25.0 ONIGKEIT, D.: Anwendung der dynamischen Programmierung zur Investitionsplanung in der Zuckerindustrie

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Dynamischen Programmierung wurde eine simultane Investitionsplanung für die beiden schweizerischen Zuckerfabriken Aarberg und Frauenfeld durchgeführt. Grundlage dafür bildeten drei verschiedene räumliche Entwicklungsvarianten für den Zuckerrübenanbau in der Schweiz bis 1982.

Das Resultat der Untersuchung lieferte Entscheidungsunterlagen für das Mangement für

- die Kapazität der Fabriken im Endausbau und die zugehörigen Kosten,
- den zeitlichen und kapazitätsmäßig optimalen Ausbaupfad für jede der Endkombinationen und
- die transport- und produktionskostenoptimale Zuteilung der Rübenbaugebiete zu den Zuckerfabriken.

Aus den Entscheidungsunterlagen konnte entnommen werden, welche Mehrkosten entstehen, wenn aus agrarpolitischen Gründen von der berechneten optimalen Lösung abgewichen wird.

Abstract

Using dynamical programming, simultaneous investment plans were prepared for the two Swiss sugar plants in Aarberg and Frauenfeld on the basis of three versions for spatial development of sugar beet production in Switzerland until 1982. The results of this investigation provides management decision aids:

- concerning the capacity of the two plants in their final stages and appropriate costs.
- concerning the optimal development path of capacities over time with respect to final combinations.
- concerning the optimal allocation of sugar beet production areas to one of the two sugar plants based on transport and production costs.

Decision criteria revealed the additional costs which arise from divergence of the optimal solution due to political reasons.

25.1 Einleitung

Im Auftrag der schweizerischen Zuckerindustrie wurde in den 70iger Jahren unter der Leitung des Autors eine Studie zur Investitionsplanung durchgeführt. Sachbearbeiter war Dipl. Ing. agr. Hansueli Nef, seinerzeit Assistent an der damaligen Professur für Wirtschaftslehre des Landbaues an der ETH-Zürich.

Bei der Studie handelte es sich um eine mittelfristige Investitionsplanung für die beiden schweizerischen Zuckerfabriken Aarberg und Frauenfeld. Zur Lösung wurde die Methode der Dynamischen Programmierung herangezogen.

Da bei Aufträgen dieser Art die aktuellen Resultate üblicherweise vertraulich sind, konnte seinerzeit nur das methodische Vorgehen publiziert werden[1] (Onigkeit, Nef). Hier soll nun eine Übersicht über die gesamten Studien, d.h. über die Datenanalyse , die Methodik und die Hauptresultate vorgelegt werden.

Die Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut:
Als erstes wird kurz die agrarpoltische Situation charakterisiert, die zur Auftragserteilung führte. Dann folgt eine Analyse des Problems und eine Beschreibung des Modellansatzes. Im Vordergrund werden dabei jene Überlegungen stehen, welche zur Vereinfachung der Datenbeschaffung und der Modellkonstruktion geführt haben.

25.2 Ausgangssituation und Problemstellung

25.2.1 Mengenmäßige Analyse

Die Schweiz deckte zur Zeit des Projektbeginns ca. 17-24 % des Zuckerbedarfs aus der Inlandproduktion. Hierzu war eine jährliche Zuckerrübenmenge von ca. 450.000 t zu ungefähr gleichen Teilen in den beiden Zuckerfabriken verarbeitet worden. Die Anbaufläche für Zuckerrüben war kontingentiert und lag bei ca. 9.000 ha. Das Produktionsprogramm des Bundesamtes für Landwirtschaft in Bern sah vor, im Laufe der nächsten Jahre die Kontingente zu erhöhen. Für diese Untersuchung wurde angenommen, daß die Anbaufläche im Jahre 1982 ca. 12.000 ha betragen könnte. Zur Verarbeitung dieser anfallenden Erntemengen wäre eine Erhöhung der Verarbeitungskapazität der beiden Zuckerfabriken von damals ca. 6.300 Tagestonnen (tato) auf total 8.000 tato erforderlich gewesen.

25.2.2 Wertmäßige Analyse

Die in der Schweiz geltende Zuckermarktordung erlaubt keine marktwirtschaftliche Kalkulation der Zuckerherstellung. Die Zuckerfabriken haben zu einem vom Bund festgesetzten Preis anzukaufen, der aus agrarpolitischen Gründen sehr hoch liegt. Der Zuckerverkauf richtet sich aber nach den Importpreisen von Zucker, die sich am Weltmarktpreis orientieren (Übersicht 1).

---

[1] Eine Übersetzung dieses Papers in polnisch mit anschließender Publikation in Polen ist vorgesehen.

Erlös	
Zuckerverkauf	73 Fr./q Zucker
Melasseverkauf	8 Fr./q Zucker
Gesamterlös	81 Fr./q Zucker
Kosten	
Rübenbeschaffung	75 Fr./q Zucker
Fertigung	46 Fr./q Zucker
Gesamtkosten	121 Fr./q Zucker

Übersicht 1. Wirtschaftlichkeitskalkulation 1968/69 - 69/70

Dies führte z.B. im Jahre 1969/70 zu Subventionen von knapp 20 Mio. Franken an die beiden schweizerischen Zuckerfabriken.

25.2.3 Problemstellung

Aus agrarpolitischen Gründen (Erhalt der schweizerischen Landwirtschaft) wurde bis 1982 mit einer Ausdehnung des Zuckerrübenanbaus auf ca. 600.000 t Rüben gerechnet (Übersicht 2).

Jahr	Zuckerrübenproduktion in t	in tato
1972	459.360	6.125
73	479.680	6.396
74	500.000	6.667
75	512.500	6.833
76	525.000	7.000
77	537.500	7.167
78	550.000	7.333
79	562.500	7.500
80	575.000	7.667
81	587.500	7.833
82	500.000	8.000

Übersicht 2. Geschätzte Entwicklung des Zuckerrübenanbaus

Damit wäre eine Erhöhung der Verarbeitungskapazität der Zuckerfabriken Aarberg und Frauenfeld von 6.300 tato auf 8.000 tato notwendig gewesen.

Für die Erhöhung des Zuckerrübenanbaus sollten die 3 Anbauvarianten

- Produktionskataster (Ausbau quasi proportional zu den heutigen Anbauflächen),
- Westschweiz (überproptionale Ausdehnung in der Westschweiz) und
- Ostschweiz (überproptionale Ausdehnung in der Ostschweiz)

untersucht werden.

Der Ausbau der Verarbeitungskapazitäten beider Zuckerfabriken sollte zeitlich und räumlich so erfolgen, daß die vorgebenen Rübenmengen mit einem Minimum an Bundessubventionen verarbeitet werden konnnte. Als Zielsetzung für die Investitionsplanung wurde also eine Kostenminimierung der Zuckerherstellung in beiden Zuckerfabriken angestrebt. Um dieses Ziel zu erreichen, war eine Optimierung

- der zeitlichen Folge der Investitionen in beiden Zuckerfabriken,
- der Aufteilung der Rübenanbaugebiete auf die Zuckerfabriken und
- der Zuteilung der Produktionsmengen zu den einzelnen Zuckerfabriken

durchzuführen.

Die Minimierung der Bundessubventionen brachte es mit sich, daß beide Zuckerfabriken, obwohl sie rechtlich unabhänig sind, für diese Untersuchung als eine Wirtschaftseinheit betrachtet werden mußten.

25.3 Problemanalyse und Modell

25.3.1 Vorgehen

Ausgehend von der vorgegebenen Zielsetzung wurde zuerst das Problem unter dem Gesichtspunkt der Erstellung eines Dynamischen Programmierungsmodelles analysiert.

Dazu waren als erstes die Kosten zu ermitteln, welche überhaupt im Modellansatz berücksichtigt werden mußten. Dann war festzustellen, von welchen Entscheidungsvariablen diese Kosten abhängen. Dieses Vorgehen erlaubte es, die Datenbeschaffung auf die entscheidungsabhängigen Kostenelemente zu reduzieren.

Nach einer simultanen Marginalanalyse von Rübentransport und Rübenproduktion ließ sich das anfänglich noch recht umfangreiche Dynamische Programmierungsmodell so vereinfachen, daß eine leicht auswertbare Bellmann'sche Rekursionsformel aufgestellt werden konnte.

25.3.2 Entscheidungsabhängige Kosten

Für die Modellanalyse wurden die Gesamtkosten nach den Kostenarten

- Rübenbeschaffung:
  - Ankauf
  - Transport
- Produktion:
  - Hilfsstoffe
  - Energie
  - Personal
  - Anlagen:
  - Investitionen
  - Unterhalt

aufgeteilt.

Dann wurde untersucht, wie die obigen Kosten von den problemrelevant definierten

Entscheidungsvariablen

TiAt bzw. TiFt	Transportmengen von Ort i nach ZFA bzw. ZFF in der Periode t
PAt bzw. PFt	Produktionsmengen in ZFA bzw. ZFF in der Periode t
KAt bzw. KFt	Kapazität der ZFA bzw. ZFF in der Periode t

abhängen. Durch die nachfolgend gezeigte Analyse zur Eliminierung aller nicht relevanten Kosten konnte viel Zeit und Geld bei der Datenbeschaffung für die Modellrechnungen eingespart werden.

25.3.2.1 Rübenbeschaffungskosten

Da die gesamte Rübenmenge verarbeitet wurde und der Rübenpreis für beide Zukkerfabriken gleich ist, waren bei der Rübenbeschaffung die Ankaufskosten (Preis mal Menge) für die Zuckerrüben entscheidungsunabhängig und somit nicht modellrelevant.

Die Transportkosten hingen nicht nur von der Transportmenge, sondern auch vom Transportweg ab. Das Transportkostenminimum wäre über ein Transportproblem zu ermitteln. Da es sich hier aber um ein Transportproblem mit 442 Ausgangsorten und nur 2 Grenzorten handelt, konnte der optimale Transportplan auch aus einer Transportmengenliste entnommen werden, in der die Ausgangsorte nach dem Transportkostenvorteil zu einer der Zuckerfabriken geordnet waren.

Nach dieser 'Voroptimierung' hingen die Transportkosten ausschließlich von den Produktionsmengen PAt bzw. PFt zur ZFA bzw. ZFF ab. Die vorgesehenen Entscheidungsvariablen TiAt und TiFt brauchten daher nicht explizit in das Modell aufgenommen werden.

25.3.2.2 Produktionskosten

Bei der Analyse der Produktionskosten hatten Diskussionen mit den Fachleuten der Zuckerfabriken zu den folgenden Ergebnissen geführt:

Kapazität (tato)	Energiekosten pro q Rüben in Fr. ZFA	ZFF	Mehrkosten der ZFA
3 000	0.44	0.34	0.10
3 300	0.44	0.34	0.10
3 500	0.44	0.34	0.10
3 600	0.45	0.34	0.11
3 700	0.46	0.34	0.12
3 750	0.47	0.34	0.13
3 800	0.47	0.34	0.13
3 900	0.48	0.34	0.14
4 000	0.49	0.34	0.15
4 100	0.50	0.34	0.16
4 200	0.50	0.34	0.16
4 400	0.50	0.34	0.16
4 700	0.50	0.34	0.16

Übersicht 3. Energiekosten in Abhängigkeit von der Kapazität

- Die Kosten für die benötigten Hilfsstoffe sind proportional zur Produktionsmenge und werden weder durch den Ort der Produktion noch durch die Produktionskapazität beeinflußt.

- Die Energiekosten (Elektrizität) unterscheiden sich bei beiden Fabriken infolge der unterschiedlichen Organisation der Stromversorgung und hängen z.T. von der Produktionskapazität ab. Die Energiekosten pro q Rüben sind in der Abhängigkeit von der Kapazität in Übersicht 3 dargestellt. Der Kostenvorteil der ZFF beträgt danach im Maximum 0.16 Fr. pro q Rüben.

Der Bestand an Personal ist nur kapazitätsabhängig und nimmt, wie Übersicht 4 zeigt, mit steigender Kapazität ab. Danach konnten z.B. pro Jahr in der ZFA ab einer Kapazität von 3.300 tato 31 Arbeitskräfte und damit 873.000 Fr. Lohnkosten eingespart werden. Für das Modell war es hinreichend, wenn, statt der gesamten Personalkosten, nur diese entscheidungsabhängigen Einsparungen an Lohnkosten berücksichtigt wurden.

Kapazität (tato)	eingesparte Arbeitskräfte (Personen)	kumulierte eingesparte Lohnkosten (Fr.)
ZFA		
3 300	31	837 000
3 500	9	1 080 000
ZFF		
3 000	6	162 000
3 200	3	243 000

Übersicht 4. Jährliche Personal- und Lohnkosteneinsparung in Abhängigkeit von der Produktionskapazität

Für die Modellrechnung ergab sich also bezüglich der Produktionskosten, daß nur

- die mengen- und kapazitätsabhängigen Energiekosten und
- die nur kapazitätsabhängigen Lohneinsparungen

Berücksichtigung finden mußten.

25.3.2.3 Anlagenabhängige Kosten

Als Folge der speziellen Technik der Zuckerherstellung können Kapazitätsvergrößerungen nur stufenweise erfolgen. Die zugehörigen Investitionsstufen und die damit verbundenen Kosten wurden in Übersicht 5 auf Seite 252 zusammengestellt.

ZFA		ZFF	
Kapazität (tato)	Investitions-kosten (Mio. Fr.)	Kapazität (tato)	Investitions-kosten (Mio. Fr.)
3 300	0	3 000	0
3 500	4.370	3 200	2.825
3 600	3.675	3 300	0.970
3 700	0	3 400	2.200
3 750	0.710	3 500	0.415
3 800	2.580	3 600	1.430
3 900	0.820	3 700	0.190
4 000	0.610	3 750	0.220
4 100	0.350	3 800	2.130
4 200	0.860	4 000	0.190
4 400	0.200	4 100	0.280
4 700	2.240	4 500	0.760
---	---	4 700	0.240

Übersicht 5. Kapazitätsausbau und Investitionskosten

Die Kpazitätserweiterungen müßten so erfolgen, daß in jedem Jahr t die anfallende Rübenmenge R(t) verarbeitet werden kann.

Weil eine Desinvestition aus agrarpolitischen Gründen bei keiner der Zuckerfabriken zulässig war, waren auch die allfälligen Reinvestitionen nicht entscheidungsabhängig. Gewisse Schwierigkeiten verursachte die Bewertung jener Kapazitätserweiterungen, die aus technischen Gründen mit einem Reinvestitonseffekt verbunden sind.

Mit den reinen Reinvestitionen war auch der Unterhalt der bestehenden Anlagen entscheidungsunabhängig. Das Gegenteil galt für den Unterhalt der (Neu-) Investitionen. Ihre Höhe hing nicht nur vom Umfang der Kapazitätserweiterung ab, sondern zog in den folgenden Jahren auch noch sogenannte Investitionsfolgekosten (für Unterhalt und Reparaturen) nach sich. Diese Kosten ließen sich aber, da sie nur von der Investitionshöhe und dem Planungshorizont abhingen, auf das Investitionsjahr diskontieren und auch zu diesem Zeitpunkt (als Zahlungsverpflichtung und nicht als effektive Zahlung!) berücksichtigen.

25.3.2.4 Resultat der Kostenanalyse

Als Ergebnis dieser Analyse ließ sich festhalten, daß sich die jährlichen anfallenden Kosten Ct zusammensetzen aus

$$C_t = I_t + P_t + T_t$$

d.h. aus den Investitionen und deren Folgekosten,

$$I_t \ (KA_t, KF_t \ / \ KA_{t-1}, KF_{t-1})$$

aus den Produktionskosten (Energie- und Lohneinsparungen)

$$P_t \ (KA_t, KF_t, PA_t, PF_t)$$

und aus den Transportkosten

$$T_t \ (PA_t, PF_t)$$

Der Zustandsvektor, der das System in der Periode t charakterisiert, bestand also aus den 4 Komponenten

$$Z_t = (KA_t, KF_t, PA_t, PF_t)$$

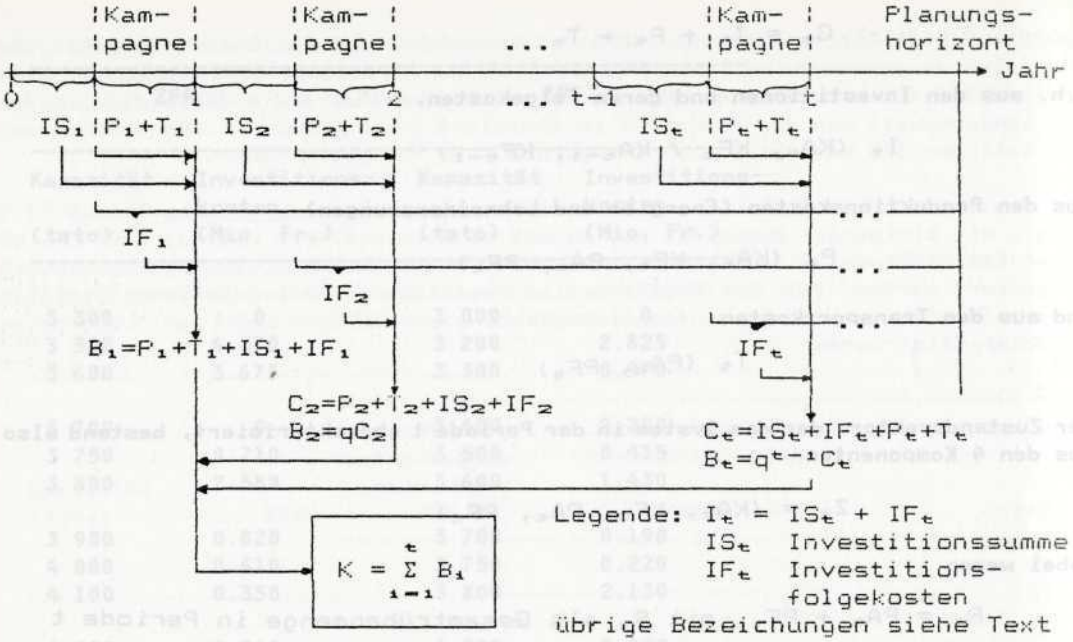
wobei wegen

$$R_t = PA_t + PF_t, \text{ mit } R_t \text{ als Gesamtrübenmenge in Periode } t$$

eine Reduktion um eine Variable möglich war.

25.3.3 Erster Modellansatz

Als Entscheidungsgröße zur Auswahl des optimalen Investitionsplanes wurden die auf den Zeitpunkt t = 1 diskontierten Kosten K aller entscheidungsabhängigen Aufwendungen herangezogen, die während des Planungszeitraumes anfielen. Die sachliche und zeitliche Gliederung für diese Kosten lassen sich am besten an einem Schema(Übersicht 6 auf Seite 254) erläutern:



Übersicht 6. Sachliche und zeitliche Gliederung der diskontierten Entscheidungskosten K

Vor der Kampagne des t. Jahres werden die Investitionen getätigt, die die Kosten IS(t) verursachen. Die Produktion und der Transport erfolgen während der Kampagnedauer. Nur die Investitionsfolgekosten IF(t) der Neuanlagen für Unterhalt, Reparaturen usw. fallen mit Beginn der Kampagnedauer bis zum Planungsende an. Alle diese Kosten werden auf den Zeitpunkt t als fällig angenommen. Bezüglich der Investitionsfolgekosten ist zu beachten, daß die in den Jahren s (s > t) anfallenden Kosten auf den Zeitpunkt t diskontiert und zu diesem Zeitpunkt im Modell belastet werden. Die Summe C(t) der zum Zeitpunkt t anfallenden Kosten wird schließlich auf den Zeitpunkt t = 1 diskontiert. Die Addition dieser diskontierten Größen ergibt die Entscheidungsgröße K. Zur Berechnung von K wurde eine Rekursionsformel für 'Vorwärtsrechnung' aufgestellt. Sie lautet

$$
\begin{aligned}
K_t\ (KA_t,\ KF_t,\ PA_t,\ PF_t\ /\ KA_{t-1},\ KF_{t-1}) \\
= \min_{\substack{(KA_{t-1},\ KF_{t-1},\\ PA_{t-1},\ PF_{t-1})}} \Big\{ & K_{t-1}\ (KA_{t-1},\ KF_{t-1},\ PA_{t-1},\ PF_{t-1}) \\
& + q^{t-1}\ [\ I_t\ (KA_t,\ KF_t\ /\ KA_{t-1},\ KF_{t-1}) \\
& \qquad + P_t\ (KA_t,\ KF_t,\ PA_t,\ PF_t) \\
& \qquad + T_t\ (PA_t,\ PF_t)\ ]\ \Big\}
\end{aligned}
$$

unter den Restriktionen

$$KA_t + KF_t \geq R_t, \qquad PA_t + PF_t = R_t$$

$$KA_t \geq KA_{t-1} \quad \text{und} \quad KF_t \geq KF_{t-1}$$

$$KA_t \geq PA_t \quad \text{und} \quad KF_t \geq PF_t$$

Die Rekursionsformel besagt, daß der Barwert aller an dem Zeitpunkt t aufgelaufenen Kosten (K(t-1)) plus alle während des t. Jahres anfallenden, entscheidungsabhänigigen Kosten für Investitionen (I(t)), Produktion (P(t)), Transport (T(t)), diskontiert auf den Zeitpunkt t-1, nach Minimumauswahl die neuen Kosten K(t) bilden.

Die Entscheidungsgröße K ist dann identisch mit K(n)

$$K = K_N,$$

wobei t=N den Planungshorizont bezeichnet.

25.3.4 Marginalanalyse von Transport und Produktion

Die Rekursionsformel des Modells basiert auf dem Zustandsvektor

$$Z_t = (KA_t, KF_t, PA_t, PF_t)$$

und ist mit den 4 vorhandenen Zustandsvariablen noch sehr rechenintensiv. Das Modell kann aber die Elimination der beiden Zustandsvariablen PA(t) und PT(t) noch weiter vereinfacht werden.

Betrachtet man die Kapazitätskombination (KA(t), KF(t)) als Parameter, so läßt sich mit Hilfe einer Marginalanalyse von Transport und Produktion für feste (KA(t), KT(t)) zeigen, daß im jeweiligen Optimum stets

$$PA_t = KA_t \quad \text{und}$$

$$PF_t = R_t - KA_t$$

sein muß. Dies soll im folgenden gezeigt werden. Für jede fixierte Kapazitätskombination

$$(KA_t, KF_t),$$

die zur Verarbeitung der anfallenden Rübenmenge R(t) ausreicht, läßt sich die Produktionsmengenkombination

$$(PA_t, PF_t)$$

in einer Nebenrechnung so ermitteln, daß Transport- und Produktionskosten T und P simultan minimal werden. Es gilt für diese beiden Kostenelemente KTP für jedes t

$$KTP = T + P = \sum_i f_i^A M_i^A + \sum_i f_i^F M_i^F + K^A \sum_i M_i^A + K^F \sum_i M_i^F$$

wobei

$$M_i^A + M_i^F = R_i \quad \text{und} \quad \sum_i M_i^A + \sum_i M_i^F = R$$

ist.

Hierin sind

M_i^A bzw. M_i^F Transportmenge } vom Ort i
f_i^A bzw. f_i^F Frachtkostensätze } nach ZFA bzw. ZFF

K^A bzw. K^F Produktionskosten pro Einheit in ZFA bzw. ZFF

R_i bzw. R Rübenmengen im Ort i bzw. insgesamt.

Nach Umformung dieser Kostengleichung erhält man

$$KTP = \sum (f_i^A - f_i^F) M_i^A + f_i^F R_{it} + (K^A - K^F) \sum M_i^A + K^F R_t$$

Die nach ZFA transportierten Mengen M1A sind dann optimal (notwendige Bedingung), wenn

$$\frac{\partial(KTP)}{\partial(M_i^A)} = f_i^A - f_i^F + K^A - K^F = 0$$

ist, oder anders ausgedrückt, wenn der Grenzwert der Frachtkostendifferenz gleich dem Grenzwert der Produktionskostendifferenz ist.

Die Rangordungsliste der Ausgangsorte für die Rübentransporte zeigt, daß

$f^F - f^A$ mit wachsendem PA kleiner und die Differenz $K^A - K^F$ für feste Kapazitäten (KA_t, KF_t) konstant und wertmässig kleiner oder gleich 0,16 Fr./q bleibt.

Eine Kalkulation hatte ergeben (Übersicht 7 auf Seite 257), daß die geforderte Gleichheit für das freie Optimum erst bei einer Produktionsmenge von PAt > 4.700 tato auftritt. Die Kapazität der ZFA durfte aber in der Planungsperiode den Wert von 4.700 tato nicht überschreiten. Daraus folgt:

Um möglichst nahe an das Optimum heranzukommen, war es notwendig, die Kapazität der ZFA voll auszuschöpfen und nur die restlichen Rübenmengen in der ZFF zu verarbeiten.

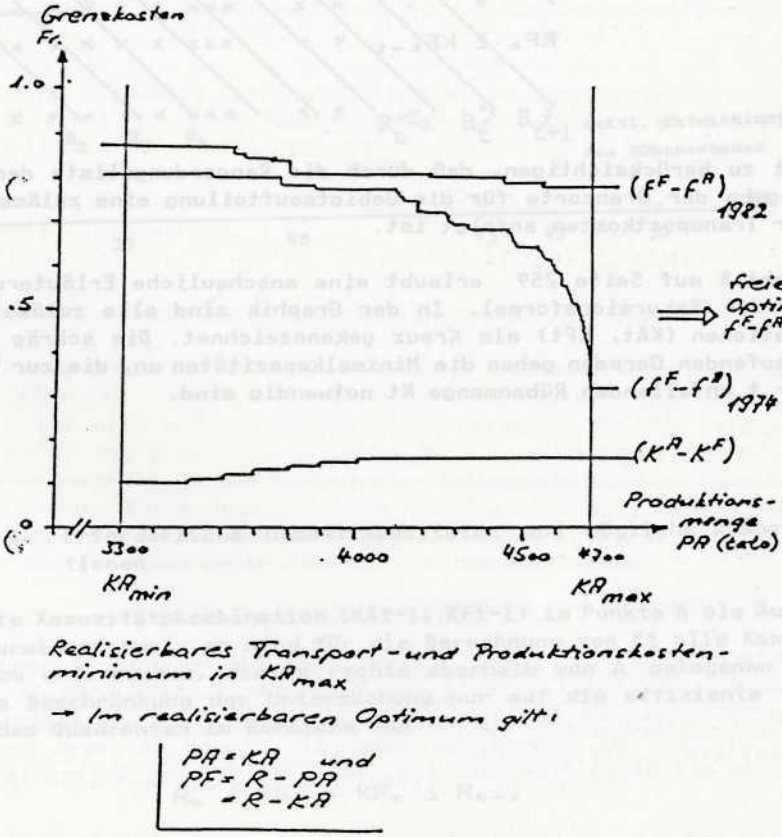
Damit ist für alle hier betrachteten Situationen stets

$$PA_t = KA_t \quad \text{und}$$
$$PF_t = R_t - PA_t = R_t - KA_t$$

Mit Hilfe dieser Relationen ließen sich jetzt die beiden Zustandsvariablen PAt und PFt eliminieren, so daß für das Dynamische Programmierungsmodell nur der Zustandsvektor

$$Z_t = (KA_t, KF_t \;/\; R_t)$$

übrig blieb.



Übersicht 7. Grenzkostenanalyse für Transport- und Produktionskostendifferenz

25.4 Vereinfachtes Modell

Als Resultat der Marginalanalyse konnte die Rekursionsformel vereinfacht werden, so daß der endgültige Modellansatz lautet:

$$K_t\ (KA_t,\ KF_t\ /\ KA_{t-1},\ KF_{t-1},\ R_t)$$

$$= \min_{(KA_{t-1},\ KF_{t-1})} \{K_{t-1} + q^{t-1}\ [\ I_t\ (KA_t,\ KF_t) + P_t\ (KA_t,\ R_t - KA_t) + T_t\ (KA_t,\ R_t - KA_t)\ ]\ \}$$

unter den Restriktionen

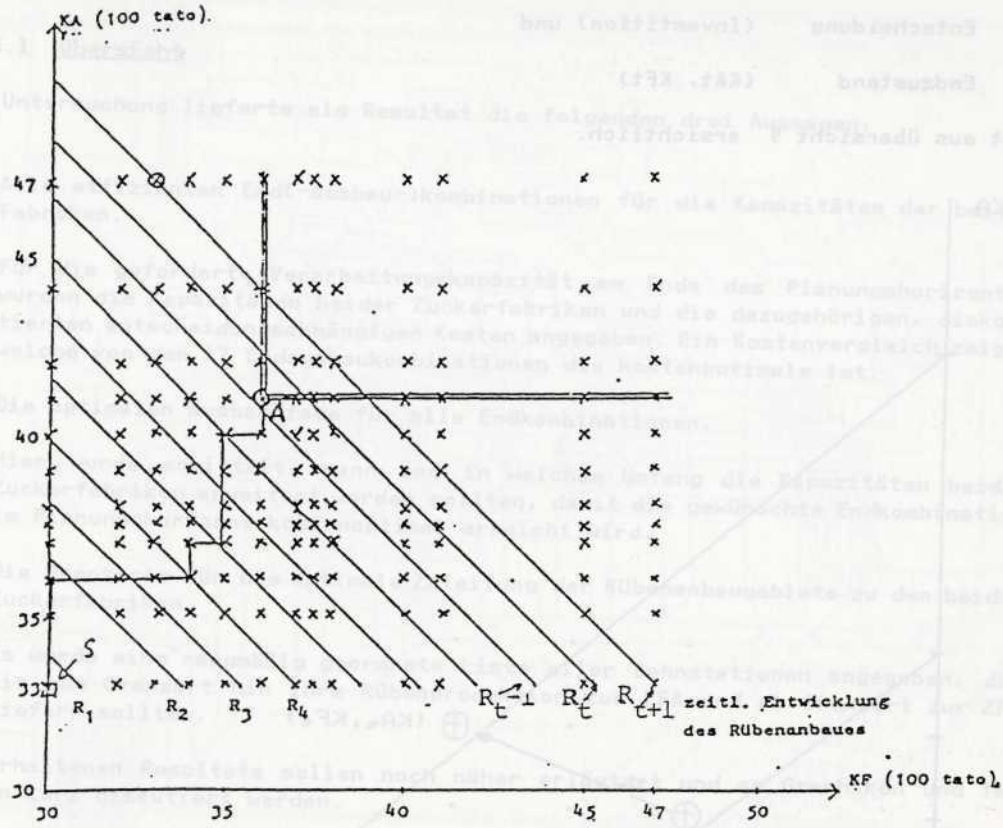
$$KA_t + KF_t \geq R_t$$

$$KA_t \geq KA_{t-1}$$

$$KF_t \geq KF_{t-1}$$

Hierbei ist zu berücksichtigen, daß durch die Rangordungsliste der Transporte und der Angabe der Grenzorte für die Gebietsaufteilung eine zulässige Voroptimierung der Transportkosten erfolgt ist.

Die Übersicht 8 auf Seite 259 erlaubt eine anschauliche Erläuterung der Wirkungsweise der Rekursionsformel. In der Graphik sind alle zulässigen Kapazitätskombinationen (KAt, KFt) als Kreuz gekennzeichnet. Die schräg nach rechts unten verlaufenden Geraden geben die Minimalkapazitäten an, die zur Vereinbarung der im Jahr t anfallenden Rübenmenge Rt notwendig sind.



Übersicht 8. Erforderliche Gesamtkapazitäten und mögliche Ausbaukombinationen

Wählt man die Kapazitätskombination (KAt-1, KFt-1) im Punkte A als Ausgangspunkt für die Rekursionsformel, so sind für die Berechnung von Kt alle Kapazitätskombinationen zu untersuchen, die im rechts oberhalb von A gelegenen Quadranten liegen. Eine Beschränkung der Untersuchung nur auf die effiziente Kombination (KAt, KFt) des Quadranten im Bereiche von

$$R_t \leq KA_t + KF_t \leq R_{t+1}$$

ist nicht ausreichend, weil die Kt-Funktion nicht konvex ist.

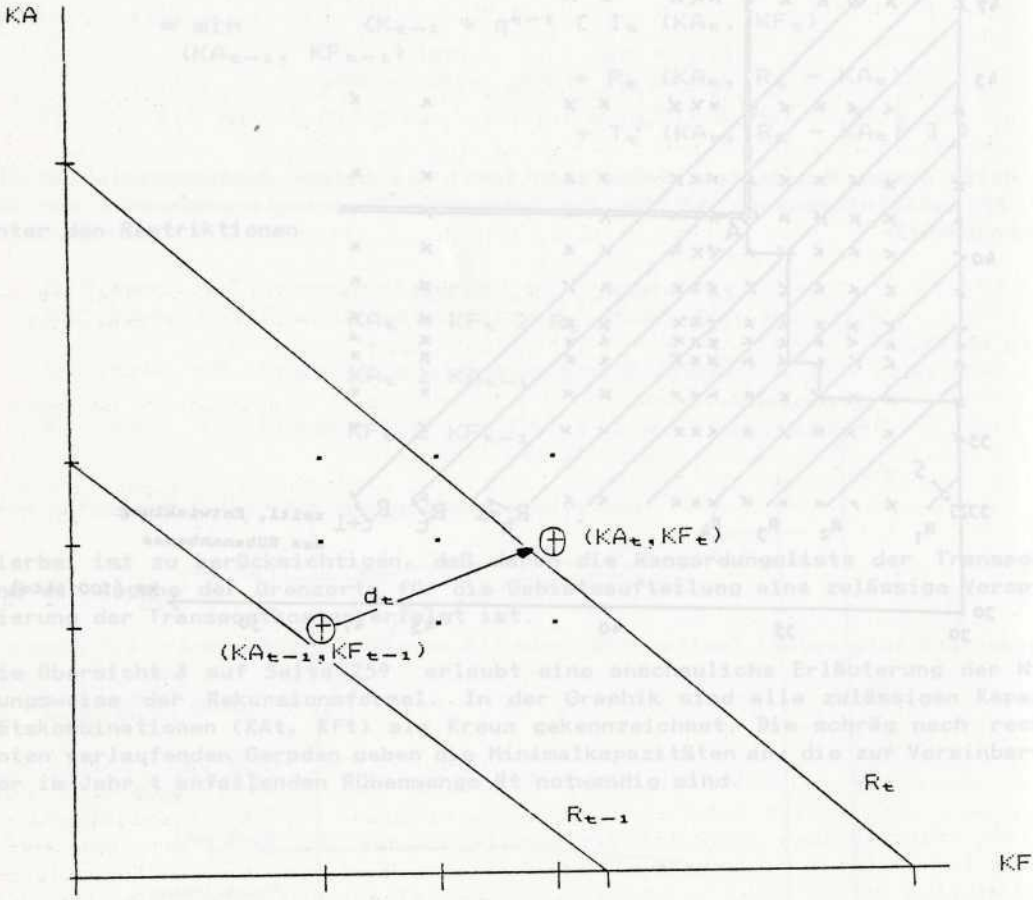
Der Zusammenhang bei jedem Iterationsschritt zwischen

Ausgangszustand (KAt-1, KFt-1),

Entscheidung (Investition) und

Endzustand (KAt, KFt)

ist aus Übersicht 9 ersichtlich.



Übersicht 9. Übergang zum nächsten Zustand

Durch die Entscheidung Dt = (KA, KF) gelangt man beim t. Iterationsschritt vom Ausgangszustand (KAt-1, KFt-1) zum folgenden Zustand (KAt, KFt). Mit der Entscheidung Dt werden zu den diskontierten Kosten Kt-1 des Zustandes (KAt-1, KFt-1) noch die von dt abhängigen Kosten It, Pt und Tt (nach Diskontierung) hinzugefügt, um die neuen diskontierten Kosten Kt für den Zustand KAt, KFt) zu erhalten.

25.5 Resultate

25.5.1 Übersicht

Die Untersuchung lieferte als Resultat die folgenden drei Aussagen:

1. Alle effizienten End(-ausbau-)kombinationen für die Kapazitäten der beiden Fabriken.

   Für die geforderte Verarbeitungskapazität am Ende des Planungshorizontes wurden die Kapazitäten beider Zuckerfabriken und die dazugehörigen, diskontierten entscheidungsabhängigen Kosten angegeben. Ein Kostenvergleich zeigt, welche von den 17 Endausbaukombinationen die kostenoptimale ist.

2. Die optimalen Ausbaupfade für alle Endkombinationen.

   Hier wurde ermittelt, wann und in welchem Umfang die Kapazitäten beider Zuckerfabriken erweitert werden sollten, damit die gewünschte Endkombination im Planungshorizont kostenoptimal erreicht wird.

3. Die Grenzorte für die optimale Zuteilung der Rübenanbaugebiete zu den beiden Zuckerfabriken.

   Es wurde eine rangmäßig geordnete Liste aller Bahnstationen angegeben, die bis zum Grenzort hin ihre Rübenproduktion zur ZFA und ab Grenzort zur ZFF liefern sollten.

Die erhaltenen Resultate sollen noch näher erläutert und an Graphiken und Tabellen kurz diskutiert werden.

25.5.2 Endausbaukombination der Kapazitäten beider Fabriken

Zum Ende des Planungshorizontes (1982) sollte die gesamte Verarbeitungskapazität beider Zuckerfabriken 8.000 tato nicht unterschreiten. Die Übersicht 10 auf Seite 262 zeigt alle untersuchten Endkombinationen für den Kapazitätsausbau und die dazugehörigen diskontierten entscheidungsabhängigen Kosten. Die effizienten Endkombinationen wurden numeriert. Es handelt sich um jene Kapazitätskombinationen beider Zuckerfabriken, die der geforderten Gesamtkapazität von 8.000 tato genügen und bei denen durch Kapazitätsreduktion in jeder Zuckerfabrik einzeln keine Kosteneinsparungen mehr erzielt werden können.

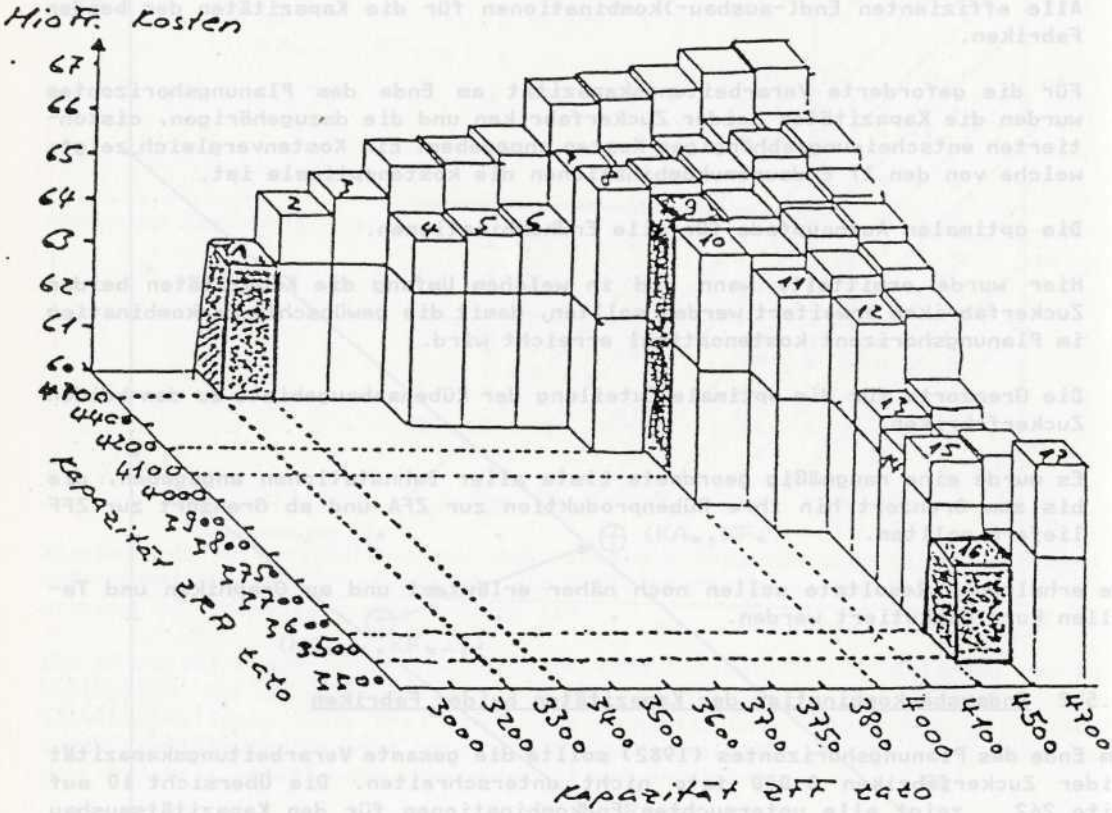
Die wichtigste Aussage aus dieser Graphik lautet:

> Würde aus agrarpolitischen Gründen nicht die optimale Endkombination (Nr. 16 mit entscheidungsabhängigen Kosten von ca. 62,3 Mio Fr.), sondern z.B. die schlechteste effiziente Endkombination (Nr. 8 mit ca. 66 Mio Fr.) gewählt, so wäre im Planungszeitraum 1972-1982 mit diskontierten Mehrkosten von 3,7 Mio Fr. zu rechnen.

Das Resultat liefert also Angaben, wieviel Mehrkosten durch Entscheidungen verursacht würden, die vom Optimum abweichen.

Eine Analyse der Aufteilung der entscheidungsabhängigen Kosten auf die Bereiche Investitionen, Produktion und Transportorte zeigte dem Management, daß, entgegen

den Erwartungen, der Ausbau der einzelnen Fabriken nicht eindeutig durch die Transportkosten bestimmt wird, sondern daß die Standortvorteile ohne weiteres durch günstigere Investitions- und Produktionskosten kompensiert werden können.



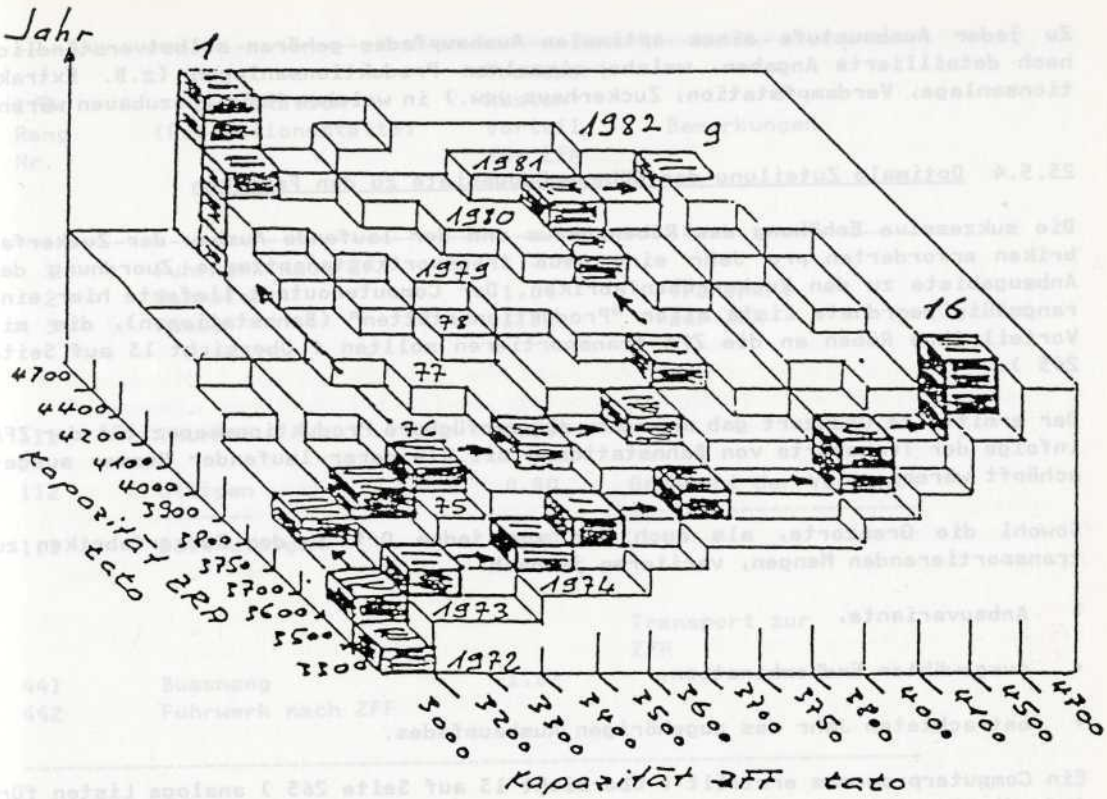
Übersicht 10. Diskontierte entscheidungsabhängige Kosten aller Endkombinationen

25.5.3 Optimaler Ausbaupfad der Endkombinationen

Die diskontierten, entscheidungsabhängigen Kosten, welche der effizienten Endkombination zugeordnet wurden, beruhen bereits auf einem Optimierungsprozeß. Diese Kosten entsprechen nämlich dem jeweiligen optimalen Ausbaupfad, der angab,

wann und in welcher Größe

die Kapazitäten der beiden Fabriken kostenminimal ausgebaut werden sollten.



Übersicht 11. Optimale Ausbaupfade für drei ausgewählte Endkombinationen

Die Übersicht 12 zeigt diese optimalen Ausbaupfade für drei herausgegriffene Endkombinationen, d.h. für die Nummer 1, 9 und 16. So ist z.B. der optimale Ausbaupfad für Endkombination 9 gemäß Tab. 6 folgendermaßen zu interpretieren:

Ausbau jahr	Kapazitätserhöhung auf tato ZFA	ZFF
1972	3.300	3.000
73	3.500	-
74	3.700	-
75	-	3.200
76	-	3.300
77	-	3.500
78	-	3.700
79	3.750	3.750
80	4.000	-
81	4.100	-
1982	-	4.000

Übersicht 12. Darstellung des zeitlichen Verlaufs des Ausbaues für die Endkombination Nr.9

Zu jeder Ausbaustufe eines optimalen Ausbaupfades gehören selbstverständlich noch detaillierte Angaben, welche einzelnen Produktionsanlagen (z.B. Extraktionsanlage, Verdampfstation, Zuckerhaus usw.) in welchem Maße auszubauen wären.

25.5.4 Optimale Zuteilung der Rübenanbaugebiete zu den Fabriken

Die sukzessive Erhöhung des Rübenanbaus und der laufende Ausbau der Zuckerfabriken erforderten pro Jahr eine neue transportkostenoptimale Zuordnung der Anbaugebiete zu den Zuckerrübenfabriken. Der Computeroutput lieferte hier eine rangmäßig geordnete Liste aller "Produktionsstätten" (Bahnstationen), die mit Vorteil ihre Rüben an die ZFA transportieren sollten (Übersicht 13 auf Seite 265).

Der ermittelte Grenzort gab an, wann die verfügbare Produktionskapazität der ZFA infolge der Transporte von Bahnstationen mit kleinerer laufender Nummer ausgeschöpft wären.

Sowohl die Grenzorte, als auch die von jedem Ort zu den Zuckerfabriken zu transportierenden Mengen, variieren je nach

- Anbauvariante,
- ausgewähter Endkombination,
- betrachtetem Jahr des zugehörigen Ausbaupfades.

Ein Computerprogramm erstellt (Übersicht 13 auf Seite 265) analoge Listen für jede dieser Situationen.

lfd. Rang Nr.	Bahnstation (Produktionsstätte)	Transport-kosten-Vorteil für ZFA (Fr./q)	Bemerkungen
1	Fuhrwerk nach ZFA	-	
2	Gampelen	1,04	Transport
3	Faoug	1,02	zur ZFA
	.		
	.		
	.		
111	Thurnen	0,80	
112	Üttigen	0,80	Grenzort der Variante
113	Boll-Utzigen	0,80	
	.		
	.		
	.		Transport zur ZFF
441	Bussnang	-1,02	
442	Fuhrwerk nach ZFF	-	

Übersicht 13. Gebietszuteilung nach Grenzorten für die Variante"Produktionskataster, Endkombination Nr.9"

25.6 Literatur

1)ONIGKEIT, D., NEF, H.: 1974
Investitionsplanung der schweizerischen Zuckerfabriken mit Dynamischer Programmierung. In: Proceeding in Operations Research.
Physica-Verlag, Würzburg-Wien 1974. Risikosimulation mit pflanzlichen