LANDBAUFORSCHUNG VÖLKENRODE, 38. JAHRGANG (1988), HEFT 4, SEITE 394 - 398

Ein Verfahren zur Abschätzung der optimalen Kapazität zentraler Verarbeitungsanlagen

BRUNO TRIES

Institut für Betriebswirtschaft

Einleitung und Problemstellung

Bei der Standortplanung für zentrale Verarbeitungsanlagen von flächengebundenen Massengütern (z.B. Ethanol aus nachwachsenden Rohstoffen, Stärke, Ölsaaten, etc.) erhebt sich neben der Frage nach dem für den Anbau geeigneten Standort das Problem der optimalen Verarbeitungskapazität. Die hinreichend genaue Beantwortung des sich ergebenden Fragenbündels kann in konkreten Fällen nur für komplexe Modelle gegeben werden (siehe beispielsweise Kögl (4)). In vielen Fällen, beispielsweise bei interregionalen Vergleichen, genügt jedoch eine Abschätzung der Größenordnung einer wirtschaftlich optimalen Kapazität. Der vorliegende Beitrag liefert dazu eine Möglichkeit durch Ausnutzung von Skaleneffekten und unter Berücksichtigung der Lieferfähigkeit der betrachteten Region. Dazu müssen einige Annahmen gemacht werden.

Die erste Annahme ist, daß der Anlagenbetreiber sich nur als Mengenanpasser verhalten kann; d.h., sein Optimierungskriterium ist die Gewinnschwelle als Minimum der durchschnittlichen Totalkosten. Diese totalen Kosten setzen sich zusammen aus Produktions- und Transportkosten des Rohstoffs und den Personal- und Investitionskosten und den sonstigen variablen Kosten der Verarbeitung. Die zweite Annahme ist die Unterstellung einer homogenen Struktur des (geplanten) Einzugsgebietes in bezug auf Anbauverfahren. M.a.W. die Anbaudichte (ρ) des Rohstoffs ist in jeder Entfernung zur Verarbeitungsanlage als gleich anzusehen; das gleiche gilt für die Kosten des Anbaus. Ein extremes Beispiel dazu liefert die Plantage mit der Anbaudichte $\rho = 1$ (Chadwick (2)).

Die Ausnutzung von Skaleneffekten geht einher mit einer Veränderung des Rohstoffbedarfs. Steigerung des Rohstoffaufkommens ist möglich entweder durch Erhöhung des Anteils an der Ackerfläche in einem fest umrissenen Gebiet oder durch Ausdehnung des Einzugsgebietes. Beides ist mit höheren Durchschnittskosten der Beschaffung verbunden. Ab einem gewissen Anteil an der AF steigen die Nutzungskosten des Anbaus stärker als die Transportkosten. Solange die zusätzlichen Transportkosten je Einheit geringer sind als die Kosten der Ausdehnung im Rahmen eines vorgegebenen Ausgangsgebietes, wird zusätzliche Beschaffung nur durch die Transportkosten determiniert.

Wenn unterstellt werden kann, daß die variablen Kosten der Verarbeitung unabhängig von der Anlagengröße sind, lassen sich die Veränderungen der totalen Kosten bei Veränderung der Kapazität anhand der Investitions-, Personal- und Transportkosten abschätzen. Die Investitions- und Personalkosten je Einheit des Produkts sinken mit steigender Kapazität, die Beschaffungskosten, dargestellt durch die Transportkosten je Einheit steigen.

Die Berücksichtigung von Skaleneffekten bedarf einer von Null verschiedenen Ausgangslösung. Dazu ist notwendig, eine Startlösung zu ermitteln. Dieser Startlösung sind die der vorgegebenen Kapazität zugemessene Rohstoffzusammensetzung sowie die Größe des Einzugsgebietes (Transportkosten) und die Anbaudichte (ρ) zu entnehmen.

Für die folgenden Überlegungen wird also vorausgesetzt, daß einer vorgegebenen Anlage (Startlösung) sowohl Einzugsgebiet als auch optimaler Rohstoffmix zugeordnet sind; eine Kapazitätsvergrößerung ist (bei konstantem ρ) nur durch Ausweitung des Einzugsgebietes möglich.

2. Grundlagen für die Abschätzung

Voraussetzung für das hier vorgestellte Verfahren zur Abschätzung der optimalen Anlagengröße ist die Annahme konstanter variabler Kosten der Verarbeitung unabhängig von der Anlagengröße und vorgegebener Anbaudichte (ρ = Rohstofffläche : Gesamtfläche), wobei ρ aufgrund von Fruchtfolgerestriktionen und/oder aufgrund von hohen Nutzungskosten determiniert sein kann. Nach dem bisher Aufgeführten gilt es nur noch die Fixkosten der Konversion und die Transportkosten gegenseitig abzuwägen, deren Verläufe aus der Abbildung hervorgehen.

Die Degression der Fixkosten bei Anlagenvergrößerung wird mit Hilfe der Gleichungen

$$\frac{I_1}{I_0} = \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^{0,65} \qquad (I_i = \text{Investitionskosten};\ K_i = \text{Kapazität})$$

für die Kapitalkosten

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^{0,2} \qquad (P_i = \text{Personalkosten})$$

für die Personalkosten

abgeschätzt (Barthel u.a. (1) und die dort angegebene Literatur). (Zu beachten ist, ob die Gültigkeit der Degressionsfunktionen in dem Bereich, der sich aus der nachfolgenden Rechnung ergibt, noch gewährleistet ist. Dies ist in jedem konkreten Einzelfall zu prüfen.)

Eine p-fache Vergrößerung der Kapazität $K_1 = p \cdot K_0$ bewirkt demnach einen Investitionsaufwand (Fixkosten)

$$I_1 = I_0 \cdot p^{0,65}$$

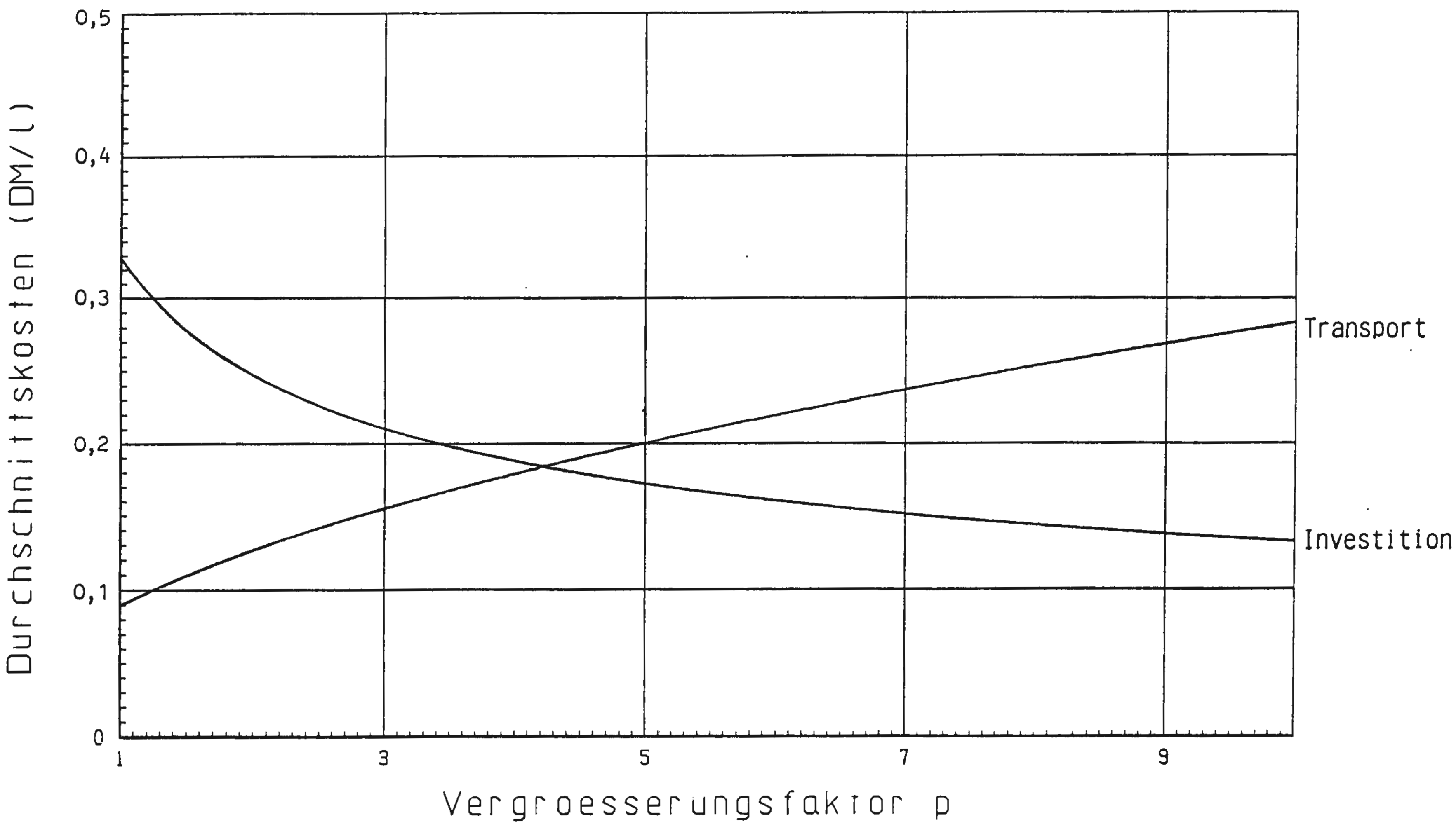
und Personalkosten

$$P_1 = P_0 \cdot p^{0,2}.$$

Die Kosten je Produktionseinheit

$$(\varnothing\ I_i = \frac{I_i}{K_i}\ ;\ \varnothing\ P_i = \frac{P_i}{K_i}\ ;\ i = 0;1)$$

Durchschnittskosten der Investition und des Transports
in Abhängigkeit vom Vergrößerungsfaktor einer Ethanolanlage



errechnen sich damit unter der Voraussetzung eines unveränderten Auslastungsgrades zu

$$\varnothing I_1 = p^{-0,35} \cdot \varnothing I_0$$

$$\varnothing P_1 = p^{-0,8} \cdot \varnothing P_0$$

Die mit der Vergrößerung der Kapazität einhergehende Veränderung der Rohstoffproduktion bedeutet eine Erhöhung der Anbaudichte und/oder eine Vergrößerung des Einzuggebietes. Bei steigenden Opportunitätskosten der Fläche und Beibehaltung des Transportsystems ist beides mit höheren Kosten verbunden. Unter Annahme einer unabhängig von der Entfernung bestehenden homogenen Agrarstruktur, konstanter Anbaudichte ρ und gleichbleibendem Flächenertrag E wird der höhere Rohstoffbedarf allein über die Vergrößerung des Einzugsgebietes befriedigt, dessen Vergrößerungsfaktor gleich dem Faktor p der Kapazitätsausweitung ist.

Nach Tries (5) ist der Transportaufwand

$$T = \rho \cdot E \cdot \varnothing R \cdot F$$ ($F = r^2 \cdot \pi$, r = Radius, ØR = Durchschnittsradius)

Bei p-facher Vergrößerung, d. h.

$$F_1 = p \cdot F_0$$

folgt $\varnothing R_1 = \sqrt{p} \cdot \varnothing R_0$ und damit

$$T_1 = \rho \cdot E \cdot \varnothing R_1 \cdot F_1$$
$$= \rho \cdot E \cdot \sqrt{p} \cdot \varnothing R_0 \cdot p \cdot F$$
$$= T_0 \cdot p \cdot \sqrt{p}.$$

Der Transportaufwand je Einheit errechnet sich

$$\frac{T_1}{K_1} = \frac{T_0 \cdot p \cdot \sqrt{p}}{p \quad K_0} = \frac{T_0}{K_0} \cdot \sqrt{p}.$$

$$\varnothing T_0 = \frac{T_0}{K_0} \cdot P_r$$ mit P_r = Kosten je Entfernungs- und Mengeneinheit

Mit diesem Rüstzeug läßt sich die Frage beantworten, in welchem Maße eine Kapazität ausgeweitet werden kann, ohne daß die Fixkostendegression (Kosteneinsparung) durch steigende Transportkosten (als untere Grenze der Vergrößerung der Beschaffungskosten) aufgezehrt wird.

Unterstellt man neben den o.g. Bedingungen, daß die variablen Kosten der Konversion ebenfalls größenunabhängig sind, dann gilt es nur noch, die Summe aus Investitionskosten, Personalkosten und Transportkosten je Einheit zu minimieren.

$$\text{Min: } SK = \varnothing I_1 + \varnothing P_1 + \varnothing T_1$$
$$= p^{-0,35}\ \varnothing I_0 + p^{-0,8}\ \varnothing P_0 + p^{0,5}\ \varnothing T_0$$

Die unabhängige Variable ist p, woraus als notwendige Bedingung folgt

$$\frac{d\ SK}{d\ p} = -0,35 \cdot \varnothing I_0 \cdot p^{-1,35} - 0,8 \cdot \varnothing P_0 \cdot p^{-1,8} + 0,5 \cdot \varnothing T_0 \cdot p^{-0,5} = 0$$

Im Gegensatz zu der hier vorgestellten homogenen Erweiterung ist auch eine "inhomogene" Ausdehnung der Rohstofffläche möglich. Eine starke Ausweitung der durchschnittlichen Transportentfernung je Produkteinheit macht es c.p. erforderlich, über große Entfernungen nur geringe Mengen zu transportieren. Nach Hollmann und Tries (3) sollte im Idealfall das Produkt aus ρ und E mit wachsender Entfernung abnehmen. Das bedeutet aber entweder abnehmendes Interesse (fallendes ρ) an der Rohstofflieferung oder aber geringere Mengen je Flächeneinheit, wobei dies wiederum nur möglich wird, wenn der Rohstoffmix geändert wird. Daraus folgt, daß eine p-fache Kapazitätserweiterung nicht gleichzeitig eine p-fache Flächenvergrößerung bedingt.

In diesem Fall läßt sich die Frage nach dem a priori zu erwartenden Vergrößerungsfaktor p nicht so einfach beantworten. Wegen der fehlenden Homogenität unterscheidet sich T1 nicht nur durch den Faktor $p^{3/2}$ von T_0, sondern durch jede in den Transportkosten vorkommende Größe. Demzufolge ist vor der Bestimmung der optimalen Ausweitung der Kapazität sowohl der Rohstoff (bzw. das Gemisch und die jeweiligen Anteile) als auch die Anbaudichte und die sich daraus ergebenden Transportkosten je Produkteinheit zu ermitteln bzw. festzulegen.

Bezeichnet ΔT den Anteil des Transportaufwandes, der durch die Hereinnahme eines zusätzlichen Einzugsgebietes (bedingt durch Kapazitätsausweitung um K mit K +ΔK = pK) erzeugt wird, dann ist

$$\frac{T_1}{K_1} = \frac{T_0 + \Delta T}{K_0 + \Delta K} = \frac{T_0 + \Delta T}{pK_0}.$$

Zur Abschätzung der optimalen Kapazität dient wieder die Summe aus Investitions-, Personal- und Transportkosten. Es wird auch hier wieder unterstellt, daß die variablen Kosten und die Rohstoffkosten sich nicht ändern. (Die zweite Annahme setzt voraus, daß der Rohstoff für die Kapazitätserweiterung im bisherigen Randgebiet bereits im vollen Umfang die Anbaudichte ausfüllt; inwieweit die Annahme über die Fixkostendegression noch gültig ist, kann hier nicht geprüft werden.)

Somit folgt::

$$\text{Min } SK = \varnothing I_1 + \varnothing P_1 + \varnothing T_1$$
$$= p^{-0,35}\ \varnothing I_0 + p^{-0,8}\ \varnothing P_0 + \frac{T_0 + \Delta T}{pK_0} \cdot P_r$$

wobei $\Delta T = \rho \cdot E \cdot \varnothing R_1 \cdot \Delta F$, P_r= Kosten je Entfernungs- und Mengeneinheit mit $\rho \cdot E \cdot \Delta F$= Ertrag der zusätzlichen Fläche = ΔK

$\varnothing R_1$ =Durchschnittsradius der Kreisringfläche ΔF

$$p \cdot K_0 = K_0 + \Delta K = K_1 .$$

Wegen $\frac{\Delta K}{K_0} = p - 1$ folgt

$$\frac{T_0 + \Delta T}{pK_0} = \frac{1}{p}\ \frac{T_0}{K_0} + \frac{\varnothing R_1 \cdot \Delta K}{pK_0}$$

$$= \frac{1}{p}\left(\frac{T_0}{K_0} + \varnothing R_1\ (p - 1)\right)$$

Nach Hollmann und Tries (3) gilt näherungsweise

$$\varnothing R_1 = \frac{r_a + r_i}{2}$$

wobei r_a und r_i der äußere und der innere Radius des Kreisringes ΔF sind.

Mit $\Delta F = (r_a^2 - r_i^2)\,\Pi$

und $\Delta F = \frac{\Delta K}{\rho \cdot E}$

folgt $\varnothing R_1 = \frac{1}{2}\left(r_i + \sqrt{\frac{K_0(p-1)}{\rho \cdot E \cdot \Pi} + r_i^2}\right)$

mit $\varnothing T_0 = \frac{T_0}{K_0} \cdot P_r$

folgt aus dem bisher hergeleiteten die notwendige Bedingung für ein Minimum

$$\frac{d\,SK}{d\,p} = -0{,}35\ \varnothing I_i \cdot p^{-1{,}35} - 0{,}8\ \varnothing P_0 \cdot p^{-1{,}8}$$
$$- p^{-2}\ \varnothing T_0 + \frac{1}{2p^2}\left[r_i + \surd + (p^2 - p)\frac{K_0}{2\surd \cdot \rho \cdot E \cdot \Pi}\right]P_r = 0$$

$$0{,}35\ \varnothing I_0\ p^{0{,}65} + 0{,}8\ \varnothing P_0 \cdot p^{0{,}2} + \varnothing T_0 = \frac{1}{2}\left[r_i + \surd + (p^2 - p)\frac{K_0}{2\surd \cdot \rho \cdot E \cdot \Pi}\right]P_r$$
$$\text{mit } \surd = \sqrt{\frac{K_0\ (p-1)}{\rho \cdot E \cdot \Pi} + r_i^2} = r_a$$

Dieser Gleichung ist zu entnehmen, daß a priori festgelegt werden muß, welcher Rohstoff (wegen E) für das Auswertungsgebiet in Frage kommt und welche Anbaudichte (ρ) gewählt wird.

(In beiden Fällen muß die hinreichende Bedingung für ein Minimum ($\frac{d^2}{dp^2}$ SK) nachgeprüft werden.)

3. Größenplanung von Ethanolanlagen

Mit Hilfe des in 2. vorgestellten Rüstzeuges soll am Beispiel einer Ethanolanlage die Abschätzung einer optimalen Kapazität vorgenommen werden. Für einen Landkreis der Bundesrepublik Deutschland wurde mit Hilfe statistischer Daten, der Vorgabe einer Anlage mit der Kapazität von 100 000 1/d ein optimaler Rohstoffmix und ein kreisförmiges Einzugsgebiet ermittelt, d.h. es wurde die oben erwähnte homogene Struktur unterstellt. Die Produktionseinheit ist 1 Liter Ethanol und gesucht wird die optimale Größe unter den genannten Bedingungen.

Es lassen sich zwei Spezialfälle betrachten: Entweder bleibt der Rohstoffmix konstant, d.h. die Zusammensetzung der Rohstoffe bleibt die gleiche wie für die Ausgangslösung, oder die Zusammensetzung ändert sich zugunsten eines transportwürdigeren Rohstoffes.

3.1 Vergrößerung bei gleichbleibender Rohstoffzusammensetzung

Konstanter Rohstoffmix und Homogenität bewirken keine Änderung von $\rho \cdot E$, d.h. das Produktionsvermögen je Flächeneinheit bleibt gleich über dem Ausdehnungsgebiet. Damit sind die Voraussetzungen für die Gültigkeit der Gleichung

$$\varnothing T_1 = p^{0{,}5} \cdot \varnothing T_0$$

erfüllt. Bezogen auf einen Liter reinen Alkohol errechnet sich nach Barthel et al.(1) Kapitalkosten Ø K_0 = 0,28 DM/l und Personalkosten Ø P_0 = 0,05 DM/l. Modellrechnungen ergaben Transportkosten Ø T_0 = 0,09 DM/l.

Der optimale Vergrößerungsfaktor p errechnet sich damit aus

$$P\ opt = 0{,}35 \cdot 0{,}28 \cdot p^{-1{,}35} + 0{,}8 \cdot 0{,}05 \cdot p^{-1{,}8} - 0{,}5 \cdot 0{,}09 \cdot p^{-0{,}5}$$
$$P\ opt = 3{,}18$$

(Die Erfüllung der hinreichenden Bedingung läßt sich durch Nachrechnen verifizieren.)

3.2 Vergrößerung bei inhomogener Rohstoffverteilung

Um der stark anwachsenden Transportbelastung durch Gebietsvergrößerungen entgegenzuwirken, ist es sinnvoll, das Produkt $\rho \cdot E \cdot P_r$ mit wachsender Entfernung möglichst zu verkleinern; hierbei gelten die gleichen Überlegungen wie in Hollmann und Tries (3). Daraus folgt notwendigerweise eine Änderung der Rohstoffstruktur von der (Ethanol-)ertragreichen Zuckerrübe zum transportwürdigen (Ethanol-)ertragärmeren Getreide.

Aus dem obigen Beispiel mit r_i = 29 km, ØI_0 = 0,28, ØP_0= 0,05, der Fortsetzung des in der Ausgangslösung (K_0) ermittelten p = 0,09, der Unterstellung einer Kapazitätserweiterung nur über Getreide mit dem Ertrag an Ethanol von 1 400 l/ha und den über den Getreidetransport ermittelten Transportkosten für Ethanol in Höhe von 0,0026 DM/l errechnet sich der Vergrößerungsfaktor aus (Fläche und Entfernung in km², km)

$$P\ opt = 0{,}35 \cdot 0{,}28\ p^{0{,}65} + 0{,}8 \cdot 0{,}05 \cdot p^{0{,}2} + 0{,}09 = \frac{1}{2}\left[29 + \surd + (p^2 - p) \cdot \frac{33000000}{2\surd \cdot 0{,}03 \cdot 140000 \cdot 3{,}14}\right] \cdot 0{,}0026$$
$$\text{mit } \surd = \sqrt{\frac{33000000}{0{,}03 \cdot 140000 \cdot \Pi} + (29)^2}$$
$$P\ opt = 3{,}52$$

4. Wertung

Wie die beiden Ergebnisse zeigen, ist in dem hier vorgestellten Beispiel der Unterschied der Lösungen nicht nennenswert. Aufgrund der qualitativen Änderung des Rohstoffmix im zweiten Fall liegt es allerdings nahe, daß dann die Formel für die Hochrechnung der Investitionskosten nicht mehr gültig ist; vermutlich fallen die durchschnittlichen Investitionskosten stärker. Dies müßte in konkreten Fällen geklärt werden, ehe eine Abschätzung nach vorliegendem Verfahren durchgeführt wird. Darüber hinaus ist zu beachten, daß die Rohstoffkosten loco Hof nicht mehr die gleichen sind wie in der Ausgangslage, so daß diese Größenabschätzung nur einen Anhaltspunkt für p ergibt.

Vergleicht man die Unterschiede der Einzugsgebiete, so ergibt sich, daß eine "homogene" Ausdehnung der Fläche (p . F_0) den Radius von 29 km auf 52 km vergrößert, wogegen der Radius bei der "inhomogenen" Ausdehnung auf 58 km wächst. Im ersten Fall hat die zusätzlich beanspruchte Fläche (Gesamtfläche des zusätzlichen Einzugsgebiets) die Größe von 5 757 km², während im zweiten Fall ΔF = 7 857 km² ist, was einer Flächenausdehnung um das vielfache (bei Kapazitätsvergrößerung um das 3,52-fache) entspricht. Neben dem oben angeführten wird klar, daß diese Abschätzung nur einen Mindestwert für p ergibt; das Optimum ist sicher bei größerem p zu erwarten.

Zusammenfassung

Zur Planung von Standort und Größe einer Anlage für die Verarbeitung von landwirtschaftlich produzierten Massengütern bedarf es i.A. umfangreicher Rechenmodelle.

Der vorliegende Beitrag liefert ein Verfahren zur Abschätzung der optimalen Größe einer Verarbeitungsanlage mit Hilfe einer Ausgangslösung ohne zusätzliche Modellkalkulation.

Voraussetzung dafür sind formelmäßig erfaßbare Skaleneffekte im Zusammenhang von Anlagenkapazität und Kapital und das Bestehen einer über den geschätzten Einzugsbereich gleichverteilten Anbaudichte.

Determination of the optimal capacity of processing plants

Planning of location and size of a plant for converting renewable resources generally requires large models.

Based on an initial solution it is shown, how to estimate the optimal size of a plant without further model calculations. This estimation is done by using scale effects in capacity and the assumption of constant cropping pattern in the relevant region.

Literatur

(1) Barthel, E.; Götzke, H.; Hennigs, H.: Konversionskosten ausgewählter Produktlinien im Bereich nachwachsender Rohstoffe. Ausarbeitung für BML-Arbeitsgruppe "Nachwachsende Rohstoffe", Braunschweig, September 1985, 120 S.

(2) Chadwick, G.: Determining the Optimum Locations and Sizes of Sugar Cane Processing Plants. In: SUGAR y AZUCAR, Vol. 78, November 1983, S. 32-35.

(3) Hollmann, P.; Tries, B.: Bestimmungsgründe des Transportaufwandes bei der Erfassung nachwachsender Rohstoffe. - Landbauforschung Völkenrode 33 (1983), H. 1, S. 33-37.

(4) Kögl, H.: Methodische Aspekte bei der Bestimmung der regionalen Herstellkosten von Bioethanol. - Agrarwirtschaft Jg. 35 (1986), H. 11, S. 328-344.

(5) Tries, B.: Überlegungen zu den Transportkosten zentraler Verarbeitungsanlagen. - Landbauforschung Völkenrode 33 (1983), H. 1, S. 31-32.

Verfasser: Tries, Bruno, Dr. oec., Institut für Betriebswirtschaft der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig -Völkenrode (FAL), komm. Leiter: Prof. Dr. Eckhart Neander.