, mit der die Höhe der innerhalb der Periode auftretenden Nachfrage beeinflusst werden kann. Die Problemstellung des Dynamic Pricing besteht darin, für jede Periode den Angebotspreis derart festzulegen, dass der über alle Perioden hinweg erzielte Gesamterlös bzw. dessen Erwartungswert maximal wird.

3.1 Stochastisches, dynamisches Grundmodell

3.1.1 Allgemeine Modellformulierung

Der zentrale Bestandteil eines jeden Dynamic Pricing Modells ist zunächst die mathematische Formulierung des Zusammenhangs zwischen Angebotspreis und resultierender Nachfrage. Dieser sei für jede der $t = T, \dots, 1$ Perioden durch die stochastische Nachfragefunktion (Preisabsatzfunktion) $D_t(p_t)$ beschreibbar, welche die jeweilige Höhe der Nachfrage in Abhängigkeit des festgelegten Angebotspreises p_t angibt. Darüber hinaus gelte $E(D_t(p_t)) = d_t(p_t)$, wobei $d_t(p_t)$ eine streng monoton fallende und stetig differenzierbare deterministische Preisabsatzfunktion darstellt. Beide Funktionen liefern ausschließlich nichtnegative Nachfragemengen. Das auf dieser Grundlage zu lösende mehrperiodige Entscheidungsproblem ist *dynamisch*, da der Anbieter zu Beginn jeder Periode in Abhängigkeit von der aktuell verfügbaren Restangebotsmenge sowie von der noch verbleibenden Länge des Verkaufszeitraums eine neue Preisentscheidung treffen kann. Es ist darüber hinaus *stochastisch*, da die aus einer bestimmten Preisfestlegung resultierende Nachfragehöhe wie beschrieben eine preisabhängige Zufallsvariable darstellt, deren konkrete Realisierung der Anbieter nicht exakt voraussagen kann. Insgesamt ergibt sich somit ein *stochastisches, dynamisches Optimierungsproblem*, das mit den Methoden der *Dynamischen Optimierung (DO)*⁴ gelöst werden kann. Die zugehörige *Bellman'sche Funktionalgleichung* lautet (**Modellformulierung M1**):

$$V(c, t) = \max_{p_t} E(p_t \cdot \min\{D_t(p_t), c\} + V(c - \min\{D_t(p_t), c\}, t-1)) \quad (1)$$

für alle $0 \leq c \leq C$ und $t = T, \dots, 1$.

Die notwendigen Randbedingungen lauten:⁵

$$V(c,0) = 0 \text{ für alle } c \geq 0 \quad (2)$$

$$V(0,t) = 0 \text{ für } t = T, \dots, 1 \quad (3)$$

Die an *Bitran/Mondschein* (1993, S. 10 ff.) sowie *Bitran/Wadhwa* (1996b, S. 7 ff.) angelehnte Formulierung lässt sich wie folgt erläutern: Jede Periode t , für die eine separate Preisentscheidung getroffen werden kann, entspricht einer *Stufe* des dynamischen Optimierungsproblems. Entsprechend lassen sich die *Zustände*, in denen sich das System in Stufe t befinden kann, eindeutig durch die dort theoretisch möglichen Angebotsrestbestände c und somit insgesamt durch die Tupel (c,t) charakterisieren. Ziel des Entscheidungsproblems ist es nun, eine *Politik* zu bestimmen, welche ausgehend von dem Anfangszustand (C,T) den erwarteten Gesamterlös maximiert. Die zur Bestimmung des Erlösmaximums benötigte *Wertfunktion* $V(c,t)$ gibt für jeden möglichen Zustand den in den verbleibenden Perioden erzielbaren erwarteten Resterlös an. Bei der Berechnung dieses Erwartungswertes sind je nach Verteilung der Zufallsvariablen $D_t(p_t)$ im Allgemeinen mehrere *Umweltzustände* einzubeziehen, bei stetig verteilten $D_t(p_t)$ gar unendlich viele. Darüber hinaus ist explizit zu berücksichtigen, dass die in einer Periode eintreffende Nachfrage aufgrund der begrenzten Kapazität ggf. nicht vollständig bedient werden kann. Der zu berechnende Erwartungswert $E(\cdot)$ setzt sich auf jeder Stufe für jeden möglichen Umweltzustand aus zwei Summanden zusammen (vgl. (1)):

- Der unmittelbar auf der jeweiligen Stufe erzielbare Erlös ergibt sich als Produkt aus gewähltem Angebotspreis p_t und absetzbarer Menge $\min\{D_t(p_t), c\}$.
- Der in den verbleibenden Verkaufsperioden erzielbare Erlös berechnet sich rekursiv zu $V(c - \min\{D_t(p_t), c\}, t-1)$.

Die Randbedingungen (2) und (3) stellen sicher, dass am Ende des Verkaufszeitraums bzw. bei aufgebrauchter Angebotskapazität kein weiterer Erlös generiert werden kann.

Zur Lösung des durch (1)–(3) definierten Optimierungsproblems ist die Bellman'sche Funktionalgleichung (1) für sämtliche denkbaren Zustände (c,t) auszuwerten. Dies kann ausgehend von der Stufe 1 in Form einer Rückwärtsrekursion bzw. eines Roll Back-Verfahrens erfolgen, bis letztlich die Stufe $t = T$ erreicht wird.

3.1.2 Bernoulli Modell

Ein häufig betrachteter Spezialfall des zuvor geschilderten Modells ergibt sich, wenn die periodenbezogenen Nachfragefunktionen derart definiert sind, dass sich Kaufanfragen stets auf genau eine Mengeneinheit beziehen und darüber hinaus in jeder Preissetzungsperiode t maximal eine Anfrage möglich ist. Der Erwartungswert der Nachfrage $d_t(p_t)$ kann dann gleichzeitig als Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen der jeweiligen Anfrage aufgefasst werden (Bernoulli-Zufallsvariable). Entsprechend gibt $1 - d_t(p_t)$ die Wahrscheinlichkeit an, dass keine Anfrage eintrifft.⁶ Die Definition von $d_t(p_t)$ kann anschaulich auf Grundlage kundenindividueller *Zahlungsbereitschaften* erfolgen. Dabei geht man davon aus, dass in jeder Periode t ein Kunde erscheint und sich genau dann für den Kauf des Produktes entscheidet, wenn seine Zahlungsbereitschaft größer oder gleich dem aktuellen Angebotspreis

p_t ausfällt. Die Zahlungsbereitschaft wird dabei als kontinuierliche Zufallsvariable mit Verteilungsfunktion $F_t(\cdot)$ modelliert. Ein Kauf kommt mit der Wahrscheinlichkeit $d_t(p_t) = 1 - F_t(p_t)$ zustande.

Die Bellman'sche Funktionalgleichung (1) lässt sich für das beschriebene Nachfragemodell wie folgt vereinfachen (**Modellformulierung M2**):

$$V(c, t) = \max_{p_t} \{ d_t(p_t) \cdot (p_t + V(c-1, t-1)) + (1 - d_t(p_t)) \cdot V(c, t-1) \} \quad (4)$$

für alle $0 \leq c \leq C$ und $t = T, \dots, 1$.

Bei der Berechnung des stufenbezogenen Erwartungswertes ist hier das Eintreten zweier möglicher Umweltzustände zu berücksichtigen (vgl. (4)):

- Mit der Wahrscheinlichkeit $d_t(p_t)$ trifft in der jeweiligen Periode t eine Anfrage ein, die zu einem unmittelbaren Erlös in Höhe von p_t Geldeinheiten führt. Gleichzeitig verringert sich in diesem Fall jedoch die noch verfügbare Angebotskapazität um eine Einheit, so dass in den verbleibenden Perioden noch mit einem Resterlös in Höhe von $V(c-1, t-1)$ gerechnet werden kann. Insgesamt ergibt sich somit der erste Summand des Erwartungswertes zu $d_t(p_t) \cdot (p_t + V(c-1, t-1))$.
- Mit der Wahrscheinlichkeit $1 - d_t(p_t)$ trifft in Periode t keine Anfrage ein. Es resultiert somit kein unmittelbarer Erlöszuwachs und die Restangebotskapazität steht vollständig für die verbleibenden Perioden $t-1, \dots, 1$ zur Verfügung. Als zweiter Summand des Erwartungswertes resultiert damit $(1 - d_t(p_t)) \cdot V(c, t-1)$.

3.1.3 Modellanwendung

Die Anwendung der stochastischen, dynamischen Formulierung wird im Folgenden am Beispiel eines Bernoulli-Modells mit $T = 50$ Perioden und einer zur Verfügung stehenden Angebotskapazität von $C = 15$ Kapazitätseinheiten illustriert. Die Zahlungsbereitschaften der Kunden seien zeithomogen im Intervall $[0, 200]$ gleichverteilt, so dass sich periodeneinheitlich die folgende Funktion für die Kaufwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit des festgelegten Preises ergibt:

$$d_t(p_t) = 1 - \frac{1}{200} p_t \text{ mit } p_t \in [0, 200], t = T, \dots, 1 \quad (5)$$

Die im Rahmen der Rückwärtsrekursion der Dynamischen Optimierung auf jeder einzelnen Stufe zu betrachtenden Maximierungsprobleme lassen sich analytisch lösen (vgl. Klein/Steinhardt 2008, S. 213). Als optimaler Preis $p_{t,c}^*$ in Stufe t bei verfügbarer Restkapazität c ergibt sich:

$$p_{t,c}^* = 100 + \frac{1}{2} (V(c, t-1) - V(c-1, t-1)) \quad (6)$$

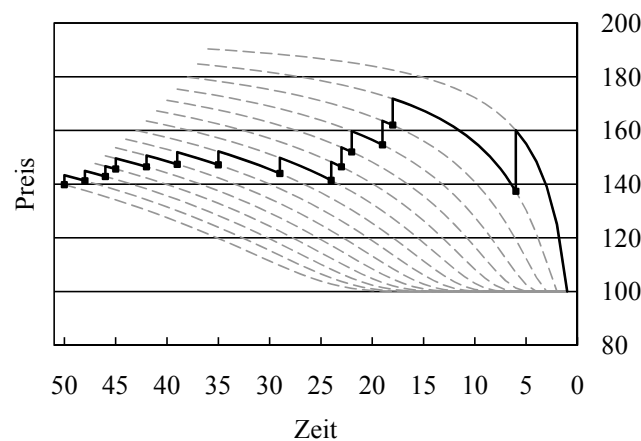
Dabei entspricht der Term $V(c, t-1) - V(c-1, t-1)$ den im Zustand (c, t) geltenden Opportunitätskosten⁷ der Angebotskapazität, d.h. er gibt an, um wie viele Einheiten sich der erwartete Resterlös bei einer Verknappung der Restangebotsmenge um eine Mengeneinheit verringern

würde. Man kann sich leicht überlegen, dass im Optimum der Grenzerlös der Angebotskapazität genau den Opportunitätskosten entspricht.

Mit Hilfe der Formeln (4) und (6) sowie der Randbedingungen (2) und (3) lässt sich im Laufe des Verkaufsprozesses für jeden eintretenden Zustand (c, t) der zugehörige optimale Angebotspreis bestimmen. Ergebnis ist eine optimale Preisanpassungspolitik, die in Abb. 1 für eine konkrete Realisierung der Zahlungsbereitschaften illustriert wird. Der resultierende Preisanpassungspfad selbst ist dabei durch die durchgezogene Linie gekennzeichnet, jeder darauf befindliche Punkt stellt ein Kaufereignis dar.⁸ Anhand der Abbildung kann man den typischen Verlauf dynamischer Preisanpassungspolitiken erkennen: In Phasen, in denen keine Einheit verkauft wird, sinkt der Angebotspreis kontinuierlich von Periode zu Periode. Durch diese Preissenkungen erhöht sich sukzessive die Wahrscheinlichkeit für einen künftigen Kauf. Kommt es schließlich zu einem Kaufereignis, so steigt der Preis sprunghaft an, sinkt danach wieder kontinuierlich usw.

In Abb. 1 sind zusätzlich gestrichelte Linien eingezeichnet, welche für verschiedene fixe Restkapazitätsniveaus c jeweils die optimalen Preisverläufe darstellen (*Iso-Kapazitätslinien*). Dabei gibt die unterste Linie den Preisverlauf für $c = 15$, die oberste denjenigen für $c = 1$ an. Unter Berücksichtigung der Iso-Kapazitätslinien kann man sich den Preisanpassungsprozess wie folgt veranschaulichen: Zu Beginn des Verkaufszeitraums folgt der Angebotspreis zunächst der Iso-Kapazitätslinie für $c = 15$. Sobald ein Verkauf stattfindet, springt der Preis auf die nächsthöhere Linie ($c = 14$) und folgt wiederum dieser, bis er beim nächsten Verkauf weiter nach oben springt usw.

Abb. 1: Exemplarischer Preisanpassungspfad und Iso-Kapazitätslinien



Bezüglich des Verlaufes der Iso-Kapazitätslinien lassen sich die beiden folgenden, wichtigen *Monotonieeigenschaften* feststellen:

- Alle Iso-Kapazitätslinien sind monoton fallend. Dies verdeutlicht den Sachverhalt, dass bei gleichbleibender Restkapazität, d.h. ausbleibenden Verkäufen, der Angebotspreis mit fortschreitender Zeit kontinuierlich sinkt.
- Die Iso-Kapazitätslinien schneiden sich nicht. Dies bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt des Verkaufszeitraums der optimale Angebotspreis umso größer ist, je knapper die noch zur Verfügung stehende Angebotskapazität ausfällt.

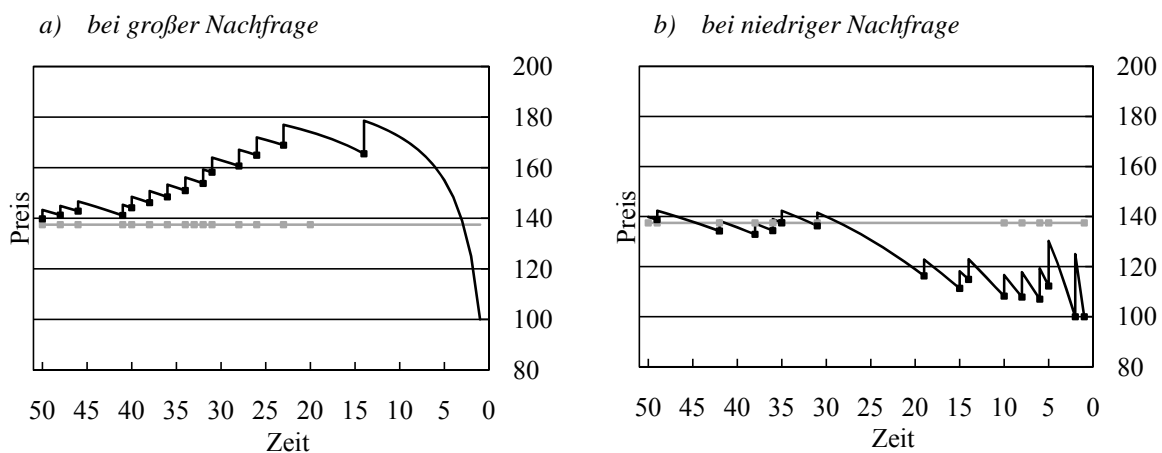
Diese beiden zentralen Aussagen bezüglich dynamischer Preisanpassungsprozesse lassen sich allgemein für Bernoulli-Modelle mit zeithomogenen Zahlungsbereitschaften beweisen und formal wie folgt angeben (vgl. z.B. *Bitran/Mondschein* 1993, S. 6):

$$p_{t+1,c}^* \geq p_{t,c}^* \text{ für } t = T, \dots, 1, c \geq 0 \quad (7)$$

$$p_{t,c}^* \geq p_{t,c+1}^* \text{ für } t = T, \dots, 1, c \geq 0 \quad (8)$$

Nachfolgend werden für das Beispiel zwei Szenarien betrachtet, die mögliche Vorteile des Dynamic Pricing gegenüber der Verwendung einer Fixpreisstrategie (vgl. z.B. *Klein/Steinhardt* 2008, S. 207 ff.) verdeutlichen.⁹ In Abb. 2a) ist ein Szenario dargestellt, bei dem die Zahlungsbereitschaften der Kunden und somit die Nachfrage unerwartet groß ausfallen. Die Verwendung des erlösoptimalen Fixpreises (graue waagrechte Gerade) führt in diesem Fall dazu, dass der Angebotsbestand bereits nach 31 Perioden vollständig ausverkauft ist. Demgegenüber wird durch die Mechanismen des Dynamic Pricing der Preis aufgrund der großen Nachfrage und der dadurch immer knapper werdenden Restkapazität kontinuierlich erhöht. In der Folge sinken die Verkaufswahrscheinlichkeiten, so dass trotz einer massiven Preissenkung gegen Ende des Verkaufszeitraums nicht alle Einheiten verkauft werden können. Dieser scheinbare Nachteil wird jedoch durch die im Durchschnitt wesentlich höheren erzielten Stückelerlöse kompensiert, so dass die Preisanpassungspolitik gegenüber dem Fixpreis in Summe zu einer Erlössteigerung von mehr als 3% führt.

Abb. 2: *Dynamic Pricing vs. Fixpreis*



In Abb. 2b) wird umgekehrt ein Szenario dargestellt, bei dem die Zahlungsbereitschaften der Kunden unerwartet gering ausfallen. Hier führt die Fixpreisstrategie dazu, dass nur 12 Einheiten verkauft werden können. Demgegenüber werden durch die dynamische Preisanpassung aufgrund erheblicher Preissenkungen alle Einheiten abgesetzt. Obwohl diese Verkäufe zu geringeren Durchschnittserlösen erfolgen, lässt sich aufgrund der insgesamt größeren Anzahl getätigter Verkäufe ein Erlöszuwachs von fast 9% verzeichnen.

3.2 Deterministisches Ersatzmodell

Zur Approximation von Modell M1 durch ein deterministisches Ersatzmodell kann ein sog. *Certainty Equivalent Control* Ansatz verwendet werden, ein Standardverfahren aus der Theorie der dynamischen Optimierung (vgl. z.B. *Bertsekas* 2005, S. 283 ff.). Die Grundidee des Vorgehens besteht darin, zunächst alle unsicheren Größen durch einen typischen Wert (z.B.

den Erwartungswert) zu ersetzen, so dass sich ein in der Regel leichter lösbares, deterministisches Optimierungsproblem ergibt. Die erste Komponente einer auf dieser Basis ermittelten, statischen Optimalpolitik wird anschließend zur Entscheidungsfindung für die erste Stufe herangezogen. Nach Beobachtung der tatsächlichen Entwicklung des Systems wiederholt sich das Vorgehen, d.h. auf der nächsten Stufe wird ausgehend von dem eingetroffenen Zustand erneut ein entsprechendes Ersatzmodell für die verbleibenden Stufen gelöst, zur Steuerung für die nächste Periode herangezogen usw.

Überträgt man das Vorgehen auf das Dynamic Pricing Problem und ersetzt in Modellformulierung M1 die unsicheren Größen, d.h. die bei einem bestimmten Angebotspreis p_t eintreffende Nachfrage $D_t(p_t)$, durch ihren Erwartungswert $d_t(p_t)$, so ergibt sich das folgende, nichtlineare Optimierungsproblem, das als deterministische Standardformulierung des Dynamic Pricing bezeichnet werden kann, die in dieser oder leicht abgewandelter Form in der einschlägigen Literatur (vgl. z.B. *Phillips* 2005, S. 251 ff. oder *Talluri/van Ryzin* 2004, S. 188 ff.) vielfach zu finden ist (**Modellformulierung M3**):

$$\text{Maximiere } r(p_T, \dots, p_1) = \sum_{t=1}^T p_t \cdot d_t(p_t) \quad (9)$$

unter der Nebenbedingung

$$\sum_{t=1}^T d_t(p_t) \leq C \quad (10)$$

Die Zielfunktion (9) maximiert den Gesamterlös $r(p_T, \dots, p_1)$ als Summe über die in den einzelnen Perioden erzielbaren Teilerlöse $r_t = p_t \cdot d_t(p_t)$. Die Nebenbedingung (10) stellt sicher, dass die Summe der periodenspezifischen Nachfragemengen die insgesamt zur Verfügung stehende Angebotskapazität C nicht überschreitet.¹⁰ Das Problem kann durch Anwendung von Standardverfahren für nichtlineare Optimierungsprobleme optimal gelöst werden (vgl. *Klein/Steinhardt* 2008, S. 196 f.).¹¹

4 Klassifikationskriterien

Die Breite des Forschungsfeldes Dynamic Pricing spiegelt sich in einer enormen, in der Literatur auffindbaren Vielfalt an Modelltypen und Verfahren wider. Deren Unterschiede lassen sich oftmals den praktischen Anforderungen des jeweils betrachteten Anwendungsgebietes zuordnen, die Übergänge zu modellierungstechnisch bedingten Varianten sind jedoch vielfach fließend. In diesem Beitrag soll zunächst eine umfassende Übersicht aller für das Dynamic Pricing relevanten Bereiche gegeben und die jeweiligen Modellierungsmöglichkeiten kurz skizziert werden, um dem Leser einen Überblick über die verschiedenen Aspekte von Dynamic Pricing Ansätzen zu geben. Dazu wird im Folgenden ein Kriterienkatalog vorgestellt, der die im anschließenden Abschnitt 5 vorgenommene, systematische Aufarbeitung der Literatur unterstützt und sich allgemein zur Klassifikation von Dynamic Pricing Entscheidungsmodellen heranziehen lässt. Klassifikationsansätze auf Basis eines Kataloges sind auch in der Literatur zum Thema Revenue Management vorzufinden, ohne jedoch spezielle Aspekte des Dynamic Pricing zu berücksichtigen. So entwickeln beispielsweise *Weatherford und Bodily* (1992) eine in der Literatur oft aufgegriffene, allgemeine Taxonomie zur Einordnung von Ansätzen des klassischen Revenue Managements. Die vielzitierte Arbeit von *McGill/van Ryzin* (1999) präsentiert einen Katalog mit Elementen des Airline Revenue Managements.

a) Sicherheit der Nachfrage

Grundsätzlich unterscheiden sich die in der Literatur betrachteten Optimierungsansätze zunächst hinsichtlich der Berücksichtigung einer gewissen, in der Regel bezüglich der Nachfrage bestehenden Unsicherheit. *Deterministische Modelle*, die exakt vorhersagbares Nachfragerverhalten implizieren, können aufgrund ihrer guten analytischen Handhabbarkeit einfacher zur Analyse auftretender Effekte eingesetzt werden und haben auch in der Praxis eine weite Verbreitung gefunden. Häufig liefert ihre Lösung für die realistischeren, jedoch vielfach auch komplexeren *stochastischen Modelle*, die Unsicherheiten durch die Einbeziehung stochastischer Größen explizit berücksichtigen, obere Schranken bezüglich der betrachteten Optimierungszielsetzung (vgl. Talluri/van Ryzin 2004, S. 204 f.).

b) Zeit

Während *zeitkontinuierliche Modelle* Preisänderungen zu beliebigen Zeitpunkten innerhalb des betrachteten Verkaufszeitraums ermöglichen, lassen *zeitdiskrete Modelle* Preisänderungen lediglich beim Übergang zwischen einzelnen (Sub-)Perioden zu. Bei diesen treten an die Stelle einer durchgängigen, preisabhängigen Nachfrageintensität periodenbezogene Preis-Absatz-Zusammenhänge. Modellierungstechnisch sind dabei *Mikroperioden* und *Makroperioden* zu unterscheiden. Während in jeder Mikroperiode maximal eine Anfrage nach genau einer Mengeneinheit eintreffen kann (vgl. Modell M2), ist innerhalb von Makroperioden – je nach genauer Ausgestaltung der Nachfragefunktionen – der Absatz beliebiger, ggf. auch nicht-ganzzahliger Mengen möglich (vgl. Modell M1). Die Diskretisierung dient einerseits der Vereinfachung, gleichzeitig ist es in der Praxis vielfach weder möglich noch erwünscht, zu jedem beliebigen Zeitpunkt einen anderen Preis zu verlangen (vgl. Bitran/Wadhwa 1996b, S. 3). Durch die geeignete Wahl der Anzahl an Perioden können die Unterschiede zwischen beiden Formulierungen jedoch im Ergebnis gering ausfallen (vgl. Bitran/Mondschein 1997, S. 66).

c) Preis

Hinsichtlich des betrachteten Lösungsraums lassen sich zwei Gruppen von Modellierungsansätzen unterscheiden. Während die grundlegenden Modelle des Dynamic Pricing mit *kontinuierlichen Preisen* arbeiten, beschränken sich zahlreiche Ansätze auf deren Auswahl aus einer endlichen, diskreten Menge, um der in der Praxis verbreiteten Bevorzugung *diskreter Preise* Rechnung zu tragen. So liegen aufgrund psychologischer Erwägungen im Einzelhandel viele Preise bekanntlich knapp unter glatten Beträgen (vgl. Meffert et al. 2008, S. 499).

d) Produktanzahl

In den meisten Veröffentlichungen zum Dynamic Pricing wird, wie auch bei den vorgestellten Modellen aus Abschnitt 3, nur der Verkaufsprozess eines einzelnen Produktes betrachtet (*Einprodukt-Modelle*). Dies ist gerechtfertigt, wenn zwischen den verschiedenen Produkten eines Anbieters keine Beziehung besteht und die Preissetzung daher vollkommen unabhängig voneinander erfolgen kann. *Mehrprodukt-Modelle* hingegen können anbieterseitige Verbundeffekte (z.B. aufgrund gemeinsam genutzter Ressourcen) und/oder nachfrageseitige Substitutions- bzw. Komplementärbeziehungen zwischen Produkten explizit berücksichtigen.

e) Bestandsaufstockung

Viele Dynamic Pricing Ansätze betrachten lediglich Absatzentscheidungen und gehen daher von einer *fixen Kapazität* bzw. einem festen Lagerbestand aus, der am Ende eines festgelegten Verkaufszeitraums verfällt. Nachbestellungen oder Rückstandsbildungen (Backlogging) sind nicht möglich. Diese Annahmen gelten insbesondere für die in Abschnitt 2 erläuterten Anwendungsgebiete bei Fluggesellschaften und im saisonalen Einzelhandel. Allerdings finden

die Methoden des Dynamic Pricing mittlerweile auch in Branchen Einzug, in denen oben genannte Annahmen nicht oder nur begrenzt gelten. Besteht die Möglichkeit, neben den Verkaufspreisen auch simultan über die Produktions- oder Bestellmengen zu entscheiden, so wird in diesem Beitrag von der Möglichkeit der *Bestandsaufstockung* (Replenishment) gesprochen. Als Zielsetzung wird dann in der Regel anstelle der Erlösmaximierung die Maximierung des Gewinns verfolgt.

f) Kundenverhalten

Ein entscheidender Einfluss auf die optimale Preisstrategie kommt dem Verhalten der Kunden zu. Während *zeitihomogene* Kunden über den gesamten Angebotszeitraum gleich agieren, ist die Präferenzstruktur der Kunden bei *zeitinhomogenem* Verhalten vom Zeitpunkt ihres Eintreffens abhängig.

Die Mehrzahl der Arbeiten geht von *myopischem Kundenverhalten* aus. Dabei erwerben die Kunden das Produkt, sobald der Angebotspreis unterhalb ihrer individuellen Zahlungsbereitschaft liegt, ohne den möglichen zukünftigen Preispfad in Betracht zu ziehen. Im Gegensatz dazu ist in der Realität meist *strategisches Kundenverhalten* zu beobachten, bei dem die Kunden ihre Kaufentscheidung in Abhängigkeit von der (antizipierten) Preisstrategie des Anbieters optimieren. Entsprechende Modellierungsansätze sind in der Regel erheblich komplexer. Häufig kann jedoch auch die Prognose des Kundenverhaltens eines myopischen Modells in einem gewissen Umfang strategisches Verhalten abbilden, vorausgesetzt, das Modell liefert eine der den historischen Daten zugrundeliegenden Preisstrategie vergleichbare Handlungsempfehlung (vgl. Talluri/van Ryzin 2004, S. 183 f.).

Neben strategischem Verhalten, das sich auf zukünftige Preise bezieht, sind in der Literatur drei weitere Effekte verbreitet, um vergangenheitsbezogene intertemporale Abhängigkeiten zu modellieren. Die beobachtete Preissetzung der Vergangenheit kann bei den Kunden zur Bildung eines *Referenzpreises* führen, den sie zur Bewertung des aktuell geforderten Preises heranziehen (vgl. Helson 1964 sowie Kahneman/Tversky 1979). Zur Bildung des Referenzpreises wurden verschiedenste Modelle entwickelt. In einer empirischen Untersuchung zeigen Briesch et al. (1997) den maßgeblichen Einfluss der bisherigen Preise des Produktes. *Sättigungs- und Diffusionseffekte* beschreiben einen negativen bzw. positiven Einfluss der vergangenen, kumulierten Verkäufe auf die aktuelle Nachfragehöhe (vgl. z.B. Bass 1969). Sie treten beispielsweise beim Verkauf langlebiger Gebrauchsgüter bei begrenzter Zahl potenzieller Käufer bzw. aufgrund von Mund-zu-Mund Propaganda auf. Wird die Produktion zusätzlicher Einheiten während des Angebotszeitraums explizit modelliert, können mit zunehmenden kumulierten Verkäufen *Lernkurveneffekte* (vgl. z.B. Hirsch 1952 sowie Henderson 1979) zum Sinken der Produktionskosten führen.¹²

g) Wettbewerb

Bei den meisten Ansätzen agiert der Anbieter als *Monopolist*, so dass weder die Reaktion der Kunden auf Preisänderungen der Konkurrenz noch die Reaktion der Konkurrenz auf eigene Preisänderungen explizit modelliert wird. Diese Vereinfachung lässt sich dadurch rechtfertigen, dass die historischen Daten die Auswirkungen von Konkurrenzreaktionen auf das Nachfrageverhalten der Kunden in gewissem Umfang bereits beinhalten (vgl. Phillips 2005, S. 55). Die Betrachtung eines *Oligopols* ist methodisch anspruchsvoller und unterstellt meist rationales Verhalten der Wettbewerber, was ggf. nicht unproblematisch erscheint: „The strong approximating assumption of no competitive response is sometimes better than the approximating assumption of pre-existing optimal behavior.“ (Shugan 2002).

h) Prognose

Die Mehrzahl der Veröffentlichungen geht von a priori *bekanntem, deterministischen Nachfrageparametern* – je nach verwendetem Modelltyp beispielsweise Parameter von Preisabsatzfunktionen, Erwartungswerte, Varianzen etc. – aus, eine Annahme, die in der Praxis jedoch in der Regel nicht erfüllt ist. Dieser Umstand wird in wissenschaftlichen Ansätzen zunehmend berücksichtigt und führte zur Entwicklung von Modellen, bei denen die Nachfrageparameter im Laufe des Verkaufsprozesses sukzessive anhand der getätigten Verkäufe „erlernt“ werden und entsprechend die Prognose zur Umsetzung der Preisstrategie fortwährend angepasst wird (sog. *Demand Learning*).

In Tab. 1 wird der entwickelte Kriterienkatalog zusammengefasst dargestellt und exemplarisch die in Abschnitt 3 vorgestellten grundlegenden Modellformulierungen M1 bis M3 entsprechend klassifiziert.

Kriterium	Ausprägungen	M1	M2	M3
Nachfragesicherheit	Stochastisch	■	■	
	Deterministisch			■
Zeit	Zeitkontinuierlich			
	Zeitdiskret – Makroperioden	■		■
	Zeitdiskret – Mikroperioden		■	
Preis	Kontinuierliche Preise	■	■	■
	Diskrete Preise			
Produktanzahl	Einprodukt-Modell	■	■	■
	Mehrprodukt-Modell			
Angebotskapazität	Fixe Kapazität	■	■	■
	Bestandsaufstockung			
Kundenverhalten	Myopisch	■	■	■
	Strategisch			
	Zeithomogen			
	Zeitinhomogen	■	■	■
	Sättigungs- und Diffusionseffekte			
	Referenzpreis			
	Lernkurveneffekte			
Wettbewerb	Monopol	■	■	■
	Oligopol			
Prognose	Bekannte Nachfrageparameter	■	■	■
	Demand Learning			

Tab. 1: Kriterienkatalog zum *Dynamic Pricing*

5 Literaturüberblick

Im Folgenden wird der aktuelle Forschungsstand auf dem Gebiet des *Dynamic Pricing* anhand eines umfassenden Literaturüberblicks vermittelt, wobei der Schwerpunkt der Darstellung insbesondere auf der Analyse einschlägiger aktueller Publikationen liegt. Dennoch wird auch die historische Entwicklung der einzelnen Forschungsströmungen nachgezeichnet. Die Einordnung der Beiträge erfolgt dabei entsprechend einer den Autoren zweckmäßig erscheinenden und auf Basis der Kriterien aus dem vorangehenden Abschnitt entwickelten Klassifikation, die sich in der Gliederung des Abschnitts widerspiegelt. Es sei darauf hingewiesen, dass

zur Eingrenzung des zu erörternden Forschungsfeldes ausschließlich Publikationen behandelt werden, die das Dynamic Pricing gemäß der in Abschnitt 2 definierten, eng gefassten Bedeutung interpretieren. Insbesondere zahlreiche Publikationen aus dem Bereich des E-Commerce, die Auktionen, automatisierte Verhandlungen o.Ä. beschreiben, werden daher ausgeklammert. Darüber hinaus werden auch dem Marketing entstammende, speziell auf die Durchführung von (temporären) Preis-Promotionen fokussierende Veröffentlichungen nicht behandelt. Eine Einführung in entsprechende quantitative Optimierungsansätze ist beispielsweise *Talluri/van Ryzin* (2004, Kap. 5.6) zu entnehmen. Schließlich wird, in Anlehnung an die Betrachtungsweise von *McGill/van Ryzin* (1999, S. 243 f.), auch auf die Behandlung zahlreicher Arbeiten, die das (Dynamic) Pricing aus einer eher analytisch-ökonomischen Perspektive¹³ betrachten und weniger der operativen Entscheidungsunterstützung dienen, weitestgehend verzichtet. Entsprechende Ansätze sind in *Talluri/van Ryzin* (2004, Kap. 8) enthalten.

5.1 Grundlegender Modellrahmen

Der grundlegende in der Literatur zum Dynamic Pricing verbreitete Modellierungsgegenstand unterstellt einen Monopolisten, der eine fixe Angebotskapazität eines einzigen Produktes einer unendlichen Population zeithomogener, myopischer Kunden anbietet. Am Ende des endlichen Verkaufszeitraums wird ein Restwert der nicht verkauften Einheiten von null angenommen. Der Angebotspreis lässt sich im Zeitablauf kontinuierlich verändern und kann beliebige nichtnegative Werte annehmen. Die Nachfrage ist preissensitiv und trifft zufällig innerhalb des Verkaufszeitraums ein.

Einen entsprechenden Modellansatz entwickeln bereits *Kincaid/Darling* (1963), deren Arbeit als erste gilt, die sich mit dynamischer Preissetzung beschäftigt. Dabei werden die stochastischen Kundenanfragen durch einen homogenen Poisson-Prozess abgebildet, wobei sich eintreffende Kunden entsprechend ihrer individuellen maximalen Zahlungsbereitschaft für oder gegen den Kauf entscheiden. Mit Hilfe der erst kurz zuvor aufgekommenen Methodik der Dynamischen Optimierung¹⁴ leiten Kincaid und Darling Integralgleichungen her, die von optimalen Politiken erfüllt werden. *Stadje* (1990) kommt unabhängig von Kincaid und Darling zu vergleichbaren Ergebnissen. *Gallego/van Ryzin* (1994) modellieren in einer umfassenden, vielfach zitierten Arbeit die Nachfrage direkt als inhomogenen Poisson-Prozess, dessen Ankunftsrate über den Preis gesteuert werden kann. Dabei gelingt es ihnen, für exponentielle Nachfragefunktionen (genauer: Preis-Intensitäts-Funktionen) eine optimale Politik in geschlossener Form herzuleiten. Für allgemeine Nachfragefunktionen ist dies jedoch nicht möglich. Hier kann aber in der Regel zumindest ein optimaler Fixpreis numerisch leicht bestimmt werden. Da der Verzicht auf Preisänderungen eine Einschränkung der Flexibilität des Anbieters bedeutet, ist damit eine einfache Heuristik für die Lösung des ursprünglichen Problems mit Preisänderungen gegeben. Ihr erwarteter Erlös stellt eine untere Schranke für den (erwarteten) Erlös der optimalen Politik dar. Gallego und van Ryzin beweisen darüber hinaus die asymptotische Optimalität der Fixpreisheuristik für große erwartete Verkaufsmengen. Beispielrechnungen verdeutlichen, dass so bereits für mittlere Problemgrößen gute Ergebnisse erzielt werden können. Ein weiterer wesentlicher Beitrag der Arbeit von Gallego und van Ryzin besteht in der Herleitung der typischen Monotonieeigenschaften des Dynamic Pricing für ihren Modellierungsansatz, die in Abschnitt 3 bereits an einer einfachen zeitdiskreten Modellierung erläutert worden sind. *Zhao/Zheng* (2000) trennen in ihrer stochastischen, zeitkontinuierlichen Modellierung wie *Kincaid/Darling* (1963) den Ankunftsprozess von der eigentlichen Kaufentscheidung, wobei sie zeitinhomogene Zahlungsbereitschaften zulassen. Sie beweisen für ihr Modell ebenfalls die Gültigkeit der Monotonieeigenschaft (8) und geben eine hinreichende Bedingung für Eigenschaft (7) an.

Zur Vereinfachung der Modellierung werden verschiedene Ansätze genutzt, die teilweise auch in Kombination eingesetzt werden. Die erste Möglichkeit besteht darin, durch Betrachtung eines *deterministischen, zeitkontinuierlichen Ersatzmodells* von der Stochastik zu abstrahieren. Der ermittelte optimale Erlös des Ersatzmodells stellt dann eine obere Schranke für den Erlös im stochastischen Modell dar. Bei zeithomogenem Kundenverhalten führt dieser Ansatz stets zu einer Fixpreisstrategie (Gallego/van Ryzin 1994), bei zeitinhomogener Nachfrage hingegen ergibt sich auch in der deterministischen Betrachtung ein im Zeitablauf variierender Preis. Anjos et al. (2004, 2005) formulieren und lösen ein entsprechendes kontrolltheoretisches Modell für den Verkauf von Flugtickets, wobei sie auf zufällige Nachfrageschwankungen durch mehrmalige Neuberechnung des Preises innerhalb des Verkaufszeitraums im Sinne eines Certainty Equivalent Ansatzes reagieren (vgl. Abschnitt 3). Chou/Parlar (2006) wählen für ihre Formulierung lineare Nachfragefunktionen mit zeitabhängigen Parametern und ermitteln die optimale Lösung unter Verwendung des Pontrjaginschen Maximumprinzips¹⁵. Netessine (2006) lässt zur Vermeidung einer in der Praxis häufig nicht umsetzbaren, kontinuierlichen Anpassung des Preises nur eine vorgegebene Anzahl an Preisänderungen zu. Für lineare Nachfragefunktionen ergibt sich in einer erweiterten Betrachtung aus der analytischen Lösung die Unabhängigkeit der zu wählenden Angebotskapazität von der Preisstrategie, so dass getrennt von – und somit insbesondere auch zeitlich vor – der Preissetzung über die Kapazität entschieden werden kann.

Eine zweite Möglichkeit zur Vereinfachung der Modellierung ist die *Diskretisierung der Zeitachse*, wobei der Verkaufszeitraum in Perioden unterteilt wird und Preisänderungen nur zu Beginn einer Periode zulässig sind, so dass sich Modelle der (diskreten) stochastischen, dynamischen Optimierung ergeben. Um die Handhabbarkeit derartiger Ansätze zu verbessern, wird dabei häufig die Periodendauer so klein gewählt, dass die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen mehrerer Kunden in einer Periode vernachlässigbar gering ausfällt, daher approximativ von Mikroperioden ausgegangen werden kann (vgl. Modell M2) und sich eine quasi-zeitkontinuierliche Modellierung ergibt. In einem solchen Modell zeigen Bitran/Mondschein (1993) die Gültigkeit der beiden typischen Monotonieeigenschaften aus Abschnitt 3. Wird durch die Verwendung weniger, längerer Makroperioden die Möglichkeit häufiger Preisänderungen eingeschränkt, so ergibt sich ein auch in der Praxis des saisonalen Einzelhandels häufig zu beobachtender Preisverlauf: Während der Preis zunächst konstant bleibt oder nur leicht sinkt, werden gegen Ende des Verkaufszeitraums höhere Rabatte gewährt. Auf die Bestimmung optimaler Politiken, auch bei vorgegebenen Rabattstufen, konzentrieren sich Bitran/Mondschein (1997).

Zeitdiskrete Modelle werden in der Literatur zum Dynamic Pricing zur Analyse verschiedener anwendungsbezogener Aspekte genutzt. So präsentieren Bitran et al. (1998) ein Modell auf der Basis von Makroperioden für den saisonalen Einzelhandel. Unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeit, kurzfristig Lagerbestände zwischen verschiedenen Filialen zu verschieben, entwickeln sie unterschiedliche Strategien zur Bestimmung optimaler Markdown-Strategien und testen diese in einer Fallstudie mit einer chilenischen Bekleidungskette. Levin et al. (2007) untersuchen die Gewährung von Preisgarantien, um Kunden die Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Preisentwicklung zu nehmen und/oder zusätzliches Erlöspotenzial zu generieren, und lösen das resultierende Modell mit Methoden der nichtlinearen Programmierung bzw. mit einer Heuristik. Das Varma/Vettas (2001) entwickeln vor einem eher volkswirtschaftlichen Hintergrund die optimale Politik für ein Modell mit Mikroperioden, exponentialverteilten Zahlungsbereitschaften und unendlichem Zeithorizont, wobei sie den diskontierten Erlös maximieren. Lewis (2005) behandelt die Preissetzung unter Berücksichtigung des Kundenwertes.

Lin (2004) nutzt eine rein ereignisgetriebene Betrachtung zur Bestimmung von Schranken für den zeitkontinuierlichen Fall. Trotz großer Analogien zu einem Modell mit Mikroperioden ist die Zahl der sequenziell eintreffenden Kunden jedoch nicht, wie sonst vielfach üblich, auf die Zahl der Mikroperioden beschränkt. Sein sequenzielles Modell unterstellt keinen bestimmten Ankunftsprozess und betrachtet nur die Verteilung der Gesamtzahl an Anfragen. Für die Bestimmung der optimalen Politik ist lediglich die Existenz und Endlichkeit der ersten beiden Momente dieser diskreten Verteilung erforderlich. Da in vielen zeitkontinuierlichen Modellen die noch im Verkaufszeitraum verbleibende Zeit lediglich zur Abschätzung der noch eintreffenden Nachfrage benötigt wird, kann *Lin* für diese Modelle sehr einfach Schranken bestimmen: Löst man das sequenzielle Modell unter Vernachlässigung der zeitlichen Verteilung nur mit der sich aus dem angenommenen Ankunftsprozess ergebenden Zahl der Kunden, so ergibt sich eine untere Schranke für den zu erwartenden Erlös. Nimmt man dagegen die Zahl der Anfragen als bekannt an, so wird die Berücksichtigung der Zeit überflüssig und die Lösung des Modells stellt eine obere Schranke dar. Die diesen Schranken zugrunde liegenden Politiken stellen für große Angebotskapazitäten asymptotisch optimale Heuristiken dar.

Eine dritte Möglichkeit zur Vereinfachung der Modellierung besteht darin, sich auf eine vorgegebene *diskrete Menge möglicher Preise* zu beschränken. Motiviert durch die Beobachtung von *Gallego/van Ryzin* (1994), dass in einem deterministischen Ersatzmodell maximal zwei der vorgegebenen Preise überhaupt wirksam werden, untersuchen *Feng/Gallego* (1995) ein zeitkontinuierliches, stochastisches Modell mit zwei vorgegebenen Preisstufen. Sie zeigen, dass sich Schwellenwerte in Bezug auf die verbleibende Zeit und die noch vorhandene Angebotskapazität berechnen lassen, bei deren Erreichen in der optimalen Politik mit einer Preisänderung der Übergang vom ersten zum zweiten Preis stattfindet. *Feng/Xiao* (2000b) erweitern die Betrachtung auf mehrere Preisstufen und Preisänderungen. Während dabei die Monotonie der Preispolitiken im Sinne eines Markdown oder Markup Pricing vorausgesetzt wird, verallgemeinern die Autoren in *Feng/Xiao* (2000a) die Ergebnisse für Politiken, die sowohl Preiserhöhungen als auch Preissenkungen enthalten dürfen. Im gleichen Kontext leitet *Chawin* (2000) die bereits erläuterten Monotonieeigenschaften optimaler Politiken her.

Weitere Varianten der vorgenannten Modelle stammen von *Karpowicz/Szajowski* (2007), die zwei mögliche Preisänderungen berücksichtigen, und *Xiao et al.* (2007), die eine dynamische Berechnung rein kapazitätsbezogener Schwellenwerte durchführen. *Feng/Xiao* (2006) sowie *Gans/Savin* (2007) berücksichtigen in ihren Modellierungen mehrere Kundensegmente, wobei Letztere jedoch für einen Teil der Segmente einen Preis vorgeben und somit für diese lediglich Annahme-/Ablehnungsentscheidungen erlauben. Während die überwiegende Mehrheit der Autoren die Summe der erwarteten Erlöse maximiert oder – seltener – eine Abdiskontierung späterer Erlöse vorsieht, berücksichtigen *Feng/Xiao* (1999) zusätzlich die Risikobereitschaft des Anbieters. *Levin et al.* (2008a) arbeiten mit einem Mindesterlös, der nur mit einer kleinen, vorgegebenen Wahrscheinlichkeit unterschritten werden darf. Das sich ergebende Problem ist für kleinere Instanzen optimal lösbar.

5.2 Mehrproduktmodelle

Nachfrageseitige Substitutions- bzw. Komplementärbeziehungen zwischen Produkten und/oder eine anbieterseitig vernetzte Leistungserstellung mit von verschiedenen Produkten gemeinsam genutzten Ressourcen erfordern die Entwicklung von produktübergreifenden, simultanen Dynamic Pricing Ansätzen. *Gallego/van Ryzin* (1997) verallgemeinern dazu ihre stochastische, zeitkontinuierliche Modellformulierung aus *Gallego/van Ryzin* (1994) auf den Mehrproduktfall mit n Produkten, die beliebig auf m Ressourcen definiert sein können, sowie einer allgemeinen mehrdimensionalen Nachfragefunktion. Da das resultierende Modell in geschlossener Form nicht lösbar ist, formulieren sie das zugehörige zeitkontinuierliche, de-

terministische Ersatzmodell und entwickeln auf dessen Basis zwei asymptotisch optimale Heuristiken, die sich im numerischen Teil ihrer Arbeit als vielversprechend erweisen: Bei der Make-to-Stock Heuristik werden entsprechend der optimalen Lösung des deterministischen Ersatzmodells die potenziell je Produkt abzusetzenden Mengen vollständig im Voraus kontingiert („produziert“) und anschließend unter Verwendung des deterministischen, dynamischen Preispfades abverkauft. Bei der Make-to-Order Heuristik wird hingegen auf die Bildung von Kontingenten verzichtet und unmittelbar entsprechend dem dynamischen Preispfad in First-Come-First-Serve Reihenfolge abverkauft, sofern die jeweils benötigten Ressourcen verfügbar sind. *Maglaras/Meissner* (2006) präsentieren eine zeitdiskrete Formulierung des n -Produkt-Modells mit einer einzelnen gemeinsam genutzten Ressource. Sie beschäftigen sich insbesondere mit der Problematik der im Mehrproduktfall erhöhten Lösungskomplexität des sich ergebenden stochastischen, dynamischen Programms. Die Grundidee ihres Ansatzes besteht in dessen Reduktion auf die entsprechende Einprodukt-Formulierung, indem in jeder Mikroperiode anstelle von n Preisen als einzige Entscheidungsvariable der aggregierte Kapazitätsverbrauch festgelegt wird. Der zugehörige erzielbare Erlös ergibt sich durch entsprechende erlösmaximale Aufteilung auf die einzelnen Produkte, wobei dieses Subproblem häufig leicht in geschlossener Form lösbar ist. *Bertsimas/de Boer* (2005) erweitern die makroperiodenbasierte Formulierung des Dynamic Pricing Problems auf den Mehrproduktfall, wobei sie zur Verringerung der Komplexität auf eine Heuristik zurückgreifen, die auf der Lösung eines linearen Optimierungsproblems basiert.

Eine Gruppe weiterer Veröffentlichungen konzentriert sich insbesondere auf die adäquate Modellierung der Nachfrageseite. So formulieren *Zhang/Cooper* (2008) ein auf Mikroperioden basierendes stochastisches, dynamisches Optimierungsmodell mit diskreten Preisen und parallelen Ressourcen ohne anbieterseitige Netzeffekte, wobei das Kundenwahlverhalten zwischen den Produkten allgemein mit Hilfe sog. Discrete Choice Modelle¹⁶ abgebildet wird. *Schön* (2005) beschränkt sich in diesem Zusammenhang auf eine spezielle Klasse von Kundenwahlmodellen, unter die auch das weitverbreitete Multinomiale Logit-Modell fällt, und verwendet diese in einer entsprechenden Formulierung mit einer einzelnen gemeinsam genutzten Ressource und diskreten Preisen. Das auf jeder Stufe des resultierenden stochastischen, dynamischen Programms zu lösende kombinatorische Optimierungsproblem zur optimalen Preisauswahl für die folgende Mikroperiode kann dabei mit Hilfe von Methoden der Quotientenprogrammierung effizient gelöst werden. Ebenfalls unter Verwendung des Multinomialen Logit-Modells formulieren und lösen *Li* (2003) sowie *Dong et al.* (2008) dynamische Programme mit kontinuierlichen Preisen und parallelen Ressourcen, wobei Letztere auf geschickte Art und Weise unmittelbar die Logit-Wahrscheinlichkeiten als Entscheidungsvariablen auf jeder Stufe verwenden und die so erhaltene Konkavität der Zielfunktion ausnutzen können.

Weitere Veröffentlichungen gehen von dem klassischen, mengenbasierten Network Revenue Management Problem (vgl. z.B. *Talluri/van Ryzin* 2004, Kap. 3) aus und erweitern dieses um buchungsklassenspezifische Preisanpassungsmöglichkeiten. In diesem Zusammenhang werden von *You* (1999) sowie *Feng/Xiao* (2006) Modelle unter Beibehaltung der Independent-Demand Annahme, d.h. ohne nachfrageseitige Substitution, vorgeschlagen, wobei Kunden sich in Abhängigkeit des aktuellen Angebotspreises für oder gegen einen Kauf entscheiden bzw. entsprechend preisabhängiger, buchungsklassenspezifischer Poisson-Prozesse eintreffen. Die Modellierung von *Weatherford* (1997) lässt auch kundenseitige preisabhängige Diversion zwischen den Buchungsklassen zu. Auch in das klassische, mengenbasierte Revenue Management findet die Modellierung des Kundenwahlverhaltens zunehmend Eingang, wie die deutschsprachige Übersicht von *Kimms/Müller-Bungart* (2006) zeigt. Aktuelle Arbeiten aus diesem Bereich umfassen beispielsweise *Miranda Bront et al.* (2007), *Zhang/Adelman* (2007),

Kunnumkal/Topaloglu (2008), *Liu/van Ryzin* (2008a), *Meissner/Strauss* (2008) sowie *van Ryzin/Vulcano* (2008).

Paschalidis/Tsitsiklis (2000) sowie darauf aufbauend *Paschalidis/Liu* (2002) beschäftigen sich mit dem Dynamic Pricing für den Absatz von Netzwerkdienstleistungen (z.B. Internet-Provider) mit beschränkter Bandbreite und den alternativen Zielsetzungen Erlösoptimierung und Wohlfahrtsoptimierung. In letzterer Veröffentlichung werden dabei explizit auch nachfrageseitige Substitutionseffekte zwischen verschiedenen Serviceklassen in die entsprechende Modellierung als stochastisches, dynamisches Programm einbezogen. Eine ebenfalls auf eine bestimmte Anwendung, den Einzelhandel mit sortenreichen Modeartikeln, zugeschnittene Arbeit stammt von *Liu/Milner* (2006). Im Gegensatz zu allen bisher erwähnten Veröffentlichungen bestehen bei ihren auf *Gallego/van Ryzin* (1994) aufbauenden Modellformulierungen weder gemeinsam genutzte Ressourcen noch nachfrageseitige Substitutionsbeziehungen. Es existiert vielmehr die Forderung, alle Sorten eines bestimmten Produktes, beispielsweise verschiedene Größen eines Kleidungsstücks, zu jedem Zeitpunkt des Verkaufszeitraums einheitlich zu bepreisen. *Kleywegt* (2001) präsentiert einen zeitkontinuierlichen, deterministischen Ansatz für einen Anwendungsfall, bei dem für verschiedene, vom Anbieter überschneidungsfrei ansprechbare Kundensegmente jeweils eigene, dynamische Preispolitiken für die angebotenen Produkte festgelegt werden können.

5.3 Integration von Dynamic Pricing und Operations Management

An der Schnittstelle zwischen Marketing, Lagerhaltung und Produktion ist in den vergangenen Jahren eine intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Ansätzen simultaner Preis- und Produktionsentscheidungen zu beobachten. Klassische Verfahren des Operations Managements aus den Bereichen Material- und Produktionswirtschaft werden dabei zunehmend mit dem Konzept des Dynamic Pricing verknüpft. Ziel ist es, gegenüber der in der Vergangenheit üblichen, rein kostenorientierten Betrachtung weitergehende Erlössteigerungen durch die aktive Einbeziehung der Nachfrageseite und die Vermeidung etwaiger Zielkonflikte erzielen zu können. Im Sinne des Klassifikationsschemas aus Abschnitt 4 ergeben sich aus der Sicht des Dynamic Pricing somit Modelle mit der Möglichkeit der Bestandsaufstockung.

Eine erste Gruppe von Veröffentlichungen geht in einer statisch-deterministischen Betrachtung von sich wiederholenden Bestellzyklen bei unendlichem Planungshorizont aus und erweitert daher das klassische Bestellmengenmodell (EOQ-Modell, vgl. z.B. *Domschke et al.* 1997, Kap. 3.2) entsprechend um Preis-Absatz-Zusammenhänge, so dass als Zielsetzung an die Stelle der Kostenminimierung die Gewinnmaximierung tritt. *Whitin* (1955) verwendet in diesem Zusammenhang erstmals sowohl Preis- als auch Losgröße bzw. Bestellmenge als Entscheidungsvariable. *Kunreuther/Richard* (1971) vergleichen für das resultierende Modell simultane mit sequenzieller Festlegung von Preis und Bestellmenge. *Cohen* (1977) präsentiert eine erweiterte Modellformulierung, bei welcher der Lagerbestand mit der Zeit kontinuierlich (exponentiell) „verdirbt“. *Abad* (1988) berücksichtigt abgestufte Mengenrabatte auf der Beschaffungsseite und entwickelt eine iterative, gegen das Optimum konvergierende Lösungsmethode. *Lee* (1993) betrachtet hingegen kontinuierliche Mengenrabatte und löst sein Modell exakt mit einem Ansatz der geometrischen Programmierung. *Abad* (2003) erlaubt (partielle) Rückstandsbildung (backlogging), wobei er von „ungeduldigen“ Kunden ausgeht, die in First-Come-First-Serve Reihenfolge bedient werden und in Abhängigkeit von der Länge ihrer Wartezeit vom Kauf zurücktreten. Während die genannten Veröffentlichungen fixe Preise innerhalb eines Bestellzyklus unterstellen, betrachten *Rajan et al.* (1992), aufbauend auf *Cohen* (1977), erstmals einen Dynamic Pricing Ansatz mit kontinuierlichen Preisänderungen und berücksichtigen dabei neben der Verderblichkeit des Lagerbestandes

auch Wertverluste. *Abad* (1996) erweitert den Ansatz um partielle Rückstandsbildung. *Transchel/Minner* (2005) erlauben innerhalb eines Zyklus eine diskrete Anzahl an Preisänderungen und stellen die erzielten Ergebnisse sowohl einer Fixpreispolitik (untere Schranke) als auch dem Ansatz von *Rajan et al.* (1992) (obere Schranke) gegenüber.

Eine weitere Forschungsströmung basiert auf Erweiterungen des dynamisch-deterministischen Bestellmengenmodells mit endlichem Planungshorizont von *Wagner/Whitin* (1958). *Kunreuther/Schrage* (1973) betrachten einen entsprechenden Ansatz, bei dem der zu bestimmende Preis über alle Perioden hinweg konstant gehalten wird und entwickeln eine iterative Lösungsheuristik, bei der abwechselnd Preise bzw. Bestellmengen festgehalten werden und nach den jeweils freien Variablen optimiert wird. *Gilbert* (1999) verwendet ein etwas restriktiveres Nachfragemodell sowie zeitinvariante Lagerhaltungs- und Bestellkosten und ermittelt eine exakte Lösung. *Gilbert* (2000) verallgemeinert die Betrachtung auf den Fall mehrerer Produkte mit gemeinsamer Ressource. Erst *van den Heuvel/Wagelmans* (2006) liefern einen optimalen polynomialen Lösungsalgorithmus für die ursprüngliche Problemformulierung. Das erste Modell, bei dem die Preissetzung dynamisch jeweils zu Periodenanfang erfolgt, stammt von *Thomas* (1970). Er zeigt dabei, dass viele Eigenschaften optimaler Bestellpolitiken des Wagner-Within-Modells, wie z.B. die typische Regenerationseigenschaft (vgl. z.B. *Domschke et al.* 1997, S. 117), auch bei variablen Preisen mit periodenbezogenen Preisabsatzfunktionen gelten. *Biller et al.* (2005) formulieren die Fragestellung als Minimalkostennetzwerkflussproblem und präsentieren einen Greedy Algorithmus zu dessen Lösung. *Deng/Yano* (2006) erweitern das Modell von *Thomas* (1970) um maximale Produktions- bzw. Bestellkapazitäten je Periode und zeigen, dass sich durch die Einführung von Preisen die grundlegenden Eigenschaften einer optimalen Lösung eines kapazitierten Losgrößenmodells (vgl. *Florian/Klein* 1971) nicht ändern. Wie dort existiert stets eine optimale Lösung aus Regenerationsintervallen, wobei innerhalb eines Regenerationsintervalls maximal eine Periode besteht, in der nicht null oder die Maximalkapazität bestellt bzw. produziert wird. *Ahn et al.* (2007) betrachten zusätzlich Preisabsatzfunktionen, bei denen die Nachfrage nicht nur von dem Preis in der betrachteten Periode selbst, sondern auch von den Preisen der anderen Perioden abhängt. Weitere jüngere Arbeiten auf dem Gebiet stammen beispielsweise von *Bhattacharjee/Ramesh* (2000) und *Chen/Chen* (2004).

Eine andere Gruppe von Arbeiten formuliert das dynamisch-deterministische Problem in kontinuierlicher Zeit. Die erste Veröffentlichung hierzu stammt von *Pekelman* (1974), wobei er eine lineare Preisabsatzfunktion mit zeitabhängigen Parametern unterstellt und das resultierende kontrolltheoretische Problem mit dem Pontrjaginschen Maximumprinzip optimal löst. Darauf aufbauende Arbeiten stammen von *Thompson et al.* (1984) und *Feichtinger/Hartl* (1985), wobei Letztere unter anderem auch Rückstandsbildung erlauben. *Gaimon* (1988) berücksichtigt erstmals Maximalkapazitäten, die zu einem vorgegebenen Kostensatz auch erweitert werden können. Aktuelle Arbeiten innerhalb des Forschungsfeldes stammen von *Adida/Perakis* (2007) und *Adida/Perakis* (2006), wobei in letzterer Veröffentlichung Prinzipien der robusten Optimierung in das kontrolltheoretische Problem integriert werden.

Neben den geschilderten, deterministischen Ansätzen haben auch Modellierungen mit stochastischen Nachfragefunktionen immense Verbreitung gefunden. Sie basieren in der Regel auf dem bekannten Newsvendor- bzw. Newsboyproblem (vgl. z.B. *Khouja* 1999), wobei auch hier wiederum *Whitin* (1955) erstmals die Erweiterung um Preisentscheidungen für eine einzige Periode präsentiert. Weitere Arbeiten, die Fixpreisansätze für eine einzige Periode vorstellen, stammen beispielsweise von *Karlin/Carr* (1962), *Zabel* (1970), *Polatoglu* (1991), *Dana/Petrucci* (2001), *Chun* (2003) sowie *Zhan/Shen* (2005). *Khouja* (2000) erlaubt zusätzlich die (statische) Festlegung eines „Discounting-Schemas“, das innerhalb der Periode

umgesetzt wird. *Petruzzi/Dada* (1999) liefern einen Überblick des Forschungsstands zum einperiodigen Newsvendorproblem mit simultaner Preissetzung.

Die ersten stochastischen, mehrperiodigen Modellformulierungen mit dynamischer Preissetzung jeweils zu Periodenbeginn stammen von *Karlin/Carr* (1962), *Zabel* (1972), *Thomas* (1974) und *Thowsen* (1975), wobei die Autoren entsprechende stochastische, dynamische Programme formulieren. *Thomas* (1974) zeigt, dass unter recht allgemeinen Bedingungen bezüglich der Nachfragefunktion optimale (s,S,P)-Politiken existieren. Wie bei der bekannten (s,S)-Lagerhaltungspolitik¹⁷ wird hier bei Unterschreitung des Bestellpunktes s der Bestand auf S Einheiten aufgestockt, wobei die Preise P stets abhängig von der Bestandshöhe zu Periodenbeginn festzulegen sind. *Chen/Simchi-Levi* (2004a) sowie *Chen et al.* (2006) konkretisieren die Analyse und beweisen die Optimalität der (s,S,P)-Politik speziell für additive Nachfragefunktionen mit bzw. ohne Rückstandsbildung. In *Chen/Simchi-Levi* (2004b) wird die Optimalität einer solchen Politik in einem Modell mit unendlichem Planungshorizont auch für allgemeine stochastische Nachfragefunktionen gezeigt. Im Gegensatz zu den bisher dargestellten Arbeiten formulieren *Federgruen/Heching* (1999) in einer vielzitierten Arbeit verschiedene Modellvarianten mit Rückstandsbildung und ohne fixe Bestellkosten. Für ihre relativ allgemeinen Formulierungen beweisen sie unter anderem die Optimalität einer „Base Stock List Price“-Politik. Liegt der Bestand dabei unter dem sog. (periodenabhängigen) Base Stock, so wird aufgestockt und der Listenpreis verlangt. Liegt er hingegen darüber, so wird nicht nachbestellt, dafür aber der Preis verringert. *Gayon/Dallery* (2007) zeigen ebenfalls die Optimalität einer solchen Politik für eine spezielle Modellierung, bei der zusätzlich die Produktionsrate aufgrund stochastischer Rückflüsse nur partiell kontrolliert werden kann. *Chan et al.* (2006) formulieren im Gegensatz zu *Federgruen/Heching* (1999) Modelle ohne Rückstandsbildung, mit diskreten Preisen sowie mit Kapazitätsrestriktionen. Sie untersuchen sog. *Partial Planning Strategies*, bei denen entweder Preis- oder Bestellmengenpolitik zu Beginn des Planungszeitraums, unter Rückgriff auf Heuristiken, statisch festgelegt wird, die jeweils andere Entscheidung dann jedoch dynamisch getroffen werden kann. Mit als die Ersten integrieren *Petruzzi/Dada* (2002) eine Form des Demand Learning in ein Modell mit simultaner Preis- und Losgrößenentscheidung (vgl. Abschnitt 5.7). *Li/Zheng* (2006) beziehen neben Nachfrageunsicherheiten erstmals auch Erlösunsicherheiten in die Modellierung ein. *Ding et al.* (2006) formulieren ein dynamisches Programm für den Fall der Existenz verschiedener Kundensegmente mit segmentspezifischen Preisen, wobei ein nicht bedienter Kunde in Abhängigkeit seiner Klasse und eines zu gewährenden Rabattes ggf. bis zur nächsten Bestellperiode wartet. Das Entscheidungsproblem besteht somit in der Allokation des vorhandenen Lagerbestandes auf die aktuell anfragenden Kunden sowie in der Festlegung geeigneter Rabattpolitiken.

Auch für den Fall stochastischer Nachfrage existieren zeitkontinuierliche Modellierungen. So betrachtet z.B. *Li* (1988) einen Ansatz, bei dem Produktion und Nachfrage als inhomogene Poisson-Prozesse mit preisabhängigen Intensitäten modelliert werden. *Feng/Chen* (2003) modellieren nur die Nachfrage als Poisson-Prozess und zeigen für ein Problem mit unendlichem Planungshorizont und diskreten Preisen die Optimalität einer (s,S,P)-Politik. *Chen/Simchi-Levi* (2006) generalisieren das Ergebnis für allgemeinere Verteilungen der Zwischenankunftszeiten und kontinuierliche Preise.

Die relevanten Fragestellungen, Modellformulierungen sowie bestehender Forschungsstand und -bedarf im Zusammenhang mit der Integration von Pricing und Operations Management sind in den vergangenen Jahren in Form umfassender Übersichtsarbeiten zusammengestellt worden. Dazu zählen im Wesentlichen die Veröffentlichungen von *Eliashberg/Steinberg* (1993), *Elmaghraby/Keskinocak* (2003), *Chan et al.* (2004), *Fleischmann et al.* (2004) sowie *Yano/Gilbert* (2004).

5.4 Strategisches Kundenverhalten

Die Berücksichtigung strategischen Kundenverhaltens im Dynamic Pricing erfolgt häufig mit Hilfe der Spieltheorie (vgl. z.B. *Fudenberg/Tirole* 1991 oder *Myerson* 1991) und hat wie diese ihre Wurzeln in der Volkswirtschaftslehre. Der Nobelpreisträger *Coase* (1972) postuliert, dass ein Monopolist ein Investitionsgut rationalen Kunden nicht teurer als zu seinen marginalen Kosten verkaufen kann, da er gewissermaßen im Wettbewerb mit sich selbst in zukünftigen Perioden steht. Diese Überlegungen werden von *Stokey* (1981) für eine endliche Population möglicher Käufer formalisiert. Kann der Anbieter sich glaubhaft auf eine Preisstrategie festlegen,¹⁸ so ist bei gleicher Abdiskontierungsrate von Nachfragern und Anbieter ein Fixpreis optimal (vgl. *Stokey* 1979), während sich für eine höhere Gegenwartspräferenz der Kunden stets eine Strategie mit zeitlicher Preisdiskriminierung ergibt (vgl. *Landsberger/Meilijson* 1985). Bis heute vielfach zitiert wird die Arbeit von *Besanko/Winston* (1990), die zeigen, dass – auch bei gleicher Abdiskontierungsrate von Anbieter und Nachfragern – eine teilspielperfekte Strategie zu im Zeitablauf sinkenden Preisen führt. Während in den Modellen der volkswirtschaftlichen Literatur die Angebotskapazität typischerweise unbeschränkt ist und damit der Gegenwartspräferenz zur Begrenzung des strategischen Wartens der Kunden eine entscheidende Bedeutung zukommt, kann auch durch eine bekannte, begrenzte Angebotsmenge ein Anreiz entstehen, Käufe zu tätigen, solange die Verfügbarkeit des Produktes noch sichergestellt ist (vgl. *Lazear* 1986).

Elmaghraby et al. (2008) bringen die vorgenannten Ansätze und die Arbeiten aus dem Bereich des Dynamic Pricing zusammen. Sie lassen auch über eine einzelne Mengeneinheit hinausgehende Nachfragemengen zu und erhalten in ihrem Modell mit beschränkter Kapazität und festgelegter Preisstrategie eine Markdown-Politik. Fälle für die Optimalität von Markup- wie Markdown-Strategien ergeben sich auch im Modell von *Su* (2007), das mehrere Kundengruppen unterschiedlicher Wertigkeit und Gegenwartspräferenz beinhaltet. Interessante Modellierungsansätze verfolgen *Xu/Hopp* (2004) mit der Endogenisierung des strategischen Verhaltens durch spezielle Preissensitivitäten sowie *Ovchinnikov/Milner* (2005), die eine Abfolge von Preisentscheidungen betrachten, die das zukünftige Verhalten der Kunden durch Lernen beeinflussen. Während die Mehrzahl der Autoren wie *Levin et al.* (2008c) endliche Populationen betrachtet, modellieren *Gallien* (2006) sowie *Aviv/Pazgal* (2008) unendliche Käuferpopulationen. Die fälschliche Annahme myopischen Kundenverhaltens führt zu Preisen, die zum Teil erheblich über den optimalen Preisen bei Annahme strategischer Kunden liegen, und damit zu signifikanten Erlöseinbußen (vgl. *Besanko/Winston* 1990 und *Aviv/Pazgal* 2008). In einer aktuellen Arbeit zeigen *Liu/van Ryzin* (2008b), dass ein Anbieter durch gezielte Verknappung bei glaubwürdiger Ankündigung einer Preis- und Mengenstrategie risikoaverse Kunden von strategischem Warten abbringen und so höhere Erlöse erzielen kann. Insgesamt ist strategisches Kundenverhalten in der Regel aus Anbietersicht ungünstiger als myopisches, unter gewissen Umständen kann jedoch auch das Gegenteil der Fall sein (vgl. *Su* 2007).

5.5 Einfluss vergangener Absätze und Preise

Robinson/Lakhani (1975) berücksichtigen erstmals Sättigungs- und Diffusionseffekte sowie im Rahmen einer Lernkurve (vgl. Abschnitt 4) sinkende Produktionskosten in einem deterministischen Modell zur dynamischen Preissetzung. Zugunsten zukünftiger Gewinne kann es für den betrachteten Anbieter optimal sein, anfänglich mit nur knapp 30% seiner variablen Produktionskosten einen sehr aggressiven Preis zu wählen. Die Analyse des Ansatzes wird von *Dolan/Jeuland* (1981) sowie *Kalish* (1983) weitergeführt. *Chen/Jain* (1992) gehen zu einem stochastischen Modell über, das die Unsicherheit der Nachfrage in Form von zufälligen Nachfragesprüngen mit Hilfe eines Punktprozesses berücksichtigt. Dagegen beschreiben *Ra-*

man/Chatterjee (1995) die Nachfrage mit Hilfe eines Wiener-Prozesses, so dass die Unsicherheit zu kontinuierlichen Abweichungen vom Erwartungswert führt. Feng/Gallego (2000) präsentieren einen Ansatz zur Berücksichtigung von Sättigungs- und Diffusionseffekten bei diskreten Preisen.

Den Einfluss vergangener Preise auf die deterministische Kaufentscheidung der Kunden untersuchen Kopalle et al. (1996) sowie Popescu/Wu (2007). Unter Berücksichtigung verschiedener Mechanismen zur Bildung eines Referenzpreises zeigen sie, dass sich bei Kunden, die auf eine Abweichung des Angebotspreises von diesem psychologischen Anker nach oben stärker reagieren als auf eine gleich große Abweichung nach unten (vgl. Klein/Scholl 2004, S. 414 ff.), ein Fixpreis ergibt. Wirkt sich dagegen eine Abweichung nach oben stärker auf die Nachfrage aus, kann eine zyklische Politik optimal sein. Eine allgemeine Formulierung wählt Oliveira (2008), der in einer methodisch orientierten Arbeit den Algorithmus zur Lösung eines nichtlinearen Problems von Lemke (1965) erweitert, in dem die Nachfrage in einer Periode linear von den Preisen aller Perioden abhängt. Eine verwandte Abbildung intertemporaler Abhängigkeiten wählen Fleischmann et al. (2005) in ihrer deterministischen, dynamischen Modellformulierung, indem sie davon ausgehen, dass nachgefragte Mengeneinheiten nicht unmittelbar konsumiert werden. Daher hängt die periodenbezogene Nachfragehöhe nach einem Produkt nicht nur vom Preis sondern auch vom bestehenden Vorrat der Konsumenten ab. Dieser dient quasi als Gedächtnis (Proxy) für alle in der Vergangenheit getroffenen Preisentscheidungen des Unternehmens. Sein sukzessiver Verbrauch wird über eine separate Konsumfunktion modelliert. Die Praxisrelevanz von Optimierungsmodellen mit Referenzpreiseffekten zeigen Natter et al. (2007) durch den erfolgreichen Einsatz eines Modells bei einer österreichischen Baumarktkette. Eine weitere Abhängigkeit berücksichtigen Smith/Achabal (1998) in einem mit drei Unternehmen getesteten Modell: Im Einzelhandel nimmt die Nachfrage gelegentlich mit sinkendem Lagerbestand ab, weil beispielsweise bestimmte Produktvarianten (einzelne Farben oder Größen im Bekleidungseinzelhandel) ausverkauft sind.

5.6 Wettbewerb

Ogleich die Notwendigkeit der Berücksichtigung mehrerer Anbieter, wie in Abschnitt 4 erläutert, durchaus kontrovers diskutiert wird, gehen zahlreiche Autoren über die Annahme eines Monopols hinaus. Der resultierende Wettbewerb wird häufig als Spiel mehrerer Anbieter aufgefasst und – vergleichbar den Ansätzen mit strategischem Kundenverhalten – mit Hilfe spieltheoretischer Konzepte beschrieben. Bereits ein von Kirman/Sobel (1974) formuliertes mehrperiodiges Modell erlaubt es den Anbietern, zu Beginn jeder Periode erneut Preis- und Produktionsentscheidungen zu treffen. Trotz stochastischer Nachfrage führt die Gleichgewichtsstrategie in vielen Fällen zu einer konstanten Produktionsmenge. Einen ähnlichen Kontext betrachten auch Bernstein/Federgruen (2004), die vor allem auf die Maximierung der aggregierten Gewinne in einer Supply-Chain hinarbeiten. In einem auf Lazear (1986) basierenden Modell ohne die Möglichkeit zur Bestandsaufstockung zeigen Granot et al. (2006, 2007), dass sich der aggregierte Gewinn der Anbieter beim Übergang vom Monopol zum Duopol um etwa 30% verringert, während der Markteintritt weiterer Wettbewerber nur noch zu wesentlich geringeren Einbußen führt. Unter geeigneten Bedingungen kann sich auch für ein Duo- oder Oligopol eine zyklische Politik ergeben (vgl. Kopalle et al. 1996). Levin et al. (2008b) berücksichtigen mehrere Segmente strategischer Kunden, deren Wahl zwischen den Produkten verschiedener Anbieter durch ein Multinomiales Logit-Modell beschrieben wird. Auf diese Form der Modellierung des Kundenwahlverhaltens greifen auch Lin/Sibdari (2007) zurück.

Als weitere Ansätze sind Xu/Hopp (2006), die von einer anfänglichen Mengenentscheidung ausgehen, sowie Levis/Papageorgiou (2007), die für mehrere Produkte neben einer Beschrän-

kung der Produktionskapazitäten auch Outsourcing berücksichtigen, zu nennen. *Van Mieghem/Dada* (1999) untersuchen den Einfluss des Wettbewerbs auf strategische Investitionsentscheidungen. Eine zeitlich nachgelagerte Preissetzung kann Investition und Produktion relativ unabhängig von der entstehenden Unsicherheit machen. Dem Einfluss von Lernkurven- und Diffusionseffekten tragen *Dockner/Jørgensen* (1988) Rechnung. Die Arbeiten von *Chinthala-pati et al.* (2006) und *Perakis/Sood* (2006) stechen durch ihre Methodik hervor: Erstere greifen auf das aus dem Machine Learning stammende Reinforcement Learning zurück, während Letztere Unsicherheit im Rahmen von robuster Optimierung betrachten. *Tang/Deo* (2008) modellieren die Situation von Vermietern, die bei unsicherer Nachfrage und unsicherer Mietdauer über die Höhe ihres Bestandes sowie der Angebotspreise entscheiden müssen. Im spezifischen Kontext der Passagierluftfahrt verorten *Friesz et al.* (2005), *Currie et al.* (2008) sowie *Isler/Imhof* (2008) ihre Formulierungen. Letztere untersuchen neben dem auch in der Praxis zurzeit intensiv diskutierten *Buy-Down* auch einen wettbewerbsbedingten *Spiral-Down Effekt*: Agieren zwei Wettbewerber als wären sie in einem Monopol, so steigt ihr Erlös zunächst mit zunehmender Kapazität. Sehr schnell beginnen die Anbieter jedoch, ihre Preise gegenseitig zu unterbieten und die Erlöse sinken stark ab. Sind sich die beiden Fluggesellschaften dagegen ihrer Situation bewusst und wählen eine teilspielperfekte Strategie, so werden sie für mittlere Kapazitäten erheblich besser gestellt.

5.7 Demand Learning

Die Mehrzahl der in der Literatur vorgefundenen Ansätze geht von einem bekannten (stochastischen) Nachfragemodell aus, das in einem dem Einsatz des Dynamic Pricing Modells vorgelegten Prozess häufig auf der Basis historischer Daten gewonnen wird. Hier kommen je nach Anwendungsbereich die verschiedensten Verfahren zum Einsatz: So diskutiert etwa *Jerez* (2008) die Nutzung der Überlebensanalyse zur Modellierung der Nachfrage nach Gebrauchtwagen, *Anjos et al.* (2004) entwickeln eine an den Bedürfnissen einer Fluggesellschaft ausgerichtete Formulierung, während *Wang* (2001) in einer methodisch ausgerichteten Arbeit mit neuronalen Netzen arbeitet. *Bell/Zhang* (2006) untersuchen den Einfluss verschiedener Komponenten, darunter auch der Nachfrageprognose, auf die Performance eines Dynamic Pricing Systems. Eine knappe Beschreibung der Methoden zur Nachfrageprognose ist in *Boyd/Bilegan* (2003) zu finden, eine ausführlichere Darstellung des Gebietes kann z.B. *Talluri/van Ryzin* (2004, Kap. 9) entnommen werden.

In der Praxis ist die Nachfrageprognose allerdings häufig mit einer gewissen Unschärfe behaftet, so dass es naheliegt, die während des Verkaufszeitraums verfügbar werdenden Daten über Preise und Absatzmengen zur Verbesserung der anfänglichen Prognose zu nutzen. Dieses Vorgehen bezeichnet man als Demand Learning¹⁹. Während die einfachsten Ansätze auf adaptive Heuristiken (vgl. z.B. *Heching et al.* 2002) zurückgreifen, basiert die Mehrheit der Arbeiten auf dem Satz von Bayes. Das grundlegende Vorgehen lässt sich in Anlehnung an *Lin* (2006) wie folgt skizzieren: Die Nachfragerate folgt einer Verteilung mit festen, aber unbekanntem Parametern (z.B. Erwartungswert und Varianz). Allerdings verfügt der Anbieter schon vor Beginn des Verkaufs über eine Vorstellung möglicher Werte dieser Parameter, so dass er bereits mit einer a priori-Nachfrageverteilung den Verkauf startet. Aus dem im Zeitablauf beobachteten tatsächlichen Kundenverhalten ergibt sich zusammen mit der a priori-Annahme eine neue a posteriori-Verteilung. Bei geeigneter Wahl der Verteilungen führt der beschriebene Lernschritt zu einer Veränderung der Parameter. So nähert sich beispielsweise ein a priori unbekannter Erwartungswert sukzessive an die tatsächliche Nachfragerate an, was eine Erhöhung der Prognosegüte widerspiegelt.

Wird vor jeder neuen Preisentscheidung die Nachfrageprognose unter Berücksichtigung der bisherigen Beobachtungen angepasst, ohne jedoch zu berücksichtigen, dass auch in Zukunft

der Lernprozess weiter stattfinden wird, so bezeichnet man dies als passives Lernen. Dagegen berücksichtigt aktives Lernen die Auswirkungen der Preisentscheidungen auf den weiteren Lernprozess (vgl. z.B. *Balvers/Cosimano* 1990 und *Araman/Caldentey* 2005). In der Literatur wird hier auf das Spannungsfeld zwischen kurzfristiger Erlösmaximierung und schnellstmöglicher Verbesserung der Prognose durch möglicherweise suboptimale Preissetzung hingewiesen, welches allerdings durch das übergeordnete Ziel der Maximierung des gesamten zukünftigen Erlöses aufgelöst werden kann. Da die Ermittlung optimaler Politiken bei aktivem Lernen jedoch wesentlich aufwendiger ist, kommen *Aviv/Pazgal* (2005a, 2005b) in einer Gegenüberstellung mit passivem Lernen zu dem Schluss, dass dieser Mehraufwand nur bei hoher Unsicherheit gerechtfertigt ist. Daher wird in eher praktisch orientierten Publikationen in der Regel auf passives Lernen zurückgegriffen (vgl. z.B. *Burger/Fuchs* 2005).

In der Literatur wird Demand Learning meist in Modellformulierungen mit endlichem Zeithorizont untersucht. *Azoury* (1985) kann in einer einflussreichen Arbeit den durch die Berücksichtigung des Lernens vergrößerten Zustandsraum des dynamischen Optimierungsproblems wieder auf eine Dimension reduzieren und so optimale Politiken analytisch bestimmen. *Petrucci/Dada* (2002) verwenden eine deterministische Nachfragefunktion, deren Parameter jedoch unbekannt sind und erlernt werden, so dass im Gegensatz zum Erlernen der Parameter stochastischer Verteilungen die Unsicherheit im Zeitablauf vollständig verschwindet. Einen interessanten Ansatz verfolgen *Subrahmanyam/Shoemaker* (1996), die eine diskrete Menge möglicher Nachfrageverteilungen annehmen und die Wahrscheinlichkeiten für das tatsächliche Vorliegen der einzelnen Verteilungen prognostizieren. Als weitere einflussreiche Arbeiten sind *Pashigian* (1988), *Bitran/Wadhwa* (1996a), *Carvalho/Puterman* (2005) und darauf aufbauend *Carvalho/Puterman* (2003) sowie *Zhang/Chen* (2006) zu nennen. Einen Anbieter mehrerer Produkte mit a priori unbekanntem nachfrageseitigen Substitutions- und Komplementärbeziehungen betrachten *Lobo/Boyd* (2003). Modelle mit unendlichem Zeithorizont formulieren beispielsweise *Cope* (2007) sowie *Farias/van Roy* (2009).

Auch die in den Abschnitten 5.4 und 5.6 behandelten Aspekte lassen sich in Modelle mit Demand Learning integrieren: Beispielsweise betrachten *Bertsimas/Perakis* (2006) sowie *Kachani et al.* (2007) konkurrierende Anbieter, *Levina et al.* (2008) bilden strategisches Kundenverhalten ab.

6 Resümee und Ausblick

Während die grundlegende Fragestellung des Dynamic Pricing, einen optimalen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage zu finden, seit jeher existiert, wurde die Problematik der Bestimmung optimaler intertemporaler Preisanpassungen bei vorgegebener maximaler Absatzmenge und beschränktem Verkaufszeitraum in der Wissenschaft zwischenzeitlich sträflich vernachlässigt. Erst Mitte der 1990er Jahre, teilweise bedingt durch die theoretisch herausragende Publikation von *Gallego/van Ryzin* (1994), setzte eine neue, bis heute anhaltende, intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Thematik ein. Diese beinhaltet zum einen die immense theoretische Weiterentwicklung von Ansätzen, die auf Publikationen aus der Mitte des vergangenen Jahrhunderts zurückgehen. So kann das Dynamic Pricing heute durchaus als eines der methodisch fortgeschrittensten und anspruchsvollsten Forschungsgebiete der quantitativen Betriebswirtschaftslehre bezeichnet werden. Zum anderen wurden im Rahmen der in diesem Beitrag analysierten Veröffentlichungen auch viele aktuelle Arbeiten vorgefunden, die durch die Einbeziehung zusätzlicher Aspekte eine realitätsnähere und praxistauglichere Modellierung ermöglichen. Dazu zählen beispielsweise die im letzten Abschnitt diskutierte Einbindung von

Lernverfahren in die Prognose sowie die explizite Modellierung des Kundenwahlverhaltens im Rahmen von Mehrproduktmodellen.

Neben den Entwicklungen in der Wissenschaft ist auch in der Praxis das Interesse an der Anwendung quantitativer Ansätze des Dynamic Pricing weiter gestiegen. Daher wird sich die Forschung in Zukunft verstärkt an denjenigen Restriktionen bzw. spezifischen Anforderungen orientieren müssen, die sich aus neuen Anwendungsdomänen ergeben, um so theoretisch und methodisch komplexe Ansätze auch praktisch nutzbar machen zu können. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Luftverkehrsbranche. Hier sind in jüngster Vergangenheit verschiedene Entwicklungen zu beobachten, die Einfluss auf die Ausgestaltung und Entwicklung von Methoden des Dynamic Pricing haben werden. Neben der bereits erörterten, zunehmenden Verbreitung des Dynamic Pricing bei Low Cost Carriern sind hier insbesondere auch neuartige hybride Geschäftsmodelle in Betracht zu ziehen: So setzen klassische Linienfluggesellschaften zunehmend neben dem traditionellen, mengenbasierten Revenue Management auf bestimmten Märkten auch Methoden des Dynamic Pricing ein, so dass sich die Notwendigkeit der methodischen Entwicklung entsprechend integrierter Verfahren ergibt (vgl. *Westermann* 2006). Erste Ansätze hierzu sind in der Literatur bereits vorzufinden (vgl. z.B. *Bertsimas/de Boer* 2005 sowie *Gans/Savin* 2007). Auch im Pauschalreisetourismus kommen Methoden des Dynamic Pricing mittlerweile zum Tragen (vgl. *Grant* 2008), so beispielsweise bei Charterfluggesellschaften, die damit über einen separaten Einzelplatzvertrieb neben dem Veranstalterabsatz die Generierung zusätzlicher Erlöse anstreben. Auch hier ergibt sich somit ein hybrides Geschäftsmodell, bei dem Kontingenzmechanismen und Dynamic Pricing erlösoptimal koordiniert werden müssen. Insbesondere in der Luftverkehrsbranche besteht bei der Umsetzung des Dynamic Pricing aufgrund der vielen zu berücksichtigenden Wirkungszusammenhänge die Problematik einer adäquaten Prognose. Dies führt dazu, dass vielfach zwar grundsätzlich ein automatisiertes Dynamic Pricing erfolgt, die Preise für einzelne Zeitpunkt-Restkapazität-Kombinationen aber häufig eher händisch aufgrund von Erfahrungswerten als auf Basis theoretischer Vorhersagemodelle festgelegt werden. Hier ist die Entwicklung integrierter Ansätze gefragt, die bestmöglich menschliche Erfahrung mit theoretisch ausgefeilten Prognosemethoden verbinden.

Literatur

- Abad, P.L. (1988): Determining optimal selling price and lot size when the supplier offers all-unit quantity discounts, in: *Decision Sciences*, 19. Jahrgang (1988), S. 622-634
- Abad, P.L. (1996): Optimal pricing and lot-sizing under conditions of perishability and partial backordering, in: *Management Science*, 42. Jahrgang (1996), S. 1093-1104
- Abad, P.L. (2003): Optimal pricing and lot-sizing under conditions of perishability, finite production and partial backordering and lost sale, in: *European Journal of Operational Research*, Band 144 (2003), S. 677-685
- Adida, E., Perakis, G. (2006): A robust optimization approach to dynamic pricing and inventory control with no backorders, in: *Mathematical Programming*, Band 107 (2006), S. 97-129
- Adida, E., Perakis, G. (2007): A nonlinear continuous time optimal control model of dynamic pricing and inventory control with no backorders, in: *Naval Research Logistics*, 54. Jahrgang (2007), S. 767-795
- Ahn, H., Gümüs, M., Kaminsky, P. (2007): Pricing and manufacturing decisions when demand is a function of prices in multiple periods, in: *Operations Research*, 55. Jahrgang (2007), S. 1039-1057
- Anjos, M.F., Cheng, R.C.H., Currie, C.S.M. (2004): Maximizing revenue in the airline industry under one-way pricing, in: *Journal of the Operational Research Society*, 55. Jahrgang (2004), S. 535-541
- Anjos, M.F., Cheng, R.C.H., Currie, C.S.M. (2005): Optimal pricing policies for perishable products, in: *European Journal of Operational Research*, Band 166 (2005), S. 246-254
- Araman, V., Caldentey, R. (2005): Dynamic pricing for non-perishable products with demand learning, Arbeitspapier, Stern School of Business, New York University, New York 2005
- Aviv, Y., Pazgal, A. (2005a): Dynamic pricing of short life-cycle products through active learning, Arbeitspapier, Olin School of Business, Washington University, St. Louis 2005

- Aviv, Y., Pazgal, A. (2005b): A partially observed markov decision process for dynamic pricing, in: *Management Science*, 51. Jahrgang (2005), S. 1400-1416
- Aviv, Y., Pazgal, A. (2008): Optimal pricing of seasonal products in the presence of forward-looking consumers, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 10. Jahrgang (2008), S. 339-359
- Azoury, K.S. (1985): Bayes solution to dynamic inventory models under unknown demand distribution, in: *Management Science*, 31. Jahrgang (1985), S. 1150-1160
- Balvers, R.J., Cosimano, T.F. (1990): Actively learning about demand and the dynamics of price adjustment, in: *Economic Journal*, 100. Jahrgang (1990), S. 882-898
- Barlow, G. (2004): easyJet: An airline that changed our flying habits, in: Yeoman, I., McMahon-Beattie, U. (2004): *Revenue management and pricing: Case studies and applications*, Thomson, London 2004, S. 9-23
- Bass, F.M. (1969): A new product growth for model consumer durables, in: *Management Science*, 15. Jahrgang (1969), S. 215-227
- Bell, P.C., Zhang, M. (2006): Management decision-making in the single period optimum pricing problem, in: *Journal of the Operational Research Society*, 57. Jahrgang (2006), S. 377-388
- Bellman, R.E. (1957): *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton 1957
- Ben-Akiva, M.E., Lerman, S.R. (1985): *Discrete choice analysis: Theory and application to travel demand*, MIT Press, Cambridge 1985
- Bernstein, F., Federgruen, A. (2004): Dynamic inventory and pricing models for competing retailers, in: *Naval Research Logistics*, 51. Jahrgang (2004), S. 258-274
- Bertsekas, D.P. (2005): *Dynamic Programming & Optimal Control (Band 1)*, 3. Auflage, Athena Scientific, Belmont 2005
- Bertsekas, D.P. (2007): *Dynamic Programming & Optimal Control (Band 2)*, 3. Auflage, Athena Scientific, Belmont 2007
- Bertsimas, D., de Boer, S. (2005): Dynamic pricing and inventory control for multiple products, in: *Journal of Revenue & Pricing Management*, 3. Jahrgang (2005), S. 303-319
- Bertsimas, D., Perakis, G. (2006): *Dynamic pricing: A learning approach*, in: Lawphongpanich, S., Hearn, D.W., Smith, M.J. (2006): *Mathematical and computational models for congestion charging*, Springer, New York 2006, S. 45-79
- Besanko, D., Winston, W.L. (1990): Optimal price skimming by a monopolist facing rational consumers, in: *Management Science*, 36. Jahrgang (1990), S. 555-567
- Bhattacharjee, S., Ramesh, R. (2000): A multi-period profit maximizing model for retail supply chain management: An integration of demand and supply-side mechanisms, in: *European Journal of Operational Research*, Band 122 (2000), S. 584-601
- Bichler, M., Kalagnanam, J.R., Katircioglu, K., King, A.J., Lawrence, R.D., Lee, H.S. et al. (2002): Applications of flexible pricing in business-to-business electronic commerce, in: *IBM Systems Journal*, 41. Jahrgang (2002), S. 287-302
- Bichler, M., Werthner, H. (2000): *E-Commerce: From fixed to dynamic pricing*. Global Electronic Commerce for World Markets Research Centre's Business Briefing Series for the UN/ECE's e-Commerce Forum 'Electronic Commerce for Transition Economies in the Digital Age', Genf 2000, S. 175-177
- Biller, S., Chan, L.M.A., Simchi-Levi, D., Swann, J. (2005): Dynamic pricing and the direct-to-customer model in the automotive industry, in: *Electronic Commerce Research*, 5. Jahrgang (2005), S. 309-334
- Bitran, G.R., Caldentey, R. (2003): An overview of pricing models for revenue management, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 5. Jahrgang (2003), S. 203-229
- Bitran, G.R., Caldentey, R., Mondschein, S.V. (1998): Coordinating clearance markdown sales of seasonal products in retail chains, in: *Operations Research*, 46. Jahrgang (1998), S. 609-624
- Bitran, G.R., Mondschein, S.V. (1993): *Pricing perishable products: An application to the retail industry*, Arbeitspapier WP #3592-93, Sloan School of Management, MIT, Cambridge 1993
- Bitran, G.R., Mondschein, S.V. (1997): Periodic pricing of seasonal products in retailing, in: *Management Science*, 43. Jahrgang (1997), S. 64-79
- Bitran, G.R., Wadhwa, H.K. (1996a): A methodology for demand learning with an application to the optimal pricing of seasonal products, Arbeitspapier WP #3898-96, Sloan School of Management, MIT, Cambridge 1996
- Bitran, G.R., Wadhwa, H.K. (1996b): Some structural properties of the seasonal product pricing problem, Arbeitspapier WP #3897-96, Sloan School of Management, MIT, Cambridge 1996
- Boyd, E.A., Bilegan, I.C. (2003): Revenue management and e-commerce, in: *Management Science*, 49. Jahrgang (2003), S. 1363-1386
- Briesch, R.A., Krishnamurthi, L., Mazumdar, T., Raj, S.P. (1997): A comparative analysis of reference price models, in: *Journal of Consumer Research*, 24. Jahrgang (1997), S. 202-214
- Burger, B., Fuchs, M. (2005): Dynamic pricing – A future airline business model, in: *Journal of Revenue & Pricing Management*, 4. Jahrgang (2005), S. 39-53

- Carvalho, A.X., Puterman, M.L. (2003): Dynamic pricing and reinforcement learning, in: Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, Portland 2003, S. 2916-2921
- Carvalho, A.X., Puterman, M.L. (2005): Learning and pricing in an internet environment with binomial demands, in: Journal of Revenue & Pricing Management, 3. Jahrgang (2005), S. 320-336
- Chan, L.M.A., Shen, Z.J.M., Simchi-Levi, D., Swann, J.L. (2004): Coordination of pricing and inventory decisions: A survey and classification, in: Simchi-Levi, D., Wu, S.D., Shen, Z.J.M. (2004): Handbook of quantitative supply chain analysis: Modeling in the e-business era, Kluwer, Boston 2004, S. 335-392
- Chan, L.M.A., Simchi-Levi, D., Swann, J.L. (2006): Pricing, production, and inventory policies for manufacturing with stochastic demand and discretionary sales, in: Manufacturing & Service Operations Management, 8. Jahrgang (2006), S. 149-168
- Chatwin, R.E. (2000): Optimal dynamic pricing of perishable products with stochastic demand and a finite set of prices, in: European Journal of Operational Research, Band 125 (2000), S. 149-174
- Chen, J., Chen, L. (2004): Pricing and lot-sizing for a deteriorating item in a periodic review inventory system with shortages, in: Journal of the Operational Research Society, 55. Jahrgang (2004), S. 892-901
- Chen, X., Simchi-Levi, D. (2004a): Coordinating inventory control and pricing strategies with random demand and fixed ordering cost: The finite horizon case, in: Operations Research, 52. Jahrgang (2004), S. 887-896
- Chen, X., Simchi-Levi, D. (2004b): Coordinating inventory control and pricing strategies with random demand and fixed ordering cost: The infinite horizon case, in: Mathematics of Operations Research, 29. Jahrgang (2004), S. 698-723
- Chen, X., Simchi-Levi, D. (2006): Coordinating inventory control and pricing strategies: The continuous review model, in: Operations Research Letters, 34. Jahrgang (2006), S. 323-332
- Chen, Y., Jain, D.C. (1992): Dynamic monopoly pricing under a poisson-type uncertain demand, in: Journal of Business, 65. Jahrgang (1992), S. 593-614
- Chen, Y., Ray, S., Song, Y. (2006): Optimal pricing and inventory control policy in periodic-review systems with fixed ordering cost and lost sales, in: Naval Research Logistics, 53. Jahrgang (2006), S. 117-136
- Chiang, W.-C., Chen, J.C.H., Xu, X. (2007): An overview of research on revenue management: Current issues and future research, in: International Journal of Revenue Management, 1. Jahrgang (2007), S. 97-128
- Chinthalapati, V.L.R., Yadanti, N., Karumanchi, R. (2006): Learning dynamic prices in multiseller electronic retail markets with price sensitive customers, stochastic demands, and inventory replenishments, in: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews, 36. Jahrgang (2006), S. 92-106
- Chou, F., Parlar, M. (2006): Optimal control of a revenue management system with dynamic pricing facing linear demand, in: Optimal Control: Applications and Methods, 27. Jahrgang (2006), S. 323-347
- Chun, Y.H. (2003): Optimal pricing and ordering policies for perishable commodities, in: European Journal of Operational Research, Band 144 (2003), S. 68-82
- Coase, R.H. (1972): Durability and monopoly, in: Journal of Law and Economics, 15. Jahrgang (1972), S. 143-149
- Cohen, M.A. (1977): Joint pricing and ordering policy for exponentially decaying inventory with known demand, in: Naval Research Logistics Quarterly, 24. Jahrgang (1977), S. 257-268
- Cope, E. (2007): Bayesian strategies for dynamic pricing in e-commerce, in: Naval Research Logistics, 54. Jahrgang (2007), S. 265-281
- Corsten, H., Stuhlmann, S. (1999): Yield Management – Ein Ansatz zur Kapazitätsplanung und -steuerung in Dienstleistungsunternehmen, in: Corsten, H., Schneider, H. (1999): Wettbewerbsfaktor Dienstleistung, Vahlen, München 1999, S. 79-107
- Currie, C.S.M., Cheng, R.C.H., Smith, H.K. (2008): Dynamic pricing of airline tickets with competition, in: Journal of the Operational Research Society, 59. Jahrgang (2008), S. 1026-1037
- Dana, J.D., Petruzzii, N.C. (2001): Note: The newsvendor model with endogenous demand, in: Management Science, 47. Jahrgang (2001), S. 1488-1497
- Das Varma, G., Vettas, N. (2001): Optimal dynamic pricing with inventories, in: Economics Letters, Band 72 (2001), S. 335-340
- Deng, S., Yano, C.A. (2006): Joint production and pricing decisions with setup costs and capacity constraints, in: Management Science, 52. Jahrgang (2006), S. 741-756
- DiMicco, J.M., Greenwald, A., Maes, P. (2001): Dynamic pricing strategies under a finite time horizon, in: Proceedings of the Third ACM Conference on Electronic Commerce, Tampa 2001, S. 95-104
- Ding, Q., Kouvelis, P., Milner, J.M. (2006): Dynamic pricing through discounts for optimizing multiple-class demand fulfillment, in: Operations Research, 54. Jahrgang (2006), S. 169-183
- Dockner, E., Jørgensen, S. (1988): Optimal pricing strategies for new products in dynamic oligopolies, in: Marketing Science, 7. Jahrgang (1988), S. 315-334
- Dolan, R.J., Jeuland, A.P. (1981): Experience curves and dynamic demand models: Implications for optimal pricing strategies, in: Journal of Marketing, 45. Jahrgang (1981), S. 52-62

- Domschke, W., Drexl, A. (2007): Einführung in Operations Research, 7. Auflage, Springer, Berlin 2007
- Domschke, W., Klein, R. (2004): Bestimmung von Opportunitätskosten am Beispiel des Produktionscontrolling, in: Zeitschrift für Planung und Unternehmenssteuerung, 15. Jahrgang (2004), S. 275-294
- Domschke, W., Scholl, A., Voß, S. (1997): Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte, 2. Auflage, Springer, Berlin 1997
- Donnelly, S., James, A., Binnion, C. (2004): bmi's response to the changing european airline marketplace, in: Journal of Revenue and Pricing Management, 3. Jahrgang (2004), S. 10-17
- Dong, L., Kouvelis, P., Tian, Z. (2008): Dynamic pricing and inventory control of substitute products, erscheint in: Manufacturing & Service Operations Management
- Eliashberg, J., Steinberg, R. (1993): Marketing-production joint decision-making, in: Eliashberg, J., Lilien, G.L. (1993): Marketing, North Holland, Amsterdam 1993, S. 827-880
- Elmaghraby, W., Gülcü, A., Keskinocak, P. (2008): Designing optimal preannounced markdowns in the presence of rational customers with multiunit demands, in: Manufacturing & Service Operations Management, 10. Jahrgang (2008), S. 126-148
- Elmaghraby, W., Keskinocak, P. (2003): Dynamic pricing in the presence of inventory considerations: Research overview, current practices, and future directions, in: Management Science, 49. Jahrgang (2003), S. 1287-1309
- Farias, V.F., van Roy, B. (2009): Dynamic pricing with a prior on market response, erscheint in: Operations Research
- Faßnacht, M. (2003): Preisdifferenzierung, in: Diller, H., Hermann, A. (2003): Handbuch Preispolitik: Strategie – Planung – Organisation – Umsetzung, Gabler, Wiesbaden 2003, S. 483-502
- Federgruen, A., Heching, A. (1999): Combined pricing and inventory control under uncertainty, in: Operations Research, 47. Jahrgang (1999), S. 454-475
- Feichtinger, G., Hartl, R. (1985): Optimal pricing and production in an inventory model, in: European Journal of Operational Research, Band 19 (1985), S. 45-56
- Feichtinger, G., Hartl, R. (1986): Optimale Kontrolle ökonomischer Prozesse – Anwendungen des Maximumprinzips in den Wirtschaftswissenschaften, De Gruyter, Berlin 1986
- Feng, Y., Chen, F.Y. (2003): Joint pricing and inventory control with setup costs and demand uncertainty, Arbeitspapier, Department of Systems Engineering and Engineering Management, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 2003
- Feng, Y., Gallego, G. (1995): Optimal starting times for end-of-season sales and optimal stopping times for promotional fares, in: Management Science, 41. Jahrgang (1995), S. 1371-1391
- Feng, Y., Gallego, G. (2000): Perishable asset revenue management with markovian time dependent demand intensities, in: Management Science, 46. Jahrgang (2000), S. 941-956
- Feng, Y., Xiao, B. (1999): Maximizing revenues of perishable assets with a risk factor, in: Operations Research, 47. Jahrgang (1999), S. 337-341
- Feng, Y., Xiao, B. (2000a): A continuous-time yield management model with multiple prices and reversible price changes, in: Management Science, 46. Jahrgang (2000), S. 644-657
- Feng, Y., Xiao, B. (2000b): Optimal policies of yield management with multiple predetermined prices, in: Operations Research, 48. Jahrgang (2000), S. 332-343
- Feng, Y., Xiao, B. (2006): Integration of pricing and capacity allocation for perishable products, in: European Journal of Operational Research, Band 168 (2006), S. 17-34
- Fleischmann, M., Hall, J.M., Pyke, D.F. (2004): Smart pricing, in: MIT Sloan Management Review, 45. Jahrgang (2004), Heft 2, S. 9-13
- Fleischmann, M., Hall, J.M., Pyke, D.F. (2005): A dynamic pricing model for coordinated sales and operations, Research Paper ERS-2005-074-LIS, Erasmus Research Institute of Management, RSM Erasmus University, Rotterdam 2005
- Florian, M., Klein, M. (1971): Deterministic production planning with concave costs and capacity constraints, in: Management Science, 18. Jahrgang (1971), S. 12-20
- Foran, J. (2003): The cost of complexity, in: Journal of Revenue & Pricing Management, 2. Jahrgang (2003), S. 150-152
- Friesz, T.L., Mookherjee, R., Rigdon, M.A. (2005): An evolutionary game-theoretic model of network revenue management in oligopolistic competition, in: Journal of Revenue and Pricing Management, 4. Jahrgang (2005), S. 156-173
- Fudenberg, D., Tirole, J. (1991): Game theory, MIT Press, Cambridge 1991
- Gaimon, C. (1988): Simultaneous and dynamic price, production, inventory and capacity decisions, in: European Journal of Operational Research, Band 35 (1988), S. 426-441
- Gallego, G., van Ryzin, G.J. (1994): Optimal dynamic pricing of inventories with stochastic demand over finite horizons, in: Management Science, 40. Jahrgang (1994), S. 999-1020

- Gallego, G., van Ryzin, G.J. (1997): A multiproduct dynamic pricing problem and its applications to network yield management, in: *Operations Research*, 45. Jahrgang (1997), S. 24-41
- Gallien, J. (2006): Dynamic mechanism design for online commerce, in: *Operations Research*, 54. Jahrgang (2006), S. 291-310
- Gans, N., Savin, S. (2007): Pricing and capacity rationing for rentals with uncertain durations, in: *Management Science*, 53. Jahrgang (2007), S. 390-407
- Gayon, J., Dallery, Y. (2007): Dynamic vs static pricing in a make-to-stock queue with partially controlled production, in: *OR Spectrum*, 29. Jahrgang (2007), S. 193-205
- Gilbert, S.M. (1999): Coordination of pricing and multi-period production for constant priced goods, in: *European Journal of Operational Research*, Band 114 (1999), S. 330-337
- Gilbert, S.M. (2000): Coordination of pricing and multiple-period production across multiple constant priced goods, in: *Management Science*, 46. Jahrgang (2000), S. 1602-1616
- Gönsch, J., Klein, R., Steinhardt, C. (2008a): Discrete Choice Modelling – Grundlagen, in: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 37. Jahrgang (2008), S. 356-362
- Gönsch, J., Klein, R., Steinhardt, C. (2008b): Discrete Choice Modelling – Anwendungsbezogene Aspekte, in: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 37. Jahrgang (2008), S. 412-418
- Granot, D., Granot, F., Mantin, B. (2006): Revenue management of perishable products under competition, Arbeitspapier, Sauder School of Business, University of British Columbia, Vancouver 2006
- Granot, D., Granot, F., Mantin, B. (2007): A dynamic pricing model under duopoly competition, Arbeitspapier, Sauder School of Business, University of British Columbia, Vancouver 2007
- Grant, I. (2008): TUI Travel automates for dynamic pricing, in: *Computer Weekly*, 02/26, S. 12
- Günther, H.-O., Tempelmeier, H. (2007): *Produktion und Logistik*, 7. Auflage, Springer, Berlin 2007
- Hall, J.M., Kopalle, P.K., Pyke, D.F. (2008): Static and dynamic pricing of excess capacity in a make-to-order environment, erscheint in: *Production and Operations Management*
- Harvey, D., Secomandi, N., Valkov, T.V. (2004): Dynamic pricing of distillate products at petroleum terminals, in: Yeoman, I., McMahon-Beattie, U. (2004): *Revenue management and pricing: Case studies and applications*, Thomson, London 2004, S. 58-70
- Heching, A., Gallego, G., van Ryzin, G.J. (2002): Mark-down pricing: An empirical analysis of policies and revenue potential at one apparel retailer, in: *Journal of Revenue and Pricing Management*, 1. Jahrgang (2002), S. 139-160
- Helson, H. (1964): *Adaptation-level theory: An experimental and systematic approach to behavior*, Harper & Row, New York 1964
- Henderson, B.D. (1979): *Henderson on corporate strategy*, Abt Books, Cambridge 1979
- Hirsch, W.Z. (1952): Manufacturing process functions, in: *Review of Economics and Statistics*, 34. Jahrgang (1952), S. 143-155
- Homburg, C., Krohmer, H. (2006): *Marketingmanagement: Strategie – Instrumente – Umsetzung – Unternehmensführung*, 2. Auflage, Gabler, Wiesbaden 2006
- Isler, K., Imhof, H. (2008): A game theoretic model for airline revenue management and competitive pricing, in: *Journal of Revenue and Pricing Management*, 7. Jahrgang (2008), S. 384-396
- Jerenz, A. (2008): *Revenue management in the automobile industry applying survival analysis*, Gabler, Wiesbaden 2008
- Jørgensen, S., Kort, P.M., Zaccour, G. (1999): Production, inventory, and pricing under cost and demand learning effects, in: *European Journal of Operational Research*, Band 117 (1999), S. 382-395
- Kachani, S., Perakis, G., Simon, C. (2007): Modeling the transient nature of dynamic pricing with demand learning in a competitive environment, in: Friesz, T.L. (2007): *Network science, nonlinear science and infrastructure systems*, Springer, New York 2007, S. 223-267
- Kahneman, D., Tversky, A. (1979): Prospect theory: An analysis of decision under risk, in: *Econometrica*, 47. Jahrgang (1979), S. 263-291
- Kalish, S. (1983): Monopolist pricing with dynamic demand and production cost, in: *Marketing Science*, 2. Jahrgang (1983), S. 135-159
- Kambil, A., Agrawal, V. (2001): The new realities of dynamic pricing, in: *Accenture Outlook Journal* (2001), Heft 2, S. 15-21
- Karlin, S., Carr, C.R. (1962): Prices and optimal inventory policies, in: Arrow, K., Karlin, S., Scarf, H. (1962): *Studies in applied probability and management science*, Stanford University Press, Stanford 1962, S. 159-172
- Karpowicz, A., Szajowski, K. (2007): Double optimal stopping times and dynamic pricing problem: Description of the mathematical model, in: *Mathematical Methods of Operations Research*, Band 66 (2007), S. 235-253
- Kephart, J.O., Hanson, J.E., Greenwald, A.R. (2000): Dynamic pricing by software agents, in: *Computer Networks*, Band 32 (2000), S. 731-752

- Khouja, M.J. (1999): The single-period (news-vendor) problem: Literature review and suggestions for future research, in: *Omega*, 27. Jahrgang (1999), S. 537-553
- Khouja, M.J. (2000): Optimal ordering, discounting, and pricing in the single-period problem, in: *International Journal of Production Economics*, Band 65 (2000), S. 201-216
- Kimes, S.E. (2000): A strategic approach to yield management, in: Ingold, A., McMahon-Beattie, U., Yeoman, I. (2000): *Yield management – Strategies for the service industries*, 2. Auflage, Continuum, London 2000, S. 3-14
- Kimms, A., Klein, R. (2005): Revenue Management im Branchenvergleich, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 75. Jahrgang (2005), Ergänzungsheft 1, S. 1-30
- Kimms, A., Müller-Bungart, M. (2006): Revenue Management unter Berücksichtigung des Kundenwahlverhaltens, in: *WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, 35. Jahrgang (2006), S. 434-439
- Kincaid, W.M., Darling, D.A. (1963): An inventory pricing problem, in: *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Band 7 (1963), S. 183-208
- Kirman, A.P., Sobel, M.J. (1974): Dynamic oligopoly with inventories, in: *Econometrica*, 42. Jahrgang (1974), S. 279-287
- Klein, R. (2001): Revenue Management: Quantitative Methoden zur Erlösmaximierung in der Dienstleistungsproduktion, in: *Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis*, 53. Jahrgang (2001), S. 245-259
- Klein, R., Scholl, A. (2004): *Planung und Entscheidung: Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*, Vahlen, München 2004
- Klein, R., Steinhardt, C. (2008): *Revenue Management: Grundlagen und Mathematische Methoden*. Springer, Berlin 2008
- Kleywegt, A.J. (2001): An optimal control problem of dynamic pricing, Arbeitspapier, School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 2001
- Kopalle, P.K., Rao, A.G., Assunção, J.L. (1996): Asymmetric reference price effects and dynamic pricing policies, in: *Marketing Science*, 15. Jahrgang (1996), S. 60-85
- Kretsch, S.S. (1995): Airline fare management and policy, in: Jenkins, D. (1995): *The handbook of airline economics*, McGraw-Hill, New York 1995, S. 477-482
- Kunnumkal, S., Topaloglu, H. (2008): A refined deterministic linear program for the network revenue management problem with customer choice behavior, in: *Naval Research Logistics*, 55. Jahrgang (2008), S. 563-580
- Kunreuther, H., Richard, J.F. (1971): Optimal pricing and inventory decisions for non-seasonal items, in: *Econometrica*, 39. Jahrgang (1971), S. 173-175
- Kunreuther, H., Schrage, L. (1973): Joint pricing and inventory decisions for constant priced items, in: *Management Science*, 19. Jahrgang (1973), S. 732-738
- Landsberger, M., Meilijson, I. (1985): Intertemporal price discrimination and sales strategy under incomplete information, in: *RAND Journal of Economics*, 16. Jahrgang (1985), S. 424-430
- Lazear, E.P. (1986): Retail pricing and clearance sales, in: *American Economic Review*, 76. Jahrgang (1986), S. 14-32
- Lee, W.J. (1993): Determining order quantity and selling price by geometric programming: Optimal solution, bounds, and sensitivity, in: *Decision Sciences*, 24. Jahrgang (1993), S. 76-87
- Lemke, C.E. (1965): Bimatrix equilibrium points and mathematical programming, in: *Management Science*, 11. Jahrgang (1965), S. 681-689
- Levin, Y., McGill, J., Nediak, M. (2007): Price guarantees in dynamic pricing and revenue management, in: *Operations Research*, 55. Jahrgang (2007), S. 75-97
- Levin, Y., McGill, J., Nediak, M. (2008a): Risk in revenue management and dynamic pricing, in: *Operations Research*, 56. Jahrgang (2008), S. 326-343
- Levin, Y., McGill, J., Nediak, M. (2008b): Dynamic pricing in the presence of strategic consumers and oligopolistic competition, erscheint in: *Management Science*
- Levin, Y., McGill, J., Nediak, M. (2008c): Optimal dynamic pricing of perishable items by a monopolist facing strategic consumers, erscheint in: *Production and Operations Management*
- Levina, T., Levin, Y., McGill, J., Nediak, M. (2008): Dynamic pricing with online learning and strategic consumers: An application of the aggregating algorithm, erscheint in: *Operations Research*
- Levis, A.A., Papageorgiou, L.G. (2007): Active demand management for substitute products through price optimisation, in: *OR Spectrum*, 29. Jahrgang (2007), S. 551-577
- Lewis, M. (2005): Research note: A dynamic programming approach to customer relationship pricing, in: *Management Science*, 51. Jahrgang (2005), S. 986-994
- Li, F. (2003): Optimal dynamic pricing for two perishable and substitutable products, Master Thesis, Grado Department of Industrial and Systems Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg 2003

- Li, L. (1988): A stochastic theory of the firm, in: *Mathematics of Operations Research*, 13. Jahrgang (1988), S. 447-466
- Li, Q., Zheng, S. (2006): Joint inventory replenishment and pricing control for systems with uncertain yield and demand, in: *Operations Research*, 54. Jahrgang (2006), S. 696-705
- Lin, K.Y. (2004): A sequential dynamic pricing model and its applications, in: *Naval Research Logistics*, 51. Jahrgang (2004), S. 501-521
- Lin, K.Y. (2006): Dynamic pricing with real-time demand learning, in: *European Journal of Operational Research*, Band 174 (2006), S. 522-538
- Lin, K.Y., Sibdari, S.Y. (2007): Dynamic price competition with discrete customer choices, erscheint in: *European Journal of Operational Research*
- Liu, B., Milner, J. (2006): Multiple-item dynamic pricing under a common pricing constraint, Arbeitspapier, Joseph L. Rotman School of Management, University of Toronto, Toronto 2006
- Liu, Q., van Ryzin, G.J. (2008a): On the choice-based linear programming model for network revenue management, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 10. Jahrgang (2008), S. 288-310
- Liu, Q., van Ryzin, G.J. (2008b): Strategic capacity rationing to induce early purchases, in: *Management Science*, 54. Jahrgang (2008), S. 1115-1131
- Lobo, M.S., Boyd, S. (2003): Pricing and learning with uncertain demand, Arbeitspapier, Stanford University, Stanford 2003
- Maglaras, C., Meissner, J. (2006): Dynamic pricing strategies for multiproduct revenue management problems, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 8. Jahrgang (2006), S. 136-148
- Mantrala, M.K., Rao, S. (2001): A decision-support system that helps retailers decide order quantities and markdowns for fashion goods, in: *Interfaces*, 31. Jahrgang (2001), Ergänzungsheft 3, S. 146-165
- Marcus, B., Anderson, C.K. (2008): Revenue management for low-cost providers, in: *European Journal of Operational Research*, Band 188 (2008), S. 258-272
- McAfee, R.P., te Velde, V. (2006): Dynamic pricing in the airline industry, in: Hendershott, T.J. (2006): *Economics and information systems (Handbooks in information systems 1)*, Elsevier, Amsterdam 2006, S. 527-569
- McGill, J.I., van Ryzin, G.J. (1999): Revenue management: Research overview and prospects, in: *Transportation Science*, 33. Jahrgang (1999), S. 233-256
- Meffert, H., Burmann, C., Kirchgeorg, M. (2008): *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung: Konzepte – Instrumente – Praxisbeispiele*, 10. Auflage, Gabler, Wiesbaden 2008
- Meissner, J., Strauss, A.K. (2008): Network revenue management with inventory-sensitive bid prices and customer choice, Arbeitspapier, Department of Management Science, Lancaster University Management School, Lancaster 2008
- Milgrom, P. (2000): An economist's vision of the B-to-B marketplace, Executive White Paper, Perfect, Palo Alto 2000
- Miranda Bront, J.J., Méndez-Díaz, I., Vulcano, G. (2007): A column generation algorithm for choice-based network revenue management, erscheint in: *Operations Research*
- Myerson, R.B. (1991): *Game theory: Analysis of conflict*, Harvard University Press, Cambridge 1991
- Natter, M., Reutterer, T., Mild, A., Taudes, A. (2007): An assortmentwide decision-support system for dynamic pricing and promotion planning in DIY retailing, in: *Marketing Science*, 26. Jahrgang (2007), S. 576-583
- Netessine, S. (2006): Dynamic pricing of inventory/capacity with infrequent price changes, in: *European Journal of Operational Research*, Band 174 (2006), S. 553-580
- Ng, I. (2007): Advanced demand and a critical analysis of revenue management, in: *The Service Industries Journal*, 27. Jahrgang (2007), S. 525-548
- Oliveira, F.S. (2008): A constraint logic programming algorithm for modeling dynamic pricing, in: *INFORMS Journal on Computing*, 20. Jahrgang (2008), S. 69-77
- Ovchinnikov, A., Milner, J.M. (2005): Strategic response to wait-or-buy: Revenue management through last minute deals in the presence of customer learning, Arbeitspapier, Joseph L. Rotman School of Management, University of Toronto, Toronto 2005
- Paschalidis, I.C., Liu, Y. (2002): Pricing in multiservice loss networks: Static pricing, asymptotic optimality, and demand substitution effects, in: *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 10. Jahrgang (2002), S. 425-438
- Paschalidis, I.C., Tsitsiklis, J.N. (2000): Congestion-dependent pricing of network services, in: *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8. Jahrgang (2000), S. 171-184
- Pashigian, B.P. (1988): Demand uncertainty and sales: A study of fashion and markdown pricing, in: *American Economic Review*, 78. Jahrgang (1988), S. 936-953
- Pashigian, B.P., Bowen, B. (1991): Why are products sold on sale? Explanations of pricing regularities, in: *Quarterly Journal of Economics*, 106. Jahrgang (1991), S. 1015-1038
- Pekelman, D. (1974): Simultaneous price-production decisions, in: *Operations Research*, 22. Jahrgang (1974), S. 788-794

- Perakis, G., Sood, A. (2006): Competitive multi-period pricing for perishable products: A robust optimization approach, in: *Mathematical Programming*, Band 107 (2006), S. 295-335
- Petruzzi, N.C., Dada, M. (1999): Pricing and the newsvendor problem: A review with extensions, in: *Operations Research*, 47. Jahrgang (1999), S. 183-194
- Petruzzi, N.C., Dada, M. (2002): Dynamic pricing and inventory control with learning, in: *Naval Research Logistics*, 49. Jahrgang (2002), S. 303-325
- Phillips, R.L. (2005): *Pricing and revenue optimization*, Stanford University Press, Stanford 2005
- Polatoglu, L.H. (1991): Optimal order quantity and pricing decisions in single-period inventory systems, in: *International Journal of Production Economics*, Band 23 (1991), S. 175-185
- Popescu, I., Wu, Y. (2007): Dynamic pricing strategies with reference effects, in: *Operations Research*, 55. Jahrgang (2007), S. 413-429
- Rajan, A., Steinberg, R., Steinberg, R. (1992): Dynamic pricing and ordering decisions by a monopolist, in: *Management Science*, 38. Jahrgang (1992), S. 240-262
- Raman, K., Chatterjee, R. (1995): Optimal monopolist pricing under demand uncertainty in dynamic markets, in: *Management Science*, 41. Jahrgang (1995), S. 144-162
- Robinson, B., Lakhani, C. (1975): Dynamic price models for new-product planning, in: *Management Science*, 21. Jahrgang (1975), S. 1113-1122
- Schön, C. (2005): Optimal dynamic pricing of perishable assets using discrete choice models, Report WIOR-669, Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2005
- Schütze, J. (2008): Pricing strategies for perishable products: The case of Vienna and the hotel reservation system hrs.com, in: *Central European Journal of Operations Research*, Band 16 (2008), S. 43-66
- Selten, R. (1975): Reexamination of the perfectness concept for equilibrium points in extensive games, in: *International Journal of Game Theory*, 4. Jahrgang (1975), S. 25-55
- Shugan, S.M. (2002): Editorial: Marketing science, models, monopoly models, and why we need them, in: *Marketing Science*, 21. Jahrgang (2002), S. 223-228
- Smith, S.A., Achabal, D.D. (1998): Clearance pricing and inventory policies for retail chains, in: *Management Science*, 44. Jahrgang (1998), S. 285-300
- Stadje, W. (1990): A full information pricing problem for the sale of several identical commodities, in: *Methods and Models of Operations Research*, 34. Jahrgang (1990), S. 161-181
- Stokey, N.L. (1979): Intertemporal price discrimination, in: *Quarterly Journal of Economics*, 93. Jahrgang (1979), S. 355-371
- Stokey, N.L. (1981): Rational expectations and durable goods pricing, in: *Bell Journal of Economics*, 12. Jahrgang (1981), S. 112-128
- Su, X. (2007): Intertemporal pricing with strategic customer behavior, in: *Management Science*, 53. Jahrgang (2007), S. 726-741
- Subrahmanyam, S., Shoemaker, R. (1996): Developing optimal pricing and inventory policies for retailers who face uncertain demand, in: *Journal of Retailing*, 72. Jahrgang (1996), S. 7-30
- Talluri, K.T., van Ryzin, G.J. (2004): *The theory and practice of revenue management*, Kluwer, Boston 2004
- Tang, C.S., Deo, S. (2008): Rental price and rental duration under retail competition, in: *European Journal of Operational Research*, Band 187 (2008), S. 806-828
- Tempelmeier, H. (2006): *Bestandsmanagement in Supply Chains*, 2. Auflage, Books on Demand, Norderstedt 2006
- Thomas, J. (1970): Price-production decisions with deterministic demand, in: *Management Science*, 16. Jahrgang (1970), S. 747-750
- Thomas, J. (1974): Price and production decisions with random demand, in: *Operations Research*, 22. Jahrgang (1974), S. 513-518
- Thompson, G.L., Sethi, S.P., Teng, J. (1984): Strong planning and forecast horizons for a model with simultaneous price and production decisions, in: *European Journal of Operational Research*, Band 16 (1984), S. 378-388
- Thowsen, G.T. (1975): A dynamic, nonstationary inventory problem for a price/quantity setting firm, in: *Naval Research Logistics Quarterly*, 22. Jahrgang (1975), S. 461-476
- Train, K.E. (2003): *Discrete choice methods with simulation*, Cambridge University Press, Cambridge 2003
- Transchel, S., Minner, S. (2005): The impact of dynamic pricing on the economic order decision. Technical Report 2/2005, University of Mannheim, Mannheim 2005
- Tscheulin, D.K., Lindenmeier, J. (2003): Yield-Management – Ein State-of-the-Art, in: *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 73. Jahrgang (2003), S. 629-662
- van den Heuvel, W., Wagelmans, A.P.M. (2006): A polynomial time algorithm for a deterministic joint pricing and inventory model, in: *European Journal of Operational Research*, Band 170 (2006), S. 463-480
- van Mieghem, J.A., Dada, M. (1999): Price versus production postponement: Capacity and competition, in: *Management Science*, 45. Jahrgang (1999), S. 1631-1649

- van Ryzin, G.J., Vulcano, G. (2008): Computing virtual nesting controls for network revenue management under customer choice behavior, in: *Manufacturing & Service Operations Management*, 10. Jahrgang (2008), S. 448-467
- Wagner, H.M., Whitin, T.M. (1958): Dynamic version of the economic lot size model, in: *Management Science*, 5. Jahrgang (1958), S. 89-96
- Wang, S. (2001): A hybrid threshold curve model for optimal yield management: Neural networks and dynamic programming, in: *Computers & Industrial Engineering*, Band 40 (2001), S. 161-173
- Warner, E.J., Barsky, R.B. (1995): The timing and magnitude of retail store markdowns: Evidence from weekends and holidays, in: *Quarterly Journal of Economics*, 110. Jahrgang (1995), S. 321-352
- Weatherford, L.R. (1997): Using prices more realistically as decision variables in perishable-asset revenue management problems, in: *Journal of Combinatorial Optimization*, 1. Jahrgang (1997), S. 277-304
- Weatherford, L.R., Bodily, S.E. (1992): A taxonomy and research overview of perishable-asset revenue management: Yield management, overbooking, and pricing, in: *Operations Research*, 40. Jahrgang (1992), 831-844
- Westermann, D. (2006): (Realtime) dynamic pricing in an integrated revenue management and pricing environment: An approach to handling undifferentiated fare structures in low-fare markets, in: *Journal of Revenue and Pricing Management*, 4. Jahrgang (2006), S. 389-405
- Whitin, T.M. (1955): Inventory control and price theory, in: *Management Science*, 2. Jahrgang (1955), S. 61-68
- Xiao, Y.B., Chen, J., Chen, Y. (2007): On a semi-dynamic pricing and seat inventory allocation problem, in: *OR Spectrum*, 29. Jahrgang (2007), S. 85-103
- Xu, X., Hopp, W.J. (2004): Customer heterogeneity and strategic behavior in revenue management: A martingale approach, Arbeitspapier, Department of Industrial Engineering, Northwestern University, Evanston 2004
- Xu, X., Hopp, W.J. (2006): A monopolistic and oligopolistic stochastic flow revenue management model, in: *Operations Research*, 54. Jahrgang (2006), S. 1098-1109
- Yano, C.A., Gilbert, S.M. (2004): Coordinated pricing and production/procurement decisions: A review, in: Chakravarty, A.K., Eliashberg, J. (2004): *Managing business interfaces: Marketing, engineering, and manufacturing perspectives*, Kluwer, Dordrecht 2004, S. 65-103
- You, P. (1999): Dynamic pricing in airline seat management for flights with multiple flight legs, in: *Transportation Science*, 33. Jahrgang (1999), S. 192-206
- Zabel, E. (1970): Monopoly and uncertainty, in: *Review of Economic Studies*, 37. Jahrgang (1970), S. 205-219
- Zabel, E. (1972): Multiperiod monopoly under uncertainty, in: *Journal of Economic Theory*, Band 5 (1972), S. 524-536
- Zhan, R.L., Shen, Z.M. (2005): Newsvendor problem with pricing: Properties, algorithms, and simulation, in: *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, Orlando 2005, S. 1743-1748
- Zhang, D., Adelman, D. (2007): An approximate dynamic programming approach to network revenue management with customer choice, Arbeitspapier, Desautels Faculty of Management, McGill University, Montreal 2007
- Zhang, D., Cooper, W.L. (2008): Pricing substitutable flights in airline revenue management, erscheint in: *European Journal of Operational Research*
- Zhang, J., Chen, J. (2006): Bayesian solution to pricing and inventory control under unknown demand distribution, in: *Operations Research Letters*, 34. Jahrgang (2006), S. 517-524
- Zhao, W., Zheng, Y. (2000): Optimal dynamic pricing for perishable assets with nonhomogeneous demand, in: *Management Science*, 46. Jahrgang (2000), S. 375-388

Dynamic Pricing – State-of-the-Art

Abstract

This paper presents a current review of the academic literature on dynamic pricing, which has evolved to one of the leading research topics at the interface between Operations Research, Marketing, Economics, and E-Commerce during the last decade. The authors begin by delivering a primer on dynamic pricing and explaining the basic model formulations. Subsequently, they develop a set of criteria which allow for the unified classification of relevant publications and serve as a basis for the extensive literature analysis. Possible future research directions are discussed as well.

-
- 1 Der bereits angeführte, allgemeine Literaturüberblick zum Gebiet des Revenue Managements von *Tscheulin/Lindenmeier* (2003) ist deutschsprachig. Die Autoren gehen in einem Unterkapitel kurz auf das Dynamic Pricing ein.
 - 2 Zum Begriff der Kernleistung vgl. *Klein/Steinhardt* (2008, S. 42 f.).
 - 3 Man beachte, dass der Begriff Markup Pricing in der Literatur teilweise auch als Synonym für Cost-Plus Pricing (vgl. Abschnitt 1) verwendet wird.
 - 4 Vgl. zur Dynamischen Optimierung *Bertsekas* (2005, 2007) sowie *Domschke/Drexel* (2007, Kap. 7).
 - 5 Zur Erleichterung des Lösungsgangs werden in der Regel weitere formale Annahmen bezüglich der Nachfrage- bzw. Erlösfunktion getroffen (vgl. *Talluri/van Ryzin* 2004, S. 187 f. und 201 f., sowie *Bitran/Wadhwa* 1996b, S. 6 f.).
 - 6 Eine Vielzahl von Autoren betrachtet die folgende Erweiterung des Bernoulli-Nachfragemodells (vgl. z.B. *Bitran/Mondschein* 1997 oder *Zhao/Zheng* 2000), mit der eine Trennung zwischen Ankunft eines Kunden und Kaufentscheidung erreicht wird: Zusätzlich zu den auf Prohibitivpreisen basierenden Wahrscheinlichkeiten, dass der Kunde in Periode t das Produkt kauft (Kaufwahrscheinlichkeiten), werden Wahrscheinlichkeiten dafür definiert, dass in der jeweiligen Periode überhaupt ein potenzieller Kunde zur Verfügung steht (sog. Ankunfts-wahrscheinlichkeiten). Beide Werte multipliziert ergeben die eigentliche Wahrscheinlichkeit für das Zustandekommen eines Kaufes. Der Vorteil dieser Betrachtungsweise besteht darin, dass die zusätzlichen Ankunfts-wahrscheinlichkeiten approximativ aus einem stochastischen Ankunftsprozess (z.B. einem Poisson-Prozess) abgeleitet werden können, so dass sich eine quasi-zeitkontinuierliche Modellierung ergibt (vgl. auch Abschnitt 5.1).
 - 7 Für eine weitere Unterscheidung in input- und outputorientierte Opportunitätskosten vgl. *Domschke/Klein* (2004).
 - 8 Streng genommen liegen aufgrund der diskreten Unterteilung in T Perioden nur einzelne Datenpunkte vor. Zur besseren Veranschaulichung sind sie in der Abbildung jedoch zu einer Linie verbunden.
 - 9 Man kann sich leicht überlegen, dass ebenfalls Szenarien existieren, bei denen umgekehrt eine dynamische Preisanpassung auf Grundlage des prognostizierten Kaufverhaltens rückblickend zu erheblichen Erlöseinbußen gegenüber der Verwendung eines Fixpreises führt. So könnte je nach Ausprägung der individuellen Zahlungsbereitschaften beispielsweise trotz massiver Preissenkungen die Nachfrage nicht ausreichend „angekurbelt“ werden. Im Mittel (Erwartungswert) über alle möglichen Szenarien ist die dynamische Preisanpassung einem fixen Angebotspreis jedoch stets überlegen.
 - 10 Entsprechend der anfangs getroffenen Annahmen nimmt $d_i(p_i)$ nur nichtnegative Werte an.
 - 11 Für eine Einführung in die Methoden der nichtlinearen Optimierung vgl. z.B. *Domschke/Drexel* (2007, Kap. 8). Je nach verwendeter Nachfragefunktion sind zur Lösung ggf. noch die Grenzen des Definitionsbereichs explizit durch die Ergänzung entsprechender Ungleichungen zu berücksichtigen. Der Lösungsgang des nichtlinearen Optimierungsproblems wird dadurch jedoch in der Regel deutlich komplexer (vgl. *Chou/Parlar* 2006).
 - 12 Obgleich Lernkurveneffekte ausschließlich den Anbieter betreffen, werden sie hier – wie in der Literatur allgemein üblich – gemeinsam mit den verwandten Sättigungs- und Diffusionseffekten auf der Nachfrageseite aufgeführt.
 - 13 In der ökonomischen Literatur wird darüber hinaus das Dynamic Pricing häufig mit dem hier nicht betrachteten Peak-Load Pricing in Verbindung gebracht. Eine mögliche Abgrenzung beider Begriffe liefern *Klein/Steinhardt* (2008, S. 181 f.).
 - 14 Die erste Buchveröffentlichung stammt von *Bellman* (1957).
 - 15 Eine umfassende Einführung in das Pontrjaginsche Maximumprinzip mit wirtschaftswissenschaftlichem Anwendungsbezug liefern *Feichtinger/Hartl* (1986).
 - 16 Für umfassende Einführungen in die Theorie der Discrete Choice Modelle vgl. *Ben-Akiva/Lerman* (1985), *Train* (2003) sowie die deutschsprachige Artikelserie von *Gönsch et al.* (2008a, 2008b).
 - 17 Vgl. zu Lagerhaltungspolitiken im Allgemeinen auch *Günther/Tempelmeier* (2007, S. 257 ff.), zur (s,S)-Politik im Speziellen *Tempelmeier* (2006, S. 101 ff.).
 - 18 Da die Festlegung auf einen Fixpreis nicht teilspielperfekt (vgl. *Selten* 1975) ist, besteht für den Anbieter die Versuchung, von der angekündigten Vorgehensweise abzuweichen. Die Voraussetzung ist nötig, da die Strategie nur optimal ist, wenn die Kunden dennoch von ihrer Umsetzung ausgehen können. Hat der Anbieter die Möglichkeit, sich zu Beginn des Verkaufszeitraums verbindlich auf eine Preisstrategie festzulegen und ist damit nicht auf eine teilspielperfekte Strategie angewiesen, kann er u.U. einen höheren Erlös erzielen (z.B. 8% unter den Annahmen in *Aviv/Pazgal* 2008).
 - 19 Vereinzelt (vgl. z.B. *Jørgensen et al.* 1999) wird der Begriff aber auch – in Analogie zu sinkenden Stückkosten durch Lernkurveneffekte – zur Beschreibung einer Abhängigkeit der Nachfrage von vorangegangenen Absätzen genutzt (vgl. Abschnitt 5.5).