

DISS. ETH Nr. 13871

**Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen am
Beispiel der Erosion im Gebiet des Baldeggersees**

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Alois Keusch

Dipl. Ing.-Agr. ETH

geboren am 21. April 1967

von Boswil, AG

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Bernard Lehmann, Referent

Prof. Dr. Renan-Ulrich Goetz, Korreferent

Zürich 2001

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Assistenzzeit am Institut für Agrarwirtschaft der ETH-Zürich. Es ist mir ein Anliegen, mich an dieser Stelle bei verschiedenen Personen für die vielfältige Unterstützung im Lauf der Entstehung dieser Arbeit zu bedanken.

Meinem Referenten, Prof. Dr. Bernard Lehmann, möchte ich ganz herzlich für den Freiraum, den er mir bei der Wahl des Forschungsschwerpunktes gewährte, danken. Eine Vielzahl von anregenden Diskussionen und seine stete Bereitschaft zur Unterstützung halfen, die Arbeit auch in schwierigen Phasen voranzutreiben.

Prof. Dr. Renan-Ulrich Goetz von der Universität in Girona, Spanien, danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates und die kompetente und engagierte fachliche Betreuung der Arbeit. Seine konstruktive Kritik in allen Bereichen und seine hervorragenden Kenntnisse im Fachgebiet haben mich entscheidend weitergebracht.

Dr. Werner Hediger danke ich herzlichst für seine wichtigen und kompetenten Hinweise zu theoretischen Fragen, insbesondere beim Kapitel über Produktionsfunktionen, zur Strukturierung der Arbeit und zu Aspekten der Interpretation der Ergebnisse. Seine konstruktiv kritische Durchsicht der Arbeit war von grossem Nutzen.

Dr. Hans-Peter Thomi trug mit seiner motivierenden Unterstützung im Rahmen verschiedener Gespräche und mit seiner Beratung zur Programmierung des Inputgenerators wesentlich zum Erfolg bei.

Martin Brugger und Christian Flury motivierten mit ihrem persönlichen Interesse, ihren anregenden Diskussionsbeiträgen zu Programmierungsfragen sowie durch ihr kollegiales Verhalten.

Christoph Theler und Annemarie Dorenbos danke ich für die angenehmen und für das Gelingen der Arbeit wichtigen Arbeitswochen in Disentis. Ihre fachlichen Tips und Hinweise brachten mich auch zu anderen Zeitpunkten weiter.

Durch die Zusammenarbeit mit Hansjörg Schmid ergaben sich erfreuliche Synergien vor allem im Bereich der Datengrundlagen für die Modellrechnungen.

Herrn Tonko Racic von den Systemdiensten der ETHZ danke ich für die zuvorkommende Unterstützung und Beratung bei Problemen mit der Nutzung des Tornado-Servers.

Dr. Daniel Schaub führte die EPIC-Simulationen durch. Auch ihm gilt ein herzlicher Dank.

Meinem ersten Bürokollegen, Dr. Lukas Bär, danke ich für sein „go for it“, die anregende freundschaftliche Zusammenarbeit sowie die Diskussionen vor und während der Entstehung meiner Arbeit. Die angenehmen Bürogemeinschaften mit ihm, Edyta Luba und Jürg Friedli trugen ebenfalls zum Gelingen der Arbeit bei.

Mein familiärer Hintergrund, die Familien meiner Schwester Franziska Odermatt und meines Freundes Magnus Bonderer förderten mit ihrem angenehmen Umfeld meine Erholungsphasen in idealer Weise. Meine alljährlichen geschätzten Sommerferien im Lötschental mit meinem Onkel P. Dr. Lukas Keusch gaben mir regelmässig den nötigen Abstand zur Arbeit.

Mein Dank gilt auch allen nicht namentlich erwähnten Personen, die zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben, besonders den aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen im C-Stock.

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist es, geeignete theoretische und methodische Grundlagen für die Modellierung dynamischer nichtlinearer Problemstellungen aufzuarbeiten und weitere notwendige und hilfreiche Grundlagen für deren Anwendung bereitzustellen. Die Modellierungsgrundlagen sollen exemplarisch am Beispiel der Erosion und der partikulären Phosphorabträge, die im Gebiet des Baldeggersees durch die landwirtschaftliche Nutzung entstehen, angewandt werden.

Modelle sind entscheidungsunterstützende Instrumente und müssen mit Blick auf die Anwendbarkeit von der Realität zielgerichtet abstrahieren. Die mathematische Modellierung ist ein Prozess, der mit der Modellzwecksetzung und der entsprechenden Systemdefinition beginnt. Von grosser Bedeutung ist die Modellqualität, die sich aus der Modellrelevanz und der Modellvalidität zusammensetzt. Die Modellrelevanz ergibt sich durch die Übereinstimmung des Modells mit den Analysezielen. Die Modellvalidität kann numerisch mittels Sensitivitätsanalyse, Szenariotechnik oder durch Parametrisierung und analytisch durch eine formale Modellanalyse geprüft werden.

Ökonomische Fragen zur Allokation knapper Ressourcen werden in sinnvoller Weise als Optimierungsprobleme analysiert. Dabei erfordern insbesondere Fragen zur Nachhaltigkeit, zur Ressourcenökonomik oder zur Investitionsrechnung in der Regel eine **dynamische Betrachtung** mit der Abbildung von Variablen, die den Entwicklungspfad des Systemzustandes und die Entwicklungspfade der Entscheide der Akteure beschreiben. Oft lassen sich Systemzusammenhänge nicht linear abbilden, so dass aus mathematischer Sicht die Methode der Nichtlinearen Programmierung zur Anwendung kommen muss. Diese stellt spezielle Anforderungen in bezug auf die globale **Lösbarkeit**. Das formulierte Problem muss konvex sein, was für den Maximierungsfall im Standardansatz bedeutet, dass die Zielfunktion mindestens pseudokonkav und die Restriktionsfunktionen mindestens quasikonvex sein müssen, bei gleichzeitiger Erfüllung der Constraint Qualification. Ist die Addition verschiedener Funktionen nötig, so verschärfen sich die Anforderungen an die einzelnen Funktionen aus der **Sicht der Konvexität** meist auf Konvexität bzw. Konkavität. Analytische Verfahren zur Prüfung der Konvexität eines Programmierungsproblems sind aufwendig. Es kann aber auf numerischer Basis die Konvexität von Optimierungsproblemen überprüft werden (z.B. mit der Software MPROBE).

Fragestellungen aus den genannten Gebieten erfordern häufig die Abbildung dynamischer und nichtlinearer Zusammenhänge in Differential- bzw. Differenzgleichungen. Aus theoretischer Sicht ist die **Kontrolltheorie** geeignet. Diese liefert die theoretische Grundlage zur Analyse des Verhaltens von Akteuren, die bei Entscheidungen mit **intertemporalen Interdependenzen** konfrontiert sind. Die Berücksichtigung der intertemporalen Interdependenzen erlaubt eine langfristige Gewinnmaximierung und damit intertemporale Effizienz. Diese ist bei einer kurzfristigen Optimierung (statisch oder komparativ statisch) nicht gegeben. Bei konkaver Gewinnfunktion (abnehmende Grenzerträge) ist bei einem negativen Einfluss der Kontroll- auf die Zustandsvariable der Wert der Kontrollvariablen bei intertemporaler Optimierung kleiner als bei statischer Betrachtung. Dies hat zur Folge, dass bei dynamischer Betrachtung eine extensivere Ressourcennutzung optimal ist, da die Nutzungskosten, die intertemporalen Opportunitätskosten, berücksichtigt werden. Damit wird **intertemporale Effizienz** gewährleistet.

Erosionsprobleme fallen aus ökonomischer Sicht ins Fachgebiet der Ressourcenökonomik. Die durch die landwirtschaftliche Nutzung hervorgerufene Erosion verursacht aus betrieblicher Sicht on-farm-costs, aus sozialer Sicht entstehen off-farm-costs in Form von Sedimentation und durch die Verschmutzung von Oberflächengewässern (non-point-source-pollution).

Zur Problemanalyse mit on- und off-farm Effekten sind aggregierte Programmierungsmodelle am geeignetsten. Bei der Verwendung dieses Modelltyps ist den Aggregationsfehlern speziell Beachtung zu schenken.

Wichtige die Erosion eindämmende **Massnahmen** sind die konservierende Bodenbearbeitung und wenig erosive Fruchtfolgen. Mögliche **Instrumente** zur Beeinflussung des Akteurverhaltens sind Steuerungen und Standards. Die beiden Massnahmen und die Instrumente müssen mit dem Modellansatz gut abgebildet werden können. Die verfügbare Datengrundlage im Bereich der Erosion (konkret im Baldeggerseegebiet) erlaubt keine Abbildung der meist nichtlinearen biophysikalischen Zusammenhänge in Funktionen, die in einem ökonomischen Modell verwendet werden können. Deshalb wird ein Modellansatz aus der **Kombination** eines biophysikalischen **Simulationsmodells** (EPIC), das eine ausreichende biophysikalische Datengrundlage liefert, mit einem ökonomischen **Optimierungsmodell** gewählt. Die Integration der Resultate des Simulationsmodells in das Optimierungsmodell erfordert einen Zwischenschritt, die **Metamodellierung**, in der aus den Resultaten des Simulationsmodells Funktionen geschätzt werden, die die biophysikalischen Zusammenhänge abbilden. Diese Funktionen können danach in das ökonomische Optimierungsmodell integriert werden (→ **bioökonomisches Modell**). Die vorhandene Kalibrierung des Simulationsmodells gestattet lediglich ein einzelbetriebliches Optimierungsmodell. Da das bioökonomische Modell kontinuierliche Allokationsentscheide erlauben soll, müssen die Funktionen aus der Metamodellierung mit der Allokationsvariablen skaliert werden können und dabei muss die Konvexitätseigenschaft der Funktion erhalten bleiben. Aus der Literaturanalyse ergaben sich keine direkt verwendbaren Funktionen, die den Anforderungen der Konvexität, der Schätzbarkeit, des Realitätsbezuges und der ökonomischen Flexibilität genügen. Eine **erweiterte Cobb-Douglas Funktion** erfüllt die genannten Kriterien. Sie dient der Kontrolle der Optimallösungen für die Modellformulierung mit quadratischen Funktionen (Verletzung der Konvexitätseigenschaft bei Skalierung mit einer Variablen). Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Umrechnung homogener Zustandsvariablen pro Bezugseinheit im Zeitablauf auf mit Flächenvariablen skalierte Variablen.

Eine erste **Modellvalidierung** erfolgt mit der qualitativen Analyse des bioökonomischen Optimierungsmodells. Die theoretische Analyse der verwendeten Produktions- und Erosionsfunktionen zeigt Konsistenz aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht. Die Analyse der first order conditions gemäss dem Lagrangeansatz des kontrolltheoretischen Allokations- und Intensitätsmodells (Optimierungsmodell) liefert aus ökonomischer Sicht korrekte Kriterien der Optimalität und erlaubt für die Bewertungsgrössen (Kozustandsvariablen) gewünschte und sinnvolle Interpretationsmöglichkeiten. Die qualitative Analyse des theoretischen Modells vor der numerischen Verwendung ist sehr wichtig und hilfreich, da nur aus einem theoretisch richtigen Modell vertrauenswürdige Resultate gewonnen werden können.

Der **Modellansatz** ermöglicht die Bestimmung der Entwicklungspfade für die **Kontroll- und die Zustandsvariablen**. Die Analyse erfolgt bei sozialer und privater Betrachtung mit kurz- und langfristigem Planungshorizont. Die Zustandsvariablen bilden den Systemzustand ab. Die Kontrollvariablen beschreiben die Entscheide der Akteure im Zeitablauf. Die Entwicklungspfade der Kozustandsvariablen des bioökonomischen Modells liefern zu jedem Zeitpunkt die **dynamische Bewertung** der Veränderung der Ressourcen. Mit dem Modellansatz lassen sich die **on-farm-costs** der Erosion und die Abweichung des privaten vom sozialen (off-farm-costs) sowie des kurzfristigen vom langfristigen Optimum quantifizieren. Aus den Divergenzen ergibt sich der Handlungsbedarf, der mittels Massnahmen und Instrumenten zu korrigieren ist. Der Modellansatz erlaubt die Quantifizierung der **Vermeidungskosten** der Verringerung der Umweltbelastung durch verschiedene Massnahmen. Verschiedene Massnahmen und Instrumente können bezüglich ihrer **Effizienz und Effektivität** verglichen werden. Dabei

stellen first best Massnahmen den Referenzpunkt dar. Die **Effizienzverluste** der einzelnen Massnahmen liefern eine wichtige Beurteilungsgrösse.

Die Verwendung **algebraischer Modellierungssprachen** bringt bei der Modellierung allgemein und speziell bei der Methode der Nichtlinearen Programmierung durch die strikte Trennung von Modell und Daten sowie durch die Möglichkeit der Indizierung von Parametern, Variablen und Restriktionen grosse Vorteile in Form einer **konzisen algebraischen Darstellung**. Eine gute Übersicht wird gewährleistet und mathematische Konsistenz erzwungen. Die Indizierung legt die Verwendung einer Datenbanksoftware als Inputgenerator nahe. Ein in MICROSOFT ACCESS programmierter **Inputgenerator** ist auf den Einsatz mit der algebraischen Modellierungssprache AMPL abgestimmt. Die Verwendung hilft Redundanzen vermeiden, erleichtert die Eingabe, indem, wo nötig, Eindeutigkeit erzwungen wird und einmalige Eingaben mit Verfügbarkeit bei weiterer Verwendung gewährleistet sind. Die Relationalität mit referenzieller Integrität verhindert Datenleichen bei Löschvorgängen und erleichtert Eintragsveränderungen durch Weitergabe. In Kombination mit MICROSOFT EXCEL und MICROSOFT WORD zur Aufbereitung des Modelloutputs ist die Verwendung des Inputgenerators und der algebraischen Modellierungssprache für die Modellierung sehr geeignet und effizient.

Die **Resultate** der auf einer Aktivitätsanalyse beruhenden Modellrechnungen weisen **tiefe on farm costs der Erosion** aus. Sie bewirken im verwendeten Modell keine Änderungen bei den betrieblichen Entscheiden bei langfristiger im Vergleich zu kurzfristiger Betrachtung. Die **Kosten zur Vermeidung** eines Phosphorabtrags, der die soziale Zielgrösse von 0.3 kg partikulärem P-Abtrag pro ha überschreitet, betragen mindestens 500 Fr. pro ha und steigen bei der Limitierung des partikulären Phosphorabtrages auf 0.1 kg / ha auf ca. 1200 Fr. je ha. Die **marginalen Vermeidungskosten** je kg partikulären Phosphorabtrags steigen von < 300 Fr. bei einem Abtrag von 1 – 5 kg Phosphor auf über 4500 Fr. für das letzte kg bei 22 kg vermiedenen P-Abtrag auf dem untersuchten Betrieb mit 20 ha LN. Die **Besteuerung** des Phosphorabtrags als least-cost Massnahme ist aus theoretischer Sicht bezüglich der betrieblichen Vermeidungskosten effizient, weist aber bedeutende Steuervolumina auf. Sie ist, da es sich um non-point-source-pollution handelt, nicht umsetzbar. Die Massnahme mit der Anforderung einer **minimalen Anzahl Bodenschutzpunkte** im Rahmen der integrierten Produktion ist in bezug auf die Bekämpfung des Erosionsproblems ineffizient und ineffektiv. Effizient und effektiv aus betrieblicher Sicht sind **Erosionspunkte und Landnutzungssteuern**, die sich am Erosionsausmass, differenziert nach Kulturen und Bodenbearbeitungsverfahren, orientieren. Eine endgültige Bewertung der beiden Massnahmen ist aber erst nach einer räumlich differenzierten Analyse an unterschiedlichen Standorten möglich.

Der verwendete **Modellierungsansatz** erweist sich in der Anwendung und mit den möglichen Resultaten und Interpretationen für Fragen aus den Bereichen der Nachhaltigkeit, der intertemporalen Ressourcennutzung und der dynamischen Investitionsrechnung **bestens geeignet**. Der Ansatz ist der Linearen Programmierung deutlich überlegen, da die Veränderungen in dynamischen Fragestellungen durch die Möglichkeit der Verwendung nichtlinearer Funktionen realitätsnäher abgebildet werden können. Die Berücksichtigung intertemporaler Kosten gestattet die Bestimmung langfristiger Optima und eine intertemporal effiziente Ressourcennutzung im Gegensatz zur kurzfristigen Betrachtung mit einem statischen oder komparativ statischen Ansatz.

Summary

The aim of the study is to elaborate and present the theoretical and methodological foundations for modeling dynamic nonlinear problems. Necessary and applicative basics for the application of the fundamentals are presented and applied in a case study of soil erosion and particulate Phosphorus runoff caused by agricultural land use in the area of the Lake of Baldegg.

Models are instruments which support decision making and abstract from reality for their applicability. The process of mathematical modeling starts with the definition of the modeling goals and the corresponding system. Model quality is of high importance and composed of the two attributes model relevance and model validity. The relevance of a model is shown by the conformance of the model with the purpose of the analysis while validity can be proved numerically by sensitivity analysis, using the scenario technique or by the theoretical analysis of the model.

Optimization techniques are best suited for the analysis of economic problems concerning the allocation of scarce resources. The research topics of sustainability, resource economics and investment calculation usually demand a **dynamic approach**. The model variables describe the development paths of the system and of the decisions made by the individuals. Nonlinear interrelations between system elements often necessitate the implementation of nonlinear programming. This method requires the satisfaction of specific conditions for a **global solution to be the most probable**. Formally, the model must be convex. This means that, for the case of maximization, the objective function is at least pseudoconcave and the constraint functions are at least quasiconvex. The constraint qualification must be satisfied too. The summation of several functions is only possible if the minimal requirement of the functional properties are tightened to convexity/concavity. Analytical techniques to examine the convexity of a programming problem demand high efforts. The **convexity** of optimization problems can be tested numerically (e.g. using the software MPROBE).

Problems in the above mentioned areas require many times the transformation of nonlinear interrelations in reality into differential / difference equations. From a theoretical point of view the **theory of optimal control** provides the most appropriate approach. It constitutes the theoretical foundations for the analysis of the behaviour of individuals whose decision making is influenced by **intertemporal interdependences**. Integrating intertemporal interdependences in optimization guarantees long-run profit maximization and intertemporal efficiency in resource use. In the case of short-run optimization (static, comparative static), the outcome is neither long-run profit maximizing nor intertemporally efficient. With a concave profit function (decreasing marginal returns to scale) and a negative effect of the control variables onto the state variables, the optimal values of the control variables are smaller in the case of a long-run consideration compared to the case of a short-run consideration. As a consequence, the intensity of resource use is reduced in a dynamic analysis, because the dynamic costs of resource use, the intertemporal opportunity costs, are taken into consideration. By this means intertemporal efficiency is satisfied.

Problems of soil erosion and Phosphorus runoff are part of the economic fields of resource economics. At the firm level soil erosion, induced through agricultural land use, causes on-farm-costs. From a social perspective, off-farm-costs through sedimentation and the pollution of surface water must be addressed. Spatial programming models are the most appropriate for the analysis of such problems with on- and off-farm costs. Using this type of models aggregation problems need special consideration.

Cost-effective **measures** to reduce erosion in the area of the Lake of Baldegg are a preserving soil management and a less erosive crop rotation. The modeling approach must allow to represent these two measures and to analyze **policy instruments** such as taxes and standards. The available data base was not sufficient to directly estimate the functions representing the nonlinear biophysical relationships. Therefore a modeling approach is chosen, which **combines** a **biophysical simulation model** (EPIC) with an **economic optimization model**. The simulation model provides the biophysical data base. Integrating the results of the simulation model into the economic optimization model requires the intermediate step of **meta-modeling**. In this step the biophysical functions are estimated on the basis of the simulation results and then integrated into the economic model (\rightarrow **bio-economic model**). The use of an economic model of one single firm is due to the existing calibration of the simulation model. Because of the necessary continuous land allocation decisions in the bio-economic model the scaling of the functions in the meta-modeling step with a variable must preserve the convexity property. To this end, an **adjusted Cobb-Douglas production function** is proposed which complies with the criteria of convexity, feasibility to estimate, reference to reality and economic flexibility. It is used as a reference control for the applied quadratic functions, which violate convexity when scaled with a linear variable. Further research is requested to converse a non scaled variable to a variable scaled with a linear variable.

The **validation of the model** results from the qualitative analysis of the bio-economic optimization model. From a natural science and economic perspective, consistency is checked through the theoretical analysis of the implemented production - and erosion functions. The analysis of the first order conditions in accordance with the Lagrange approach of the allocation-/intensity model based on the theory of optimal control (optimization model) shows accurate optimality criteria. The possibilities of interpretation for the valuation items (costate variables) are as desired and reasonable. The qualitative analysis of the theoretical model is important for the interpretation of the empirical results obtained from a model run. The interpretation requires the underlying model to be theoretically correct.

The **modeling approach** enables to determine the developing paths of the **control variables** and of the **state variables**. The analysis is executed from a private and social perspective with both a long-run and short-run planning horizon. The state variables describe the state of the system in consideration. The control variables map the decisions taken by the farmer during time. The developing paths of the costate variables of the bio-economic model indicate at each point of time the **dynamic valuation** of the changes in the resource state. With this approach the **on farm costs** of erosion and the deviation between the private and social optimums can be quantified. The deviation corresponds to the need of action. Action is induced by instruments which influence measures taken by the individuals. Furthermore, **costs of avoiding** environmental damage are assessed for different instruments. Different measures and instruments can be compared with respect to their **efficiency and effectiveness**. Least-cost measures serve as a reference point. **Efficiency losses** of distinct measures are important for the economic valuation.

Big advantages accrue when using **algebraic modeling languages**, especially in combination with the method of nonlinear programming. The model and the data are strictly separate, and the parameters, the variables and the constraints are indexed. This allows a **precise algebraic representation**. Moreover a good overview is ensured and mathematical consistency enforced. Indexing is related to data base software packages and suggests to program an input generator using such a software package. An **input generator** programmed in MICROSOFT ACCESS is adjusted to the use with the algebraic language for mathematical modeling (AMPL). This tool helps to avoid redundancies, facilitates input while enforcing uniqueness where necessary. Items must be entered once and are afterwards available where needed. Relationality with referential integrity avoids data without any relation when deleting items and simplifies

the change of items through transmitting the changes to related items. In combination with MICROSOFT WORD and MICROSOFT EXCEL for processing model output, the use of the input generator and the algebraic modeling language is best adapted and efficient for modeling with the mentioned approach.

The **results** of the model runs based on activity analysis show **low on farm costs of erosion**. They do not cause changes in decision making on the firm level comparing long-run and short-run planning horizons. **Costs of avoiding** particulate Phosphorus losses higher than 0.3 kg per hectare (social goal) amount to at least 500 sFr. per hectare. They increase to about 1200 sFr. per hectare with a limit of 0.1 kg particulate Phosphorus loss per hectare. **Marginal avoiding costs** for 1 to 5 kg of particulate Phosphorus loss total to less than 300 sFr. per kg. They exceed 4500 sFr. for the 22nd kg of reduced Phosphorus loss on the analyzed farm with an area under cultivation of 20 hectares. **Taxing** Phosphorus losses is a least cost measure and efficient from a theoretical point of view. However the measure can not be implemented due to the non-point-source-pollution character of the problem. The measure, which requires a **minimum number of soil protection points** in the integrated production method in Swiss agriculture is neither efficient and nor effective to reduce the problem of soil erosion and Phosphorus runoff. Effective and efficient on a firm level perspective are both **erosion points** and **land use taxes** if they correspond with the amount of erosion and Phosphorus runoff. They must be differentiated with respect to the crop and the cultivation method. A final valuation is not possible unless the analysis is executed with spatial differentiation for distinct sites.

In general the proposed **modeling approach is the most suitable** for analyses in the fields of sustainability, resource economics and dynamic investment calculation. This refers to its application, the possibilities of interpretation and its advantages compared to linear programming models. The proposed approach provides a much more realistic representation of dynamic problems due to the facilities of representing non constant changes with nonlinear functions. The integration of intertemporal costs allows the assessment of long-run optima. In this case the intertemporal resource use is efficient in contrast to the results of a short-run analysis with a static or comparative static approach.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	XVII
Abbildungsverzeichnis.....	XIX
Abkürzungsverzeichnis.....	XXI
Literaturverzeichnis.....	261

1 Einleitung und Problemstellung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Struktur der Arbeit	2

TEIL 1: GRUNDLAGEN DER MODELLIERUNG

2 Grundlagen der Modellbildung und der Methodenwahl	7
2.1 Systembegriff	7
2.2 Modellbegriff	8
2.2.1 Differenzierung der Modelle aus ökonomischer Sicht	9
2.2.2 Differenzierung der Modelle aus zeitlicher Sicht	10
2.2.3 Zusammenspiel Modell - Realität	11
2.2.4 Modellzweck	12
2.2.5 Modellierungsprinzipien für mathematische Modelle allgemein	13
2.2.6 Modellierungsprinzipien im dynamischen Fall	13
2.2.7 Modellqualität	14
2.3 Methoden bei mathematischen Modellen	15
2.3.1 Mathematische Modelle im Operations Research	15
2.3.2 Simulation	16
2.3.2.1 Grundelemente der Simulation und Struktur	17
2.3.2.2 Einsatz der Simulationstechnik	18
2.3.2.3 Stärken und Schwächen der Simulation	18
2.3.2.4 Zusammenhänge zwischen Realität, Modell und Simulation	19
2.3.3 Gleichgewichtsanalyse und Optimierung	20
2.3.3.1 Statische oder Gleichgewichtsanalyse	20
2.3.3.2 Komparative Statik	21
2.3.3.3 Optimierung	21
2.3.4 Zusammenhang zwischen Simulation, Gleichgewichtsanalyse und Optimierung	22
2.3.5 Dynamik in der Ökonomie und Analysis	23
2.3.6 Mathematische Programmierung	24
2.4 Schlussfolgerungen für die Modellierung der Erosion	24

3	Modellierungsansätze im Bereich Ressourcenökonomie	27
3.1	Ressourcenökonomische Modellierungsansätze	27
3.2	Aggregierte Darstellung in einem Modell	29
3.2.1	Aggregierungsmöglichkeiten in einem bottom-up Modell	31
3.2.1.1	Optimierung von Einzelbetrieben und Hochrechnung	31
3.2.1.1.1	<i>Virtuelle Agrarregion durch Minimierung der Abweichungen von Regionsmerkmalen</i>	31
3.2.1.1.2	<i>Modelle auf der Basis von Betriebstypen</i>	32
3.2.1.2	Optimierung auf aggregierter Ebene	34
3.2.1.2.1	<i>Gleichzeitige Optimierung verschiedener Betriebstypen</i>	34
3.2.1.2.2	<i>Nicht homogene Betriebe und unvollständige Information über Betriebscharakteristika</i>	34
3.2.1.3	Vergleich getrennter und simultaner Optimierung	35
3.2.2	Aggregationsprobleme aus mikro- und makroökonomischer Sicht	36
3.2.2.1	Aggregationsfehler aus mikroökonomischer Sicht	36
3.2.2.2	Aggregationsfehler aus makroökonomischer Sicht	38
3.2.2.3	Entschärfung des Aggregationsproblems	39
3.3	Schlussfolgerungen für die Modellierung der Erosion	39
4	Mathematische Aspekte der Modellierung von Optimierungsproblemen	41
4.1	Konvexität	41
4.1.1	Konvexe Funktionen	42
4.1.2	Pseudokonvexe Funktionen	43
4.1.3	Quasikonvexität	44
4.1.3.1	Quasikonvexe Funktionen	44
4.1.3.2	Strikte Quasikonvexität (semistrikt quasikonvex, funktional konvex, explizit quasikonvex)	45
4.1.3.3	Strenge Quasikonvexität	46
4.1.3.4	Quasimonotone Funktionen	46
4.1.3.5	Summierung von Funktionen	46
4.1.3.6	Konvexe Mengen	47
4.1.4	Testverfahren zur Bestimmung der Konvexität	48
4.1.4.1	Analytische Bestimmung der Funktionsform	48
4.1.4.2	Numerisch: MPROBE – Tool für die Analyse der Konvexität von Funktionen und ganzen Modellen	48
4.1.5	Fazit für die Modellierung	49
4.2	Optimierung	49
4.2.1	Allgemeines Maximierungsproblem	49
4.2.2	Notwendige und hinreichende Bedingungen für Extrema: Begriffe	50
4.2.3	Bedeutung der Constraint Qualification (CQ)	51
4.2.3.1	Fazit bezüglich der Bedeutung der Constraint Qualification	52
4.2.4	Maximierung ohne Nebenbedingungen	53
4.2.5	Optimierungsprobleme mit Nebenbedingungen	54
4.2.5.1	Optimierung mit Gleichheitsrestriktionen	54
4.2.5.2	Optimierung mit Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen	55
4.2.6	Globale Optima in der Nichtlinearen Programmierung	57
4.2.6.1	Streng monotone Zielfunktion und quasikonvexe Ungleichheitsrestriktionen	57
4.2.6.2	Arrow-Enthoven sufficiency theorem: quasikonkave Programmierung	57
4.2.6.3	Pseudokonvexe Zielfunktion und quasikonvexe / quasikonkave Restriktionsfunktionen	58
4.2.6.4	Gleichheitsrestriktionen und Definitionsgleichungen	59
4.2.6.5	Globale Lösungen aus Sicht der Theorie und der Solver	60
4.2.7	Schlussfolgerungen für die Modellierung aus Sicht der Konvexität	61

5	Kontrolltheorie	63
5.1	Das Kontrollproblem	63
5.1.1	Analytische Darstellung des Kontrollproblems	64
5.1.2	Numerische Darstellung des Kontrollproblems	65
5.2	Behandlung zusätzlicher Restriktionen	67
5.3	Schlussfolgerungen für die Modellierung: Theoretische Abstützung	67
TEIL 2: DAS EROSIONS- / PHOSPHORPROBLEM UND SEINE MODELLIERUNG		
6	Beschreibung des Erosions- / Phosphorproblems	71
6.1	Problembeschreibung naturwissenschaftlich	71
6.1.1	Erosion	72
6.1.1.1	Bestimmung der Wirkungen der Erosion	73
6.1.1.2	Erosionssituation in der Schweiz	74
6.1.2	Phosphorverluste	74
6.1.2.1	Umweltauswirkungen des Phosphors	74
6.1.2.2	Phosphorsituation in der Schweiz	76
6.1.3	Standortbeschreibung	76
6.1.4	Zielgrößen	77
6.1.4.1	Zielgrößen für das Gebiet des Baldeggersees	77
6.2	Problembeschreibung ökonomisch	78
6.2.1	Eigenheiten der non-point-source-pollution	79
6.2.2	Externalitäten	79
6.2.3	Aspekte der Bewertung der Erosionswirkungen aus ökonomischer Sicht	80
6.2.3.1	Bewertungstechniken auf Mikrolevel	82
6.2.3.2	Monetäre Bewertung der Erosionsfolgen	82
6.3	Fazit für die Modellierung des Erosions- und Phosphorproblems	83
7	Methoden zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems und möglicher Massnahmen in der Literatur	85
7.1	Qualitative Analyse mit einem theoretischen Modell	85
7.2	Kosten-Nutzen-Analyse	85
7.3	Programmierung	86
7.3.1	Beispiele mit Linearer Programmierung	86
7.3.2	Beispiele mit Nichtlinearer Programmierung	86
7.3.3	Beispiele mit stochastischer dynamischer Programmierung	87
7.3.4	Gleichgewichtsanalyse	87
7.4	Simulation	88
7.5	Statistische Methoden	88
7.6	Fazit für die Modellierung der Erosion	89

8	Massnahmen zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems	91
8.1	Bewirtschaftungsmassnahmen im Bereich Phosphor und Erosion	91
8.2	Umweltpolitische Instrumente zur Beeinflussung der Bewirtschaftungsmassnahmen der einzelnen Akteure	92
8.2.1	Emissionssteuern	94
8.2.2	Inputsteuern	94
8.2.3	Standards	95
8.2.4	Handelbare Zertifikate	95
8.2.5	Fazit und Beurteilung von Massnahmen	95
9	Modellansatz: bioökonomische Modellierung	97
9.1	Biophysikalisches Simulationsmodell EPIC	98
9.2	Ökonomisches Optimierungsmodell	99
9.2.1	Wesentliche Aspekte der Wahl der Zielfunktion	99
9.2.1.1	Bestimmung des Entscheidungskriteriums	99
9.2.1.2	Wahl der Diskontrate	101
9.2.1.3	Wahl des Zeithorizonts	101
9.2.2	Formale Darstellung des ökonomischen Modellansatzes	101
9.2.3	Modellierung der Entwicklung des Baldeggensees	103
9.2.3.1	Modellierung der Phosphorentwicklung im Baldeggensee	104
9.2.3.2	Begründung für die Nichtberücksichtigung der Phosphorentwicklung im Baldeggensee in den Modellrechnungen	104
9.3	Integration des biophysikalischen Simulationsmodells EPIC in ein ökonomisches Modell zur Analyse von Politikmassnahmen im Falle der non-point-source-pollution	105
9.3.1	Metamodellierung	105
9.3.2	Fazit und Konsequenzen aus dem Modellansatz für die verwendeten Funktionen	106
10	Produktionsfunktionen für den Modellierungsansatz	109
10.1	Einleitung und Begründung	109
10.2	Trennung der Allokations- von der Intensitätsfrage in einem zweistufigen Optimierungsprozess.	109
10.2.1	Fazit für die Frage der zweistufigen Optimierung der Allokation und Intensität	113
10.3	Produktionsfunktionen allgemein	113
10.3.1	Produktionsfunktionen in der Geschichte der Ökonomie	114
10.3.2	Die Produktionsfunktion aus Sicht der Empirie, der Ökonomie, der Landwirtschaft und der Mathematik	114
10.4	Wichtige Eigenschaften von Produktionsfunktionen	115
10.4.1	Skalen- und Kostenelastizität sowie Homogenitätsgrad von Produktionsfunktionen	116
10.4.1.1	Spezielle Eigenschaften homogener Funktionen	117
10.4.2	Grenzrate der technischen Substitution und Substitutionselastizität	118
10.4.3	Grenz- und Durchschnittserträge von Produktionsfunktionen	120
10.4.4	Flexibilität von Funktionen in mehreren Variablen	120

10.4.5	Produktionsfunktionen in der angewandten Forschung	121
10.5	Beurteilungskriterien / Motivation	122
10.6	Produktionsfunktionen aus landwirtschaftlicher Sicht	123
10.6.1	Quadratische Funktion	123
10.6.2	Wurzelfunktion	123
10.6.3	Mitscherlich-Baule Funktion	124
10.6.4	Translog - Approximation	124
10.6.5	Linear-limitationale Funktion / Von Liebig Funktion	124
10.6.6	Konsequenzen aus der Analyse von im landwirtschaftlichen Bereich verwendeten Produktionsfunktionen	124
10.7	Produktionsfunktionen aus ökonomischer Sicht	125
10.7.1	Cobb-Douglas Funktion	125
10.7.1.1	Eigenschaften der Funktion allgemein	125
10.7.1.2	Schätzbarkeit der Funktion	125
10.7.1.3	Konvexitätseigenschaft und Beurteilung für NLP	126
10.7.1.4	Flexibilität der Cobb-Douglas Funktion aus ökonomischer Sicht	126
10.7.1.5	Realitätsbezug der Funktion	127
10.7.1.6	Vergleich der Steigungen der Cobb-Douglas - und der quadratischen Produktionsfunktion	129
10.7.1.7	Bewertung der Cobb-Douglas Produktionsfunktion	130
10.7.2	CES-Funktion	130
10.7.2.1	Eigenschaften der CES-Funktion	130
10.7.2.2	Konvexitätseigenschaft und Beurteilung für die Verwendung im Modellansatz	131
10.7.3	Verallgemeinerungen mit variabler Substitutionselastizität (VES)	131
10.7.3.1	Transzendente VES - Produktionsfunktion	131
10.7.3.2	Translog Funktion	131
10.7.3.2.1	<i>Eigenschaften der Funktion:</i>	<i>131</i>
10.7.3.2.2	<i>Konvexitätseigenschaft und Beurteilung für NLP</i>	<i>132</i>
10.7.3.3	Generalized Leontief Funktion	132
10.7.3.3.1	<i>Bewertung der Taylor-Series Funktionen</i>	<i>133</i>
10.7.3.4	Minflex-Laurent Funktion	133
10.7.3.5	Produktionsfunktion mit konstanten Veränderungsrate der Faktorproduktivität (constant marginal share CMS)	134
10.7.3.5.1	<i>Bewertung der erweiterten Cobb-Douglas Produktionsfunktion</i>	<i>135</i>
10.7.3.6	Additive nichthomogene Produktionsfunktion	136
10.7.3.7	Multiplikativ nichthomogene Produktionsfunktion	136
10.7.4	Weitere Produktionsfunktionen	136
10.7.4.1	Verallgemeinerte Cobb-Douglas Funktion	136
10.8	Cobb-Douglas Funktion - Erweiterungen	137
10.8.1	Verallgemeinerung der linear homogenen Cobb-Douglas Funktion	137
10.8.2	Linear homogene CMS - Funktion	137
10.8.2.1	Bewertung der linear homogenen CMS Produktionsfunktion	140
10.8.3	Korrektur mittels einer allgemeinen konvexen Funktion	141
10.8.3.1	Schätzbarkeit	142
10.8.3.2	Flexibilität der mit einer konvexen Funktion modifizierten Cobb-Douglas Funktion	142
10.8.3.3	Realitätsbezug	144
10.8.3.4	Zusammenfassende Darstellung der modifizierten Cobb-Douglas Funktion	146
10.8.4	Erweiterung und Verallgemeinerung	147
10.8.4.1	Flexibilität der verallgemeinerten modifizierten Cobb-Douglas Funktion	147
10.8.4.2	Diskussion der einzelnen Summanden der Funktion	150
10.8.4.3	Diskussion des Verlaufs der Isoquanten	151
10.8.5	Bewertung der Verwendbarkeit der allgemeinen Form der modifizierten Cobb-Douglas Produktionsfunktion	151
10.9	Fazit aus der Analyse ökonomischer Produktionsfunktionen	153

11	Qualitative Analyse des Erosionsmodells	155
11.1	Das ökonomische Modell: verwendete Funktionen	155
11.2	Intensitätswahl und die Allokation von Land im Falle von Bodenerosion	157
11.2.1	Interpretation der Schattenpreise von Restriktionen und Differenzgleichungen im dynamischen Modell	162
11.3	Fazit aus der qualitativen Analyse	162
TEIL 3: DATENGRUNDLAGEN, EDV-KONZEPT UND MODELLECHNUNGEN		
12	Grundlagen der Modellrechnungen	165
12.1	Konzept für die quantitative Analyse	165
12.1.1	Ziele der quantitativen Analyse	165
12.1.2	Forschungsfragen für die quantitative Analyse	165
12.1.3	Vorgehen bei der quantitativen Analyse	166
12.1.4	Übersicht über das Konzept der quantitativen Analyse	168
12.2	Datengrundlagen	169
12.2.1	Abkürzungen bei Kulturen	169
12.2.2	Metamodellierung: Schätzung der Produktions- und Erosionsfunktionen	170
12.2.2.1	Datengrundlage für die Schätzung	170
12.2.2.2	Methodische Aspekte der Schätzung	170
12.2.2.2.1	<i>Regressionsanalyse allgemein</i>	171
12.2.2.2.2	<i>Schätzprinzipien</i>	172
12.2.2.2.3	<i>Bemerkung zur knappen Datengrundlage aus EPIC</i>	173
12.2.2.3	Durchführung der Schätzung	173
12.2.3	Ertrag und Erosion bei einzelnen Kulturen	177
12.2.4	Festlegung der Ertrags- und Kostenniveaus	178
12.2.4.1	Bewertung der Arbeitsstunden in der Kostenrechnung	179
12.2.4.2	Aufteilung der Kosten zwecks Berücksichtigung der Intensität und von Ertragsveränderungen	179
12.2.5	Trennung von Haupt- und Zwischenkulturen	179
12.3	Prinzip der Darstellung der Resultate	179
12.4	Berechnung und Interpretation wichtiger Schattenpreise	181
12.5	Fazit und Ausblick	182
13	EDV-Konzept für die quantitative Analyse mit Resultataufbereitung	183
13.1	AMPL	185
13.2	Inputgenerator in Access	186
13.2.1	Grundlagen für die Entwicklung eines Datenverwaltungssystems auf Datenbankbasis	186
13.2.2	Entwurfsprozess einer logischen Datenstruktur	187

13.2.2.1	Der Normalisierungsprozess	187
13.2.2.2	Das klassische Relationenmodell nach Codd	188
13.2.3	Inputgenerator für AMPL in Access	192
13.2.3.1	Funktionalität des Inputgenerators	193
13.3	Bewertung des EDV Konzeptes	194
14	Resultate	195
14.1	Vergleich des privaten Optimums mit dem sozialen Optimum	195
14.1.1	Einleitung	195
14.1.2	Erosionsentwicklung im Zeitablauf aus privater Sicht	195
14.1.3	Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangsbodenmächtigkeiten	198
14.1.4	Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten	199
14.1.5	Auswirkungen von Düngungsverfahren und Bodenbearbeitung	200
14.1.6	Bewertung der Erosion	200
14.1.7	Erosionsentwicklung im Zeitablauf aus sozialer Sicht	201
14.1.8	Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangsbodenmächtigkeiten	205
14.1.9	Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten	207
14.1.10	Fazit	207
14.2	Vergleich der privaten mit der sozialen Optimierung	207
14.2.1	Vermeidungskosten in Abhängigkeit des Diskontfaktors und der Bodenmächtigkeit	208
14.2.1.1	Vermeidungskosten in laufenden Werten bei Variation des Diskontfaktors und der Bodenmächtigkeit	208
14.2.2	Fazit	212
14.3	Least-cost Massnahmen	212
14.3.1	Grundlagen der Massnahmenbeurteilung	212
14.3.2	Vermeidungskosten bei unterschiedlichen Niveaus der Limitierung des P-Abtrags (P-Standards)	212
14.3.2.1	Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags	219
14.3.2.2	Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten	221
14.3.2.3	Auswirkungen unterschiedlicher Bodenmächtigkeiten	221
14.3.2.4	Auswirkungen unterschiedlicher Längen des Planungshorizontes	222
14.3.2.5	Fazit	222
14.3.3	Least cost Solution durch P-Abtragssteuer	222
14.3.3.1	Optimale Steuersätze zur Erreichung des sozialen Optimums	224
14.3.3.2	Zielfunktionsdifferenz bei privater Optimierung mit und ohne Steuern	225
14.3.3.3	Steuerbetrag des untersuchten Ackerbaubetriebes	227
14.3.3.4	Einkommenseinbusse infolge Betriebsstrukturveränderung bei Besteuerung	228
14.3.3.4.1	<i>Relatives Verhältnis von Steuern und strukturbedingten Einbussen zum Total der Einkommenseinbusse</i>	229
14.3.3.4.2	<i>Vergleich der Anpassungskosten der P-Steuer mit denjenigen der P-Abtragslimite</i>	229
14.3.3.5	Marginale Vermeidungskosten der Massnahme P-Abtragssteuer	230
14.3.3.6	Fazit	231
14.4	Indirekte Massnahmen	232
14.4.1	Entwicklung der Erosion bei minimaler Vorschrift über Bodenschutzpunkte	232
14.4.1.1	Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“	237
14.4.1.2	Marginale Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“	237
14.4.1.3	Effizienz der Massnahme Bodenschutzpunkte	240
14.4.2	Fazit	241
14.5	Weitere Massnahmen	241
14.5.1	Landnutzungssteuern zur Eindämmung des Erosionsproblems / P-Abtrags	241

14.5.1.1	Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer	243
14.5.1.2	Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer	244
14.5.1.3	Fazit	245
14.5.2	Erosionspunkte	246
14.5.2.1	Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Erosionspunkte	247
14.5.3	Fazit	249
14.6	Fazit aus den Resultaten der quantitativen Analyse	249
15	Schlussfolgerungen	251
15.1	Teil 1: „Grundlagen der Modellierung“	251
15.2	Teil 2: „Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung“	253
15.3	Teil 3: „Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen“	256
15.4	Künftige Herausforderungen der bioökonomischen Analyse	258
15.5	Synthese	259
	Literaturverzeichnis	261

Anhang

Der Anhang ist unter der Internetadresse <http://www.iaw.agrl.ethz.ch/~keusch/Diss-ETH-13871-Anhang.pdf> abrufbar. Das Inhaltsverzeichnis und die weiteren Verzeichnisse für den Anhang sind zu Beginn des Anhangs aufgeführt.

Tabellenverzeichnis

Teil 2: Das Erosionsproblem und seine Modellierung

Tabelle 1:	Zielgrößen für den P-Eintrag in den Baldeggersee und für Flächenabträge	77
Tabelle 2:	Typologische Übersicht über Umweltschutzinstrumente nach Mauch et al.	93
Tabelle 3:	Datengrundlage und geschätzte Funktionswerte.....	128
Tabelle 4:	Schätzergebnisse aus EVIEWS für die quadratische und die Cobb-Douglas Funktion	128
Tabelle 5:	Regressionsresultate CMS Funktion	138
Tabelle 6:	Regressionsresultate der modifizierten Cobb-Douglas Funktion.....	145

Teil 3: Datengrundlagen und Modellrechnungen

Tabelle 7:	Konzept der quantitativen Analyse	169
Tabelle 8:	Liste der Abkürzungen bei Kulturen.....	169
Tabelle 9:	Koeffizienten der verschiedenen Schätzfunktionen.....	176
Tabelle 10:	Erträge und Erosion der einzelnen Kulturen pro Jahr bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit gemäss EPIC-Simulationen.....	178
Tabelle 11:	In Tabellen dargestellte Resultatgrößen und Erläuterungen	180
Tabelle 12:	Struktur der AMPL Inputfiles	186
Tabelle 13:	Begriffe im Zusammenhang mit dem klassischen Relationenmodell.....	188
Tabelle 14:	Entitätsmengen des Erosions- und Phosphormodells.....	189
Tabelle 15:	Assoziationstypen.....	190
Tabelle 16:	Einbezug von Identifikationsschlüsseln und Lokalattributen	191
Tabelle 17:	Resultate aus privater Sicht bei Diskontfaktor 1.06 und Bodenmächtigkeit 1.05 m	196
Tabelle 18:	Entwicklung der on-farm-costs der Erosion bei abnehmender Bodenmächtigkeit in Fr. pro mm je ha LN in laufenden Werten.....	198
Tabelle 19:	Vergleich der statischen und dynamisch bewerteten Kosten der Erosion in laufenden Werten.....	200
Tabelle 20:	Resultate aus sozialer Sicht bei Diskontfaktor 1.06, Bodenmächtigkeit 1.05, P-Abtragslimite 0.3	202
Tabelle 21:	On-farm-costs der Erosion bei kurz- und langfristiger, sozialer und privater Betrachtung in Fr. / ha im Jahr 1	204

Tabelle 22:	Vermeidung von Erosion und P-Abtrag bei Erfüllung des sozialen Standards und Vermeidungskosten in laufenden Werten	209
Tabelle 23:	Minima und Maxima der Vermeidungskosten bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit und unterschiedlicher Diskontrate in laufenden Werten in Fr. / ha	211
Tabelle 24:	Limitierung des Phosphorabtrages bei einer Diskontrate von 6% und einer Ausgangsbodenmächtigkeit von 1.05 m - kurzfristig.....	216
Tabelle 25:	Vermeidungskosten des Landwirts im ersten Jahr bei kurzfristigem Planungshorizont bei Einführung verschiedener spezifischer P-Abtragslimiten in laufenden Werten.....	218
Tabelle 26:	Datengrundlage zur Schätzung der Funktion der marginalen Vermeidungskosten und marginale Vermeidungskosten	220
Tabelle 27:	Optimale Steuerbeträge pro kg P-Abtrag bei kurz- und langfristigem Planungshorizont	224
Tabelle 28:	Gewinndifferenzen durch die Besteuerung des P-Abtrags in laufenden Werten.....	226
Tabelle 29:	Steuervolumen des Ackerbaubetriebes bei Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg P-Verlust pro ha in laufenden Werten	227
Tabelle 30:	Einkommenseinbussen des Ackerbaubetriebes durch Strukturveränderungen infolge Besteuerung in Fr. pro Betrieb	228
Tabelle 31:	Prozentualer Anteil der strukturänderungsbedingten Einbusse an der gesamten Einbusse bei Besteuerung.....	229
Tabelle 32:	Unterschiede in den Vermeidungskosten bei Besteuerung und bei Vorgabe eines sozial bedingten Standards in Fr. total in laufenden Werten -> Effizienzverlust	229
Tabelle 33:	Auswirkungen einer Erhöhung der geforderten Anzahl Bodenschutzpunkte.....	235
Tabelle 34:	Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ bei kurzfristiger Betrachtung in laufenden Werten für das erste Jahr im Betrachtungszeitraum	237
Tabelle 35:	Datengrundlage zur Schätzung der Funktion der Vermeidungskosten für die Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“	238
Tabelle 36:	Beurteilungsgrössen und Effizienzverlust der Massnahme Bodenschutzpunkte bei Erreichung eines Standards von 0.75 kg P-Abtrag pro ha	240
Tabelle 37:	Landnutzungssteuern zur Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg P-Abtrag / ha in Fr. / ha	242
Tabelle 38:	Auswirkungen unterschiedlicher Niveaus der Landnutzungssteuer auf Erosion und P-Abträge bei kurzfristiger Betrachtung im Jahr 1 bei einer Diskontrate von 6% und einer Bodenmächtigkeit von 1.05 m	243
Tabelle 39:	Mögliches Schema für Erosionspunkte für einzelne Kulturen	246

Abbildungsverzeichnis

Teil 1: Grundlagen der Modellierung

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	3
Abbildung 2: Systemdarstellung allgemein.....	8
Abbildung 3: Kategorisierung von Modellen.....	9
Abbildung 4: Bezug Realität-Modell: konzeptionell	11
Abbildung 5: Bezug Realität-Modell: mathematische Programmierung	11
Abbildung 6: Bezug Modell – Entscheidungsprozess.....	15
Abbildung 7: Struktur des Ermittlungsmodells und des Optimierungsmodells.....	16
Abbildung 8: Simulationsmodell.....	19
Abbildung 9: Aggregationsfehler	37
Abbildung 10: Beziehungen zwischen verschiedenen Arten von Konvexität	42
Abbildung 11: Konvexe Funktion	43
Abbildung 12: Pseudokonvexe Funktion	44
Abbildung 13: Quasikonvexität.....	45
Abbildung 14: Karush-Kuhn-Tucker Ansatz	56

Teil 2: Das Erosionsproblem und seine Modellierung

Abbildung 15: Einflussfaktoren auf die P-Verfügbarkeit in Boden und Wasser	75
Abbildung 16: Aufteilung der Phosphorverluste in der Schweiz auf verschiedene Ursachen.....	75
Abbildung 17: Struktur des Vorgehens für die Berechnungen	106
Abbildung 18: Durchschnittskostenkurven homogener und nichthomogener Produktionsfunktionen	118
Abbildung 19: Vergleich geschätzter Funktionen mit der Datengrundlage.....	129
Abbildung 20: Verlauf der linear homogenen CMS Produktionsfunktion	139
Abbildung 21: Vergleich Datengrundlage mit konvex modifizierter Cobb-Douglas Funktion	146
Abbildung 22: Beispiel eines Funktionsverlaufs der modifizierten Cobb-Douglas Funktion	151
Abbildung 23: Transformation der modifizierten Cobb-Douglas Funktion in eine konvexe Funktion.....	152

Teil 3. Datengrundlagen und Modellrechnungen

Abbildung 24: Wahl des Schätzvorgangs	173
Abbildung 25: Umsetzung des Konzeptes der quantitativen Analyse auf EDV Basis	183
Abbildung 26: Begriffe im Zusammenhang des Datenmodells	187
Abbildung 27: Logischer Entwurfsprozess	189
Abbildung 28: Entitätenblockdiagramm	190
Abbildung 29: Startbildschirm des Inputgenerators	192
Abbildung 30: Vermeidungskosten bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit und bei einer Diskontrate von 6 % in laufenden Werten pro Jahr	210
Abbildung 31: Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags für die Massnahme P-Standard	220
Abbildung 32: Vermeidungskosten unterschiedlicher P-Abtragslimiten in Abhängigkeit von der Bodenmächtigkeit im Jahr 1 der Betrachtung	221
Abbildung 33: Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags bei einer P-Abtragssteuer	231
Abbildung 34: Marginale Vermeidungskosten pro Bodenschutzpunkt bei der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“	239
Abbildung 35: Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags bei der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ pro kg vermiedenem P-Abtrag	239
Abbildung 36: Vermeidungskosten von Landnutzungsteuern und P-Abtragssteuern im Vergleich	244
Abbildung 37: Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer in Fr. pro kg vermiedenem P-Abtrag	245
Abbildung 38: Marginale Vermeidungskosten je vermiedenem Erosionspunkt	248

Akürzungsverzeichnis

AMPL

A Modeling Language for Mathematical Programming: eine algebraische Modellierungssprache für Optimierungsprobleme, vgl. <http://www.ampl.com/cm/cs/what/-ampl/-index.html>.

Anpassungskosten

siehe Vermeidungskosten.

BLW

Bundesamt für Landwirtschaft.

CD

Cobb Douglas Funktion: typische Produktionsfunktion in der Ökonomie mit einer Skalen- und Substitutionselastizität von 1.

CD MOD

Modifizierte Cobb-Douglas Produktionsfunktion mit besseren ökonomischen Eigenschaften (Flexibilität, Realitätsbezug, Skalierbarkeit).

CES

Funktion mit konstanter Substitutionselastizität ungleich 1.

CGE

Computable General Equilibrium Models: allgemeine Gleichgewichtsmodelle.

CMS

Constant Marginal Share Funktion: Funktion mit konstanten Veränderungsraten der Faktorproduktivität.

CQ

Die Constraint Qualification stellt Anforderungen an die Restriktionsfunktionen eines nichtlinearen Problems, damit Unregelmässigkeiten am Rand des zulässigen Bereiches ausgeschaltet werden, die zur Folge hätten, dass die KKT Bedingungen ungültig wären, würde das Optimum dort erscheinen.

DGVE

Dünger-Grossvieheinheit.

EDV

Elektronische Datenverarbeitung.

Effizienzverlust

Bei der Massnahmenbeurteilung bezeichnet der Effizienzverlust die Abweichung der Vermeidungskosten einer bestimmten Massnahme von den minimalen Vermeidungskosten zur Erreichung eines Umweltziels.

EPIC

Erosion Productivity Impact Calculator: biophysikalisches Simulationsmodell für den Boden.

F.O.C.

first order conditions: Bedingungen erster Ordnung für die Optimalität.

FAT

Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon.

First best Massnahmen

Massnahmen, bei denen die marginalen Vermeidungskosten den marginalen Schadenskosten entsprechen, wobei die marginalen Vermeidungskosten bei allen betroffenen Verschmutzern gleich gross sind.

GAMS

General Algebraic Modeling System: algebraische Modellierungssprache für die Optimierung.

GRTS

Grenzrate der technischen Substitution.

HP

Hewlett Packard.

IAW

Institut für Agrarwirtschaft der ETH Zürich.

IFOR

Institute für Operations Research der ETH Zürich.

IP

Produktionsverfahren in der Schweizer Landwirtschaft: Integrierte Produktion.

IRR

Internal Rate of Return: interne Verzinsung des eingesetzten Kapitals.

KKT

Karush-Kuhn-Tucker: Optimalitätsbedingungen für nichtlineare Programmierungsprobleme mit Ungleichheitsrestriktionen.

KNA

Kosten-Nutzen-Analyse.

LBL

Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau .

Least cost Massnahmen

Massnahmen mit minimalen marginalen Vermeidungskosten / Anpassungskosten.

LN

Landwirtschaftliche Nutzfläche.

LP

Lineare Programmierung: mathematisches Verfahren zur Optimierung einer linearen Zielfunktion unter linearen Restriktionen.

MINOS

Mathematischer Solver für nichtlineare Programmierungsprobleme.

MPROBE

Software zur Analyse mathematischer Programmierungsprobleme auf Konvexitätseigenschaften, vgl. <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/mprobe.html>.

NLP

Nichtlineare Programmierung: mathematisches Verfahren zur Optimierung einer nichtlinearen Zielfunktion unter nichtlinearen Restriktionen.

NLSQ

Nonlinear Least Square: Schätzverfahren für statistische Analysen für die nichtlineare Regression.

O.F.C.

on-farm-costs: Kosten, die auf Stufe Betrieb entstehen, beispielsweise durch die Erosion.

OLS

Ordinary Least Square: Schätzverfahren für statistische Analysen mit der Methode der Minimierung der Quadrate der Abweichungen im Falle linearer Funktionen.

Opportunitätskosten

Entgangener Nutzen der nächstbesten nichtgewählten Alternative.

Second best Massnahmen

Massnahmen, deren marginale Vermeidungskosten nicht den marginalen Schadenskosten entsprechen. Zudem sind die marginalen Vermeidungskosten nicht bei allen von der Massnahme betroffenen Verschmutzern identisch.

SP

Schattenpreis in der Lösung von Optimierungsproblemen.

USLE

Universal Soil Loss Equation.

Vermeidungskosten

Betriebliche Kosten der Vermeidung von Umweltverschmutzung: Anpassungskosten.

VES Funktionen

Funktionen mit variabler Substitutionselastizität.

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Einleitung

Mathematische Modelle sind Instrumente zur Entscheidungsunterstützung und Analyse (Jakeman et al. 1993, S. 9). Dabei sollen einerseits die Auswirkungen verschiedener Entscheidungsalternativen unter verschiedenen möglichen Umweltentwicklungen in bezug auf ausgewählte Entscheidungskriterien untersucht werden. Andererseits ermöglichen Modelle das Verständnis der Komplexität realer Systeme und deren Analyse. Die Verwendung von Modellen fördert das Problemverständnis, da eine systematische Denkarbeit beim Modellbau und bei der Interpretation der Modellergebnisse notwendig ist. Modelle beruhen auf der rationalen Erfassbarkeit der Realität (eines realen Prozesses) und vereinfachen den Umgang mit der Komplexität der Realität (des realen Prozesses). Sie abstrahieren von der Realität durch Vereinfachung. Insbesondere reduzieren quantitative Modelle die komplexe Realität auf die quantitative Ebene. Diesen Tatsachen ist im Modellierungsprozess Rechnung zu tragen, indem dieser Prozess bewusst durchlaufen wird. Es muss eine Reduktion auf das Wesentliche bei Gewährleistung der „Vollständigkeit“ erfolgen.

In der Arbeit soll ein Modellkonzept entwickelt und exemplarisch angewendet werden, das sich für die Analyse von Fragestellungen der intertemporalen Ressourcennutzung eignet und zur Entscheidungsunterstützung für Massnahmen in diesem Bereich dienen kann. Am Beispiel der Erosion im Gebiet des Baldeggersees wird ein biophysikalisches Modell im Verbund mit einem ökonomischen Modell, das die agronomischen Praktiken abbildet, verwendet. Der Aspekt der intertemporalen Ressourcennutzung ist zentral für die Nachhaltigkeitsthematik (vgl. Hediger 1999, Goetz und Keusch 1999, Hediger 1998, World Commission on Environment and Development 1987¹, etc.).

Die Verwendung mathematischer Modelle, meist hochdetailliert, zur Politikanalyse und Unternehmensplanung besitzt am IAW eine lange Tradition. Dabei stehen lineare Programmierungsmodelle eindeutig im Zentrum, die statisch oder komparativ statisch eingesetzt werden. Lineare Programmierungsmodelle dieser Art eignen sich zur Unterstützung der kurzfristigen Unternehmensplanung und zur Analyse der kurzfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Politikmassnahmen sehr gut, wenn lineare Darstellungen die realen Zusammenhänge ausreichend genau abbilden lassen. Für Analysen mit langfristigem Betrachtungshorizont ist die Methode in der statischen oder komparativ statischen Verwendung dagegen nur bedingt geeignet, insbesondere, wenn Fragen der Entwicklung von Ressourcen oder langfristige Investitionsfragen von Bedeutung sind. Neben den Vorteilen der gegebenen globalen Lösung eines linearen Programmierungsproblems, der einfachen Verwendung, sehr effizienter Solver und der Möglichkeit der Formulierung von gemischt-ganzzahligen Problemen besitzt die Lineare Programmierung auch Nachteile wie die Tendenz zu Extrem Lösungen (gegeben durch die Linearität: Produktionsfunktionen im Modell sind typischerweise vom Typ Leontief) und evtl. zu starker Vereinfachung nichtlinearer Zusammenhänge in der Realität. Neue Fragestellungen im Bereich der Nachhaltigkeit und der Umweltprobleme rufen nach einer kritischen Überprüfung der verwendeten Methode.

Die vorliegende Arbeit soll keine Abwertung der Methode der Linearen Programmierung darstellen, da jedes nichtlineare Problem durch die Lineare Programmierung approximiert werden kann. Sie besitzt ihre Vorteile und Eignungen. Richtig eingesetzt im genauen Wissen, was die Methode kann und wo ihre Grenzen liegen, behält die Methode der Linearen Programmie-

¹ Vgl. auch Fussnote 2.

rung ihre Bedeutung. Die Arbeit soll vielmehr ein Hinweis sein, dass alternative methodische Ansätze bei gewissen Fragestellungen Vorteile gegenüber der Linearen Programmierung besitzen können. Ganz allgemein ist für die Untersuchung einer Fragestellung die zu verwendende Methode einer kritischen Eignungsprüfung zu unterziehen. Dies bedeutet aber, dass eine möglichst breite Auswahl in die Evaluation miteinbezogen oder die Bewertung der Methode auf der Basis der internationalen Forschungsliteratur vollzogen wird.

1.2 Problemstellung

Neuere Fragestellungen aus dem Umweltbereich und im Gebiet der Nachhaltigkeit stellen neue Herausforderungen an die mathematische Modellierung und an die verwendete Methode. Nachhaltigkeit ist gemäss dem Bericht der Brundtland Kommission beispielsweise ein Entwicklungskonzept². Diese Tatsache und auch die Notwendigkeit der Modellierung von Prozessen mit Bestandesgrössen erfordern eine dynamische Analyse und die Verwendung entsprechender Methoden und Theorien. Fragen im Umweltbereich beziehen sich auf das reale biophysikalische System. Interdependenzen in diesem komplexen realen System sind mit linearen Funktionen schwierig darzustellen. Systeme werden geeigneterweise mit Variablen, die den Systemzustand beschreiben, abgebildet. Folglich steht die Entwicklung dieser Systemzustandsvariablen, d.h. deren Veränderung im Zeitablauf, im Zentrum des Interesses.

Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, die Grundlagen einer möglichen Alternative zur Linearen Programmierung, die Methode der Nichtlinearen Programmierung in Verbindung mit der Kontrolltheorie aufzuarbeiten. Diese alternative Methodik soll an einem Problem aus dem Gebiet der Umwelt- und Ressourcenökonomie beispielhaft angewendet werden und zeigen, dass die Methode in Verbindung mit der Theorie für dynamische Fragestellungen und speziell für solche aus dem Bereich der Nachhaltigkeit bestens geeignet ist. Die Bewertungen eines solchen Modellansatzes werden der Realität aus normativer Sicht gerechter als bei einem statischen oder komparativ statischen Ansatz, da sie dynamisch erfolgen. Spezielle Beachtung erhält der Modellierungsprozess. Wichtige Aspekte dieses Prozesses werden am Anwendungsbeispiel der Erosions- und Phosphorproblematik ausführlich dargestellt. Die Erosion ist ein Problem, das eine dynamische Analyse erfordert. Sie eignet sich daher gut für die Illustration der Anwendungsmöglichkeiten der gewählten Methodik im Bereich der Nachhaltigkeit und anderer dynamischer Fragestellungen.

Der Hauptfokus der Arbeit liegt bei der Wahl eines geeigneten Instrumentariums für die Modellierung von Fragestellungen im Bereich der dynamischen Ressourcennutzung am Beispiel der Erosion im Gebiet des Baldeggersees.

1.3 Struktur der Arbeit

Die Abbildung 1 liefert eine Übersicht über die Struktur der Arbeit. Die Arbeit gliedert sich in drei Teile:

1. Grundlagen der Modellierung
2. Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung
3. Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen

² „In essence, sustainable development is a process of change in which the exploitation of resources, the direction of investments, the orientation of technological development, and institutional change are all in harmony and enhance both current and future potential to meet human needs and aspirations.“ (World Commission on Environment and Development 1987, S. 46). „Sustainable development is not a fixed state of harmony“ (World Commission on Environment and Development 1987).

Teil 1: Grundlagen der Modellierung

- Grundlagen der Modellbildung und Methodenwahl
- Modellierungsansätze im Bereich Ressourcenökonomie
- Mathematische Aspekte der Modellierung von Optimierungsproblemen
- Kontrolltheorie

Teil 2: Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung

- Beschreibung des Erosions-/Phosphorproblems
- Methoden zur Analyse des Erosionsproblems und möglicher Massnahmen in der Literatur
- Massnahmen zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems
- Modellansatz: bioökonomische Modellierung
- Produktionsfunktionen für den Modellierungsansatz
- Qualitative Analyse des Erosionsmodells

Teil 3: Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen

- Grundlagen der Modellrechnungen
- EDV-Konzept für die Berechnungen
- Resultate

Anhang (<http://www.iaw.agrl.ethz.ch/~keusch/Diss-ETH-13871-Anhang.pdf>)

- Simulation: Grundelemente für die Implementierung auf dem Computer
- Mathematische Testverfahren zur Bestimmung der Konvexitätsart einer Funktion
- Schätzung der Funktionen
- Ertragskorrekturen und Kostenpositionen
- Ergebnisse aus privater und sozialer Sicht
- Least cost solution mit P-Steuer
- P-Standard
- Bodenschutzlimite

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Teil 1 behandelt im Kapitel über die Grundlagen der Modellbildung und Methodenwahl nach der Diskussion des Systems- und Modellbegriffs drei Methoden bei mathematischen Modellen: Simulation, Gleichgewichtsanalyse und Optimierung. Das Kapitel 3 präsentiert ressourcenökonomische Modellierungsansätze und in diesem Zusammenhang die wichtige Frage der aggregierten Darstellung in einem Modell. Die Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen stellt bei der Verwendung der Methode der Nichtlinearen Programmierung spezielle Anforderungen aus mathematischer Sicht (Kapitel 4). Die Darstellung einer möglichen theoretischen Abstützung der Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen erfolgt in Kapitel 5.

Teil 2 vertieft das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung. Kapitel 6 beschreibt das Erosions- und Phosphorproblem aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht, wie

auch den Untersuchungsstandort. Damit ist der Systemrahmen für die Modellierung gegeben. Die Beschreibung verschiedener Methoden zur Analyse des Erosionsproblems sowie von Massnahmen und Instrumenten zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems aus Sicht der Literatur erfolgt in den Kapiteln 7 und 8. Als Modellansatz zur Analyse des Erosionsproblems wird die bioökonomische Modellierung verwendet. Der Modellansatz besteht in der Integration eines biophysikalischen Simulationsmodells in ein ökonomisches Modell (Kapitel 9). Aus dieser Integration ergeben sich Schwierigkeiten für die Modellierung aus mathematischer Sicht. Diese werden im Kapitel 10 über Produktionsfunktionen im Modellierungsansatz zu beheben versucht. Es werden verschiedene ökonomische Produktionsfunktionen bezüglich ihrer Verwendbarkeit im bioökonomischen Modellierungsansatz diskutiert. Die Cobb-Douglas Produktionsfunktion wird modifiziert und ermöglicht für gewisse Arten ressourcenökonomischer Fragestellungen eine Behebung des Konvexitätsproblems aus mathematischer Sicht, für andere dagegen nicht. Teil 2 schliesst im Kapitel 11 mit der qualitativen Analyse des Erosionsmodells aus dem bioökonomischen Modellansatz. Diese ermöglicht die theoretische Validierung des bioökonomischen Modells.

Im Teil 3 „Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen“ werden nach dem Berechnungskonzept die Datengrundlagen und die Prinzipien der Resultatdarstellung vorgestellt. Mit dem EDV-Konzept für die Berechnungen befasst sich Kapitel 13, in welchem die verwendete algebraische Modellierungssprache und ein speziell dafür programmierter Inputgenerator auf Datenbankbasis beschrieben werden. Das Kapitel 14 liefert eine Interpretation der Resultate der quantitativen Analyse des Erosions- / Phosphorproblems mit dem bioökonomischen Modellansatz. Neben Optimierungen aus sozialer und privater Perspektive werden die Vermeidungskosten der Erosion an einem Standort im Gebiet des Baldeggersees untersucht sowie least cost und weitere second best Massnahmen zur Bekämpfung der Erosion und des P-Abtrags analysiert. Das letzte Kapitel präsentiert detailliert die Schlussfolgerungen aus der ganzen Arbeit mit Blick auf die eingesetzte Methodik, das verwendete Modellkonzept, die quantitativen Resultate und die Perspektiven der dynamischen nichtlinearen Optimierung.

Anhang:

Der Anhang der Arbeit ist unter der Internetadresse <http://www.iaw.agrl.ethz.ch/~keusch/Diss-ETH-13871-Anhang.pdf> abrufbar. Er umfasst im Kapitel A1 ein Grundkonzept der Implementation eines Simulationsmodells auf dem PC. Anhang A2 erläutert mathematische Testverfahren zur Bestimmung der Konvexitätsart einer Funktion. Die Resultate der Schätzungen der Produktions- und Erosionsfunktionen für die Verwendung im bioökonomischen Modell, welche auf der Datenbasis der Simulationen mit dem biophysikalischen Simulationsmodell erfolgen, sind im Anhang A3 aufgeführt. Im Anhang A4 sind die Datengrundlagen zu den Ertragskorrekturen und den Kostengrössen aufgeführt. Die Anhänge A5 bis A8 umfassen alle Resultate der Berechnungen mit dem bioökonomischen Modell in tabellarischer Form.

TEIL 1: GRUNDLAGEN DER MODELLIERUNG

Übersicht zu den Grundlagen der Modellierung

Die Analyse des Erosionsproblems stellt spezielle Anforderungen an die Modellierung infolge der Nichtlinearität in den Systemzusammenhängen und der für ressourcenökonomische Analysen typischen Dynamik bei Fragen der intertemporalen Ressourcennutzung. Daher werden in diesem Teil der Arbeit wichtige Aspekte der Modellierung mit Blick auf die Fragestellung im Bereich der Erosion und des Phosphorabtrags behandelt.

Kapitel 2 behandelt die Grundlagen der Modellbildung und die Methodenwahl. Die Modellbildung (Modellierung) ist dabei als Prozess zu betrachten, der möglichst strukturiert erfolgen soll. Bei der Modellbildung wird vor dem Modellbegriff zuerst der Systembegriff erörtert. Danach folgt eine Diskussion von 3 Methoden bei mathematischen Programmierungsmodellen: Simulation, Gleichgewichtsanalyse und Optimierung.

Kapitel 3 beschreibt für ressourcenökonomische Fragestellungen geeignete Modellierungsansätze und geht vertieft auf die Aggregationsfrage ein, die für die Modellierung im Bereich Ressourcenökonomie wichtig ist, wenn auf einer höheren Ebene als der einzelbetrieblichen modelliert werden soll (sektoral, regional, gebietsbezogen, etc.).

Kapitel 4 befasst sich mit den Grundlagen der Modellierung aus mathematischer Sicht, indem die für globale Lösbarkeit zentrale Frage der Konvexität dargestellt wird. In diesem Kapitel werden auch die Grundlagen der nichtlinearen Optimierung und die Lösbarkeit bei nichtlinearen Optimierungsproblemen behandelt.

Im Kapitel 5 erfolgt die Darstellung der für dynamische und ressourcenökonomische Fragestellungen bestens geeigneten Kontrolltheorie. Diese bietet sich auch für Fragen im Investitionsbereich an. Generell ist sie zur Abbildung der Entwicklung von Bestandesgrößen bzw. Prozessen mit Gedächtnis wie für Flussgrößen geeignet.

2 Grundlagen der Modellbildung und der Methodenwahl

"Any model is a compromise between reality and manageability" (Intriligator 1970 in Brandes 1985, S. 74).

Modelle sind vereinfachte Darstellungen der Realität³, die durch Abstraktion von der Realität generiert werden. Dabei werden Modelle auf der Basis von Funktions-, Struktur- oder Verhaltensähnlichkeiten bzw. –analogien zu einem Original (Realität) zum Zwecke speziell solcher Problemlösungen benutzt, deren Durchführung am Original nicht möglich oder zu aufwendig wäre (Gabler 1993, S. 2296).

Modelle dienen der Unterstützung bei der Entscheidungsfindung und bei der Analyse eines komplexen realen Systems. Im Falle der Erosion sollen mit einem Modell die Auswirkungen des Erosionsproblems analysiert und Grundlagen für Entscheide über Massnahmen erarbeitet werden können.

Vor der Modellierung ist das zu betrachtende System durch Reduktion auf das für die Fragestellung Wesentliche bei grösstmöglicher „Vollständigkeit“ abzugrenzen. Bedeutsam ist der Entscheid über die Art des Modells. Optimierungsmodelle können als Spezialfälle von Simulations- und Gleichgewichtsmodellen betrachtet werden. Die genannten Modellarten werden nach der Diskussion des System- und Modellbegriffs vorgestellt.

Objekt der Optimierung, Simulation und Gleichgewichtsanalyse ist die Realität, zu deren Analyse als Instrumente Modelle, vereinfachte Darstellungen des realen Systems, verwendet werden können. Abschnitt 2.1 erläutert den Systembegriff, bevor in Abschnitt 2.2 der Modellbegriff diskutiert wird.

2.1 Systembegriff

Systeme stellen gedankliche Konstrukte der wahrgenommenen Realität dar mit dem Zweck der Vereinfachung zur Lösung von Problemen. Der Zweck des Systemdenkens ist eine "operative Beherrschung der als System interpretierten Zusammenhänge" (Miller 1974, S. 28 in Thomi 1994, S. 12). „Ein System ist eine Menge von geordneten Elementen mit Eigenschaften, die durch Relationen verknüpft sind. Die Menge der Relationen zwischen den Elementen eines Systems ist seine Struktur. Unter Element versteht man einen Bestandteil eines Systems, der innerhalb dieser Gesamtheit nicht weiter zerlegt werden kann. Die Ordnung bzw. die Struktur der Elemente eines Systems ist im Sinne der Systemtheorie seine Organisation. Die Begriffe der Organisation und der Struktur sind also identisch. Ein offenes System enthält mindestens ein Randelement, das zu Elementen anderer Systeme Wechselwirkungen enthält. Reale Systeme sind grundsätzlich offen. Reale Systeme können nur in der Vereinfachung als geschlossene Systeme betrachtet werden. Dies ist nötig, um in der Systemtheorie alle für einen bestimmten Zusammenhang wesentlichen Eigenschaften und Relationen zu erfassen“ (Gabler 1993, S. 3217).

Systeme bilden eine Ganzheit, abgegrenzt von den nicht zugehörigen Teilen. Sie dienen der Betrachtung der speziell interessierenden Realität. Die klare Bestimmung der Systemgrenzen ist ein wichtiger Schritt für die Modellierung. Die Festlegung der Systemkomponenten und der Systemgrenze (bestimmt den Auflösungsgrad) hängt von den sich aus der Problemstel-

³ Der Zugang zur Erforschung der Realität beruht auf der rationalen Erfassbarkeit (Logik) und diese erlaubt ein analytisches Vorgehen. Im Gegensatz dazu steht der ganzheitliche intuitive Zugang zur Erforschung einer Fragestellung (Keusch 1999, S. 19).

lung ergebenden Bedürfnissen ab. Ein System kann mit seiner Umwelt⁴ noch Beziehungen aufweisen (offenes System). Wird in der Systembetrachtung der Zeitfaktor berücksichtigt, handelt es sich um ein dynamisches System. Sind Systemuntersuchungen nicht am realen Objekt durchführbar, liefert die Abstraktion des realen Systems in ein Modell ein Ersatzobjekt für die Untersuchung.

Ein System kann wie folgt graphisch dargestellt werden.

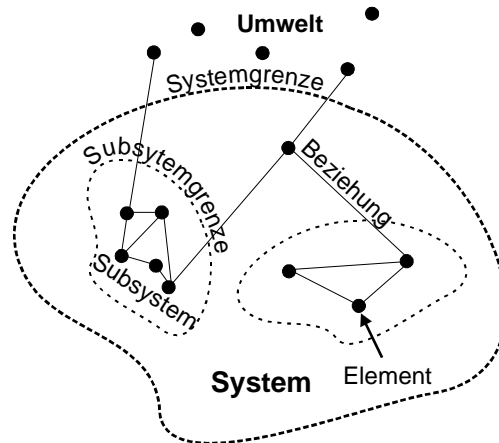


Abbildung 2: Systemdarstellung allgemein (Quelle: in Thomi 1994, S. 12 nach Epple 1979, S. 9)

Beim System in Abbildung 2 handelt es sich um ein offenes hierarchisches System, da es in Subsysteme gegliedert ist und Beziehungen zur Umwelt aufweist. Das System kann damit nicht allein durch interne Funktionsmechanismen erklärt werden. Es gilt, auch äussere Einflussgrössen zu beachten. Die Systemelemente besitzen gewisse Eigenschaften, die je unterschiedliche Ausprägungen haben können (Eigenschaftsraum der Eigenschaft für ein Element oder ein System). Die Ausprägung einer Eigenschaft (konkreter Wert) zu einem Zeitpunkt wird als Zustand bezeichnet. Zu jedem Zeitpunkt besitzt ein System einen durch die Elementzustände beschriebenen Systemzustand (Miller 1974, S. 28 in Thomi 1994, S. 12).

"Das Beziehungsgefüge der Elemente innerhalb eines Systems wird formal durch seine Struktur erfasst, wobei sich Systeme unterscheiden lassen, deren Struktur im Zeitablauf unveränderlich bleibt, und Systeme, deren Struktur sich im Zeitablauf verändert." (Grochla 1980, S. 2209 in Thomi 1994, S. 13).

Zum Studium der Systemeigenschaften und der Auswirkungen darauf bei Veränderungen werden Systeme in Modellen abgebildet. "Durch die mathematische Darstellung von Modellen sind diese überhaupt erst operational, da das Modellsystemverhalten in einem Computer berechnet werden kann" (Böhm 1980, S. 12 in Thomi 1994, S. 13).

2.2 Modellbegriff

"In der Systemtechnik stellt ein Modell eine qualitative oder quantitative Abbildung eines Prozesses dar, durch welches die Wirkung jener Faktoren gezeigt wird, die für die ins Auge gefassten Zwecke wichtig sind. Obwohl ein Modell den tatsächlichen Prozess nicht in allen Einzelheiten darstellt, beschreibt es doch die wesentlichen Eingabegrössen und Ausgabegrössen sowie die inneren Kenngrössen, und es umfasst Angaben über die Umgebungsbedingun-

⁴ "Mit dem Begriff "Umwelt" werden all jene Systeme zusammenfassend bezeichnet, mit denen das interessierende System in Beziehung steht. Es wäre durchaus möglich, all diese ausserhalb liegenden Systeme zu präzisieren, doch wird darauf vielfach aus Gründen des erhöhten Arbeitsaufwandes verzichtet." (Miller 1974, S. 28 in Thomi 1994, S. 11)

gen, die jenen für das tatsächliche System entsprechen. Ein Modell kann bildlich, beschreibend, qualitativ, d.h. von nur annähernder Natur sein; es kann jedoch auch mathematisch und quantitativ und somit hinreichend genau sein. Ein Modell ist ein Abbild der Realität, das Ergebnisse liefert, die jenen des realen Systems entsprechen." (Chestnut 1973, S. 80f).

Die Abbildung 3 zeigt eine grobe Kategorisierung von Modellen mit speziellem Detaillierungsgrad bei den mathematischen Modellen. Diese Modellart steht in der vorliegenden Arbeit im Zentrum:

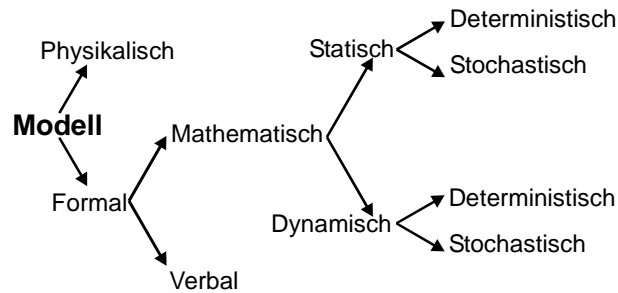


Abbildung 3: Kategorisierung von Modellen (Quelle: Böhm 1980, S. 12, Steffen und Born 1987, S. 24f in Thomi 1994, S. 13)

In den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 folgt eine Differenzierung des Modellbegriffs aus ökonomischer und zeitlicher Sicht.

2.2.1 Differenzierung der Modelle aus ökonomischer Sicht

Ein grundsätzlicher Entscheid besteht in der Wahl zwischen positiven und normativen Methoden, deren Anwendung an Modellen erfolgt. Im folgenden werden die Begriffe positiv und normativ am Beispiel der positiven und normativen Ökonomik erläutert:

Positive Ökonomik: Positiv meint, "so ist es". Mit positiven Methoden wird die Welt der Ökonomie beschrieben. Mit der Formulierung und dem Testen von Hypothesen oder Annahmen (meist als Modell bezeichnet) werden Zusammenhänge in der realen Welt aufzuzeigen und zu quantifizieren versucht, um Fähigkeiten der Vorhersage zu verbessern. Die Struktur der wesentlichen Beziehungen bestimmter Aspekte in der Welt der Ökonomie steht im Zentrum der Untersuchung. Aus dem Modelltest ergeben sich Wirkungszusammenhänge oder Theoreme, die logisch abgeleitet werden und z.T. allgemeine Gültigkeit besitzen. Die Validität wird durch den Vergleich mit der Realität bestimmt. Es ist im positiven Ansatz einfacher, die wichtigen Folgerungen aus den Hypothesen zu testen, als die den Hypothesen zugrundeliegenden Annahmen. Die Modelltypen in diesem Bereich werden auch als deskriptive Modelle bezeichnet.

Normative Ökonomik: Normativ meint, "so sollte es sein" (im Sinne vorgegebener Zielsetzungen bzw. Prämissen). Normative Vorschläge basieren letztlich auf der gesellschaftlichen Ethik⁵ oder auf Wertvorstellungen⁶. Normative Methoden helfen der Welt der Ökonomie

⁵ Ethik bezeichnet Normen, die allgemeinverbindlich und in einer sozial stabilen Zivilisation meist zeitlich längerfristig als Grundlage des menschlichen Handelns und Verhaltens gültig sind. Die Wirtschaftsethik liefert normenbezogene, fremd- oder eigenerzeugte Legitimation oder Rechtfertigung für wirtschaftliches Handeln und Wollen (Gabler 1993, S. 3787). Eine zivilisierte Gesellschaft unterschreibt ethische Normen unabhängig von aktuellen Forderungen und materiellen Interessen (Mishan 1981, S. 20).

⁶ Unter Werturteilen/-vorstellungen werden Normen verstanden, die individueller ausgerichtet und kurzlebiger sind. Werturteile können zwischen einzelnen Mitgliedern und Gruppen einer zivilisierten Gesellschaft variieren. Werturteile müssen nicht Teil eines konsistenten Rahmens grundlegender Überzeugungen sein,

Normen / Ziele vorzugeben und Wege / Massnahmen zu deren Erreichung aufzuzeigen. Auf makroökonomischer Ebene können allgemein akzeptierte Ziele wie hoher Beschäftigungsgrad, Preisstabilität, Güter- und Faktormobilität, auf mikroökonomischer Ebene beispielsweise solche der effizienten Allokation, der Verteilung und der Gewinn- oder Nutzenmaximierung als Ziele vorgegeben werden. Letztere implizieren allokativer Veränderungen, die mittels Kosten-Nutzen Analyse, Methoden der mathematischen Programmierung und des Operations Research vorgezeichnet werden. Als Ergebnisse resultieren jeweils Projekt- und/oder Politikempfehlungen, deren Ziel und Zweck gesellschaftliche Verbesserungen sein sollten. Dabei sind immer Auswirkungen und Grenzen der angewendeten Kriterien und Methoden zu berücksichtigen. Letzlich geht es in der normativen Ökonomie um die Rangierung von alternativen ökonomischen Situationen. Im normativen Ansatz ist es unmöglich, die vorschreibenden Folgerungen (zur Erreichung einer Norm) zu testen. Ein Testen beschränkt sich auf die Ermittlung der Gültigkeit der Schlussfolgerungen in Bezug auf den Realitätsbezug der zugrunde liegenden Annahmen. Modelle im Bereich der normativen Ökonomie gehören zu den präskriptiven Modellen.

Normative und positive Ökonomie stehen in enger Beziehung, besonders bei Verwendung eines normativen Ansatzes. Mishan (1981, S. 22) beschreibt den Zusammenhang wie folgt:

"A normative economics must have recourse to the analysis and findings of positive economics. For it is not possible to prescribe what should be done unless we have clear ideas about what would happen if certain economic measures were undertaken or withdrawn. Such knowledge involves acceptable hypotheses about the economic universe, which, of course, is the stuff of positive economics. Thus, normative economics draws upon and, indeed develops specific aspects of positive economic theories."

Die Weiterentwicklung der normativen Ökonomie besteht u.a. darin, dass unter Zugrundelegung von in der positiven Ökonomie hergeleiteten Strukturen und Wirkungszusammenhängen nach der Validierung des normativen Modells an der realen Situation, Aussagen über Strukturwirkungen und andere Grössen gemacht werden können. Diese rühren von Parameterveränderungen (Veränderungen von Rahmenbedingungen, Einführung von Massnahmen) her, die in der Realität noch nicht beobachtbar sind. So können Wirkungstendenzen aufgezeigt werden, die der Entscheidungsunterstützung dienen.

2.2.2 Differenzierung der Modelle aus zeitlicher Sicht

Dieser Abschnitt erläutert verschiedene Ansätze der Modellierung: statisch, komparativ statisch, rekursiv, rekursiv dynamisch und simultan dynamisch.

Der statische Optimierungsansatz optimiert den Modellzustand über eine einzelne Periode. Die Periode ist ausgehend von der realen Situation und der Fragestellung zu definieren und beruht meist auf einem Produktionszyklus (Landwirtschaft meist ein Jahr). Abhängigkeiten zwischen Perioden fliessen nur in dem Sinne in die Betrachtung ein, dass die Ausgangssituation durch die Vergangenheit geprägt ist. Im komparativ statischen Ansatz wird zu verschiedenen Zeitpunkten oder für verschiedene Bedingungen optimiert, wobei die Ausgangslagen für die Vergleichszeitpunkte oder die alternativen Bedingungen meist exogen und deterministisch vorgegeben werden. Es sind keine Abhängigkeiten direkter oder indirekter Art zwischen Perioden oder Zuständen mit unterschiedlichen Ausgangsbedingungen berücksichtigt.

Im rekursiven Optimierungsansatz wird der Betrachtungszeitraum in einzelne Unterperioden aufgeteilt, wobei die jeweils vorlaufende Periode die nachfolgende beeinflusst (Zustandsgrös-

sondern können individuelle Meinungen bezüglich bestimmter Ereignisse darstellen. Sie sind mehr von intellektuellen Gegebenheiten abhängig und ändern mit der Lebenserfahrung (Mishan 1981, S. 24).

sen / -variablen). Somit werden die Entwicklungen über den mehrperiodischen Betrachtungszeitraum in Schritten einzelner Perioden evtl. mit mehrperiodischem Betrachtungshorizont (rekursiv dynamisch) abgebildet, wobei das Vorperiodenergebnis jeweils die neue Ausgangslage darstellt. Diese Art der Programmierung kommt dem realen Verhalten nahe und zeigt, wie die Akteure sich verhalten würden bei gegebenen Rahmenbedingungsänderungen.

Der Unterschied zwischen komparativ statischer und rekursiver Programmierung liegt in der Abhängigkeit der Modelle von verschiedenen Zuständen. Im komparativ statischen Ansatz gibt es keine gegenseitigen Abhängigkeiten, im rekursiven (rekursiv dynamischen) Ansatz sind dagegen über den Betrachtungszeitraum die Abhängigkeiten zu beachten.

In einem dynamischen Optimierungsmodell wird die Untersuchungseinheit über den gesamten Betrachtungszeitraum simultan optimiert. Die Optimierung erfolgt über mehrere Modellperioden. Dadurch ergeben sich optimale Pfade der Anpassung an sich ändernde exogene Größen. Je Rechengang wird vollständige Information vorausgesetzt. Diese Art der Problembehandlung liefert dem normativen Ansatz entsprechende Resultate – wie sich die Akteure verhalten müssten bei sich ändernden Rahmenbedingungen und vollständiger Information⁷ über den Betrachtungszeitraum. Im Gegensatz dazu steht der rekursive (rekursiv dynamische) Ansatz, der über die optimierte Subperiode (evtl. mehrere bei mehrperiodischem Planungshorizont) normativ, im rekursiven Vorgehen aber positiv ist. Der Realitätsbezug dieses Vorgehens ist besser, wenn Aussagen über das reale Verhalten eines eine Zielfunktion (Bsp. Gewinnfunktion) optimierenden Akteurs möglichst gut gemacht werden sollen.

Einer weiteren Klärung des Modellbegriffs ist neben der Differenzierung aus ökonomischer und zeitlicher Sicht eine Vertiefung des Zusammenhangs zwischen Modell und Realität dienlich.

2.2.3 Zusammenspiel Modell - Realität

Modelle abstrahieren von der Realität und vereinfachen sie. Damit stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Modell und Realität. Abbildung 4 und Abbildung 5 legen diesen Zusammenhang für die mathematischen Modelle schematisch dar:

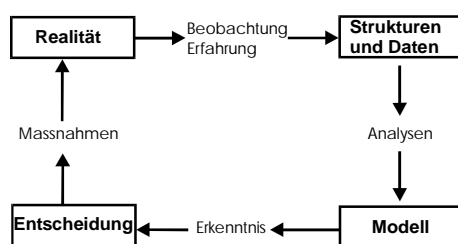


Abbildung 4: Bezug Realität-Modell: konzeptionell (Quelle: Lüthi 1999, S. 14)

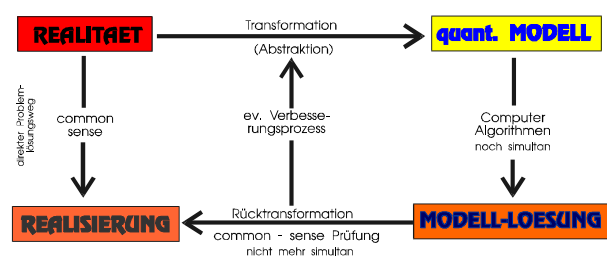


Abbildung 5: Bezug Realität-Modell: mathematische Programmierung

Abbildung 4 zeigt den konzeptionellen Bezug zwischen der Realität und einem Modell auf. Durch Beobachtung und Erfahrung können die in der Realität problembezogen relevanten

⁷ Mittels der Szenariotechnik können Unsicherheiten mit wenig Aufwand berücksichtigt werden.

Strukturen und Daten bestimmt werden. Aus der Analyse der empirisch gewonnenen Daten und Strukturen resultieren dann die Grundlagen für die Modellbildung. Bei geeigneter Modellbildung werden aus der Anwendung des Modells auf die dafür geeigneten Fragestellungen neue Erkenntnisse oder ein besseres Verständnis gewonnen. Dies liefert Unterstützung für Entscheidungen über Massnahmen zur Beeinflussung der ursprünglichen realen Situation. Der Vorteil des Modellansatzes liegt darin, dass nicht alle Möglichkeiten in der Realität durchgeführt werden müssen.

Die Abbildung 5 zeigt den analogen Zusammenhang am Beispiel der mathematischen Programmierung. Durch Abstraktion werden die problemrelevanten Zusammenhänge der Realität (System mit Elementen, Beziehungen und Grenze) in ein quantitatives Modell transformiert, um Modellösungen zu bestimmen. Die Bestimmung der Modellösungen erfolgt simultan durch Computeralgorithmen. Die Modellösungen müssen danach einer kritischen common-sense Prüfung standhalten. Sonst ist ein Verbesserungsprozess in der Modellbildung und eine Neuberechnung nötig. Der Informationsgehalt einer Lösung ist durch denjenigen des Modells begrenzt: Es findet ausschliesslich eine Informationsverarbeitung statt. Ist die Modellösung zur Entscheidungsunterstützung zufriedenstellend, so kann durch Rücktransformation (Umsetzung der Erkenntnisse in die Realität), d.h. durch das Ergreifen von Massnahmen, zur Realisierung geschritten werden. Es existiert für die Realisierung natürlich auch ein direkter Weg zur Lösung von in der Realität festgestellten Problemen über den gesunden Menschenverstand, sofern die Komplexität der Fragestellung dies zulässt, d.h. nicht zu gross ist.

Ein mathematisches Modell sollte "value independent"⁸ sein, d.h. das Modell ist symbolisch zu formulieren, so dass es für verschiedene Datengrundlagen seine Gültigkeit bewahrt. Die Haupteigenschaft eines mathematischen ökonomischen Modells ist seine abstrakte Qualität. Ein mathematisches ökonomisches Modell soll im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, um in Bereichen von ökonomischem Interesse wichtige und wenn möglich allgemein gültige Schlussfolgerungen ziehen zu können. Daher ist es für den Modellierer entscheidend, die wichtigsten Kräfte und Beziehungen zu identifizieren. Diese liegen in einem ressourcenökonomischen Modell in den ökonomischen Basisaktivitäten Produktion, Konsum, Handel und der physikalischen Umwelt. "An economic model is, then, an abstract, stylised representation of what the modeller believes to be the essential relationships operating in some more or less wide set of circumstances" (Perman et al. 1996, S. 82). Ökonomische Schlussfolgerungen entstehen durch logische Ableitungen aus solchen Modellen.

Die folgenden Abschnitte erörtern wesentliche Aspekte, die bei der Modellierung zu berücksichtigen sind, wie Modellzweck, Modellierungsprinzipien allgemein und im dynamischen Fall sowie Fragen der Modellqualität.

2.2.4 Modellzweck

Modelle dienen der Nachbildung einer komplexen Realität durch Vereinfachung (Abstraktion). Dabei wird ein Lernzweck über den Untersuchungsgegenstand verfolgt. Allen Modellen gemeinsam sind folgende Eigenschaften (Lüthi 1999, S. 13):

- Idealisierung oder Abstraktion eines Teils der Realität
- Unvollständige Darstellung des realen Phänomens (Imitation der Realität)

⁸ "A model fragment is represented in a value independent way, if it is represented symbolically in such a manner that specific values are essentially absent for all of its value-bearing mathematical objects, although some objects may incorporate a rule for calculating their value" (Geoffrion 1992, S. 327).

Modelle sind ein Experimentierersatz für die Realität. Die Zwecksetzung ist zusätzlich diejenige der Durchführung von Experimenten zur Beantwortung von Fragen. In Modellen wird alles ausser das für die Fragestellung Wesentliche weggelassen.

Modelle werden im Operations Research hauptsächlich zur Informationsgewinnung über die Konsequenzen alternativer Aktionen eingesetzt und dienen der Entscheidungsunterstützung. Sie sind ein Instrument neben anderen. "Modelle dienen zur Unterstützung der Intuition und zur Förderung des Problemverständnisses, indem eine systematische Denkarbeit beim Modellaufbau und bei der Interpretation der Modellergebnisse gefördert wird" (Lüthi 1999, S. 14).

2.2.5 Modellierungsprinzipien für mathematische Modelle allgemein

Beim Modellbau sind nach Perman et al. (1996, S. 82) folgende Aspekte wichtig:

Ein mathematisches Modell ist eine abstrakte formalisierte Darstellung eines realen Systems. Infolge der Notwendigkeit der Vereinfachung und der Reduktion der Komplexität des realen Problems besteht immer die Gefahr, die bedeutendsten Kräfte und Beziehungen (vgl. eingeführter Systembegriff) nicht zu modellieren. Im weiteren sollte die Fragestellung die Natur und Spezifizierung der als Modellkomponenten gewählten Beziehungen bestimmen. Die Modellgrenzen liegen in den zugrunde liegenden Annahmen und den modellierten Beziehungen.

Die folgenden Modellbauschritte berücksichtigen die von Perman et al. genannten Aspekte bei der Modellierung (Lüthi 1999, S. 5):

1. Festlegung von relevanten Aspekten und Fragestellungen für die Problemsituation (Modellzweck).
2. Explizites Aufstellen der wichtigsten Beziehungen zwischen diesen Elementen (Modellstruktur).
3. Formulierung von Hypothesen über die Natur dieser Beziehungen (Modellformulierung).

Folgende Fragen sind danach vor der Entwicklung eines computergestützten mathematischen Modells zu beantworten:

1. Sind die Variablen der Untersuchung steuer- und messbar?
2. Existiert eine einfach aufarbeitbare Datenbasis?
3. Ist die Problemdefinition gut (nur auf gut gestellte Fragen gibt es auch gute Antworten) und ein mathematisches Modell zweckmässig?
4. Sind statistisch relevante Aussagen über die Unsicherheiten der zugrunde liegenden Daten machbar, sinnvolle Szenarien formulierbar?

Auch bei positiver Beantwortung der oben gestellten Fragen bleibt immer zu berücksichtigen, dass quantitative Analysen einen beschränkten Aussagebereich haben, dass nie alle Aspekte in einem mathematischen Modell erfassbar sind und für gute Entscheidungen mehr als fehlerfreie mathematische Methoden benötigt werden.

2.2.6 Modellierungsprinzipien im dynamischen Fall

Hannon und Ruth (1997, S. 21f) beschreiben den Modellierungsprozess für dynamische Fragestellungen wie folgt:

1. Definition der Problem- und Fragestellung sowie der Modellziele.
2. Wahl der Zustandsvariablen⁹, der Indikatoren des Systemzustands über die Zeit.
3. Wahl der Kontrollvariablen¹⁰, die die Zustandsvariablen beeinflussen.
4. Bestimmung der Parameter (Koeffizienten) der Kontrollvariablen und der zugehörigen Funktionen und Relationen mit evtl. Zeitverzögerung.
5. Modelltest bezüglich Konsistenz mit allgemeingültigen Gesetzmässigkeiten.
6. Wahl des zeitlichen und räumlichen Horizonts, der Intervalllänge und des numerischen Kalkulationsverfahrens.
7. Berechnung der Resultate und Test auf Sinn und Beantwortung der gestellten Fragen.
8. Sensitivitätsanalyse bei Parametern und Anfangswerten.
9. Vergleich der Modellresultate mit empirischen Daten.
10. Überprüfung der Parameter und der Modellstruktur zur Reflexion der Komplexität und um Ausnahmen bei empirischen Resultaten miteinzubeziehen. Wiederholung der Schritte. Das Modell sollte neue Fragen aufwerfen.

Die Modellierungsprinzipien / Modellbauschritte sollen dazu beitragen, vom Vorgehen her ein gutes Modell für die zu beantwortende Fragestellung zu erhalten. Der Abschnitt 2.2.7 vertieft den Aspekt der Modellqualität.

2.2.7 Modellqualität

Eine bedeutende Frage beim Umgang mit Modellen ist die nach den Qualitätsmerkmalen. Wichtige Beurteilungskriterien sind die folgenden (Lüthi 1999, S. 14):

Relevanz: Modellzwecksetzung (Problemrelevanz für Entscheider). Dies ermöglicht das Experimentieren und die Erstellung von Prognosen, fördert das Denken und das Systemverständnis, generiert Daten und Ideen und archiviert Wissen (Hannon und Ruth 1997, S. 22f).

Gültigkeit (Validität): Vertrauensbasis für die Interpretation der Modellergebnisse.

Modellieren ist ein Prozess, in dem die richtigen Fragen erkannt und vertrauenswürdig beantwortet werden. In einem Gültigkeitstest sollten die folgenden Fragen positiv beantwortet werden (Lüthi 1999, S. 14):

- Erfasst das Modell korrekt und klar die bekannten Tatsachen und Problemsituationen?
- Bleiben die Resultate bei Änderung der wichtigsten Modellgrössen konsistent?
- Lassen sich Spezialfälle behandeln, deren Ergebnisse voraussagbar sind?
- Können bekannten Wirkungen die Ursachen zugeordnet und die Zusammenhänge interpretiert werden?

⁹ Zustandsvariablen beschreiben in einem mathematischen Modell den Systemzustand mittels konkreter Werte und damit auch den Modellzustand. Prozesse, die durch äussere Einflüsse ausgelöst werden können oder auf systemimmanenter Dynamik beruhen, führen zu neuen Systemzuständen. Diese Prozesse werden in mathematischen Modellen durch Übergangsfunktionen beschrieben. Die Kontrollvariablen sind die Entscheidungsgrössen in einem Modell, die über die Übergangsfunktionen die Zustandsvariablen beeinflussen.

¹⁰ Vgl. Fussnote 9.

Dazu tragen quantitative und qualitative Modelle bei, bei denen aber je die Grenzen zu betrachten sind. Die Berücksichtigung von Unsicherheiten ist sehr zentral im Modellbau. Beispielsweise stellt in vielen Fällen die Verwendung der Methoden der Szenarioanalyse, der Monte-Carlo Simulation oder der stochastischen Programmierung eine geeignete Möglichkeit zur Berücksichtigung von Unsicherheit dar.

Nach diesen Ausführungen allgemeiner Art zu quantitativen Modellen und zum Modellbau stellt sich die Frage nach Methoden zur Lösung mathematischer (quantitativer) Modelle.

2.3 Methoden bei mathematischen Modellen

Vor der Darstellung von drei verschiedenen Methoden, die bei mathematischen Modellen zur Anwendung kommen, wird im folgenden Abschnitt der Begriff der mathematischen Modelle im Bereich des Operations Research vertieft.

2.3.1 Mathematische Modelle im Operations Research

Die Methoden des Operations Research¹¹ gehören zu den entscheidungsunterstützenden Instrumenten für Unternehmungen. Entscheidungen sind bewusste Wahlhandlungen von Personen. Jede Wahlhandlung setzt sich aus verschiedenen beeinflussbaren und nicht beeinflussbaren Elementen zusammen. Die nicht beeinflussbaren Elemente bilden den Datenrahmen, die Wertekombinationen der beeinflussbaren Elemente bezeichnen die Entscheidungsalternativen. Zu den Merkmalen von Entscheidungen gehört auch die Zielausrichtung, wobei ein unbefriedigender Zustand erst Entscheidungen nötig macht. „Zum Entscheiden sind Informationen über Ziele, Alternativen und Daten notwendig, die im Entscheidungsprozess bearbeitet werden:

- Anregen und Erkennen des Entscheidungsproblems (Problemidentifikation)
- Suchen von Entscheidungsalternativen (Lösungsraum)
- Informatorische Fundierung der Entscheidungsalternativen (Wirkungszusammenhänge / Konsequenzen)
- Ermittlung der Zielwirksamkeit der Entscheidungsalternativen (Leistungsprofil)
- Finalentscheidung (Auswahl) durch Bewertung der Entscheidungsalternativen“

Der Bezug zum realen Entscheidungsprozess ist dadurch gegeben, dass die Modellelemente und -strukturen Objekte einer realen Alternativenbewertung darstellen. Die Elemente eines Modells setzen sich zusammen aus Entscheidungszielen, Alternativen, Umweltzuständen etc.. Formal-logische Beziehungen zwischen den Elementen geben diesen eine Struktur (vgl. Abbildung 6).

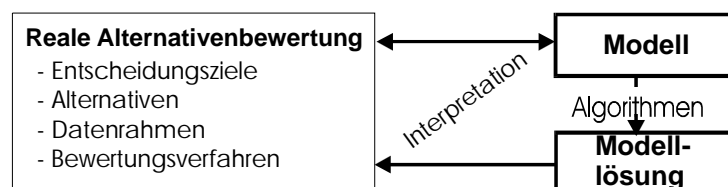


Abbildung 6: Bezug Modell – Entscheidungsprozess (Quelle: Lüthi 1999, S. 16)

Die Interpretation der Modelllösung erfolgt in Worten, während die Lösung des Modells mittels Methoden (Algorithmen) erfolgt.

¹¹ Der Abschnitt stützt sich auf Lüthi 1999, S. 15ff.

Quantitative Modelle werden nach der Art der Alternativenbewertung in Ermittlungsmodelle (explizite Bewertung, Entscheidung ist nicht Bestandteil der Rechnung) und Optimierungsmodelle (implizite Bewertung, Entscheidung ist Bestandteil der Rechnung) unterteilt.

In Ermittlungsmodellen werden die Zielbeiträge jeder Alternative direkt berechnet. Die Alternativenmenge ist explizit gegeben und endlich, und die Modellstruktur durch Systeme von Bestimmungsgleichungen beschrieben. In solchen Systemen stehen abhängige Variablen für Ziele und Alternativen (Wertekombinationen). Der Datenrahmen wird durch Parameter dargestellt. Einfache Ermittlungsmodelle besitzen eine, komplexe mehrere Zielvariablen.

In Optimalmodellen sind die Alternativenwirkungen implizit erfasst. Eine Funktion beschreibt die Modellstruktur und damit die Beziehung der Alternativenmenge mit mindestens einer Zielvariablen. Weitere Strukturelemente können in Restriktionen gefasst sein. Die Alternativen sind unabhängige Variablen und der für die Alternativenmenge einheitliche Datenrahmen besteht im Modell aus Struktur, Parametern und Konstanten.

Die Abbildung 7 zeigt das Ermittlungsmodell und das Optimierungsmodell im Vergleich¹²:

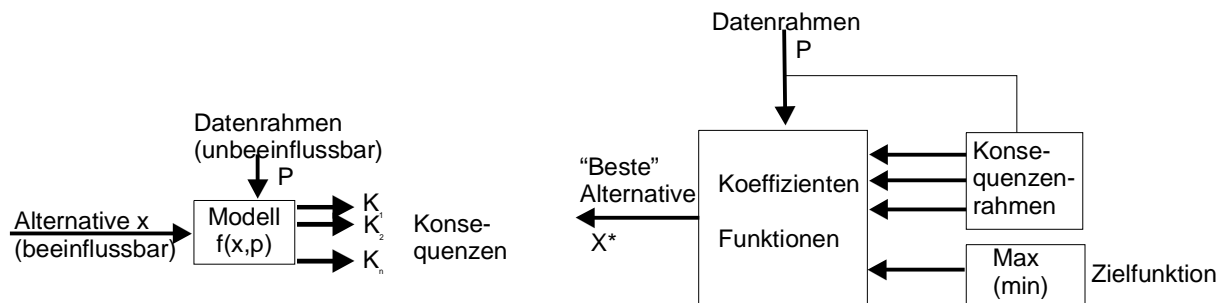


Abbildung 7: Struktur des Ermittlungsmodells (links) und des Optimierungsmodells (rechts) (Quelle: Lüthi 1999, S. 17f)

Ermittlungsmodelle bestimmen die Konsequenzen einer gegebenen Alternative, Optimierungsmodelle dagegen die beste Alternative aufgrund der gewünschten Konsequenzen. Simulationsmodelle gehören zum Bereich der Ermittlungsmodelle. Optimierungsmodelle liefern einen Sollzustand und sind Instrumente der Anwendung normativer Methoden (Erläuterung der Begriffe, vgl. Abschnitt 2.2.1).

Die Abschnitte 2.3.2 bis 2.3.6 zeigen drei wichtige mathematische Methoden, die bei mathematischen Programmierungsmodellen zur Anwendung kommen im Vergleich: Simulation, Gleichgewichtsanalyse und Optimierung.

2.3.2 Simulation

Der Begriff der Simulation leitet sich ab aus lat. *simulare*¹³ = ähnlich machen. Im deutschen Sprachgebrauch hat sich der Sinn leicht verändert und meint eher etwas Vortäuschen wie z.B. eine Krankheit. Simulation ist im wesentlichen ein Analyse-, aber gleichzeitig auch ein entscheidungsunterstützendes Instrument.

In der Simulation werden Modelle bzw. Betriebs- und Umgebungsbedingungen verwendet, wobei die Modelle oder Bedingungen in physikalischer, mathematischer oder anderer Form vorliegen. Dabei wird angestrebt, die verschiedenen Ergebnisse zu bestimmen, die vom realen

¹² P bezeichnet den Datenrahmen, x die Alternativen.

¹³ Langenscheidt 1983, S. 484: "ähnlich machen, nach- oder abbilden, darstellen, nachahmen, vorschützen, heucheln, sich stellen als ob".

System geliefert werden, indem man das Modell solchen Bedingungen unterwirft, die entweder äquivalent zu den tatsächlichen Bedingungen oder diesen ähnlich sind (Chestnut 1973, S. 83). Simulation bildet die Struktur und/oder das Verhalten eines Systems im Zusammenhang mit einem häufigen Wiederholen von Rechnungen ab. Eine einzelne Berechnung kann nicht als Simulation bezeichnet werden (Autorenkollektiv 1969, S. 416). In der Simulation werden die unabhängigen Variablen in Einzelexperimenten bei unveränderter Modellstruktur variiert¹⁴.

Im engeren Sinne versteht man unter Simulation die Behandlung mathematischer Probleme, die Modelle von technischen und ökonomischen Vorgängen darstellen. Die Fragestellung besteht in der Regel in zeitabhängigen Phänomenen, "deren Änderung in Zeitschritten (zeitorientiert!) oder Ereignisschritten (ereignisorientiert!) nachvollzogen werden kann (Gabler 1993, S. 2975). Simulation ist im weiteren Sinne begrifflich ein möglichst realitätsnahes Nachbilden von Geschehen der Wirklichkeit. Diese wird durch Abstraktion in ein Modell gefasst, mit welchem zielgerichtet experimentiert wird. Aus den Experimentresultaten wird dann auf das Verhalten der realen Vorgänge zurückgeschlossen. Bei der Modellkonzipierung ist Geschick und Erfahrung gefordert, um die wesentlichen Einflussgrößen zu erfassen und keine unzulässige Vereinfachung vorzunehmen. Simulation ist nicht auf analytische Verfahren (->effektiver Algorithmus) und auch nicht auf die quantitative Ebene beschränkt.

"In Wissenschaft und Technik ist der Begriff der Simulation die Bezeichnung für die Nachbildung eines realen Systems oder Prozesses durch ein Modell und die Durchführung von Experimenten mit diesem Modell, um Einsichten über Strukturen und Verhaltensweisen des realen Systems zu gewinnen. Gemäss dieser Definition als Nachahmung der Wirklichkeit mit Hilfe eines Modells ist die Simulation der hauptsächliche Zweck jeglicher Modellbildung und zwar unabhängig davon, ob zum Studium des Modellverhaltens analytische oder numerische Lösungstechniken herangezogen werden" (Berg und Kuhlmann 1993, S. 137).

2.3.2.1 Grundelemente der Simulation und Struktur

Für eine erfolgreiche Anwendung einer Simulation sind folgende Schritte in der genannten Reihenfolge erforderlich (Moder und Elmaghraby 1978, S. 545ff):

1. Problemdefinition: Identifikation der wichtigen Aufgaben.
2. Sammlung der empirischen Information und Datenanalyse: Kontaktaufnahme mit Experten und Kunden.
3. Modellformulierung: Übereinkunft über Abstraktionsgrad, akzeptable Vereinfachungen, relevante Modellreaktionen und Leistungsmaßstäbe.
4. Modellbau oder -wahl: Dokumentation der Teilmodelle und Festlegung der Parameter.
5. Modellrechnungen: Kalkulationen zur Bestimmung der Reaktionen bei ändernden Rahmenbedingungen für das Modell: Experimentelles Design und Reduktion der Varianz.
6. Validierungsstudien: Sind Kalkulationsresultate mit dem Input konform und konsistent mit den Erfahrungen in der Realität?
7. Kommunikation der Resultate mit Auftraggebern: Wiederholen einzelner Schritte in Abhängigkeit der Lerneffekte.

¹⁴ Parametrische Optimierung ist keine Simulation, da bei diesem Verfahren nur strukturelle Koeffizienten und nicht die unabhängigen Variablen in Einzelexperimenten bei unveränderter Modellstruktur variiert werden.

Als Simulation werden die Punkte 3-7 bezeichnet, wobei der Begriff sich im allgemeinen auf die numerische Kalkulation und besonders auf die statistische Auswertung eines mathematischen Modells zwecks Schätzung der Wahrscheinlichkeiten bestimmter Resultate bezieht. Die Punkte 1 und 2 sind typische Schritte des Operations Research und der Systemanalyse (vgl. Abschnitte 2.2.5, 2.2.6, 2.3.1).

2.3.2.2 Einsatz der Simulationstechnik

Johnson und Rausser (1977) klassieren den Einsatz der Simulation in 5 Bereiche: Firmen und Prozesse, Markt, Aggregate, Entwicklungen, sowie Modelle natürlicher Ressourcen. Biophysikalische und bioökonomische Simulationsmodelle werden oft komplementär eingesetzt. Ursprünglich wurde die Simulation primär als Forschungsmethode eingesetzt, zunehmend findet die Methode als entscheidungsunterstützendes System Verwendung (Oriade und Dillon 1997, S. 56).

Sind die Modellresultate nicht oder nur sehr schwierig analytisch evaluierbar, d.h. lassen sie sich nicht direkt aus der mathematischen Formulierung ableiten, so ist eine zusätzliche Modellbildungsstufe erforderlich, in welcher das mathematische Modell so in ein ComputermodeLL umgesetzt wird, dass sich die darin enthaltenen Zusammenhänge mit den Effekten auf die Resultate experimentell – d.h. durch Simulation – bestimmen lassen. Damit ist die Simulation eine numerische¹⁵ Lösungstechnik, um die im Modell formulierten mathematischen Zusammenhänge in Form eines Computerprogrammes korrekt nachzubilden (Berg und Kuhlmann 1993, S. 137f).

Eine Besonderheit der Simulation liegt in der Tatsache, dass für die Lösung eines Problems nicht unbedingt eine vollständige Datenbasis erforderlich ist. Lücken können mittels Simulation gefüllt werden (Autorenkollektiv 1969, S. 419). Simulation sollte daher Verwendung finden, wenn sich ein reales Problem nicht ausreichend exakt durch ein mathematisches Modell beschreiben lässt, also keine analytische Lösung zulässt oder eine exakte Lösung einen unverhältnismässig hohen Rechenaufwand verursacht (Gabler 1993, S. 2976).

2.3.2.3 Stärken und Schwächen der Simulation

Simulation weist wie andere Methoden Stärken und Schwächen auf (Oriade und Dillon 1997, S. 47f):

- Aktuelle und künftige Computerkapazitäten tragen wesentlich zur Verbreitung der Methode der Simulation bei.
- Simulation erlaubt die Generierung von Input-Output Daten, wenn die Datenbasis ungenügend ist. Zudem erlaubt Simulation den Einbezug stochastischer Grössen, die schlecht beobachtbar sind, zum Systemverständnis aber bedeutend beitragen können. Der Beitrag zum Systemverständnis ist eine Kerneigenschaft und besitzt eine grosse Bedeutung, wenn zeitliche Dimensionen einfließen.
- Kritik an der Simulation fällt meist im Bereich der ungenügenden Modellvalidierung an, v.a. wenn Modellbauer und –benutzer nicht dieselben Personen sind (Modelle als Black-

¹⁵ Der Unterschied zwischen analytischer und numerischer Lösung besteht im folgenden: Die analytische Lösung besteht in der Art eines geschlossenen Formelausdruckes (z.B. einer Differentialgleichung) und ist für einen weiten Bereich von Anfangs- und Parameterwerten gültig. Die numerische Lösung lässt sich dagegen für eine bestimmte Parameterausprägung als Zeitpfad der endogenen Grösse durch Simulation ermitteln, wobei ein Approximationsfehler meist in Kauf genommen werden muss (abhängig vom Integrationsverfahren und von der Länge des Zeitintervalls) (Berg und Kuhlmann 1993, S. 138f).

box). Die Frage, ob ein bestehendes Modell in eine neue Umgebung übertragbar oder auf eine neue Fragestellung anwendbar ist, wird selten ausreichend geklärt. Zudem ist die Simulation immer im Vergleich zu alternativen Techniken zu betrachten und muss aus dem Vergleich ihre Anwendung rechtfertigen. Simulation ist per se kein Optimierungsverfahren, obwohl Anstrengungen zur Systemoptimierung durch Simulationsmodellierung unternommen wurden. Beispiele dafür sind die "Response Surface Methodology" (RSM), direct search, und die "Stochastic Approximation Method SAM" (SAM=Statistically convergent search methods: Azadivar und Lee 1988, S. 331-345).

Weitere Kritikpunkte liegen darin, dass ein Simulationsmodell im Prinzip für jede Anwendung validiert sein muss (was aufwendig ist) und dass die Divergenzen zwischen Modellresultaten und Realität gross sein können. Viele Simulationsentscheide und Inputs sind vorbestimmt und unkontrollierbar, was bei der Generierung eine interdisziplinäre Kooperation bedingt, um die Anwendbarkeit des Modells zu gewährleisten.

2.3.2.4 Zusammenhänge zwischen Realität, Modell und Simulation

Abbildung 8 zeigt eine gebräuchliche Zerlegung einer Simulation in drei Hauptelemente. Das innere Dreieck zeigt die wechselseitigen Beziehungen dieser Elemente. Die äusseren Kreispeile beziehen sich auf Vorgehensweisen, die die Glaubwürdigkeit einer Simulation bestimmen.

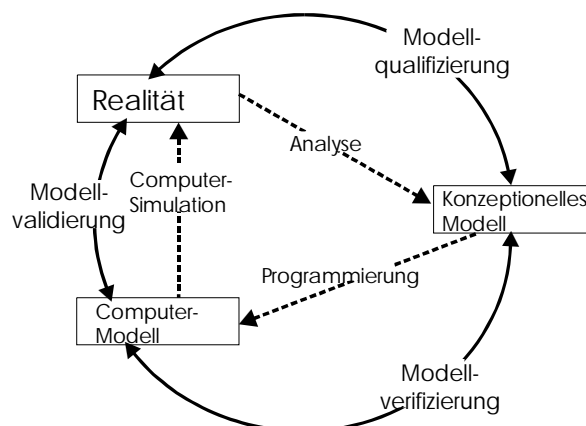


Abbildung 8: Simulationsmodell (Quelle: Knepell und Arangno 1993, S. 1.2)

Die folgende Auflistung klärt einige im Zusammenhang mit der Simulation wichtige Begriffe (Knepell und Arangno 1993, S. 1.3):

- Simulation:** Modellierung eines Systems und seiner Wirkungen durch die Nutzung verschiedener Mittel der Darstellung.
- Realität:** Eine Ganzheit, eine Situation oder ein System, welche(s) das Analyseobjekt darstellt.
- Anwendbarkeitsbereich:** Besteht aus vorgeschriebenen Bedingungen, für welche das Computermodell getestet, mit der Realität bestmöglich verglichen und für den Einsatz als geeignet befunden wurde.
- Genauigkeitsbereich:** Aufgezeigte Übereinstimmung zwischen dem Computermodell und der Realität im definierten Anwendbarkeitsbereich.
- Verifizierung:** Feststellung, dass die Implementation eines konzeptionellen Modells auf dem Computer korrekt ist und sich entsprechend verhält.

- Validierung: Feststellung, dass ein Computermodell im Anwendbarkeitsbereich ein befriedigendes Mass an Genauigkeit besitzt, das konsistent mit der beabsichtigten Modellanwendung ist.
- Vertrauensfeststellung: Prozess der Feststellung der Glaubwürdigkeit des Verhaltens und der Resultate einer Simulation.

Nach der Darstellung des Simulationsmodelle folgt im nächsten Abschnitt die Vorstellung der anderen zwei wichtigen Methoden bei mathematischen Modellen, der Gleichgewichtsanalyse und der Optimierung. Durch die Überleitung von der Gleichgewichtsanalyse auf die Optimierung soll die Nähe dieser beiden Methoden aufgezeigt werden.

2.3.3 Gleichgewichtsanalyse und Optimierung

Der Abschnitt 2.3.3 liefert einen knappen Überblick über die Gleichgewichtsanalyse, die komparativ statische Analyse, die Optimierungsprobleme und die Dynamik in der Ökonomie und Integralrechnung. Der Abschnitt schliesst mit der mathematischen Programmierung.

2.3.3.1 Statische oder Gleichgewichtsanalyse

Die Optimierung ist lediglich ein Spezialfall der Gleichgewichtsmodellierung (Gleichgewichtsanalyse), indem ein spezielles Gleichgewicht gesucht wird, das vorbestimmten Zielvorstellungen möglichst gut genügt. Der Begriff „Gleichgewicht“, gemeint ist ein Gleichgewicht ohne weitere Zielvorstellung, wird von Machlup¹⁶ wie folgt definiert: „a constellation of selected interrelated variables so adjusted to one another that no inherent tendency to change prevails in the model which they constitute.“ „Selected“ meint dabei die bei der Modellbildung durch die Abstrahierung von der Realität ausgewählten Variablen. Somit hat das Gleichgewicht nur eine Bedeutung im Kontext der gewählten Variablen. „Interrelated“ bedeutet, dass für ein Gleichgewicht die Variablen Werte annehmen, so dass sie in einen Ruhezustand versetzt werden und mit den jeweils anderen Variablen kompatibel sind. „Inherent“ bedeutet, dass im Gleichgewicht die modellinternen Kräfte ausbalanciert sind und externe Einflussfaktoren als fix angenommen werden. Grundsätzlich besteht im Gleichgewicht keine Tendenz zur Veränderung mehr. Ein gefundenes Gleichgewicht muss aber nicht eindeutig sein und nicht unbedingt den Zielvorstellungen entsprechen. Es handelt sich um einen personenunabhängigen Prozess der Interaktion und Anpassung ökonomischer Kräfte (Zusammenspiel gegensätzlicher Kräfte). Ein Beispiel dafür ist das Marktgleichgewicht bei gegebenen Angebots- und Nachfragebedingungen. Dabei werden Werte für die endogenen Variablen gesucht, die die Gleichgewichtsbedingung des Modells erfüllen. Die Grenzen der Gleichgewichtsanalyse als statischer Analyse liegen in der Tatsache, dass die wiederholten Anpassungsprozesse, die zum Gleichgewicht führen, nicht untersucht und nicht berücksichtigt werden. Das Gleichgewicht ist in dieser Art von Analyse von Interesse und nicht der Weg dazu. Zwei bedeutende Probleme finden keine Beachtung:

- Wegen der zeitlichen Anpassungsdauer können theoretisch bestimmte Gleichgewichtszustände ihre Relevanz verlieren, wenn die exogenen Kräfte die Gleichgewichtszustände in der Zwischenzeit verschieben (→ komparativ statische Analyse).
- Der Gleichgewichtszustand der statischen Analyse kann, obwohl Störeinflüsse fehlen, unerreicht sein, da es sich um ein instabiles Gleichgewicht („instable equilibrium“) handelt.

¹⁶ * Fritz Machlup, „Equilibrium and Disequilibrium: Misplaced Concreteness and Disguised Politics,“ *Economic Journal*, March 1958, p. 9. (Reprinted in F. Machlup, *Essays on Economic Semantics*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1963) in Chiang 1984: *Fundamental Methods of Mathematical Economics*, 1984 S. 35ff..

delt. Dies ist der Fall, wenn der Anpassungsprozess die Variablen vom Gleichgewicht weg anstatt zu ihm hin bewegt. Bleibt der Anpassungsprozess unberücksichtigt, so wird die wichtige Frage der Erreichbarkeit und Stabilität eines Gleichgewichts nicht beantwortet (→ dynamische Analyse).

Bei komplexen Gleichgewichtsmodellen und einer Vielzahl möglicher Gleichgewichte ist die Qualifizierung / Beurteilung eines bestimmten Gleichgewichts schwierig, da diese erst nachträglich erfolgt. Es ist zudem unklar, ob ein bezüglich einer allfälligen Zielgrösse besseres Gleichgewicht überhaupt existiert.

Die Berücksichtigung exogener Einflüsse, die Gleichgewichte verschieben, führt zur komparativ statischen Analyse (Chiang 1984, S. 124).

2.3.3.2 Komparative Statik

Bei der komparativ statischen Analyse (Chiang 1984, S. 127) werden Gleichgewichtszustände mit ihren assoziierten Parameter- und exogenen Variablenwerten verglichen. Ausgangspunkt ist der Zustand eines Referenzgleichgewichts, der mit einem neuen Gleichgewichtszustand aufgrund von Änderungen in Parametern oder exogenen Variablen verglichen wird. Anpassungsprozesse, Fragen der Erreichbarkeit und der Stabilität der untersuchten Gleichgewichte bleiben unbeachtet. Die Orientierung der komparativ statischen Analyse kann qualitativ oder quantitativ sein, je nachdem, ob nur die Richtung oder auch das Ausmass (beinhaltet den qualitativen Aspekt) der Veränderung interessieren. Von Interesse ist das Ausmass der Veränderung einer endogenen Variablen im Vergleich zu den Veränderungen der Parameter und der exogenen Variablen (= Derivat bzw. Differential => Rate der Veränderung), d.h. wie Parameterveränderungen den Gleichgewichtszustand des Modells beeinflussen.

Die Limiten der komparativen Statik liegen bei der Nichtbeachtung der Anpassungsprozesse zwischen zwei Gleichgewichten und bei den zugehörigen Zeitaspekten. Zudem kann wegen Modellinstabilitäten ein Gleichgewicht unerreichbar sein (Chiang 1984, S. 226).

2.3.3.3 Optimierung

Bei Gleichgewichtsmodellen muss immer die Existenz einer Lösung zuerst bewiesen werden, bei Optimierungsmodellen (Chiang 1984, S. 231) ist die Existenz einer Lösung eine Voraussetzung. Im Bereich der Optimierung, die einen Spezialfall der statischen Gleichgewichtsanalyse darstellt, gibt es komparativ statische Aspekte, indem die Auswirkungen von Parameterveränderungen auf die Werte der Entscheidungsvariablen und auf den Zielfunktionswert untersucht werden.

Gleichgewichte mit inhärenten Zielen fallen in den Bereich der Optimierungsprobleme. Probleme dieser Art sind typisch für die Ökonomie, ist sie doch im wesentlichen eine Wissenschaft der Wahl (Ausdruck von Präferenzen unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien). Märkte haben selbst keine inhärenten Ziele, sie beschreiben lediglich das Zusammentreffen von Angebot und Nachfrage. Die einzelnen Haushalte hinter der Nachfrage und die Firmen hinter dem Angebot dagegen handeln gemäss ihren Zielvorstellungen. Ist nur der Markt allein Untersuchungsgegenstand und werden von extern keine Ziele vorgegeben (preisliche Ziele etc.), so bilden Gleichgewichte die entscheidende Grösse unabhängig von Preishöhe und Menge. Deshalb bildet die Gleichgewichtsanalyse die geeignete Methode zur Untersuchung von Märkten.

Im Optimierungsproblem geht es um die optimale Position einer ökonomischen Einheit, die das Erreichen eines bestimmten Ziels als bestmögliche der Alternativen anstrebt und es kom-

men Präferenzen in der Menge möglicher Lösungen zum Tragen (Zielgleichgewichte). Ein typisches Beispiel aus der Ökonomie für ein Gleichgewicht mit Optimierung ist das allgemeine Marktgleichgewicht mit Maximierung der Wohlfahrt. Optimierungsprobleme bestehen im wesentlichen aus Zielfunktion und Entscheidungsvariablen. Während des Optimierungsvorganges wird jene Menge von Werten der Entscheidungsvariablen gesucht, die den gewünschten Extremwert¹⁷ der Zielfunktion liefert. Techniken zur Bestimmung optimaler Positionen sind der Bereich der Differentialrechnung und neuerer Entwicklungen z.B. der Bereich der mathematischen Programmierung.

Sind Zusammenhänge zwischen einzelnen Entscheidungsvariablen zu berücksichtigen oder sind diese durch exogene Grössen (limitierende Faktoren) begrenzt, so erweitert sich das Optimierungsproblem einer Zielfunktion um Restriktionen (Chiang 1984, S. 369). Neben der Verfolgung des Ziels sind die Zielerfüllung beschränkende Bedingungen zu berücksichtigen. Diese Bedingungen werden in Restriktionen abgebildet. Sie beschränken den Lösungsraum und damit den möglichen Zielerfüllungsgrad. Es lassen sich Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen unterscheiden. Optimierungsprobleme im klassischen Sinne enthalten noch keine Ungleichheitsrestriktionen und Nichtnegativitätsbedingungen (Chiang 1984, S. 431). Die Berücksichtigung solcher Restriktionen stellt eine Erweiterung dar.

Besondere Beachtung verdient im Falle der Optimierung die Frage nach lokalen und globalen Extrema. Die Bedingungen erster und zweiter Ordnung liefern nur lokale oder relative Extrema und es kann keine Aussage darüber gemacht werden, wie gut ein gefundenes Extremum ist. Zusätzliche Untersuchungen sind dann für die Identifikation absoluter oder globaler Extrema nötig. In diesem Zusammenhang ist die Konvexität eines Problems von zentraler Bedeutung (vgl. Abschnitt 4.1).

2.3.4 Zusammenhang zwischen Simulation, Gleichgewichtsanalyse und Optimierung

Simulation eignet sich zur Analyse eines Systems, zur Systembeschreibung. Die Lösung einer Simulation muss nicht eindeutig sein. Mit einer Vielzahl von Simulationen ist es möglich, den in Bezug zur Realität sinnvollen Lösungsraum, der durch die einzugebenden Modellparameter festgelegt wird, aufzuzeigen. Ohne zeitliche Dimension ergibt sich ein Zustandsraum, mit zeitlicher Dimension ein Entwicklungsraum bzw. es resultieren Entwicklungsperspektiven. Die Grundlage der Simulation bildet ein komplexer Ursache – Wirkungszusammenhang. Mit Simulationen können Auswirkungen auf interessierende Parameter aufgezeigt werden. Dies erlaubt die Analyse und die Abbildung des Handlungsspielraums von Akteuren, Systemen etc.. Der Handlungsspielraum dient als Grundlage zur Generierung von (neuen) Zielvorstellungen oder zur Diskussion bestehender. Im weiteren besteht die Möglichkeit, interessierende Fragen, die evtl. über den aktuell als sinnvollen Lösungsraum angesehenen Bereich hinausgehen, problemlos mit wenig Aufwand zu evaluieren. Dabei ist nicht primär eine bezüglich eines oder mehrerer Ziele beste Lösung von Interesse. Für solche Probleme ist der Einsatz von Programmierungsmethoden (Bsp. Optimierung) angezeigt. Programmierungsmethoden bilden somit den logischen Folgeschritt von Rechnungen mit Simulationsmodellen. Bei der Verwendung von Programmierungsmethoden können Zielvorstellungen verschiedenster Art {komplementäre, konfliktierende (substitutive, absolute) Präferenzen mit oder ohne Hierarchien} berücksichtigt und die Variablenwerte eines die Ziele optimierenden Gleichgewichtszustandes bestimmt werden. Die Zielgrösse steht als Norm da und die anderen Möglichkeiten (Erweite-

¹⁷ Im Bereich der Ökonomie wird der mathematische Begriff "Extremum" in "Minimum" und "Maximum" differenziert.

rungen) können nur durch Verwendung der Methodik der Simulation¹⁸ in einem Programmierungsmodell bestimmt werden.

Gleichgewichtsmodelle unterscheiden sich von Simulationsmodellen deutlich. In diesen steht die Existenz einer Lösung, die ein Gleichgewicht darstellt, zur Diskussion und muss bewiesen werden. Gleichzeitig stellt ein Gleichgewicht einen Ruhezustand dar, der nur durch äussere Einflüsse verändert werden kann. Das Finden eines Gleichgewichts ist ein personenunabhängiger Prozess und muss daher keinen persönlichen Zielvorstellungen genügen und auch nicht eindeutig sein. Im Zentrum steht die Frage nach der Existenz eines stabilen Zustandes bei bestimmten Rahmenbedingungen.

2.3.5 Dynamik in der Ökonomie und Analysis

Die Frage nach Anpassungsprozessen, der Einbezug der Erreichbarkeit eines Gleichgewichts und die Frage nach dessen Stabilität führen zur dynamischen Analyse (Chiang 1984, S. 435). Ist man in der Ausgangssituation infolge einer Parameteränderung nicht mehr im Gleichgewicht, so stellt sich die zentrale Frage, ob die modellinternen Kräfte zu einer neuen Gleichgewichtsposition tendieren. Die Lösung eines solchen Problems liefert auch die allfälligen Pfadcharakteristika zum Gleichgewicht. Der Begriff dynamische Analyse bezieht sich trotz der Vielfalt der Interpretationsmöglichkeiten heute meist auf spezifische Zeitpfade von Variablen, die dargestellt oder studiert werden sollen oder darauf, ob die Variablen bei verfügbarer Zeit zu einem Gleichgewicht konvergieren oder nicht. Die dem Prozess der ökonomischen Anpassung unterstellte Tendenz zum Gleichgewicht in der statischen Analyse wird nicht mehr als gegeben angenommen, sondern in Frage gestellt. Die Variablen besitzen damit eine zeitliche Dimension (diskret oder kontinuierlich) und es soll die Frage beantwortet werden, welchem Pfad die Variablen im Laufe der Zeit folgen. Für den kontinuierlichen Fall bilden Integrale und Differentialgleichungen den methodischen Ansatz, wogegen im diskreten Fall die Summenbildung und Differenzgleichungen zu benutzen sind.

Statik:

Das Problem liegt im analytischen Finden der endogenen Variablenwerte, die spezifizierten Gleichgewichtsbedingungen genügen. Im Optimierungsmodell sind die Werte der Entscheidungsvariablen so zu bestimmen, dass die Zielfunktion optimiert wird.

Dynamik:

Das Problem liegt im analytischen Aufzeigen des Zeitpfades von Variablen, deren Veränderungsmuster bekannt ist (Differentialrechnung). Für die Eindeutigkeit dieses Pfades sind Ausgangsbedingungen notwendig. In komplizierteren Fällen kommen Differentialgleichungen zur Anwendung (vgl. Kapitel 5).

Sind mehrere Differentialgleichungen vorhanden, so ist entscheidend, ob die dynamischen Variablen untereinander abhängig sind. Bei Unabhängigkeit handelt es sich um ein separierbares dynamisches Gleichungssystem, bei Abhängigkeit um ein simultanes dynamisches Gleichungssystem.

Grenzen der analytischen dynamischen Analyse liegen u.a. in der Tatsache, dass Koeffizienten in den Differential- oder Differenzgleichungen mit dem Ziel der besseren Lösbarkeit konstant gehalten werden, obwohl meist zwischen Koeffizienten und Variablenwerten bedeutende Interdependenzen bestehen. Eine Entschärfung liegt in der Möglichkeit der Verwendung einer komparativ dynamischen Analyse. Zusätzlich wird die Tendenz zur Modellvereinfachung durch Linearisierung der Realität kaum gerecht und erschwert die Interpretation

¹⁸ Vgl. Fussnote 14.

(Chiang 1984, S. 646). Lineare Modelle stellen Approximationen an die oft nichtlineare Realität dar und liefern Extremallösungen in den Entscheidungsvariablen. Eine wichtige Frage ist in diesem Zusammenhang diejenige, ob die Approximation den Anforderungen der Fragestellung genügt. Diese Beurteilung ist für die Interpretation der Resultate relevant, aber oft schwierig zu machen.

2.3.6 Mathematische Programmierung

Die mathematische Programmierung (Chiang 1984, S. 651) umfasst die Nichtlineare und die Lineare Programmierung. Eine wesentliche Eigenschaft der mathematischen Programmierung liegt in der Zulassung von Ungleichheitsrestriktionen und damit der ökonomisch sinnvollen und daher geforderten Nichtnegativität der Variablenwerte anstelle der ausschliesslichen Verwendung von Gleichheitsrestriktionen der bereits diskutierten Optimierung (vgl. Abschnitt 2.3.3.3). Dadurch werden die möglichen Modellformulierungen interessanter und realistischer.

Beschränkungen der Methode der mathematischen Programmierung liegen wie bei den anderen erwähnten Methoden in der statischen Natur der Lösung, ausgedrückt in einem Lösungsvektor, der sich auf einen Zeitpunkt oder eine Periode mit konstanten Rahmenbedingungen bezieht und in der geforderten Kontinuität der Entscheidungsvariablen. Letzteres wird erst durch die ganzzahlige oder gemischtganzzahlige Programmierung behoben (Chiang 1984, S. 754).

Ein dynamisches Optimierungsproblem beantwortet dagegen die Frage nach dem optimalen Zeitpfad der einzelnen Variablen im Betrachtungszeitraum. Dies bedingt aber entweder Kenntnisse im Bereich der Variationsrechnung, der Theorie der optimalen Kontrolle (vgl. Abschnitt 4.2.7) oder der dynamischen Programmierung. Bereits einfache Probleme sind schwierig zu analysieren und zu lösen. Häufig verwendete Annahmen bezüglich Parameterkonstanz verlangen eine kritische und eingehende Prüfung (Chiang 1984, S. 313).

Generell gilt, dass jede Analysemethode ihre spezifischen Stärken und Schwächen hat. Korrekt angewendet und interpretiert kann jede Methode ihren Beitrag zum Studium ökonomischer Phänomene leisten (Chiang 1984, S. 646). Die Kenntnis der Grenzen der einzelnen Methoden ist aus folgenden Gründen wichtig: "The purpose of this is not, of course, to discredit the mathematical methods,; rather it is to caution you not to attribute to them a degree of omnipotence they do not possess. Indeed, it is an essential part of learning always to have a clear awareness of the limitations of the analytical methods you study, because without it you could become a slave to the techniques rather than their master!" (Chiang 1984, S. 755).

2.4 Schlussfolgerungen für die Modellierung der Erosion

Das Kapitel 2 behandelt Grundlagen der Modellierung aus allgemeiner Sicht. Wesentliche Aspekte der Modellierung werden im folgenden mit Blick auf die Modellierung der Erosion angesprochen. Diese Aspekte stellen Anforderungen an die Modellierung der Erosion dar.

- Das Betrachtungssystem für die Modellierung ist klar abzugrenzen. Im Falle der Erosion ist der Standort mit seinen Eigenschaften zu definieren und es sind die entsprechenden Daten zu beschaffen (vgl. Abschnitt 6.1 Teil 2 und Abschnitt 12.2.2 im Teil 3).
- In der Modellierung ist der Abstraktionsprozess von der Realität sehr sorgfältig mit Blick auf die zu beantwortenden Fragen durchzuführen. Für den Bereich Erosion stellt sich die Frage nach dem Handlungsspielraum des Akteurs und dem Detaillierungsgrad im ökonomischen Bereich und im biophysikalischen Bereich des Bodens (vgl. Kapitel 8 im Teil 2 und Abschnitt 12.2.2 im Teil 3). Aus Sicht der Methodenwahl handelt es sich bei Opti-

mierungsmodellen um normative Modelle, die sich auf Daten aus der Anwendung positiver Methoden abstützen (vgl. Kapitel 9).

- Der Modellzweck ist vor dem Modellbau zu klären. Das zu bauende Erosionsmodell muss eine einzelbetriebliche Analyse des Erosions- und Phosphorproblems und die Analyse von Massnahmen unter privater und sozialer Perspektive erlauben (vgl. Abschnitt 12.1 im Teil 3 und Kapitel 9 im Teil 2). Zwecks Abbildung des Akteurverhaltens soll für das Erosionsproblem zusätzlich ein rekursiver Ansatz in Betracht gezogen und mit der simultan dynamischen Analyse verglichen werden.
- Der Modellbau selbst ist ein strukturierter Prozess. Bei jeder Modellierung sind die in den Abschnitten 2.2.5 und 2.2.6 dargestellten Modellierungsprinzipien zu beachten. Der Teil 2 „Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung“ versucht diese Prinzipien für den Fall der Erosion umzusetzen.
- Unter den verschiedenen Modellarten (vgl. Abbildung 3) eignen sich die formal-mathematischen Modelltypen für eine quantitative Analyse und zur Entscheidungsfindung. Die weitere Differenzierung dieser Modelltypen ist in statisch/dynamisch und deterministisch/stochastisch vorzunehmen. Stehen Fragen des Anpassungsprozesses, der Erreichbarkeit und Stabilität eines Gleichgewichtes zur Diskussion, so ist eine dynamische Analyse angezeigt. Die mathematische Programmierung liefert mit der Linearen und Nichtlinearen Programmierung deterministische Methoden zur Analyse quantitativer dynamischer Optimierungsprobleme. Für die Analyse des Erosions- und Phosphorproblems erscheint ein dynamisches Optimierungsmodell geeignet, dessen biophysikalischer Teil aber sehr präzise formuliert sein muss. Der biophysikalische Teil muss daher nichtlinear formuliert werden und bedingt den Einsatz der Nichtlinearen Programmierung.
- Die Qualität eines Modells setzt sich aus den Komponenten Modellrelevanz und Modellvalidität zusammen. Der Modellierungsprozess für die Erosion muss strukturiert und transparent (vgl. Teil 2) erfolgen und das der Analyse zugrunde liegende Modell muss theoretisch korrekt sein (vgl. Kapitel 11). Dabei muss das Modell bekannte Tatsachen und Problemsituationen korrekt und klar abbilden, bei Änderung bestimmter Modellgrößen konsistente Resultate liefern, in Spezialfällen voraussagbare und begründbare Ergebnisse ausgeben und bei bekannten Wirkungen müssen die Ursachen zugeordnet werden können. Die Interpretation der Resultate aus den Modellkalkulationen zum Erosions- und Phosphorproblem muss aus theoretischer und ökonomischer Sicht nachvollziehbar sein.

3 Modellierungsansätze im Bereich Ressourcenökonomie

Die Behandlung von Fragen aus dem Bereich der Erosion fällt aus ökonomischer Sicht ins Fachgebiet der Ressourcenökonomik. Analysen finden in diesem Fachgebiet auf verschiedenen Ebenen und mit verschiedenen Modellierungsansätzen statt. Die Wahl der am besten geeigneten Modellierungsebene hängt von der Fragestellung ab. Je nach Fragestellung ist ein einzelbetrieblicher Ansatz, ein regionaler Ansatz oder ein sektoraler Ansatz zu wählen. Zur Analyse der einzelbetrieblichen Auswirkungen der Erosion genügt ein einzelbetrieblicher Modellierungsansatz (Bsp. Louhichi et al. 1999, Schmid et al. 1997). Sind ausserhalb des Einzelbetriebs auftretende Auswirkungen betrieblicher Aktivitäten wichtig (Beispiel Belastung von Gewässern), so ist ein regionaler Modellansatz angezeigt (Bsp. Fleming und Adams 1997, Wu et al. 1995). Regional kann im Falle der ausserhalb des Betriebes auftretenden Auswirkungen der Erosion auf ein Gewässer auch das Wassereinzugsgebiet bedeuten. Politikmassnahmen können auf verschiedenen Ebenen (lokal, regional, national) eingeführt werden. Haben Massnahmen zur Eindämmung des Erosionsproblems Auswirkungen auf Märkte, so ist ein sektoraler Ansatz zu wählen (Bsp: Ribaud et al. 1994, Alfsen et al. 1996). Ausser beim einzelbetrieblichen Ansatz gehen die Modellierungsansätze auf höherer Ebene von einer aggregierten Betrachtung aus, da nicht alle Einzelbetriebe isoliert modelliert werden können und Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind. Die Aggregation stellt wegen der Heterogenität der Betriebe und bei Auswirkungen der Entscheide auf Märkte spezielle Anforderungen an die Vorgehensweise.

Abschnitt 3.1 beschreibt diverse ressourcenökonomische Modellierungsansätze auf sektoraler Ebene. Diese eignen sich oft auch für die regionale Ebene, wenige für die einzelbetriebliche Ebene. Da die Ursachen von Umweltproblemen (Erosion und P-Eintrag in die Gewässer), die aus der Ressourcennutzung entstehen, meist nicht von individuell identifizierbaren Verursachern ausgehen, behandelt Abschnitt 3.2 vertieft die Frage der Aggregation bzw. der aggregierten Darstellung in einem Modell.

3.1 Ressourcenökonomische Modellierungsansätze

Taylor und Howitt (1993) vergleichen 8 verschiedene ressourcenökonomische Modellierungsansätze¹⁹ für aggregierte Modelle zur Analyse der Wirkungen von Politikmassnahmen auf sektoraler Ebene. Die Autoren betonen die Bedeutung einer aggregierten Betrachtung, da sich Politikmassnahmen je nach Ebene ihrer Implementation auf Märkten auswirken:

- a) Konventionelle partielle Budgetierung
- b) Aggregierte partielle Budgetierung
- c) Ex post ökonometrische Modelle
- d) Kleine ökonometrische Simulationsmodelle
- e) Grosse ökonometrische Simulationsmodelle
- f) Allgemeine Gleichgewichtsmodelle auf Computern
- g) Auf linearen Elastizitäten basierte Modelle
- h) Interregionale Programmierungsmodelle

¹⁹ Eine detaillierte Beurteilung der Eignung verschiedener aggregierter Modellansätze zur Analyse spezifischer Ressourcenpolitiken liefern Taylor und Howitt 1993 in Tabelle 4.2 S. 154.

Die Modelltypen a-b sind positive Modellansätze oder zumindest vorwiegend positiv orientiert. Sie bilanzieren Auswirkungen meist ohne Berücksichtigung von Interdependenzen und inhärenten Zielen. Eine Eignung zur Analyse von Ressourcenpolitiken ist nur bei vernachlässigbaren Auswirkungen auf aggregierte Größen wie Input und Output gegeben. Mit dem ökonometrischen Ansatz werden Abhängigkeiten unter Zugrundelegung eines bestimmten Modells des ökonomischen Verhaltens bestimmt. Sie sind meist ex post orientiert. Die Relevanz hängt von der Variabilität der Datenlage für die zu untersuchende Ressourcenpolitik ab. Simulationsmodelle bilden Auswirkungen von Veränderungen in den Aktivitäten ab. Das Ziel ist nicht eine Veränderung in Richtung der bestmöglichen Zielerfüllung. Je nach Auswirkungen von Variablenänderungen auf andere Variablen ist ein hoher Detaillierungsgrad erforderlich. Auch bei Gleichgewichtsmodellen steht eine bestmögliche Zielerfüllung nicht im Zentrum des Interesses. Wie auch der Modelltyp g ist dieser Modelltyp meist nicht dynamisch und nicht regionalisiert. Die Modelltypen a-g sind für die aggregierte Evaluation von Ressourcenfragen schlecht bzw. nur für einzelne Fragestellungen bedingt geeignet (v.a. Erosion, Wasserqualität). Der Ansatz h des interregionalen Programmierungsmodells ist der geeignetste Modellansatz für Fragen der Ressourcenpolitik.

Die Verwendung eines interregionalen Programmierungsmodells in einem dynamischen Ansatz erlaubt die Bearbeitung von Fragen der Entwicklung regionaler Landwirtschaften bei künftigen Rahmenbedingungen unter Nutzung des unternehmerischen Handlungsspielraumes und damit das Studium der Strukturentwicklung auf der Basis eines Einzelakteurs.

Neben Budgetierung, Ökonometrie, Simulation und Programmierung (linear, nichtlinear, stochastisch) werden in der Literatur noch weitere Methoden zur Analyse ressourcenökonomischer Fragestellungen angewandt, wie die theoretische Analyse (Saliba 1985), die Kosten-Nutzen Analyse (Johnson 1993), die Gleichgewichtsanalyse (Coxhead und Jayasuriya 1995) oder statistische Methoden (Regressionsanalyse: Van Vuuren 1986).

Taylor und Howitt (1993) folgern S. 153: „Interregional Programming is for aggregate evaluation of erosion policies and water quality policies the best option“. Der Programmierungsansatz ist auf der sektoralen, regionalen und einzelbetrieblichen Ebene zur Analyse des Erosionsproblems bestens geeignet. Wegen der sehr grossen Bedeutung auf sektoraler Ebene und der auch auf regionaler Ebene zu klärenden Frage der Aggregation werden die interregionalen Programmierungsmodelle im folgenden noch weiter diskutiert. Wesentlich ist, dass im Fall der nicht einzelbetrieblichen Modellierung ein bestimmter Aggregationsgrad erforderlich ist.

Obwohl die interregionale Programmierung als der beste Ansatz bezeichnet wird, besitzt er wie die anderen Ansätze Vor- und Nachteile. Diese werden im folgenden kurz erläutert.

Vor- und Nachteile von interregionalen Programmierungsmodellen

Einen Vergleich der Eigenschaften von aggregierten Modellen zur Behandlung von Fragen der Ressourcenpolitik zeigt Tab 4.1 in Taylor und Howitt (1993, S. 153). Der Modellansatz der interregionalen Programmierung ist am besten geeignet u.a. auch, weil relevante Beziehungen als Restriktionen abgebildet werden können. Im Unterschied zu den oben erwähnten Modelltypen a-g ist der Einsatz für verschiedenste Aspekte der Ressourcenpolitik geeignet. Der Modelltyp wird jedoch selten für die Bestimmung von Markträumungspreisen eingesetzt und es ist speziell darauf zu achten, dass über zuviele Flexibilitätsrestriktionen der normative Modellansatz nicht zu einem Buchhaltungsmodell wird. Der Ansatz ist normativ und auf ex ante Fragestellungen ausgerichtet, erfordert jedoch einen sehr grossen Datenbedarf. Eine Dynamisierung erfordert einen zusätzlichen Aufwand. Möglichkeiten im Bereich der Risikoaversion der Produzenten, der Verbindung zu Faktormärkten, der Internationalisierung und der Partizipation an Produktionsprogrammen sind gegeben. Ökonomische Auswirkungen im Be-

reich der aggregierten Effizienz sind schwierig, Verteilungswirkungen nur in Abhängigkeit der und bei geeigneter Formulierung zu schätzen.

Die Orientierung in interregionalen Programmierungsmodellen ist auf die Allokation von Flächen und weiteren verfügbaren Ressourcen ausgerichtet. Vorteile liegen im normativen Ansatz, der ex ante Aussagen ermöglicht und in der Möglichkeit der hohen Detaillierung im Restriktionsbereich. Positivierungen sind grundsätzlich möglich, jedoch nur beschränkt sinnvoll. Da Ressourcenpolitiken meist in physischen Ungleichheitsrestriktionen und nicht in Preisen definiert sind und interregionale Programmierungsmodelle Ungleichheitsrestriktionen erlauben, ergibt sich eine Übereinstimmung zwischen den Anforderungen der Fragestellung und den Möglichkeiten der Modellierung. Die im Falle von linearer Spezifikation vorausgesetzte Leontief Technologie erfordert wenig Daten, birgt aber die Gefahr von Missspezifikationen bei landwirtschaftlichen Ressourcentechnologien. Die Gefahr liegt in der zu starken Vereinfachung nichtlinearer Zusammenhänge in der Realität durch die lineare Approximation im Modell (Bsp. Zusammenhang Erosion – Ertrag) und der Tendenz zu Extremallösungen in linear spezifizierten realen Zusammenhängen. Dieses Problem kann durch die Methode der Nichtlinearen Programmierung entschärft werden. Durch die Möglichkeit der Einführung von Gewichtungsfaktoren in die Zielfunktion kann eine soziale Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt werden²⁰, was dem Modell eine grössere Offenheit verleiht. Der wohl bedeutendste Vorteil der interregionalen Programmierung liegt in der Effizienzorientierung und der Optimalität, was eine Qualifizierung der Lösung erlaubt. Wichtig ist auch die bei der Verwendung mathematischer Programmierungsmethoden resultierende duale Lösung. Die duale Lösung liefert Bewertungen von marginalen Veränderungen in der Form von Schattenpreisen und damit auch eine modellmässige Ressourcenbewertung.

Alle von Taylor und Howitt (1993) präsentierten Modellansätze, die sich für die Analyse von Fragen im Bereich der Ressourcenpolitik eignen, basieren auf aggregierten Modellen. Die Aggregationsfrage ist für die Analyse von Auswirkungen der Erosion, die sich nicht direkt auf den Einzelbetrieb auswirken, zentral. Deshalb vertieft der Abschnitt 3.2 die Frage der aggregierten Darstellung in einem Modell.

3.2 Aggregierte Darstellung in einem Modell

Sind die Auswirkungen von Veränderungen nicht auf die einzelbetriebliche Ebene beschränkt, so setzen aussagekräftige Resultate in der Anwendung von ressourcenökonomischen Modellen zur Analyse eine aggregierte Betrachtung voraus, d.h. es dürfen nicht nur Einzelakteure im Raum isoliert untersucht werden, ohne deren Interaktionen und eventuelle Auswirkungen auf Märkte zu berücksichtigen. Die Modellierung muss auf einer regionalen oder sektoralen Ebene erfolgen.

Wichtige und zu diskutierende Aspekte aggregierter Modelle sind die folgenden²¹:

- Top-down / bottom-up
- Ex post / ex ante Politikevaluation
- Modellspezifität bezüglich modellierter In- und Outputs
- Modellverbindung zur übrigen Wirtschaft
- Regionale Spezifität

²⁰ Dies setzt voraus, dass alle externen Kosten und Nutzen quantifizierbar und evtl. zusätzlich monetarisierbar sind.

²¹ Die Ausführungen stützen sich im wesentlichen auf Taylor und Howitt 1993, S. 142ff.

- Stochastische versus deterministische Modelle
- Modelltypen und grössere quantitative Techniken zur Analyse der Ressourcenpolitik

Bei Ansätzen der Modellierung kann zwischen top-down und bottom-up Ansätzen unterschieden werden. Im top-down Ansatz wird von einer globalen Betrachtung (Bsp. Schweiz als Gesamtbetrieb) ausgegangen und danach disaggregiert. Bei bottom-up Ansätzen wird von Einzellösungen (Bsp. Einzelbetrieb) auf die aggregierte Ebene hochgerechnet. Top Down Ansätze erlauben die endogene Bestimmung von Gleichgewichtspreisen, weisen aber Mängel bei Fragen der Verteilung und Effizienz auf. Im Vergleich zu bottom-up Ansätzen sind Aggregationsverzerrungen schwieriger oder überhaupt nicht zu bestimmen. Nachteile sind weiter Schwierigkeiten bei der Bestimmung von Funktionen und Beziehungen zwischen Modellsystemeinheiten. In bottom-up Ansätzen können spezifische Submodelle für Einzelakteure verwendet werden, was aber empirisch und rechentechnisch eher unrealistisch ist. Einen Kompromiss in diesem Bereich stellen repräsentative Submodelle von Akteurgruppen und deren Aggregation dar. Taylor und Howitt (1993) folgern, dass für aggregierte Modelle der bottom-up Ansatz vorzuziehen ist, zumal Aggregationsbias's (vgl. Abschnitt 3.2.2) besser quantifiziert werden können. Das SFI²² beispielsweise stellt den bottom-up Ansatz ins Zentrum der eigenen interdisziplinären Forschung, da dieser den Situationen in Marktwirtschaften besser entspricht und das Verhalten der Subjekte besser abbilden lässt als der top-down Ansatz.

Odening und Balmann (1997) formulieren weitere Vorteile des einzelbetrieblichen Ansatzes²³:

Eine gute Lösung der Analysefunktion bei Problemen und der Unterstützungsfunktion für Beurteilungen erfordert eine vertiefte und umfassende Abbildung der ökonomischen und ökologischen Wirkungszusammenhänge. Unverzichtbar ist die Modellierung auf einer "Individualebene" aus folgenden Gründen:

- Probleme bei der Übereinstimmung aggregierter Grössen (Mittelwerte) mit individuellen Produktionsentscheidungen.
- Bedarf an regional oder standortbezogen differenzierten Aussagen über Produktionsmöglichkeiten und politisch geschaffene Anreize.
- Adäquate Berücksichtigung individueller Zielstrukturen und Verhaltensweisen.
- Erfassung einzelbetrieblicher Reaktionen in ihrer gesamten Breite, einschliesslich umweltrelevanter Aspekte.
- Flächenbezogene Intensitätseffekte können bei Durchschnittsbetrachtungen unter Zugrundelegung aggregierter Verhaltensfunktionen u.U. fehlerhaft eingeschätzt werden.
- Sunk-costs führen zudem oft zu erheblichen Verzögerungen der betrieblichen Anpassungen, die bei Durchschnittsbetrachtungen zu Fehlern bei disaggregierten Aussagen führen.

Modellierungsansätze lassen sich auch bezüglich der zeitlichen Zielsetzung (ex post und ex ante Evaluation) unterscheiden, wovon auch der Typ der Variablen (endogen oder exogen) abhängt. Für ex ante Untersuchungen empfehlen Taylor und Howitt (1993) vor allem Programmierungsansätze.

Die weiteren Aspekte aggregierter Modelle sind vor Beginn des Modellbaus zu klären und festzulegen. Sie hängen mit Fragen der Systemdefinition (vgl. Abschnitt 2.1 und Kapitel 6)

²² Das Santa Fe Institute in New Mexico studiert komplexe Phänomene in den Natur- und Sozialwissenschaften und in der Mathematik (Szpiro 1998, S. 63).

²³ In Anlehnung an Odening und Balmann 1997, S. 371f.

und der Modellwahl aus zeitlicher (vgl. Abschnitt 2.2.2) und ökonomischer Sicht (vgl. Abschnitt 2.2.1) zusammen.

3.2.1 Aggregierungsmöglichkeiten in einem bottom-up Modell

In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Behandlung von Fragen auf einer höheren als der betrieblichen Stufe, bzw. wie ausgehend von Ergebnissen der Betriebs- oder Bewirtschaftungseinheiten Aussagen auf einer höheren Stufe gemacht werden können ("bottom-up" - Ansatz). Es kann unterschieden werden zwischen:

- der getrennten Modellierung von Einzelbetrieben und nachträglicher Hochrechnung und
- der simultanen Modellierung von Einzelbetrieben / Regionshöfen in einem Sektormodell.

Diese Ansätze der Aggregierung werden in den Abschnitten 3.2.1.1 und 3.2.1.2 für regionale und sektorale Modelle auf der Grundlage von Beispielen aus der Literatur vorgestellt.

3.2.1.1 Optimierung von Einzelbetrieben und Hochrechnung

3.2.1.1.1 Virtuelle Agrarregion durch Minimierung der Abweichungen von Regionsmerkmalen

Balman et al. (1998, S. 222-230) benützen einen einzelbetrieblich gestützten Modellansatz zur Bestimmung der regionalen Auswirkungen einzelbetrieblicher Anpassungsreaktionen. Sie rechnen mittels einer Gewichtung typischer Betriebe auf eine virtuelle Regionsstruktur hoch. Der Ansatz erlaubt z.B. die Einbindung der Mengen auf der Angebots- und Nachfrageseite in ein Marktmodell. Die sich ergebenden Preise fließen wieder in die Betriebsmodelle ein, womit aus einem iterativ rekursiven Prozess simultan Gleichgewichtsmengen und –preise bestimmt werden können. Die Autoren bezeichnen ihren dargestellten Modellansatz als Hybridmodell.

Für die Festlegung der Gewichtungsfaktoren berücksichtigen die Autoren die regionalen Merkmale der Betriebsstrukturen mit den Faktoren der Organisations- und Betriebsform, der Faktoreinsatzmengen, der Anbauflächen, der Tierbestände und der Produktionsumfänge. Minimiert wird die Abweichung der statistischen Ausprägung der regionalen Merkmalsfaktoren in der ausgewählten Region im Bezugsjahr von der durch die gewichtete Aggregierung der Modellbetriebe erzeugten virtuellen Agrarregion. In jeder Region hat ein bestimmtes Merkmal ein Gewicht. Durch Multiplikation des Merkmalsbeitrages eines Modellbetriebes an das regionale Merkmal mit dem regionalen Merkmalsgewicht entsteht ein relatives Gewicht pro Betriebstyp. Durch dessen Multiplikation mit der Betriebszahl und der Summierung über alle Betriebstypen (Minimierung der Abweichung liefert Anzahl Betriebe pro Betriebstyp) entsteht das Gewicht des Merkmals in der virtuellen Betriebsstruktur. Dieses sollte möglichst wenig vom realen Merkmalsgewicht abweichen, was durch die Minimierung der Abweichungsquadrate erreicht wird.²⁴

Die "typischen" Betriebe werden mit Expertenwissen und auf der Basis von Statistiken generiert. Die Hochrechnung der mit inflexibler Faktorstruktur optimierten Betriebstypen liefert die Anzahl jedes Betriebstyps, die zusammen die virtuelle Betriebsstruktur bilden (Minimierung der relativen Merkmalsabweichungen). Diese Betriebszahlen werden im Zeitablauf konstant gehalten. Mittel- und langfristig ist diese Konstanz aber anzuzweifeln.

²⁴ Die mathematische Darstellung des Verfahrens zur Bestimmung der Betriebszahlen je Modellbetrieb für die virtuelle Region ist in Odening und Balman 1997, S. 371-383 zu finden.

Ein Vorteil der Fundierung eines Sektormodells auf typischen Betrieben liegt nach Balmann et al. (1998, S. 223) darin, „dass der Aggregationsproblematik weitgehend aus dem Weg gegangen werden kann“. Je heterogener eine Betriebsstruktur ist, umso schwerwiegender ist zudem die Aggregationsproblematik.

Schwierigkeiten bereitet beim Ansatz das Problem der extremen Lösungen in linearen Programmierungsmodellen. Die Abweichungen von den Regionsmerkmalen bei der Hochrechnung werden zwar minimiert, aber es können sehr wohl durch die Extrem Lösungen einzelbetrieblicher LP-Modelle Extremwerte bei der Aggregation entstehen. In iterativen Verfahren müssen den vorgegebenen Gleichgewichtspreisen nicht entsprechende Mengen in Marktmodelle eingegeben werden und Neuberechnungen durchgeführt werden, bis Gleichgewichte erreicht sind. Die regionale Repräsentativität bezüglich der definierten Regionsmerkmale wird durch eine gewichtete Aggregation nicht repräsentativer Betriebe erreicht. Die sich ergebenden Betriebszahlen sind aber kaum repräsentativ, so dass auch die aggregierten Wirkungen einzelner Betriebsergebnisse vermutlich verzerrte oder zumindest diesbezüglich nicht qualifizierbare Resultate liefern werden.

3.2.1.1.2 Modelle auf der Basis von Betriebstypen

Modelle auf der Basis von Betriebstypen²⁵ erheben einen Anspruch auf Repräsentativität bezüglich der Gruppe von Betrieben, die sie repräsentieren.

Ansatz über Modelle repräsentativer Betriebstypen:

Der Ansatz repräsentativer Betriebsmodelle ist eine flexible Alternative zu grossen simultanen linearen Gleichgewichtsmodellen (simultaner Mehrgüter Gleichgewichtsansatz). Die repräsentativen unabhängigen Betriebsmodelle sollten den ganzen analysierten Landwirtschaftssektor repräsentieren. Nach der individuellen Optimierung werden die Betriebsergebnisse durch eine evtl. gewichtete Addition auf den Landwirtschaftssektor hochgerechnet. Jedes Betriebsmodell repräsentiert eine Gruppe von realen Betrieben oder kann als zufälliges Stichprobenelement interpretiert werden. Der betriebliche Entscheider trifft seine Entscheidung völlig unabhängig von Interaktionen mit anderen Betrieben. Dies erfordert, wenn die Hochrechnung starke Marktungleichgewichte ergibt, Neuberechnungen (iteratives Vorgehen). Werden die Ungleichgewichte nicht korrigiert, müssen über ein alternatives Modell die Ungleichgewichtsmengen auf die Betriebsmodelle aufgeteilt werden (Zufallszahlengenerator). Ohne Bereinigung können keine Schlüsse auf Sektorebene gezogen werden.

Wossink (1993) benutzt in ihrer Arbeit mit dem Titel "Analysis of future agricultural change" ein einperiodisches umweltökonomisches LP-Modell repräsentativer Betriebstypen mit Feedback Modulen (externe Informationen zu Ergebnissen: Bsp. Landtransfer zwischen Betrieben). Der umweltökonomische Bereich umfasst den Input und die Emissionen von Pflanzenschutzmitteln und Nitrat. Die Berücksichtigung von Input- und Outputmärkten wird wegen der nicht sektoriellen Aggregationsstufe als nicht zwingend erachtet.

Die repräsentativen Betriebstypen werden mittels Clusteranalyse bestimmt (Wossink 1993, S. 74ff). Die Methode der Clusteranalyse eignet sich, den durch die Verwendung repräsentativer Betriebstypen anstelle der einzelnen Betriebe unvermeidlichen Aggregationsbias zu minimieren (technisch homogene Betriebe mit gleichen Aktivitäten und Input-Output Beziehungen sowie mit proportionalen Faktorausstattungen und Gewinnerwartungen). Sie erlaubt die elementare Gruppierung und liefert die Datengrundlage für Restriktionen und Aktivitäten des Betriebstypenmodells. Ein Aggregationsverfahren von Einzelbetrieben auf die regionale Ebene wird vorgeschlagen aber nicht umgesetzt.

²⁵ Die Ausführungen stützen sich im wesentlichen auf Hanf 1989.

Probleme bereiten die Bestimmung der Gewichtungsfaktoren für die Hochrechnung, damit Aggregationsfehler vermieden werden und vor allem die Eigenschaft linearer Programmierungsmodelle, dass sich bei der Optimierung extreme Lösungen ergeben.

Ansatz über Regionshofmodelle:

Regionshöfe beschreiben das Produktionspotential eines Produktionsgebietes und sind durch diskrete Raumpunkte repräsentiert. Dadurch werden die spezifischen Produktionsbedingungen der einzelnen Regionen und Betriebsgruppen berücksichtigt. Für die jeweiligen Teilregionen und Gruppen sind strenge Homogenitätsvoraussetzungen notwendig, zwischen den Teilregionen und Gruppen sind differenzierte Produktionsfunktionen und Faktorausstattungen möglich. So kann eine Angebotsfunktion modelliert werden, die durch die Technologie, den Faktorbestand, die Angebots- und Nachfragebedingungen vor- und nachgelagert und die Zielsetzungen und Verhaltensweisen der Akteure bestimmt ist. Ein Modell mit Regionshöfen ist eine nach Produkten, Faktoren und Betriebsgruppen disaggregierte Form eines Sektormodells. Den realen Verhältnissen kann man sich beliebig annähern, wenn man nur die Regionen beliebig klein wählt (Andreae 1977, S. 131ff). In diesem Sinne kommt der Ansatz den repräsentativen Betriebstypen nahe bzw. entspricht diesem bei genügend differenzierter Wahl der Region.

Die Definition einer grossen Zahl von Regionshöfen ist notwendig, um eine ausreichende Differenzierung und für die Optimierung eine genügende Flexibilität zu erreichen. Die Differenzierung ist für die Interpretation der räumlichen und zeitlichen Inzidenz wesentlich. Eine genügende Flexibilität ist bei sich stark verändernden Rahmenbedingungen für aussagekräftige Resultate unerlässlich. Je geringer die Anzahl Regionshöfe, umso grösser ist das Problem der extremen Lösung in linearen Programmierungsmodellen.

Ansatz über Farm-Sample Modelle:

Modelle aus betrieblichen Stichproben (Farm-sample) erheben keinen Anspruch der Repräsentation des Sektors (kein Aggregations-, aber ein vermutlich kleinerer Stichprobenfehler). Ein Vorteil liegt in der Berücksichtigung, dass Entscheide mit unterschiedlichem Zeithorizont auf Betriebsebene getroffen und in unterschiedlicher Häufigkeit wiederholt werden müssen. Der Freiheitsgrad der Entscheidungsfindung hängt zudem vom Familienzyklus und der Lebensdauer der Investitionen ab. Rekursive oder iterative Verfahren helfen, eine gewisse Koordination mit der sektoriellen Entwicklung zu erreichen. Als Daumenregel sollten für jede Betriebsgruppe, für die Aussagen gemacht werden sollen, 20-25 Betriebsmodelle gerechnet werden. Gemäss Hanf 1989 S. 15 sollte eine 100x100 Matrix zur Darstellung der meisten Anpassungsmöglichkeiten reichen.

Vorteile der Farm-Sample Modelle liegen in der höheren Flexibilität, in den nicht auftretenden Aggregationsfehlern und in der Beachtung der Entscheidungsfindung in der Zeit. Beim Farm-Sample Ansatz besteht aber ein Stichprobenfehler. Hinzu kommt, wenn nicht auf der Basis der Grundgesamtheit die Stichprobe gezogen wird, bei den aggregierten Modellergebnissen ein systematischer Fehler. Das Problem der Extremallösung in der LP kann zwar durch eine grössere Anzahl von Betrieben entschärft aber nicht vermieden werden.

3.2.1.2 *Optimierung auf aggregierter Ebene*

3.2.1.2.1 *Gleichzeitige Optimierung verschiedener Betriebstypen*

In Modellen, die verschiedene Betriebseinheiten simultan optimieren²⁶, kommen als Basis-einheiten die im Abschnitt 3.2.1.1 erwähnten Darstellungsformen der Landwirtschaft (repräsentative Betriebe, Regionshofmodelle) in Frage. Der Modelltyp besteht aus mehreren Betriebsmodellen (bottom-up Sektormodell). Zusätzlich zur einzelbetrieblichen Optimierung beachtet dieses Modell die gegenseitigen Abhängigkeiten, die sich aus der Konkurrenz auf Produkt- und Faktormärkten ergeben. Gemeinsam ist diesem Ansatz und dem Ansatz über Regionshofmodelle, dass der Landwirtschaftssektor durch ein Set unterschiedlicher Entscheidungseinheiten repräsentiert wird. In Modellen mit gleichzeitiger Optimierung verschiedener Betriebstypen wird im Prinzip eine gemeinsame sektorale Gewinn- oder Nutzenfunktion anstelle der individuellen optimiert. Ein Problem liegt darin, dass die modellmässige simultanen Interaktionen in der Realität mit time-lags verbunden sind.

Betriebstypenmodelle stehen für statistisch repräsentative Betriebe. Mögliche Kriterien sind die Bodenqualität, das Produktions- und Ertragsniveau der Betriebe sowie deren Faktorausstattung. Das einzelne Modell ist ein für eine Gruppe von Betrieben repräsentativer Betriebstyp (Gruppenhof: vgl. Bernegger 1996, S. 51). Rieder (1972, S. 18ff) verwendet in seinem Sektormodell den Ansatz repräsentativer Betriebstypen. Die landwirtschaftliche Nutzfläche wird in 5 Regionen unterteilt, für die je homogene Ertragsverhältnisse vorausgesetzt werden. Betriebstypen werden nach den Kriterien für Flächenanteile im Ackerbau, nach klimatischen Verhältnissen für den Ackerbau und nach Hangneigungen differenziert. Gemäss diesen Kriterien werden verschiedene Betriebstypen pro Region gebildet und entsprechend diesen verschiedene Subregionen. Deckt ein solcher Betrieb die ganze Region ab, handelt es sich um einen Regionshof. Der Betriebstyp wird zusätzlich an günstigeren Standorten zugelassen, was den Unterschied zum Regionshof ausmacht (Rieder 1972, S. 72ff). Ein Betrieb kann mit seiner Fläche eine ganze Region abdecken. Mittels einer "Hilfsvariablen" mit dem Koeffizienten der Betriebsfläche wird dann die Betriebszahl bilanziert und mit der Betriebszahl werden betriebsabhängige Grössen bilanziert (Bsp. Arbeitsleistung der Betriebsleiter (Rieder 1972, S. 44ff). Die Folge dieser Formulierung ist, dass keine Entwicklungen in Koeffizienten abgebildet werden dürfen, da die Aktivitäten des Betriebes Grössenordnungen im Regionsrahmen annehmen.

Die in einer räumlichen Einheit konkurrenzfähigsten Betriebe füllen den Raum bei Verwendung der Methode der Linearen Programmierung maximal aus (lineare Homogenität durch Verwendung der Leontief Technologie). Dies ist ein bedeutender Nachteil der Formulierung, da ohne Vorgabe der Betriebszahlen in jeder Region jeweils nur der konkurrenzfähigste Betrieb in der Lösung erscheint, ausser es wirken zusätzliche Restriktionen bindend (Bsp. Milchkontingent). Bei der simultanen Optimierung aller Betriebe entsteht zusammengefasst das Problem der Spezialisierung der rentabelsten Kulturen (ohne Berücksichtigung des Marktes) auf den rentabelsten Betrieben.

3.2.1.2.2 *Nicht homogene Betriebe und unvollständige Information über Betriebscharakteristika*

Önal und McCarl (1989) beschreiben ein empirisches Verfahren für den Fall heterogener Betriebstypen und unvollständiger Datenlage bezüglich der betrieblichen Charakteristika einzel-

²⁶ Die Ausführungen stützen sich im wesentlichen auf Hanf 1989.

ner Betriebstypen. Das Vorgehen basiert auf einem Dekompositionsansatz, der den unvermeidlichen Aggregationsfehler zu reduzieren hilft. Die Aggregationsaktivitäten bilden dabei die Summe individueller in einer Region beobachteter Entscheidungen. Der Vorteil liegt bei der theoretischen Fundierung in der mathematischen Theorie (Dekomposition von Programmierungsproblemen) und dies eliminiert den Aggregationsfehler. Das aggregierte Modell ist zudem von bescheidener Grösse und kann bei fehlenden Microdaten auf aggregierter Datengrundlage aufgebaut werden. Die Grundlage dazu ist die Extrempunktdarstellung linearer Systeme. Dabei werden die Koeffizienten der Aggregationsaktivitäten für die Bilanzierungsrestriktionen aus den Lösungen verschiedener Betriebstypen bei den auf aggregierter Ebene relevanten Rahmenbedingungen berechnet. Eine Konvexitätsrestriktion garantiert den Verbleib im zulässigen Lösungsraum. Ein alternativer Ansatz berechnet die Koeffizienten der Aggregationsaktivitäten auf der Basis historischer Daten der aggregierten Ebene (zulässiger Lösungsraum). Dieser Ansatz entschärft das Problem der unvollständigen Information. Es muss im Prinzip in beiden Ansätzen lediglich die Summe der zulässigen Ausprägungen über alle heterogenen Betriebe bekannt sein. Im zweiten Ansatz ist der Vergangenheitsbezug ein Problem, da dieser den zulässigen Lösungsraum im Falle stark veränderter Rahmenbedingungen beschränkt.

Ein sich ergebendes Problem ist, dass kaum detaillierte Aussagen über das Verhalten unterschiedlicher individueller Betriebstypen bei Rahmenbedingungsänderungen gemacht werden können und bei hochdetaillierten Modellen, wie sie für Nachhaltigkeitsfragen erforderlich sind, ein sehr grosser Aufwand entsteht.

3.2.1.3 Vergleich getrennter und simultaner Optimierung

Die Ansätze der Optimierung von Einzelbetrieben mit nachfolgender Aggregation und die Optimierung auf aggregierter Ebene besitzen Vor- und Nachteile. In der folgenden Auflistung erscheinen ex- oder implizite Elemente einer Sektormodellstruktur mit einer Bewertung in Bezug auf die getrennte oder simultane Optimierung in einem aggregierten Modell (Hanf 1989, S. 17ff):

- Beschreibung des ökonomischen Verhaltens der Produzenten: Farm-Sample Ansatz ist am besten geeignet, die Diversität und Vielfalt der Verhaltensweisen der Landwirte abzubilden (Zeit, Risiko etc.).
- Beschreibung der Produktionsfunktion: meist lineare Beschreibung. Aggregationsfehler (Probleme bei gruppenspezifischer Interpretation) versus Stichprobenfehler beim Farm-Sample Ansatz.
- Definition der Ressourcenausstattung: dito
- Spezifikation der Marktumgebung: die Berücksichtigung der gegenseitigen Interdependenzen ist ein gewaltiger Vorteil der simultanen Sektormodelle. Die Realität mit nicht perfekten Märkten schwächt diesen Vorteil aber wieder ab.
- Raum: simultane Sektormodelle haben zur Berücksichtigung von Transportkosten deutliche Vorteile. Diese haben aber zunehmend weniger Gewicht.
- Zeit: Entscheidungen werden zu einem bestimmten Zeitpunkt auf der Basis von Erwartungswerten (differieren von Markträumungspreisen) getroffen mit unterschiedlichen time-lags. Nur langfristig ist der erwartete Preis mit dem mittleren Markträumungspreis identisch. Die Berücksichtigung von time-lags in Modellen ist wichtig. Farm-Sample Modelle besitzen diesbezüglich grosse Vorteile.

- Information: Unvollständige Information kann teilweise durch Erwartungswerte und Risikoüberlegung modelliert werden. Dies ist einfacher in Farm-Sample Modellen. Falls kein Gleichgewichtspreis existiert, sondern Preisdispersion vorherrscht, ist der simultane Ansatz ungeeignet.

Vorteile des Farm-sample Ansatzes:

- bei starken Abweichungen von perfekten Marktbedingungen
- bei starker Abweichung des Verhaltens der Landwirte vom ausschliesslichen Gewinnmaximierungsprinzip
- falls Anpassungsprozesse und Entscheidungsstrukturen in der Zeit sehr wichtig für die sektorale Entwicklung sind.

Vorteile simultaner Sektormodelle:

- falls gegenseitige Abhängigkeiten im Sektor sehr bedeutend sind.

Simultane Modelle unterliegen Aggregationsfehlern, Farm-Sample Modelle Stichprobenfehlern. Beide sind durch Erhöhung der Anzahl unterschiedlicher Betriebe reduzierbar.

3.2.2 Aggregationsprobleme aus mikro- und makroökonomischer Sicht

Wird anstelle eines einzelbetrieblichen Modells (Modell einer Bewirtschaftungseinheit) ein Modell mehrerer und unterschiedlicher Bewirtschaftungseinheiten verwendet, so stellt sich mit zunehmender Grösse des untersuchten Raumes das Problem, dass nicht mehr alle Akteurseinheiten individuell berücksichtigt werden können. Durch die Wahl bestimmter Bewirtschaftungseinheiten muss von der realen Betriebsstruktur abstrahiert werden.

"The transition from firm level to regional, industrial, or even national analysis is the source of the aggregation problem" (Sprien und Takayama 1980, S. 146). Die zentrale Frage dabei ist, ob es Bedingungen gibt, so dass bei deren Berücksichtigung bei der Darstellung einer Gruppe von Betrieben durch ein aggregiertes Modell (repräsentativer Betriebstyp) keine Information verlorenght.

3.2.2.1 Aggregationsfehler aus mikroökonomischer Sicht

Nur schon die Eigenschaft der LP, dass die optimalen Lösungen (Zielfunktion parallel zu einer Restriktion) nicht eindeutig sind, führt dazu, dass kein exaktes Aggregationsmodell existieren kann (Sprien und Takayama 1980, S. 147). Die Autoren folgern: "Given a set of N linear programming models and an aggregate model, then the aggregate model cannot satisfy exact aggregation for all price vectors ($P \geq 0$), but may be a semiexact aggregation model". Semiexakt meint dabei, dass die aggregierten Lösungen der Einzelfirmen im Lösungsraum des aggregierten Modells liegen. Dieses Problem existiert im strikt konvexen nichtlinearen Fall nicht – eine exakte Aggregation wird da möglich (Sprien und Takayama 1980, S. 150).

In der Realität ist die in Modellen für Betriebsgruppen (repräsentative Betriebstypen) für eine exakte Aggregation unterstellte Homogenität meist nicht gegeben. Zusätzlich wird meist vollständige Information über die zu aggregierenden Betriebe vorausgesetzt (Önal und McCarl 1989, S. 499). Auch diese Voraussetzung bereitet Schwierigkeiten für eine exakte Aggregation.

Das Aggregationsproblem kann mittels einer Isoquantendarstellung für den Fall linearer Modelle erläutert werden (Buckwell und Hazell 1972, S. 123f):

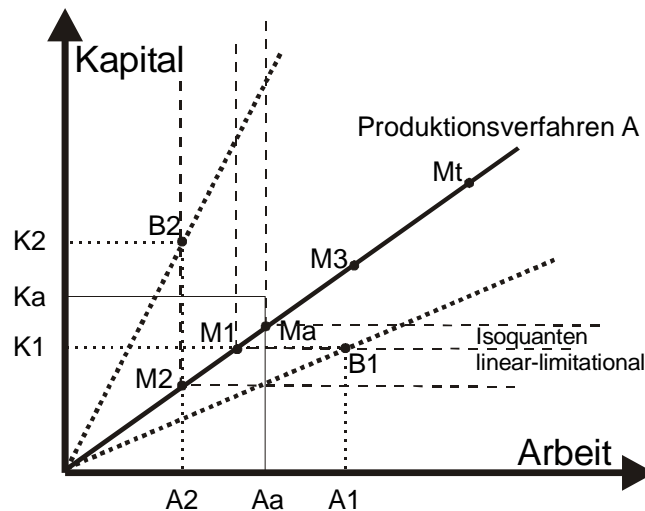


Abbildung 9: Aggregationsfehler (Quelle: abgeändert nach Buckwell und Hazell 1972, S. 124)

Abbildung 9 zeigt den Fall von 2 Betrieben B1 und B2 mit den Ressourcenausstattungen an Arbeit und Kapital von (A_1, K_1) und (A_2, K_2) . Die beiden Betriebe produzieren ein Produkt mit dem Produktionsverfahren A. Dabei ist der Betrieb B1 kapitallimitiert und der Betrieb B2 arbeitslimitiert. Die beiden gestrichelten Ursprungsstrahlen kennzeichnen theoretische Produktionsprozesse, in denen für beide Betriebe beide Faktoren limitierend sind. Der Betrieb B2 produziert mit dem Produktionsverfahren A die Menge M_2 , der Betrieb B1 mit dem gleichen Produktionsverfahren die Menge M_1 . Zusammen produzieren die beiden Betriebe die Menge $M_3 = M_1 + M_2$. Bei der Aggregation der beiden Betriebe zu einem durchschnittlichen Betrieb beträgt die Ressourcenausstattung (A_a, K_a) . Mit dieser Ausstattung kann mit dem Produktionsverfahren A die Menge M_a produziert werden, wobei die Produktion arbeitslimitiert verbleibt. Die total produzierte Menge beträgt infolge der Aggregation $M_t = 2 \cdot M_a$. Die Menge $M_t - M_3$ wird als Aggregationsbias bezeichnet und ist durch die Heterogenität der Betriebe bezüglich der Faktorlimitierung bei der Produktion mit dem Produktionsverfahren A verursacht. Durch die Mittelwertbildung gleichen sich die Faktorlimitierungen z.T. aus und erlauben eine höhere Durchschnittsproduktion. Das Problem der Gruppierung der Betriebe besteht darin, diese so vorzunehmen, dass der Aggregationsbias $(M_t - M_3)$ eliminiert wird, d.h. die Gruppen müssen möglichst identische Faktorknappheiten aufweisen.

Wossink (1993, S. 38f) definiert den Aggregationsbias wie folgt: "the error in predicting aggregate outcomes for a group of farms by using models at a certain degree of aggregation, rather than modelling each farm individually". Dadurch, dass aggregierte Modelle anstelle der Modellierung jeder einzelnen Farm verwendet werden, entstehen Fehler in der Vorhersage der Entwicklung von Farmgruppen. Es gibt zwei Aspekte zu beachten:

- **Heterogenität in einer Gruppe von Betrieben:** es sind sehr viele Mikromodelle erforderlich, um das Verhalten einer Gruppe von Farmen abzubilden. Ein Lösungsansatz liegt in der Verwendung repräsentativer Betriebstypen. Nach Day 1963 S. 802 müssen die Betriebe, die durch einen einzelnen modellierten Betriebstyp repräsentiert werden, technisch homogen sein, proportionale Ressourcenausstattungen und Kostenrelationen besitzen. Eine Methode zu deren Garantierung ist die Clusteranalyse. Bei dynamischer Betrachtung müssen die repräsentierten Betriebe auf Veränderungen von Rahmenbedingungen identisch reagieren.
- **Interaktionen zwischen individuellen Einheiten:** Diese Interaktionen finden auf den Märkten für In- und Outputs statt. Um diese zu berücksichtigen, müssen die Betriebseinheiten entweder in einem Modell kombiniert werden (Problem: die Entscheidungsfindung findet nicht auf dem regionalen sondern auf dem Microlevel statt) oder die einzelnen Mo-

dellresultate müssen aufsummiert werden (Brandes 1985, S. 83). Önal und McCarl (1989) schlagen ein schrittweises Vorgehen vor, um betriebsbezogene Restriktionen und Reaktionen im aggregierten Modell zu berücksichtigen. In einem ersten Schritt werden LP-Modelle repräsentativer Betriebstypen wiederholt in einem ausreichend weiten Set relevanter Rahmenbedingungen, die auf dem aggregierten Niveau Bestand haben, gelöst. Im zweiten Schritt werden die Resultate der individuellen Modelle für jedes Set von Rahmenbedingungen summiert und in einen Aktivitätenbereich für das aggregierte Modell übersetzt.

Der Aspekt der Interaktion zwischen individuellen Einheiten wird im Abschnitt 3.2.2.2 noch ausführlicher diskutiert.

3.2.2.2 Aggregationsfehler aus makroökonomischer Sicht

Bei der Aggregation und bei einer aggregierten Betrachtungsweise stellen sich Probleme, da Produzenten, Konsumenten, Steuerzahler im multiregionalen Mehrgüterkontext durch Entschiede der modellierten Akteure beeinflusst werden. Die Auswirkungen von Veränderungen in einem aggregierten Modell können unterteilt werden in:

Auswirkungen auf den Markt (Produzenten, Konsumenten, vor- und nachgelagerte Stufen): Preis- und Mengenbeeinflussungen auf Angebots- und Nachfrageseite durch Verschiebung von Angebots- und Nachfragekurven, Aussenhandelsbeeinflussung.

Kosten und Gewinne der Allgemeinheit (Effekte auf Steuerzahler, auf den staatlichen Finanzhaushalt): Direktzahlungen, Subventionen, Einnahmen aus Abgaben, Zöllen etc..

Externe Effekte (pekuniäre und technische): Pekuniäre externe Effekte laufen über den Markt ab: beispielsweise Preiserhöhung wegen Nachfragezunahme. Diese Effekte haben Verteilungswirkungen aber keine Fehlallokation zur Folge. Technische externe Effekte sind nicht marktmässige Interdependenzen zwischen ökonomischen Aktivitäten direkt und indirekt betroffener Akteure. Sie treten auf, wenn individuelle Nutzen- oder Produktionsfunktionen nicht monetäre Grössen enthalten. Diese Grössen werden nicht durch den Entscheid der betroffenen Person oder der Unternehmung, sondern durch jemand anderen ohne Kompensation für die verursachten marginalen Nutzen oder Schäden festgelegt. Dies stellt dann die Frage nach der Internalisierung dieser externen Effekte.

Aggregationsfehler werden im englischen Kontext als phallacy of composition (Taylor und Howitt 1993, S. 146) bezeichnet. Ein Beispiel ist das folgende: Die Einführung einer Lenkungsabgabe auf Mineraldünger wird das landwirtschaftliche Einkommen gemäss einzelbetrieblichen Modellrechnungen senken. Wird aus einzelbetrieblichen Berechnungen auf eine aggregierte Ebene (Region, Nation) hochgerechnet, so können durch den durch die Lenkungsabgabe induzierten Intensitätsrückgang und die geringere Produktion die Produktpreise steigen. Je nach Preiselastizität der Nachfrage kann sogar eine Erhöhung des sektoralen Einkommens die Folge sein, was auch Folgen auf einzelbetrieblicher Ebene hat, da höhere Einheitserlöse erzielt werden. So könnten in der Folge einer Lenkungsabgabe die einzelbetrieblichen Einkommen sogar steigen. Dies ist der zur "Agricultural Treadmill" (Rieder und Anwander Phan-Huy 1994, S. 94) gegenteilige Effekt.

Für gesamtgesellschaftliche Betrachtungen wäre aus ökonomischer Sicht die Ebene der sozialen Wohlfahrt zur Beurteilung angezeigt. Bei diesem Ansatz bereiten aber die Bestimmung der Nutzenfunktionen und deren Aggregation zusätzliche Probleme. Der Nutzen einer monetären Einheit bleibt nicht konstant. Die Beurteilung von Wohlfahrtsveränderungen durch Veränderungen bei Preisen und Mengen führt zu den Rentenkonzepten nach Hicks und Marshall (Ng 1990, S. 84ff). Mit dem klassischen Rentenkonzept ohne Kompensation kann nur gearbeitet werden, wenn marktliche Auswirkungen bzw. Veränderungen gering sind.

3.2.2.3 *Entschärfung des Aggregationsproblems*

Auf der mikroökonomischen Ebene gilt: Werden gleiche Gewinnerwartungen für alle Betriebe vorausgesetzt und besitzen die Betriebe die gleichen Produktionsfunktionen (Prozessverfahren = Ursprungsgeraden in Abbildung 9), so sind die institutionelle Proportionalität und gleiche duale Lösungsvektoren die Voraussetzungen für eine Aggregation, die keine Verzerrungen bzw. Aggregationsfehler verursacht. Die zweite Voraussetzung bedeutet, dass die Ressourcenausstattungen bei den Betrieben proportional und die Ressourcenknappheiten identisch sein müssen. Institutionelle Proportionalität ist nach Day (1963, S. 802) gegeben, wenn die Betriebe identische relative Faktorausstattungen haben und damit in Abbildung 9 S. 37 auf der gleichen Ursprungsgerade liegen. Für die ressourcenökonomische Modellierung bedeutet dies, dass auch die Ausstattung des Betriebes mit natürlichen Ressourcen zu gleichen relativen Ressourcenknappheiten führen muss.

Auf der makroökonomischen Ebene müssen Gleichgewichtspreise gegeben sein, was die Abbildung der Märkte im Modell erfordert, sofern die Preise durch veränderte Modellresultate (Mengen) beeinflusst werden. Werden Preise durch Modellaktivitäten beeinflusst, müssen diese endogenisiert sein (\rightarrow Gleichgewichtspreis). Andernfalls entstehen Verzerrungen bei der Aggregation, die zu nicht oder sehr schwer interpretierbaren Resultaten führen.

3.3 **Schlussfolgerungen für die Modellierung der Erosion**

In der Ressourcenökonomie existieren mehrere Modellierungsansätze. Die ressourcenökonomische Modellierung muss je nach Fragestellung auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Sind nur einzelbetriebliche Auswirkungen der Ressourcennutzung zu beurteilen, so ist eine einzelbetriebliche Modellierung geeignet. Entstehen durch eine Ressourcennutzung externe Effekte in Form von Verschmutzungen und sind diese zu analysieren, so ist eine regionale Modellierungsebene angezeigt. Dabei kann die regionale Ebene im Falle der Untersuchung von Gewässerbelastungen auch ein Wassereinzugsgebiet sein. Auswirkungen auf sektorale Mengen und Preise erfordern eine Modellierung auf sektoraler Ebene. Bei ressourcenökonomischen Fragestellungen ist, v.a. wenn es um die Umweltauswirkungen des Handelns von Akteuren oder die Analyse der Ressourcenpolitik geht, ein interregionaler Programmierungsansatz am geeignetsten. Da meist Auswirkungen auf die Märkte vorkommen und Umweltprobleme, die von der Landwirtschaft verursacht werden, selten auf einzelne Akteure zurückgeführt werden können, ist ein aggregierter Modelltyp in den meisten Fällen angezeigt. Dessen Formulierung erfolgt am besten gemäss dem bottom-up Ansatz. Der Aggregationsfrage ist im Rahmen der Modellierung spezielle Beachtung zu schenken, da auf mikro- und makroökonomischer Ebene mögliche Aggregationsverzerrungen zu berücksichtigen und möglichst zu vermeiden sind.

Der Fokus auf die Erosion und die Phosphorabträge legt ein Schwergewicht auf ein Feld des unternehmerischen Handlungsspielraumes, das durch gesellschaftliche Anforderungen aus dem Bereich der Ökologie zunehmende Bedeutung erhält. Gerade die Berücksichtigung von Umweltaspekten führt häufig zu Nichtlinearitäten, deren Approximation in einem linearen Programmierungsmodell schwierig ist. Dies legt den Einsatz nichtlinearer Programmierungsmethoden nahe. Programmierungsmethoden sind generell zur Analyse und Entscheidungsunterstützung für Fragen aus dem Gebiet der Ressourcenökonomie bestens geeignet.

Die auftretenden Nichtlinearitäten bei der Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen stellen aus mathematischer Sicht spezielle Anforderungen an die Lösbarkeit. Auf diese Aspekte wird im folgenden Kapitel vertieft eingegangen.

4 Mathematische Aspekte der Modellierung von Optimierungsproblemen

Programmierungsmodelle sind für den Einsatz in ressourcenökonomischen Fragestellungen bestens geeignet. Zusammenhänge im Umweltbereich sind oft nichtlinearer Natur und für die Analyse in einem ökonomischen Modell schwierig durch Linearisierung zu approximieren. Daher kommt geeigneterweise die Nichtlineare Programmierung zur Anwendung. Bei nichtlinearen Programmierungsmodellen ist die Frage der Lösbarkeit und der Qualität der Lösung von zentraler Bedeutung. Für die Beurteilung ist die Konvexität des Problems entscheidend. Dabei ist die Konvexität bei Funktionen von derjenigen von Bereichen zu unterscheiden (vgl. Abschnitt 4.1).

Akteure suchen in der Regel die bestmögliche Zielerfüllung bei der Wahl zwischen Alternativen. Landwirte treffen Produktionsentscheide, Institutionen treffen Entscheide über Massnahmen. Durch Entscheide werden Knappheiten erzeugt, die eine Bewertung erfordern. In diesen Fällen ist die Optimierung eine geeignete Methode. Bei nichtlinearen Optimierungsproblemen ist die Art des Optimierungsproblems (Art der Nebenbedingungen) für die Beurteilung der Lösbarkeit wichtig. Dazu sollen aus der Literatur minimale Anforderungen abgeleitet werden (Abschnitt 4.2). Eine zusammenfassende Übersicht gibt Abschnitt 4.2.7.

4.1 Konvexität

Für die Konvergenz mathematischer Lösungsverfahren, d.h. für die lokale/globale und evtl. lokal-/global-eindeutige Lösbarkeit von Optimierungsproblemen ist die Konvexität eines Problems eine entscheidende Voraussetzung. Jedes lokale Extremum eines konvexen Programms ist gleichzeitig ein globales Extremum. Dies ist bedeutend für den Optimierungsprozess, weil das Ende des Optimierungsprozesses gegeben ist, wenn die Suche nach einer besseren Lösung in der Nachbarschaft einer Lösung zu keiner Verbesserung führt.

Dabei muss der zulässige Bereich konvex sein und die Zielfunktion muss den Anforderungen der Konvexität genügen. Daher werden in diesem Abschnitt die Konvexitätsbegriffe erläutert.

Konvexität bei einer Funktion meint etwas anderes als die Konvexität einer Menge. Bei einer Funktion bezeichnet Konvexität, wie der Graph der Funktion verläuft – z.B. in der Form eines Tales. Bei der Konvexität einer Menge dagegen bezeichnet der Begriff, wie zwei Punkte zueinander liegen, d.h. die kürzeste innere Verbindungsstrecke der beiden Punkte liegt bei einem konvexen Bereich ebenfalls im zulässigen Bereich. Der Zusammenhang zwischen konvexen Funktionen und Mengen liegt darin, dass für die Definition einer konvexen Funktion der Definitionsbereich eine konvexe Menge darstellen muss (Chiang 1984, S. 351).

Die Art der Konvexität der Zielfunktion wie der einzelnen Restriktionsfunktionen ist sehr entscheidend für die Beantwortung der Frage nach der globalen Lösbarkeit eines Problems. Deshalb werden die Arten der Konvexität nachfolgend aufgezeigt und numerische und analytische Testverfahren zur Feststellung der Art diskutiert. Von Bedeutung sind die schwächsten Anforderungen an die Konvexität, da diese den Anwendungsbereich grösstmöglich erweitern. Präsentiert wird jeweils nur der konvexe Fall, da sich der konkave Fall durch Skalierung mit -1 in den konvexen Fall überführen lässt. Abbildung 10 zeigt Beziehungen zwischen verschiedenen Arten der Konvexität auf. Die Pfeile sind als "impliziert" zu lesen, d.h. die Konvexitätsart, auf die ein Pfeil gerichtet ist, ist in derjenigen, von der er ausgeht, enthalten.

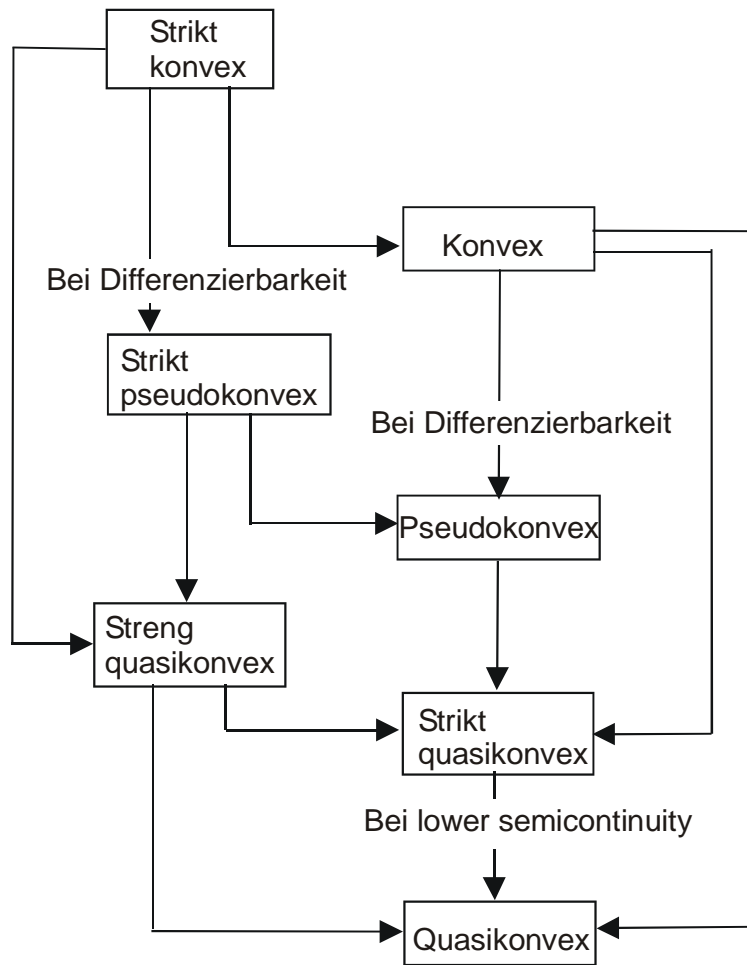


Abbildung 10: Beziehungen zwischen verschiedenen Arten von Konvexität²⁷ (Bazaraa et al. 1993, S. 116)

Für die Konvexität ist keine Differenzierbarkeit und Stetigkeit erforderlich. Sind die beiden Eigenschaften aber gegeben, so erleichtert dies die Prüfung der Art der Konvexität.

Die Funktionsarten quasikonvex/-konkav und pseudokonvex/-konkav heissen auch verallgemeinerte konvexe Funktionen.

4.1.1 Konvexe Funktionen

Funktionen, die stetig und differenzierbar sind, heissen konvex, wenn folgende Bedingung für alle Funktionswerte der Funktion erfüllt ist (Bazaraa et al. 1993, S. 79):

$$\begin{aligned}
 f\{\lambda * x_1 + (1 - \lambda) * x_2\} &\leq \lambda * f(x_1) + (1 - \lambda) * f(x_2) \\
 \forall x_1, x_2 &\in \mathfrak{R}^n \\
 \forall \lambda &\in [0,1]
 \end{aligned}$$

Der Funktionswert eines Punktes zwischen zwei beliebigen Punkten des Definitionsbereiches muss immer unter oder auf der inneren Verbindungsstrecke der Funktionswerte der zwei

²⁷ „Lower semicontinuity“ bedeutet bei einer Funktion, die in einer Umgebung von x_0 definiert ist, dass für alle Folgen von x_n mit $\lim_{x_n \rightarrow \infty} x_n = x_0$ gilt: $\lim_{x_n \rightarrow \infty} f(x_n) = f(x_0)$ (Bronstein und Semendjajew 1991 S. 260).

Punkte liegen, jedoch nie darüber. Werden in Abbildung 11 zwei beliebige Punkte der Funktion $F(x)$ mit einer Gerade verbunden, so müssen im Bereich zwischen den beiden Punkten alle Funktionswerte darunter liegen, d.h. die Funktion darf die Gerade nicht schneiden.

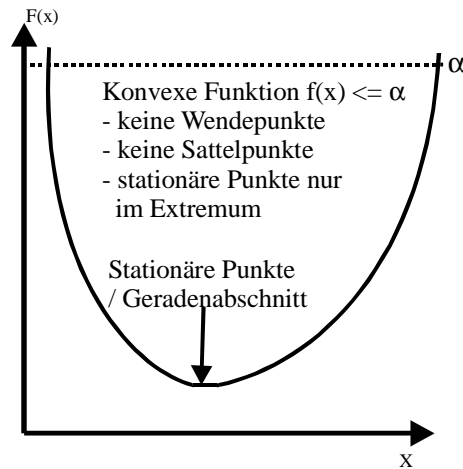


Abbildung 11: Konvexe Funktion

Im Extremum darf die Steigung 0 an mehreren Punkten gleichzeitig vorkommen. Für die strikte Konvexität wird das kleiner gleich Zeichen (\leq) zu einem kleiner Zeichen ($<$). Dies bedeutet, dass im Extremum die Steigung nur in einem Punkt 0 sein darf. Wendepunkte oder Sattelpunkte (Steigung 0, aber Vorzeichen der Steigung wechselt nicht) sind zudem in keinem der Fälle erlaubt. Der Kurvenverlauf weist bei strikter Konvexität nur eine Linkskrümmung auf. Daher ist die zweite Ableitung immer positiv bzw. die Hessische Matrix positiv definit²⁸. Lineare und affine²⁹ Funktionen sind konvex und konkav. Eine konvexe Funktion kann durch die Konvexität ihres Epigraphen (Fläche über dem Graphen: Menge) charakterisiert werden.

4.1.2 Pseudokonvexe Funktionen

Pseudokonvexe Funktionen teilen mit konvexen Funktionen die Eigenschaft, dass, wenn $\nabla f(\bar{x}) = 0$, der Punkt \bar{x} ein globales Optimum ist (Bazaraa et al. 1993, S. 113). Dies bedeutet, dass ausser im Optimalpunkt an keiner Stelle die Steigung 0 vorkommen darf. Im Gegensatz zu konvexen Funktionen dürfen bei pseudokonvexen Funktionen Wendepunkte vorkommen, diese dürfen aber nicht die Steigung 0 besitzen (dürfen keine Sattelpunkte sein). Die Pseudokonvexität ist mathematisch wie folgt definiert:

Sei S eine nichtleere offene Menge in \bullet^n und sei $f: S \rightarrow \bullet^1$ differenzierbar über S . Die Funktion f ist pseudokonvex, wenn für beliebige $x_1, x_2 \in S$ mit $\nabla f(x_1)'(x_2 - x_1) \geq 0$ $f(x_2) \geq f(x_1)$ oder äquivalent, wenn für $f(x_2) < f(x_1)$ $\nabla f(x_1)'(x_2 - x_1) < 0$ gilt (Bazaraa et al. 1993, S. 113f).

²⁸ Die Hessische Matrix ist die Matrix der zweiten Ableitungen: $H(x) = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{n1} & \dots & f_{nn} \end{bmatrix}$. Positiv definit ist

die Hessische Matrix $H(x)$, wenn die Determinanten der Principal Minors (quadratische Submatrizen mit f_{11} als Ausgangsbasis) alle positiv sind. Eine ausführliche Darstellung ist im Anhang A2 und in Takayama (1994, S. 40ff) zu finden.

²⁹ Affine Funktionen sind lineare Funktionen, die durch den Ursprung gehen.

Wenn die Richtungsableitung an der Stelle x_1 in Richtung x_2 grösser oder gleich Null ist, dann ist der Funktionswert an der Stelle x_2 grösser oder gleich demjenigen an der Stelle x_1 , oder wenn die Richtungsableitung strikt kleiner ist, muss auch der zweite Funktionswert strikt kleiner sein. Es sind somit nur im Extremum mehrere benachbarte Punkte mit der Steigung 0 vorhanden.

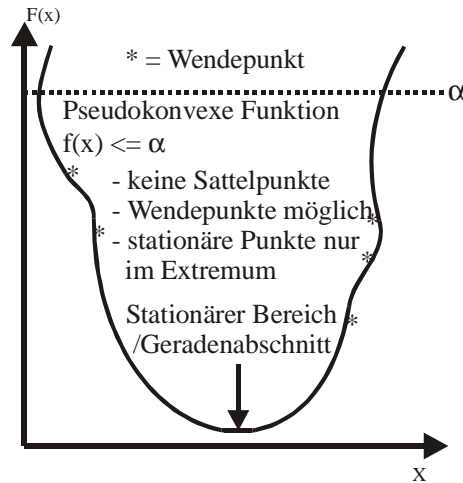


Abbildung 12: Pseudokonvexe Funktion

Für strikte Pseudokonvexität wird gefordert, dass für beliebige $x_1, x_2 \in S$ mit $\nabla f(x_1)'(x_2 - x_1) \geq 0 \implies f(x_2) > f(x_1)$ gilt oder äquivalent, wenn $f(x_2) \leq f(x_1)$ ist, dass $\nabla f(x_1)'(x_2 - x_1) < 0$ gilt. Im Extremum ist somit nur ein Punkt mit Steigung 0 vorhanden und kein stationärer Bereich, wie in Abbildung 12 dargestellt, möglich.

Eine Funktion mit Wendepunkten aber ohne Sattelpunkte, die nur steigt oder nur fällt, ist strikt pseudokonvex und strikt pseudokonkav gleichzeitig. Solche Funktionen heissen pseudolinear.

4.1.3 Quasikonvexität

Quasikonvexe Funktionen werden im folgenden ausführlicher dargestellt, da sie als schwächste Bedingungen für die den zulässigen Bereich eines Optimierungsproblems bestimmenden Restriktionen gelten, so dass die Konvexität des zulässigen Bereiches gewährleistet ist.

4.1.3.1 Quasikonvexe Funktionen

Quasikonvexe Funktionen können im Funktionsverlauf stationäre Abschnitte, Sattelpunkte und Wendepunkte aufweisen. Somit besitzen sie die wichtige Eigenschaft konvexer und pseudokonvexer Funktion nicht, dass, wenn $\nabla f(\bar{x}) = 0$ der Punkt \bar{x} ein globales Optimum ist. Auf dem fallenden Funktionsast ist bei quasikonvexen Funktionen die Steigung immer kleiner oder gleich Null, auf dem steigenden Funktionsast ist die Steigung immer grösser oder gleich 0.

Die mathematische Definition der Quasikonvexität lautet wie folgt: Sei $f: S \rightarrow \mathbb{R}^1$, wobei S eine nichtleere konvexe Menge in \mathbb{R}^n ist. Die Funktion f heisst quasikonvex, wenn für irgendein $x_1, x_2 \in S$ die folgende Ungleichheit zutrifft:

$$f[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] \leq \max\{f(x_1), f(x_2)\} \quad \forall \lambda \in (0,1) \quad (\text{Bazaraa et al. 1993, S. 108}).$$

Der Funktionswert eines Punktes zwischen zwei anderen Punkten ist immer kleiner oder gleich dem grösseren Funktionswert der beiden äusseren Punkte.

Bei differenzierbaren Funktionen können die Bedingungen der Quasikonvexität auch wie folgt definiert werden: Sei S eine nichtleere offene konvexe Menge in \mathbb{R}^n , und sei $f:S \rightarrow \mathbb{R}^1$ differenzierbar in S . Dann ist f quasikonvex, wenn eine der folgenden Bedingungen (Bazaraa et al. 1993, S. 109) gültig ist:

1. Wenn $x_1, x_2 \in S$ und $f(x_1) \leq f(x_2)$, dann ist $\nabla f(x_2)'(x_1 - x_2) \leq 0$ (Der Unterschied zum Pseudokonvexitätsfall liegt in der nicht strikt geforderten Ungleichheit).
2. Wenn $x_1, x_2 \in S$ und $\nabla f(x_2)'(x_1 - x_2) > 0$, dann ist $f(x_1) > f(x_2)$

Eine quasikonvexe Funktion ist durch die Konvexität des Level-Sets (\subseteq Definitionsbereich) charakterisierbar. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung:

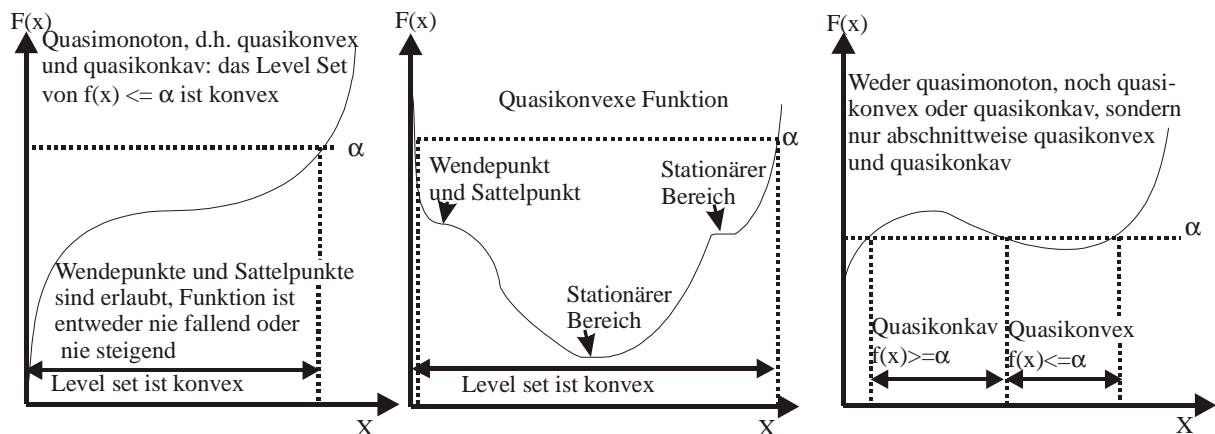


Abbildung 13: Quasikonvexität

Sei $f:S \rightarrow \mathbb{R}^1$, wobei S eine nichtleere konvexe Menge in \mathbb{R}^n ist. Die Funktion f ist quasikonvex genau dann, wenn $S_\alpha = \{x \in S : f(x) \leq \alpha\}$ konvex für jede reelle Zahl α ($S_\alpha =$ Level Set) (Bazaraa et al. 1993, S. 108). Dies gilt sinngemäss auch für alle konvexen und pseudokonvexen Funktionen und ist sehr zentral für die Konvexität des zulässigen Bereiches eines Optimierungsproblem. Quasikonvexe Funktionen sind Funktionen, die die minimalen Anforderungen erfüllen, die für die Konvexität des zulässigen Bereiches gegeben sein müssen.

4.1.3.2 **Strikte Quasikonvexität (semistrikt quasikonvex, funktional konvex, explizit quasikonvex)**

Strikt quasikonvexe Funktionen sind speziell wichtig in der Nichtlinearen Programmierung, da sie sicherstellen, dass lokale Minima und Maxima über einer konvexen Menge global sind (Bazaraa et al. 1993, S. 111). Dabei sind nicht nur die Bedingungen erster, sondern auch jene zweiter Ordnung von Bedeutung.

Sei $f: S \rightarrow \mathbb{R}^1$, wobei S eine nichtleere konvexe Menge in \mathbb{R}^n ist. Die Funktion f heisst strikt quasikonvex, wenn für beliebige $x_1, x_2 \in S$ mit $f(x_1) \neq f(x_2)$ gilt:

$$f[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] < \text{maximum} \{f(x_1), f(x_2)\} \quad \forall \lambda \in (0,1) \quad (\text{Bazaraa et al. 1993, S. 111}).$$

Haben zwei Werte im Definitionsbereich unterschiedliche Funktionswerte, so müssen innere Linearkombinationen der Werte des Definitionsbereiches einen Funktionswert haben, der strikt kleiner ist als das Maximum der beiden Funktionswerte an den Eckbereichen. Dies bedeutet, dass stationäre Bereiche nur im globalen Extremum vorkommen dürfen, dies im Gegensatz zur Quasikonvexität allgemein, wo stationäre Bereiche im ganzen Definitionsbereich zulässig sind. Dies lässt ausserhalb des Bereiches des globalen Extremums nur noch Sattelpunkte zu (Gradient 0).

Jede konvexe Funktion ist strikt quasikonvex.

4.1.3.3 **Strenge Quasikonvexität**

Strikte Quasikonvexität garantiert keine eindeutige globale Optimallösung sondern nur eine globale Lösung, da benachbarte Punkte den gleichen Funktionswert haben dürfen. Strenge Quasikonvexität garantiert dagegen eine global eindeutige Optimallösung (vgl. Abschnitt 4.2).

Sei S eine nichtleere konvexe Menge in \mathbb{R}^n , und sei $f: S \rightarrow \mathbb{R}^1$. Die Funktion f heisst streng quasikonvex, wenn für beliebige $x_1, x_2 \in S$ mit $x_1 \neq x_2$ folgendes gilt:

$$f[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] < \text{maximum} \{f(x_1), f(x_2)\} \quad \forall \lambda \in (0,1) \quad (\text{Bazaraa et al. 1993, S. 112}).$$

Für unterschiedliche Werte im Definitionsbereich müssen Funktionswerte des Zwischenbereichs strikt kleiner als das Maximum der Funktionswerte der Randpunkte sein. Dies bedeutet, dass keine zwei benachbarte Punkte den gleichen Funktionswert haben dürfen, dass aber Sattelpunkte und Wendepunkte beliebig vorkommen dürfen. Daher ist das globale Extremum dann eindeutig.

- Jede strikt konvexe Funktion ist streng quasikonvex.
- Jede streng quasikonvexe Funktion ist strikt quasikonvex.
- Jede streng quasikonvexe Funktion ist quasikonvex, sogar bei fehlender Semikontinuitätsannahme³⁰ (Bazaraa et al. 1993, S. 113).

Eine Summe quasikonvexer Funktionen ist nicht unbedingt wieder quasikonvex (Takayama 1991, S. 61 und Bazaraa et al. 1993, S. 110). Diese Eigenschaft erschwert die Bestimmung von Konvexitätsarten von Summen von Funktionen und damit, ob Zielfunktion oder Restriktionen den Anforderungen für globale Lösungen genügen können oder nicht.

4.1.3.4 **Quasimonotone Funktionen**

Quasimonotone Funktionen (Bazaraa et al. 1993, S. 108) besitzen die spezielle Eigenschaft, dass sie quasikonkav und quasikonvex (vgl. Abschnitt 4.1.3 und 4.2.6.3) gleichzeitig sind. Eine Funktion f heisst in \mathbb{R}^n

- monoton wachsend, wenn aus $x < y$ folgt $f(x) \leq f(y)$, d.h. die Funktion fällt nie
- monoton fallend, wenn aus $x < y$ folgt $f(x) \geq f(y)$, d.h. die Funktion steigt nie.

Gilt eine strenge Ungleichheit, so sind die Funktionen streng monoton wachsend bzw. fallend. Die Summe monoton wachsender Funktionen ist wieder monoton wachsend, das Produkt ebenfalls. Das Reziprok einer monoton wachsenden Funktion ist monoton fallend (Walter 1992, S. 44). Quasimonotonie ist die minimale Anforderung für die Formulierung von Gleichheitsrestriktionen.

4.1.3.5 **Summierung von Funktionen**

Konvexe Funktionen:

Lineare Funktionen sind konvex und konkav aber nicht strikt (Chiang 1984, S. 390). Die Summe konvexer oder konkaver Funktionen ist immer konvex oder konkav.

³⁰ Vgl. Fussnote 27.

Quasikonvexe Funktionen:

Im Falle von Quasikonvexität gilt nicht, dass die Summe quasikonvexer Funktionen oder quasikonvexer und konvexer Funktionen wieder quasikonvex ist (Takayama 1991, S. 61 und Bazaraa et al. 1993, S. 110, Chiang 1984, S. 391). Dies bestätigt auch J.E. Martinez: "For quasiconvex functions, it is very exceptional that the sum is also quasiconvex"³¹.

4.1.3.6 Konvexe Mengen

Chiang (1994a) bemerkt zum Bezug von konvexen Funktionen und konvexen Mengen³² folgendes: Bei konvexen Funktionen ist der Definitionsbereich immer eine konvexe Menge. Der n-dimensionale Raum ist eine konvexe Menge (n = Zahl der Variablen). Für die Konvexität eines Bereiches genügt die Konvexität der entsprechenden Teilmenge von \bullet ³¹. Eine konvexe Funktion $f(x)$ führt zu einer konvexen Menge $S^{\leq} = \{x / f(x) \leq k\}$. Dies sind die Werte im Zulässigkeitsbereich.

Bei der Konvexitätsanforderung an den zulässigen Bereich (constraint set) ist nur die Definitionsmenge relevant, nicht aber die Bildmenge. Erstere muss konvex sein, das heisst, es dürfen keine Lücken auftreten. Deshalb genügt für die Konvexität des zulässigen Bereichs (constraint set) die Anforderung der Quasikonvexität an die einzelnen Restriktionsfunktionen im Falle der Maximierung. Die Anforderung, dass die Linearkombination zweier beliebiger Punkte im zulässigen Bereich liegen muss, gilt für den Definitionsbereich der einzelnen Restriktionen³³.

Der Begriff der konvexen Menge (zum Vergleich mit konvexen Funktionen siehe Abschnitt 4.1) ist wichtig für die Optimierung mit Restriktionen. Die Definition lautet wie folgt: Jeder Punkt auf der inneren Verbindungsstrecke zweier Punkte einer Menge muss ebenfalls zur Menge gehören, bzw. jeder Punkt auf der inneren Verbindungsstrecke zweier Punkte des durch ein Restriktionssystem definierten zulässigen Bereiches muss ebenfalls im zulässigen Bereich liegen. Formal ausgedrückt lautet die Formulierung für die Menge S und beliebige Punkte der Menge (Bazaraa et al. 1993, S. 34):

$$\lambda * x_1 + (1 - \lambda) * x_2 = x_3 \in S$$

Für die Schnittmenge, die Summe und die Differenz konvexer Mengen gelten folgende Zusammenhänge (Bazaraa et al. 1993, S. 35 und Takayama 1994, S. 80):

1. $S_1 \cap S_2$ ist konvex
2. $S_1 \oplus S_2 = \{x_1 + x_2 : x_1 \in S_1, x_2 \in S_2\}$ ist konvex
3. $S_1 \ominus S_2 = \{x_1 - x_2 : x_1 \in S_1, x_2 \in S_2\}$ ist konvex

Der erste Zusammenhang besagt, dass die Schnittmenge konvexer Mengen wieder konvex ist. Sind also die durch einzelne Restriktionen definierten zulässigen Bereiche je konvex, so ist der durch das Restriktionensystem definierte zulässige Bereich (Schnittmenge der einzelnen Bereiche) wieder konvex. Ebenso sind die Summe und die Differenz konvexer Mengen wieder konvex.

³¹ e-mail von Juan Enrique Martinez-Legaz, Departament d'Economia i d'Historia Economica, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain: JuanEnrique.Martinez@uab.es vom 14.4.98

³² „Unter einer „Menge“ verstehen wir jede Zusammenfassung M von bestimmten wohlunterschiedenen Objekten m unserer Anschauung oder unseres Denkens (welche die „Elemente“ von M genannt werden) zu einem Ganzen“ (Walter 1992, S. 4). In diesem Sinne stellen Punkte im Raum eine Menge dar.

³³ Mündliche Auskunft von Dr. Benno Bühler, IFOR ETHZ, vom 8. Oktober 1997.

Eine Menge heisst strikt konvex, wenn die Punkte auf der Verbindungslinie zweier Punkte nie auf einem Randpunkt liegen. Dies bedingt strikt konvexe Restriktionsfunktionen.

Die schwächste Anforderung an eine Restriktionsfunktion eines Programmierungsproblems ist, dass die Restriktionsfunktion bei \geq Restriktionen mindestens quasikonkav und bei \leq Restriktionen mindestens quasikonvex ist. Dies bestätigt die folgende Aussage: "The condition that the constraint functions ...are quasiconvex implies that the constraint set is convex" (Mas-Colell et al. 1995, S. 962 und Takayama 1994, S. 81). Somit fehlen auf Seite der Restriktionen keine Voraussetzungen mehr, die helfen, die Konvexität des zulässigen Bereichs zu garantieren. *Damit sind die Minimalanforderungen für die zweite der Bedingungen für die globale Lösbarkeit nichtlinearer Programmierungsprobleme, die der Konvexität des zulässigen Bereiches, geklärt.*

4.1.4 Testverfahren zur Bestimmung der Konvexität

Ein ausführliche Darstellung von Testverfahren ist im Anhang in Kapitel A2 zu finden.

4.1.4.1 Analytische Bestimmung der Funktionsform

Die Konvexität einer Funktion kann bestimmt werden über:

- die Prinzipal Minors der Hessischen Matrix
- über das Gauss Jordan Verfahren
- über die Eigenwerte der Funktion.

Das Testverfahren für die Pseudokonvexität und die Quasikonvexität baut auf der mit den ersten Ableitungen geränderten Hessischen Matrix auf. Generell ist darauf zu achten, ob die Testbedingungen notwendig und hinreichend (vgl. Abschnitt 4.2.2) sind. Für die Durchführung der Konvexitätstests von Funktionen eignet sich die Software Mathematica (Wolfram 1999), evtl. in Verbindung mit AMPL³⁴ oder GAMS zur numerischen Bestimmung der Werte der Determinanten der Prinzipal Minors gut. Ein Beispielcode zur Funktionsanalyse mit Mathematica ist im Anhang im Abschnitt A2.5.1 zu finden. Die Bestimmung der Werte der Determinanten erfolgt dabei graphisch. Das graphische Verfahren ist auf den Fall mit zwei Variablen beschränkt.

4.1.4.2 Numerisch: MPROBE – Tool für die Analyse der Konvexität von Funktionen und ganzen Modellen

MPROBE³⁵ ist ein Softwaretool zur Unterstützung der mathematischen Programmierung. Es unterstützt die Analyse mathematischer Programmierungsmodelle verschiedener Typen (linear, nichtlinear, ganzzahlig, logisch) und verschafft Einblicke in das Modell. Die Software erlaubt, die Effektivität einer Restriktion³⁶, die Form nichtlinearer Funktionen und die Konvexität des Zulässigkeitsbereiches zu bestimmen sowie Profilplots nichtlinearer Funktionen zu zeichnen. MPROBE ist direkt zu AMPL gelinkt.

Speziell nützlich für die Nichtlineare Programmierung ist die Analyse der Form der Restriktionsfunktionen und der Zielfunktion und des Wertebereichs von Funktionen sowie die Schät-

³⁴ AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming (vgl. Fourer et al. 1993) und GAMS: General Algebraic Modeling System (Brooke et al. 1992) sind Modellierungstools für die mathematische Programmierung.

³⁵ Vgl. Chinneck 2000 und Chinneck 1999 sowie die Internetseite <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/mprobe.html>.

³⁶ Dies ist der Teil des Zulässigkeitsbereiches, den eine Restriktion eliminiert.

zung der Konvexität des Zulässigkeitsbereiches³⁷. Auf Stufe Zielfunktion wird geschätzt, ob ein globales oder lokales Optimum wahrscheinlich ist.

M_{PROBE} erspart aufwendige analytische Testverfahren zur Bestimmung der Konvexität eines Programmierungsproblems. Durch den direkten Link mit AMPL können Modelle mit minimalem Aufwand auf ihre globale Lösbarkeit überprüft werden.

4.1.5 Fazit für die Modellierung

Die Konvexität von in mathematischen Modellen dargestellten Problemen ist wichtig für die Lösbarkeit. Es existieren konvexe Funktionen und Verallgemeinerungen davon (pseudokonvexe und quasikonvexe Funktionen, die die Eigenschaft strikt oder streng erfüllen), die unterschiedliche Auswirkungen auf die Qualität der Lösung (global, lokal, eindeutig oder nicht eindeutig) haben. Besondere Bedeutung erhalten die Aspekte der Konvexität im Zusammenhang mit Optimierungsproblemen, wie im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.2 Optimierung

Optimierung bedeutet das Finden eines Gleichgewichtszustandes für die verschiedenen Variablen unter vorgegebener Zielvorstellung im Zulässigkeitsbereich. Der Bereich der möglichen Lösungen kann zudem durch Nebenbedingungen eingeschränkt werden.

Dieser Abschnitt behandelt die verschiedenen Arten der Optimierung und gibt einen Überblick über die Bestimmung von Extremas bei einer Zielfunktion ohne Nebenbedingungen bis zum Fall mit Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen. Im Zentrum steht immer die Frage nach der globalen Lösbarkeit und damit nach der Konvexität eines Problems. Für die Konvergenz von Lösungsverfahren, d.h. für die (eindeutige) Lösbarkeit von Optimierungsproblemen ist die Konvexität eine entscheidende Voraussetzung. Ein lokales Optimum ist dann immer auch ein globales Optimum. Ein Problem wird in der mathematischen Programmierung konvex genannt, wenn der zulässige Bereich konvex und die Zielfunktion im Falle der Maximierung (pseudo-)konkav, im Falle der Minimierung (pseudo-) konvex ist.

Gesucht werden Bedingungen für globale Lösungen in der Nichtlinearen Programmierung in Analogie zur Linearen Programmierung. In der Linearen Programmierung sind keine global eindeutigen (Zielfunktionswert nur bei einer einzigen Kombination der Variablenwerte erreichbar) Lösungen garantiert, da Zielfunktion und Restriktionen lediglich konvex und konkav sind (vgl. Abschnitt 4.1.1). Da im nichtlinearen Fall bei komplexen Modellen lineare Restriktionen zu erwarten sind, können keine global eindeutigen Lösungen, sondern lediglich globale Lösungen wie in der Linearen Programmierung erwartet werden. Globale Lösungen sind aber gleichzeitig als Minimalanforderung zu betrachten, da die Interpretation von lokalen Lösungen in komplexen Modellen sehr schwierig ist.

Im folgenden werden Anforderungen für die Existenz eines globalen Extremums für ein allgemeines Maximierungsproblem aufgeführt. Diese setzen sich aus Bedingungen erster und zweiter Ordnung und Qualifikationsanforderungen an die Zielfunktion und die Restriktionen zusammen. Darauf wird auf die verschiedenen Arten von Optimierungsproblemen und ihre Lösbarkeit eingegangen.

4.2.1 Allgemeines Maximierungsproblem

Ein allgemeines Optimierungsproblem, in diesem Fall ein Maximierungsproblem, präsentiert sich wie folgt im Standardansatz³⁸:

³⁷ Schnittmenge des Zulässigkeitsbereiches aller Restriktionen bzw. möglicher Lösungsraum.

Gleichung 1: Allgemeines Maximierungsproblem

$$\begin{array}{ll}
 \text{Max} & f(x) \\
 \text{u.d.NB} & g_k(x) \leq b_k \quad k = 1..K \\
 & h_m(x) = c_m \quad m = 1..M \\
 & x \geq 0
 \end{array}$$

Das allgemeine Optimierungsproblem setzt sich aus einer Zielfunktion f , dem Vektor der Entscheidungsvariablen x , k Ungleichheitsrestriktionen, m Gleichheitsrestriktionen und den Nichtnegativitätsbedingungen für die einzelnen Entscheidungsvariablen zusammen. Die Nichtnegativitätsbedingungen sind für viele ökonomische Fragestellungen relevant.

Die Diskussion der verschiedenen Optimierungsprobleme (mit oder ohne Nebenbedingungen) ab Abschnitt 4.2.4 orientiert sich an der Darstellung in Gleichung 1. Für die Diskussion der verschiedenen Arten von Optimierungsproblemen sind die Begriffe der notwendigen und hinreichenden Bedingungen für Extrema wichtig (Abschnitt 4.2.2). Zudem ist die Constraint Qualification von grosser Bedeutung (Abschnitt 4.2.3).

4.2.2 Notwendige und hinreichende Bedingungen für Extrema: Begriffe

Notwendige Bedingungen helfen, nicht in Frage kommende Kandidaten für optimale Lösungen auszuschneiden. In der NLP sind innere Punkte des zulässigen Bereiches, die die Karush-Kuhn-Tucker³⁹ Bedingungen nicht erfüllen, keine Kandidaten, ebenso wenig wie Randpunkte, die die Constraint Qualification erfüllen aber die Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen nicht. Erfüllt ein Punkt die notwendigen Bedingungen, muss er nicht unbedingt eine optimale Lösung darstellen (Bsp. Wendepunkt). Mittels notwendiger Bedingungen werden eigentliche optimale Lösungen und auch vermeintliche getroffen.

Ein Punkt, der hinreichende Bedingungen für ein Maximum erfüllt, muss die Zielfunktion maximieren. Damit ist dieser Optimalitätstest definitiver. Aber eine hinreichende Bedingung muss nicht notwendig sein, so dass eigentliche Optimallösungen bei den hinreichenden Bedingungen nicht gefunden werden, d.h. mit den hinreichenden Bedingungen als Fischernetz könnte eine existierende optimale Lösung nicht gefunden werden.

Hilfreich sind notwendige und hinreichende Bedingungen. Damit werden alle Optimallösungen gefunden und es besteht kein Risiko, Extrema, die keine Extrema sind, zu treffen. Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen können notwendig und hinreichend sein (Chiang 1984, S. 739). Dies trifft aber nicht in jedem Fall zu, wie der folgende Absatz und der folgende Abschnitt erläutern.

Im Zusammenhang mit der globalen Lösbarkeit stellt sich die Frage nach der Konvexitätsstruktur des Problems. Diese genügt je nach Art der Problemformulierung für das Vorhandensein eines globalen Maximums. Damit aber via die Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen (vgl. Abschnitt 4.2.5.2) das Maximum gefunden werden kann, muss die Constraint Qualification (vgl. Abschnitt 4.2.3) erfüllt sein. Andernfalls kann es sein, dass, obwohl ein Maximum existiert, dieses durch die Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen nicht gefunden werden kann (Chiang 1984, S. 731ff).

³⁸ Für Minimierungsprobleme müssen die Ungleichheitszeichen in den Restriktionen \geq sein und die Zielfunktion wird minimiert.

³⁹ Vgl. Abschnitt 4.2.5.2.

4.2.3 Bedeutung der Constraint Qualification (CQ)

Aus dem in Abschnitt 4.2.2 Dargestellten folgt, dass die Modellformulierung notwendige und hinreichende Bedingungen für globale Optima erlauben muss. Damit die KKT Bedingungen notwendig sind, wird die Erfüllung der CQ vorausgesetzt, die Anforderungen an die Restriktionsfunktionen eines nichtlinearen Programmes stellt. Damit werden Unregelmässigkeiten am Rand des zulässigen Bereiches ausgeschaltet, die zur Folge hätten, dass die KKT Bedingungen ungültig wären, würde das Optimum dort erscheinen (Chiang 1984, S. 731). Beispiele für solche Unregelmässigkeiten sind:

- Sattelpunkte⁴⁰ können die KKT an optimalen Randlösungen ungültig werden lassen, müssen aber nicht.
- Die KKT Bedingungen können ungültig sein auch ohne Sattelpunkte, da das Problem weniger bei der Form des zulässigen Bereiches als vielmehr bei jener der jeweiligen Funktionen liegt (Chiang 1984, S. 730f).

Unregelmässigkeiten am Rande des zulässigen Bereiches treten nicht auf, wenn eine bestimmte CQ erfüllt ist. Bei einem nichtlinearen Programmierungsmodell mit linearen Restriktionen ist die CQ immer erfüllt. Deshalb ist bei solchen Problemen und im speziellen bei Linearer Programmierung keine solche Diskussion nötig.

Im folgenden werden einige typische Constraint Qualifications mit Blick auf die Nichtlineare Programmierung diskutiert:

Abadie CQ:

Die Abadie CQ besagt, dass am Optimalpunkt der Zielfunktionsgradient als mit den Lagrangemultiplikatoren gewichtete Linearkombination der Gradienten der bindenden Restriktionen ausgedrückt werden kann. Sie ist bei linearen Restriktionsfunktionen immer wahr und impliziert damit die Notwendigkeit der KKT Bedingungen unabhängig von der Form der Zielfunktion. Deshalb sind CQ-Tests nur bei nichtlinearen Restriktionsfunktionen notwendig. Im nichtlinearen Fall impliziert die Abadie CQ die KKT CQ nicht notwendigerweise und ist daher für die Notwendigkeit der KKT Bedingungen nicht genügend (Bazaraa et al. 1993, S. 186f).

Folgende CQ (Bazaraa et al. 1993, S. 193) garantieren bei Vorhandensein von Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen in einem Problem die Gültigkeit der KKT Bedingungen.

Slater CQ:

1. Die Menge $X = \{x \mid g_k(x) \leq 0 \text{ für } k=1, \dots, K\}$ ist offen⁴¹.
2. jedes g_k für $k \in K$ (d.h. jede am Optimalpunkt bindende Ungleichheitsrestriktion) ist pseudokonvex am Optimalpunkt,
3. jedes andere g_k (am Optimalpunkt nicht bindende Ungleichheitsrestriktionen) ist kontinuierlich am Optimalpunkt,
4. jede Gleichheitsrestriktion h_m für $m = 1, \dots, M$ ist quasikonvex, quasikonkav und kontinuierlich differenzierbar am Optimalpunkt,

⁴⁰ Sattelpunkte haben die Steigung 0 (Bsp.: erste Ableitung der Funktion einer Variablen ist 0). Die Krümmung der Funktion ändert sich aber im Punkt (zweite Ableitung wechselt das Vorzeichen). Im Falle mehrerer Variablen ist die Steigung durch den Gradienten der ersten Ableitungen und die Krümmung durch die Determinanten der Principal Minors der Hessischen Matrix definiert.

⁴¹ Eine Teilmenge eines metrischen Raumes heisst offen, wenn sie nur aus inneren Punkten besteht (Walter 1992, S. 22). Ein Punkt ist ein innerer Punkt einer Menge, wenn seine Umgebung eine Teilmenge davon ist (Walter 1992, S. 21).

5. und die Gradienten der Gleichheitsrestriktionen sind am Optimalpunkt linear unabhängig.
6. Zudem gebe es einen zulässigen Punkt $x \in X$ mit $g_k(x) < 0$ für $k=1, \dots, K$ und $h_m(x) = 0$ für $m=1, \dots, M$.

Den Punkt 1 zu erfüllen, bereitet keine Schwierigkeiten. Punkt 2 ist mit der Wahl pseudokonvexer nichtlinearer Restriktionsfunktionen erfüllbar. Für die Erfüllung von Punkt 3 sind stetige differenzierbare Funktionen genügend. Punkt 4 bereitet bei der Wahl monoton steigender oder – fallender Funktionen (=quasimonotone Funktion) keine Schwierigkeiten. Punkt 5 muss getestet werden. Punkt 6 bereitet für ein ökonomisches Optimierungsproblem keine Schwierigkeiten, da eine zulässige Lösung Voraussetzung ist und für die Ungleichheitsrestriktionen als innerer Punkt existieren sollte. Die Slater CQ impliziert die Karush-Kuhn-Tucker CQ.

Lineare Unabhängigkeit CQ:

Die Gradienten der bindenden Ungleichheitsrestriktionen und die Gradienten der Gleichheitsrestriktionen müssen am Optimalpunkt linear unabhängig sein. Letztere müssen kontinuierlich differenzierbar sein. Diese CQ ist bei nicht allzu vielen nichtlinearen Restriktionen einfach zu testen, da die Gradienten nach Variablen gruppiert werden können (Büeler 1997, S. 124f) und die lineare Unabhängigkeit gruppenweise verifiziert werden kann. Der CQ Test kann partiell ausgeführt werden, indem die Variablen in solche gruppiert werden, die nur in linearen Restriktionen, in linearen und nichtlinearen, sowie solche, die ausschliesslich in nichtlinearen Restriktionen vorkommen. Bei den linearen Restriktionen kann die lineare Unabhängigkeit vorausgesetzt werden, da die Solver redundante Gleichungen eliminieren. Die Gradienten derjenigen Variablen, die ausschliesslich in nichtlinearen Restriktionen vorkommen, müssen auf lineare Unabhängigkeit getestet werden (Büeler 1997, S. 124f). Diese CQ impliziert die Karush-Kuhn-Tucker CQ ebenfalls.

Constraint Qualification Test für Maximierungsprobleme (Quasikonkave Programmierung (vgl. Abschnitt 4.2.6.2) nach Chiang 1984, S. 746

Vorausgesetzt werden ausschliesslich Ungleichheitsrestriktionen. Die Constraint Qualification ist erfüllt, wenn das mathematische Modell folgenden Bedingungen gleichzeitig genügt:

- Jede Restriktionsfunktion ist differenzierbar und quasikonvex.
- Es existiert ein innerer Punkt im positiven Quadranten (d.h. keine der Restriktionen ist in diesem Punkt bindend, bzw. es existiert mindestens ein Punkt, der den Rand des Zulässigkeitsbereichs nicht berührt).
- Die Restriktionsfunktionen sind alle konvex, oder die ersten partiellen Ableitungen sind nicht alle gleichzeitig 0 an irgendeinem Punkt im zulässigen Bereich.

Weitere in Frage kommende CQ sind jene von Cottle, Kuhn-Tucker oder Abadie. Diese sind aber schwieriger zu testen. Die Abadie CQ genügt für die Notwendigkeit der KKT Bedingungen nicht (vgl. oben).

4.2.3.1 Fazit bezüglich der Bedeutung der Constraint Qualification

Entscheidend für die Relevanz der CQ ist das vom Solver angewendete Lösungsverfahren. Solver, die auf der Basis von KKT die Extrema bestimmen (dazu gehören auch die inneren Punkt Methoden), setzen die CQ voraus (Bsp.: der Solver MINOS basiert auf KKT). Ohne Bedeutung ist die CQ für andere Lösungsverfahren, die gewisse Solver verwenden, z.B. Gradientenverfahren, Newtonverfahren usw.. Eine grosse Bedeutung hat die Frage nach der linearen Unabhängigkeit der Gradienten vor allem bei nichtlinearen Restriktionen. Verschiedene Solver können aber andere Anforderungen stellen.

CQ sind theoretisch sehr relevant, bei good natured problems aber nicht so bedeutend (d.h. wenn es eine zulässige Lösung gibt, die Modellstruktur Konvexität erlaubt und der Zulässigkeitsbereich fett ist, d.h. dass der Unterschied zwischen Innen- und Aussenkreisen nicht extrem sondern dünn ist⁴²). In der Ökonomie sind die Lösungsräume häufig flach, was numerische Probleme verursachen kann. Diesem Problem kann durch die Verwendung von Solvern mit unterschiedlichen Lösungsverfahren begegnet werden. Beispiele sind Solver, die innere Punkt-Methoden⁴³ oder Branch and Reduce Ansätze (Ryoo und Sahinidis 1996) etc. für die globale Optimierung verwenden.

Das Problem der linearen Abhängigkeiten ist nicht sehr zentral. Wichtig ist, dass es einen zulässigen Punkt gibt, d.h. das Zulässigkeitsgebiet darf nicht leer sein. Dafür gibt es eine Existenzaussage, die beinhaltet, dass die Zielfunktion stetig ist, ein zulässiger Punkt existiert und der Zulässigkeitsbereich beschränkt ist⁴⁴.

4.2.4 Maximierung ohne Nebenbedingungen

Für lokale Extrema bei Optimierungsproblemen ohne Nebenbedingungen existieren notwendige und hinreichende Bedingungen bei zweimal differenzierbaren Funktionen:

Notwendig: $\nabla f(x) = 0$ bzw. $\frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_n} = 0 \quad \forall n$ (Mas-Colell et al. 1995, S. 954)

Der Gradient der partiellen Ableitungen muss 0 sein, was bedeutet, dass jede einzelne partielle Ableitung 0 sein muss. Es darf somit in keine Richtung mehr eine Verbesserung möglich sein. Der einfachste Fall ist derjenige in zwei Dimensionen, wo die erste Ableitung nach der exogenen Variablen 0 sein muss. Die Bedingung ist nur notwendig aber nicht hinreichend, da Sattelpunkte diese Bedingung auch erfüllen können und noch keine Voraussetzungen an die Funktionsform gestellt wurden.

Hinreichend:

- Wenn \bar{x} ein lokales Maximum ist, dann ist die Hessische Matrix⁴⁵ an der Stelle \bar{x} negativ semidefinit
- Ist die Hessische Matrix an der Stelle \bar{x} negativ definit⁴⁶, dann ist \bar{x} ein lokales Maximum.

In diesem Falle ist die Funktion in der Umgebung von \bar{x} konkav und damit das Sattelpunktproblem ausgeschlossen.

Für ein globales Maximum ist es notwendig, Anforderungen an die Funktionen über den ganzen Definitionsbereich zu stellen (ohne Nebenbedingungen nur an die Zielfunktion, mit Nebenbedingungen an Zielfunktion und Restriktionen, vgl. später), dafür sind geringere Anforderungen an die Hessische Matrix zu stellen.

⁴² Am Beispiel eines Dreiecks gezeigt bedeutet dies, dass die Winkel nicht sehr spitz sind.

⁴³ Vgl. beispielsweise <http://ecolu-info.unige.ch/logilab/software/>.

⁴⁴ Mündliche Auskunft von Dr. Benno Bühler, IFOR ETHZ 26. Januar 1998

⁴⁵ Matrix der zweiten Ableitungen: $H(x) = \begin{bmatrix} f_{11} & \dots & f_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ f_{n1} & \dots & f_{nn} \end{bmatrix}$

⁴⁶ Für negative Semidefinitheit müssen die Determinanten der Hauptminoren (principal minors) die Vorzeichen wechseln oder 0 sein ($\leq 0, \geq 0, \leq 0, \dots$). Der einfachste Fall ist zweidimensional, wo die Hessische Matrix aus f_{11} besteht. Für ein Maximum ist ein Wert kleiner gleich 0 verlangt. Dies bedingt eine nach rechts gekrümmte Kurve (notwendig). Für positive Semidefinitheit müssen die Determinanten der Hauptminoren immer grösser oder gleich 0 sein.

So ist im Falle von Pseudokonkavität die Bedingung erster Ordnung notwendig und hinreichend für ein globales Extremum, da Steigungen mit dem Wert 0 nur im Extremum vorkommen (vgl. Kap 4.1.2 auf S. 43). Wendepunkte mit Ausnahme von Sattelpunkten sind in diesem Falle beim Funktionsverlauf beliebig erlaubt. Daher genügt bei nur zwei Dimensionen folgende Qualifizierung bei der Zielfunktion für die Maximierung: Pseudokonkavität.

Im Falle von quasikonkaven Zielfunktionen dagegen genügt die Bedingung erster Ordnung für ein globales Maximum nicht, da Abschnitte oder Punkte mit der Steigung 0 möglich sind, die im Funktionsverlauf beliebig vorkommen können, also auch ausserhalb des Extremums. Es sind die Bedingungen zweiter Ordnung (Anforderungen an die Hessische Matrix am Optimalpunkt) zusätzlich erforderlich, die garantieren, dass es sich nicht um einen Sattelpunkt (Steigung 0) handelt. Ein Maximum liegt mit Sicherheit nur dann vor, wenn die Hessische Matrix des vermuteten Extrempunktes negativ definit ist, kann aber auch bei negativer Semidefinitheit vorliegen, da in diesem Fall in der Umgebung des Punktes der Kurvenverlauf konkav sein kann.

4.2.5 Optimierungsprobleme mit Nebenbedingungen

Nebenbedingungen schränken den zulässigen Lösungsraum ein. Bei der Optimierung mit Nebenbedingungen können Probleme mit Gleichheitsrestriktionen, mit Ungleichheitsrestriktionen und mit beiden Restriktionstypen gemischt unterschieden werden.

4.2.5.1 Optimierung mit Gleichheitsrestriktionen

Bei der Optimierung einer Zielfunktion mit Nebenbedingungen in Form von Gleichheitsrestriktionen ist der zulässige Lösungsraum bei zwei Dimensionen durch die durch die Restriktionen gegebenen Kurven oder Geraden gegeben. Bei drei Dimensionen entspricht der zulässige Raum der durch die Restriktionen gegebenen (Ober-)Fläche im dreidimensionalen Raum. In höheren Dimensionen bilden dann Hyperebenen der entsprechenden Dimension die Begrenzung des zulässigen Raumes. Alle Funktionen sind im \bullet^n definiert.

Das Lösungsprinzip zur Bestimmung des Optimums beruht auf folgender Überlegung: Gradienten stehen senkrecht auf den Tangenten bzw. Tangentialebenen bzw. Tangentialhyperebenen an jedem Punkt der Zielfunktion. Entsprechend stehen die Gradienten der einzelnen Restriktionen senkrecht auf den „Tangenten“ an jedem Punkt der jeweiligen Restriktion. Im Optimalpunkt kann der Gradient der Zielfunktion bezüglich einer Variablen durch eine Linearkombination der Gradienten der einzelnen Restriktionen bezüglich derselben Variablen ausgedrückt werden (vgl. auch Abbildung 14, S. 56). Dieses Prinzip liegt dem Lagrange-Ansatz zugrunde (Mas-Colell et al. 1995, S. 956):

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_m \lambda_m h_m(x)$$

$$\frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_n} = \sum_{m=1}^M \lambda_m \frac{\partial h_m(\bar{x})}{\partial x_n} \quad \text{bzw.} \quad \nabla f(\bar{x}) = \sum_{m=1}^M \lambda_m \nabla h_m(\bar{x}) \quad \forall \quad n = 1..N$$

λ_m = Lagrangemultiplikator (in der Ökonomie Schattenpreis): alle partiellen Ableitungen nach λ_m und x_n werden null gesetzt.

Es sind daher $N+M$ Variablen, die eine Lösung zur gleichen Anzahl Restriktionen (Lösung eines Gleichungssystems vom Rang $N+M$) darstellen. Es ergeben sich somit $N+M$ Bedingungen aus dem Lagrange-Ansatz, die erfüllt sein müssen. Die Lösung dieses Gleichungssystems ergibt den gesuchten Optimalpunkt.

Für die Lösbarkeit ist entscheidend, dass die Anzahl der Variablen grösser als die der Restriktionen ist, andernfalls existiert im allgemeinen keine Lösung. Der Lagrange-Ansatz gilt nur, wenn die Matrix aus den ersten Ableitungen der Restriktionen mit M Zeilen und N Spalten den Rang M hat, das heisst, wenn die Restriktionen am Optimalpunkt linear unabhängig sind (Constraint Qualification⁴⁷). Die Constraint Qualification besagt, dass wenn bei einem lokalen Extremum eine Verschiebung entlang der Restriktionstangenten keinen Effekt erster Ordnung auf die Ableitungen hat, d.h. das Produkt aus Gradient mal Verschiebung null ist, auch eine Verschiebung vom Optimalpunkt der Zielfunktion ohne Wirkung ist. Wenn die Hessische Matrix aus den Ableitungen nach den Variablen x und nach den Lagrangemultiplikatoren λ negativ definit ist, dann ist x ein lokales Maximum (Mas-Colell et al. 1995, S. 957). Für globale Extrema müssen die Voraussetzungen durch die Art der Konvexität der Restriktionsfunktionen und der Zielfunktion gegeben sein (vgl. Abschnitt 4.2.6).

4.2.5.2 Optimierung mit Gleichheits- und Ungleichheitsrestriktionen

Der Fall mit ausschliesslich Ungleichheitsrestriktionen wird nicht separat diskutiert, da der KKT⁴⁸ Ansatz eine Erweiterung des Lagrange-Ansatzes ist und die Erweiterung in der Berücksichtigung der Ungleichheitsrestriktionen in Form der Komplementärschlupfbedingungen besteht.

Alle im Optimalpunkt bindenden Restriktionen müssen linear unabhängig (Lineare Unabhängigkeit CQ) sein. Die Bedingungen erster Ordnung, die beim Vorhandensein von Ungleichheitsrestriktionen erfüllt sein müssen, heissen Kuhn-Tucker Bedingungen:

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_m \lambda_m h_m(x) - \sum_k \lambda_k g_k(x)$$

$$I \quad \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_n} = \sum_{m=1}^M \lambda_m \frac{\partial h_m(\bar{x})}{\partial x_n} + \sum_{k=1}^K \lambda_k \frac{\partial g_k(\bar{x})}{\partial x_n} \quad \text{bzw.} \quad \nabla f(\bar{x}) = \sum_{m=1}^M \lambda_m \nabla h_m(\bar{x}) + \sum_{k=1}^K \lambda_k \nabla g_k(\bar{x}) \quad \forall n = 1..N$$

$$II \quad \lambda_k (g_k(\bar{x}) - b_k) = 0 \quad \forall k = 1..K$$

Bei der Bedingung II handelt es sich um die Komplementärschlupfbedingungen.

Im Standardansatz der Maximierung müssen die Lagrangemultiplikatoren der Ungleichheitsrestriktionen ein positives Vorzeichen haben.

Die erste der Kuhn-Tucker Bedingungen ist unter Berücksichtigung der zweiten mit der Lagrange-Bedingung identisch, indem am Extrempunkt der Zielfunktionsgradient durch die Linearkombination der Gradienten der bindenden Restriktionen ausgedrückt werden kann. Die zweite Bedingung besagt, dass bei nicht bindenden Ungleichheitsrestriktionen der zugehörige Lagrangemultiplikator null ist⁴⁹.

Die Constraint Qualification sichert, dass ein lokales Optimum vorliegt. Weitere Konvexitätsanforderungen an die Zielfunktion und an die einzelnen Restriktionen können sichern, dass ein globales Optimum vorliegt (vgl. Abschnitt 4.2.6).

⁴⁷ Die CQ setzen Vorschriften für die Restriktionsfunktionen eines nichtlinearen Programmierungsmodells, damit Irregularitäten am Rand des zulässigen Bereiches ausgeschlossen werden, die die KKT Bedingungen ungültig werden liessen, sollte die optimale Lösung dort auftreffen (Chiang 1984, S. 731): vgl. Abschnitt 4.2.3.

⁴⁸ Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen sind notwendige Bedingungen für Optimas in Optimierungsproblemen mit Ungleichheitsrestriktionen.

⁴⁹ Der Lagrangemultiplikator ist aus der Sicht der Ökonomie der Schattenpreis: vgl. die Analogie zur Linearen Programmierung, wo nur die Schattenpreise bindender Restriktionen verschieden von null sind.

Nichtnegativitätsbedingungen für Variablen:

Die Einführung der ökonomisch sehr sinnvollen Nichtnegativitätsbedingungen modifiziert das Gleichheitszeichen der ersten der KKT Bedingungen ohne Erweiterung zu einem \leq Zeichen. Die strikte Gleichheit gilt nur, wenn die mit den Nichtnegativitätsbedingungen verknüpften Lagrangemultiplikatoren in der ersten Bedingung berücksichtigt sind. Der um die Nichtnegativitätsbedingungen ($x_n \geq 0$) erweiterte Lagrange-Ansatz lautet folglich mit $g_n(x) := -x_n$ (Mas-Colell et al. 1995, S. 960):

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_{m=1}^M \lambda_m h_m(x) - \sum_{k=1}^K \lambda_k g_k(x) - \sum_{n=1}^N \lambda_n g_n(x)$$

$$I \quad \frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x_n} = \sum_{m=1}^M \lambda_m \frac{\partial h_m(\bar{x})}{\partial x_n} + \sum_{k=1}^K \lambda_k \frac{\partial g_k(\bar{x})}{\partial x_n} + \lambda_n \frac{\partial g_n(\bar{x})}{\partial x_n} \quad \text{bzw.} \quad \nabla f(\bar{x}) = \sum_{m=1}^M \lambda_m \nabla g_m(\bar{x}) + \sum_{k=1}^K \lambda_k \nabla h_k(\bar{x}) - \lambda_n \quad \begin{matrix} m = 1..M \\ k = 1..K \\ n = 1..N \end{matrix}$$

$$II \quad \begin{matrix} \lambda_k (g_k(\bar{x}) - b_k) = 0 & \forall k = 1..K \\ -\lambda_n x_n = 0 & \forall n = 1..N \end{matrix} \quad (x_n = \text{Variablenwert} \cong \text{Schlupf der Nichtnegativitätsbedingung})$$

Die Bedingungen II sind die Komplementärschlupfbedingungen.

Das negative Vorzeichen (letzter Term der ersten Optimalitätsbedingung) erklärt sich dadurch, dass die Nichtnegativitätsbedingung durch Multiplikation mit (-1) in die Standardform der Maximierung für eine Ungleichung gebracht werden kann ($g_n(x) = -x_n$ liefert positive Lagrangemultiplikatoren) und der Gradient dieser Ungleichung (-1) ist. Daher werden die mit den Nichtnegativitätsbedingungen verbundenen Lagrangemultiplikatoren subtrahiert.

Graphische Darstellung des Karush-Kuhn-Tucker Ansatzes:

Die graphische Darstellung des Ansatz von Karush-Kuhn-Tucker stützt sich auf das folgende Gleichungssystem:

Minimiere	f:	$(x_1-3)^2+(x_2-2)^2$
u.d.NB	g1:	$x_1^2+x_2^2 \leq 5$
	g2:	$x_1+2x_2 \leq 4$
	g3:	$-x_1 \leq 0$
	g4:	$-x_2 \leq 0$

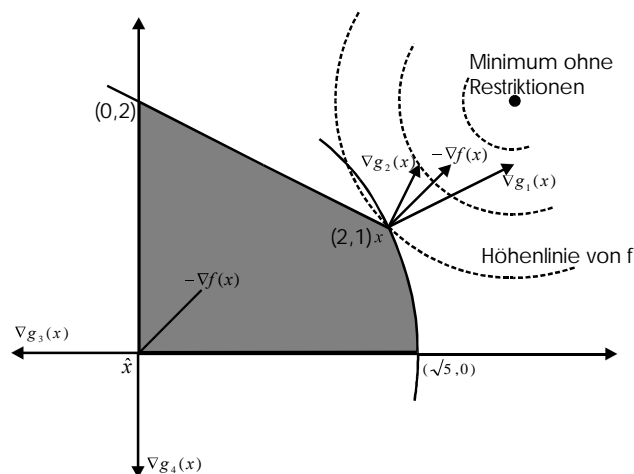


Abbildung 14: Karush-Kuhn-Tucker Ansatz (Quelle: Bazaraa et al. 1993, S. 572f)

Die Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen besagen, dass der negative Zielfunktionsgradient im durch die Gradienten der bindenden Restriktionen aufgespannten Kegel liegen muss. Dadurch

kann der Zielfunktionsgradient am Optimalpunkt als negative Linearkombination der Restriktionsgradienten dargestellt werden. Gradienten nicht bindender Restriktionen sind bei der Gleichsetzung des Zielfunktionsgradienten mit der Linearkombination der Restriktionsgradienten nicht nötig. Daher müssen die zugehörigen Lagrangemultiplikatoren (in Abbildung 14 jene der Nichtnegativitätsbedingungen) 0 sein, wie es die zweite der KKT Bedingungen fordert. Analoges gilt für die übrigen Ungleichheitsrestriktionen, die am Optimalpunkt nicht bindend sind. Bei Gleichheitsrestriktionen haben die Lagrangemultiplikatoren in Abhängigkeit der Wirkung der Restriktion (Wirkung als \geq oder \leq) unterschiedliche Vorzeichen. Der analoge Vorzeichenwechsel tritt bei Ungleichheitsrestriktionen auf, je nachdem, ob diese gemäss dem Standardansatz für ein Optimierungsproblem formuliert sind oder nicht (Maximierung \leq , Minimierung \geq).

4.2.6 Globale Optima in der Nichtlinearen Programmierung

Globale Optima, d.h. Optima deren Zielfunktionswert eindeutig ist, sind für eine sinnvolle Interpretation der Lösung komplexer nichtlinearer Programmierungsprobleme unabdingbar. Lokale Optima sind schwierig zu interpretieren, da eine Bewertung über die Güte des gefundenen Optimums nicht möglich ist und bessere Zielfunktionswerte mit anderen Lösungswerten in den Variablen wahrscheinlich sind. Die zentrale Frage lautet daher: Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit ein durch einen nichtlinearen Solver gefundenes Optimum (Vektor \bar{x} mit Zielfunktionswert z_{opt}) global, d.h. damit der Zielfunktionswert eindeutig ist. Es werden Bedingungen, die die schwächsten Anforderungen stellen, präsentiert.

4.2.6.1 *Streng monotone Zielfunktion und quasikonvexe Ungleichheitsrestriktionen*

Ein globales Optimum liegt vor, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind (Mascoll et al. 1995, S. 961):

- keine Gleichheitsrestriktionen (ausser sie seien linear)
- jede \leq Ungleichheitsrestriktion ist durch eine quasikonvexe Funktion auf der linken Restriktionsseite gegeben
- streng monotone Zielfunktion: $\nabla f(x)(x'-x) > 0$ für x' und x wenn $f(x') > f(x)$ d.h. keine 0 Steigung, d.h. Zielfunktion ist mindestens pseudokonkav
- \bar{x} erfüllt die Kuhn-Tucker Bedingungen
- die Constraint Qualification ist am Punkt \bar{x} erfüllt (es genügt auch, dass der zulässige Bereich (constraint set) ein nichtleeres Inneres hat)

Die Prüfung der Constraint Qualification dürfte bei einem komplexen Modell aufwendig sein (Bsp.: Slater condition vgl. Abschnitt 4.2.3), die Existenz einer inneren Lösung dagegen ist bei ökonomischen Optimierungsproblemen eine Voraussetzung und bezieht sich auf die Ungleichheitsrestriktionen.

Diese Bedingungen sind notwendig und hinreichend.

4.2.6.2 *Arrow-Enthoven sufficiency theorem: quasikonkave Programmierung*

Ein globales Optimum wird bei einem nichtlinearen Programmierungsproblem erhalten, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind (Chiang 1984, S. 744):

Gegeben sei ein nichtlineares Programm der folgenden Form:

$$\begin{aligned} \max \quad & \Pi = f(x) \\ \text{s.t.} \quad & g_k(x) \leq r_k \quad (k = 1, \dots, K) \\ & x_n \geq 0 \end{aligned}$$

Folgende Bedingungen sind hinreichend für ein globales Optimum:

- a) Die Zielfunktion ist differenzierbar und quasikonkav im nichtnegativen Quadranten.
- b) Jede Restriktionsfunktion ist differenzierbar und quasikonvex im nichtnegativen Orthanten.
- c) Im Optimalpunkt sind die Kuhn-Tucker Bedingungen erfüllt.
- d) Und entweder
 - I. $f_n(\bar{x}) < 0$ bei mindestens einer Variablen x_n oder
 - II. $f_n(\bar{x}) > 0$ für einige Variablen x_n , welche einen positiven Wert ohne Verletzung der Restriktionen annehmen können oder
 - III. die n Ableitungen $f_n(\bar{x})$ sind nicht alle null und die Zielfunktion ist zweimal differenzierbar in der Umgebung des Optimalpunktes, d.h. alle zweiten Ableitungen der Zielfunktion existieren am Optimalpunkt oder
 - IV. die Zielfunktion ist konkav.

Bei Erfüllung der Bedingungen a,b,d sind die Kuhn-Tucker Bedingungen lediglich hinreichend für ein Maximum (vgl. Abschnitt 4.2.2). Für komplexe Probleme sind notwendige und hinreichende Bedingungen erforderlich. Die Notwendigkeit der Bedingungen ist bei gewährleisteteter Constraint Qualification gegeben (vgl. Abschnitt 4.2.3).

4.2.6.3 Pseudokonvexe Zielfunktion und quasikonvexe / quasikonkave Restriktionsfunktionen

Unter der Voraussetzung der Constraint Qualification sind die KKT Bedingungen (vgl. Abschnitt 4.2.5.2) notwendig für lokale Optima. Werden bestimmte Konvexitätsannahmen bei der Zielfunktion und den Restriktionsfunktionen erfüllt, so werden die KKT-Bedingungen hinreichend für Optimalität. Solche Konvexitätsanforderungen werden im folgenden erläutert.

Die Konvexitätsanforderungen für Maximierungsprobleme sind die folgenden:

- Ist die Zielfunktion pseudokonkav,
- sind die bindenden Ungleichheitsrestriktionen bei \leq Formulierung quasikonvex und bei \geq Formulierung quasikonkav
- und sind bei quasikonvexen Gleichheitsrestriktionen die Lagrangemultiplikatoren positiv und bei quasikonkaven negativ,
- ➔ dann ist der unter Einhaltung der KKT-Bedingungen erhaltene Lösungsvektor eine optimale Lösung des Problems (Bazaraa et al. 1993, S. 572).

Die KKT-Bedingungen sind in diesem Fall notwendig und hinreichend für eine optimale Lösung. Sind die Konvexitätsanforderungen über den gesamten zulässigen Bereich der einzelnen Restriktionen erfüllt und ist die Constraint Qualification gewährleistet, so ist der unter Einhaltung dieser Restriktionen erhaltene Lösungsvektor ein globales Optimum.

Gleichheitsrestriktionen, die quasikonvex und quasikonkav (über den ganzen Definitionsbereich monoton steigend oder fallend) gleichzeitig sind, bereiten demnach keine Probleme. Damit das KKT Theorem hinreichend ist, genügt es, für die Zielfunktion Pseudokonvexität zu fordern und für den zulässigen Bereich Konvexität. Die Konvexität ist durch die Anforderung von mindestens Quasikonkavität bei \geq und Quasikonvexität bei \leq Restriktionen garantiert (vgl. Bazararaa et al. 1993, S. 572).

4.2.6.4 Gleichheitsrestriktionen und Definitionsgleichungen

Die Frage nach der Behandlung von Gleichheitsrestriktionen und Definitionsgleichungen ist von grosser Bedeutung. In Definitionsgleichungen wird die definierte Variable in anderen Restriktionen oder in der Zielfunktion weiterverwendet. In diesem Falle muss die Konvexitätsart des mit der definierten Variablen bilanzierten Funktionsteils weiter berücksichtigt werden. Die theoretische Analyse eines nichtlinearen Programmierungsmodells sollte so gemacht werden, als ob keine definierten Variablen aus Definitionsgleichungen existieren würden. Diese Aussagen sind solverspezifisch abzuklären⁵⁰. Viele Solver eliminieren Definitionsgleichungen, indem sie die definierten Variablen in den anderen Modellteilen mit der sie definierenden Funktion substituieren.

Es können verschiedene Arten von Gleichheitsrestriktionen unterschieden werden⁵¹: Dabei müssen die diskutierten Eigenschaften für globale Lösungen über den ganzen Definitionsbereich der Variablen gültig sein:

Lineare Gleichungen

Bei linearen Gleichungen ergeben sich keine Schwierigkeiten, da lineare Funktionen konvex und konkav sind.

Nichtlineare Gleichungen:

- a.) *Gleichheitsrestriktionen: $f(x) = a$.* Die Funktion mit dem Wert der Right-Hand-Side a muss mindestens quasikonvex und quasikonkav gleichzeitig, d.h. quasimonoton sein. Ist $f(x)$ nur quasikonvex oder nur quasikonkav, so muss in der Lösung der Lagrangemultiplikator auf das richtige Vorzeichen getestet werden (Bazararaa et al. 1993, S. 572). Im Falle der Maximierung muss der Lagrangemultiplikator bei quasikonvexer Funktion $f(x)$ positiv und bei quasikonkaver Funktion $f(x)$ negativ sein. Im Prinzip müsste die Gleichheitsrestriktion durch die entsprechende Ungleichung (quasikonvexes $f(x)$ bei \leq Restriktion etc.) ersetzt werden können. Dies bedeutet, dass bei quasikonvexem $f(x)$ die Gleichheitsrestriktion nicht als \geq Restriktion wirken darf (umgekehrt für quasikonkaves $f(x)$). Entspricht das Vorzeichen des Lagrangemultiplikators nicht der Konvexitätsart der Funktion $f(x)$, so stimmt die erhaltene Optimallösung nicht.
- b.) *Definitionsgleichung: $f(x) - z = 0$.* Bei Verwendung der definierten Variablen z in anderen Restriktionen oder in der Zielfunktion wird diese von den meisten Solvern durch die Funktion $f(x)$ dort substituiert. Deshalb müssen die Konvexitätseigenschaften der Restriktionen oder der Zielfunktion, die eine globale Lösung aus theoretischer Sicht ermöglichen, nach der Substitution der in ihnen enthaltenen Variablen z durch $f(x)$ erhalten bleiben. Die Verwendung von nichtlinearen Definitionsgleichungen muss daher sehr genau geprüft werden. In einer \leq Restriktion muss im Maximierungsfall bei der Addition der Variablen z die Funktion $f(x)$ mindestens konvex sein (konkav bei Subtraktion). Bei einer \geq Restriktion im Maximierungsfall muss im Falle der Addition der Variablen z die Funktion $f(x)$

⁵⁰ Hinweise von Dr. Benno Bühler IFOR ETHZ vom 19. März 1998.

⁵¹ Hinweise von Dr. Jürg Mayer IFOR ETHZ vom 28.6.2000.

konkav und bei der Subtraktion konvex sein. Wird die Variable z nicht addiert oder subtrahiert sondern in einer Funktion weiterverwendet ($g(x,z)$), so muss die Restriktion oder die Zielfunktion die nötigen Eigenschaften für eine globale Lösung behalten. Daher muss die Funktion $g(x,z) = g(x,f(x))$ auf ihre Konvexitätseigenschaft getestet und mit den Anforderungen (vgl. Abschnitt 4.2.6) verglichen werden.

Lineare Gleichheitsrestriktionen bereiten in nichtlinearen Programmierungsmodellen keine Schwierigkeiten. Gleichheitsrestriktionen müssen mindestens quasimonoton sein. Der Fall der Definitionsgleichungen ist im Modell durch Substitution der definierten Variablen mit der sie definierenden Funktion überall im Modell zu überprüfen. Die Auswirkungen auf die Konvexität des Programmierungsproblems sind zu testen.

Ist für bestimmte Restriktionen nicht der gesamte positive Quadrant konvex, kann über Startpunktvorgaben und Beschränkung der Variablen auf den konvexen Bereich das Problem entschärft werden.

4.2.6.5 Globale Lösungen aus Sicht der Theorie und der Solver

Die theoretischen Anforderungen an das Restriktionssystem und an die Zielfunktion sind nicht unbedingt diejenigen der Solver⁵². So können auf theoretischer Ebene aus der Sicht der globalen Lösbarkeit einwandfreie Probleme bei der Implementation auf dem Solver Schwierigkeiten machen und auch umgekehrt. Es bestehen Diskrepanzen zwischen Theorie und praktischer Umsetzung (Numerik) in Solvern. Dies ist mit ein Grund, weshalb in Ergänzung zu den bestehenden Lösungsverfahren wie KKT und Newton aktuell intensiv an neuen Methoden geforscht wird. Neuerungen sind im Bereich der interior-point Methoden zu finden.

Die theoretischen Anforderungen sind aus Solversicht nicht voll erfüllbar, da Solver auf der Basis von Rechentoleranzen (ϵ -Kriterium⁵³) über die Optimalität entscheiden. Dies ist der Fall beim:

- KKT-Verfahren, wo die Nullsetzung der Gradienten der Lagrangefunktion im ϵ -Bereich erfolgt
- Newton-Verfahren, wo der Gradient einer einzelnen Restriktion im ϵ -Bereich als Null betrachtet wird.

Es können für jedes bekannte Solverkonzept Beispiele gefunden werden, wo der Solver das aus theoretischer Sicht gutartige Problem nicht lösen kann, und umgekehrt bereiten aus theoretischer Sicht nicht gutartige Probleme Solvern überhaupt keine Schwierigkeiten.

In der Anwendung der Methode der Optimierung besteht keine zwingende Notwendigkeit nach jeder Optimierung all die theoretischen Optimalitätskriterien auszutesten. Dies ist nur im Problemfall beim Verdacht auf eine nicht optimale oder nicht globale Lösung durchzuführen und kann evtl. durch die Verwendung anderer Lösungsverfahren bzw. Lösungsalgorithmen entschärft werden.

Nichtlineare Optimierungsprobleme sollten mit mehreren Algorithmen, die unterschiedliche Lösungsverfahren anwenden, gelöst werden (bspw. Solver, die auf Kuhn-Tucker Methode, Newton Methode, innerer Punkt Methode oder Branch-and-Reduce Methode aufbauen).

⁵² Gespräch mit Dr. Benno Bühler, IFOR ETHZ, vom 26. Januar 8.30-9.15 Uhr.

⁵³ Das ϵ -Kriterium ist das Abbruchkriterium für Solver, indem bei Verbesserungen, die kleiner als ϵ sind, der Solver die weitere Suche abbricht.

4.2.7 Schlussfolgerungen für die Modellierung aus Sicht der Konvexität

Für die Konvergenz mathematischer Lösungsverfahren, d.h. für die lokale/globale und evtl. lokal-/global-eindeutige Lösbarkeit von Optimierungsproblemen, ist die Konvexität eines Problems eine entscheidende Voraussetzung. Jedes lokale Extremum eines konvexen Programms ist gleichzeitig ein globales Extremum.

Aus der mathematischen Theorie ergeben sich folgende Anforderungen an die Formulierung von Restriktionen und Zielfunktion für nichtlineare Modelle, damit die Konvexität des Programmierungsproblems gegeben und eine globale Lösung wahrscheinlich ist:

Zielfunktion:

Die Zielfunktion muss im Falle der Maximierung mindestens pseudokonkav und im Falle der Minimierung mindestens pseudokonvex sein (vgl. Abschnitt 4.2.6.3).

Restriktionen:

Die Anforderung, dass die zulässige Menge konvex ist, ist dadurch garantiert, dass als Mindestanforderung die folgenden Voraussetzungen für globale Optima (gleiche Optima-Qualität wie in LP) erfüllt sein müssen:

\leq Restriktionen: die Funktion auf der linken Seite muss mindestens quasikonvex sein

\geq Restriktionen: die Funktion auf der linken Seite muss mindestens quasikonkav sein.

Gleichheitsrestriktionen: Lineare Gleichheitsrestriktionen sind problemlos. Nichtlineare Gleichheitsrestriktionen müssen im Falle der Maximierung mindestens quasimonotone Funktionen aufweisen, d.h. die Funktionen müssen quasikonvex und quasikonkav gleichzeitig sein. Sind sie nur eines von beiden, so ist der Lagrangemultiplikator in der Lösung auf das der Funktion entsprechende Vorzeichen zu überprüfen (bei mindestens quasikonvexer Funktion positiv). Im Falle von Definitionsgleichungen muss die definierte Variable an den Stellen im Modell, an denen sie weiterverwendet wird, mit der sie definierenden Funktion substituiert werden und das Modell muss die Konvexitätseigenschaften, die aus theoretischer Sicht eine globale Lösung garantieren, behalten.

Die Constraint Qualification ist beim Verdacht von Problemen mit der erhaltenen Optimallösung zu verifizieren.

Dies sind die schwächsten Anforderungen für die Formulierung des Restriktionssystems. Werden schärfere Anforderungen gemäss Abbildung 10 erfüllt, so entschärft sich das Problem der Bestimmung der globalen Lösung.

Existieren Schwierigkeiten bezüglich der Quasikonvexitäts- oder Quasikonkavitätsanforderungen an einzelne Restriktionen, so kann der Definitionsbereich der Variablen evtl. soweit eingeschränkt werden, dass eine der Anforderungen erfüllt ist. Dies ist in der Ökonomie meist sinnvoll (Beispiel: Nichtnegativitätsbedingung oder noch stärker eingeschränkter Definitionsbereich für einzelne Variablen).

Skalierungsprobleme⁵⁴ können bei neuen leistungsfähigen Solvern durch diese intern entschärft/eliminiert werden.

⁵⁴ Skalierungsprobleme entstehen, wenn sich die Grössenordnungen der Werte (Produkt aus Koeffizient und Variable) stark unterscheiden (Bsp.: 10^6 , 10^{-6}) und die Solver dieses Problem nicht selbständig lösen.

Solver

Bei den Berechnungen sollten immer mehrere Solver mit unterschiedlichen Lösungsalgorithmen eingesetzt werden. Die Sicherheit einer globalen Lösung steigt bei Verwendung mehrerer Verfahren⁵⁵, da die Diskrepanzen zwischen Theorie und Solver (vgl. Abschnitt 4.2.6.5) entschärft werden können.

Dieses Kapitel klärt aus mathematischer Sicht die Frage der globalen Lösbarkeit nichtlinearer Programmierungsprobleme. Die Nichtlinearität hat für ressourcenökonomische Fragestellungen eine grosse Bedeutung, da viele Zusammenhänge im biophysikalischen Bereich nicht durch lineare Funktionen sinnvoll approximiert werden können. Daneben besitzt der Aspekt der Dynamik in Fragestellungen in den Bereichen Ressourcenökonomie, Nachhaltigkeit und dynamische Investitionsrechnung ein grosses Gewicht. Die Berücksichtigung dieses Aspekts lässt sich aus ökonomischer Sicht auf die Kontrolltheorie abstützen, die sich sehr gut mit dem Programmierungsansatz verbinden lässt.

⁵⁵ Beispiele von Lösungsverfahren sind: Karush-Kuhn-Tucker, Newton Gradienten, Innere-Punkt Methode, Branch and Reduce etc..

5 Kontrolltheorie

Ressourcenökonomische Probleme sind in der Regel nicht statischer Natur. Die Berücksichtigung der Veränderung von Zuständen (stocks) ist typisch für ressourcenökonomische Fragestellungen und erfordert eine dynamische Betrachtung. Weitere Bereiche, in denen eine dynamische Betrachtung angezeigt ist, sind diejenigen der Nachhaltigkeit und der dynamischen Investitionsrechnung. Für dynamische Analysen eignet sich die Kontrolltheorie bestens. Diese wird aus mathematischer Sicht in diesem Kapitel für die analytische und numerische Problemformulierung dargestellt. Im numerischen Fall sind die Aspekte der Konvexität und der minimalen Anforderungen für die globale Lösbarkeit von Optimierungsproblemen im kontrolltheoretischen Modellansatz wichtig (vgl. Kapitel 4).

Ein dynamisches Optimierungsproblem beantwortet die Frage nach dem optimalen Zeitpfad der einzelnen Variablen (Kontroll- und Zustandsvariablen vgl. Abschnitt 5.1) im Betrachtungszeitraum. Die Lösung eines solchen Problems bedingt Kenntnisse im Bereich der Variationsrechnung, der Theorie der optimalen Kontrolle und der dynamischen Programmierung. Die Kontrolltheorie wird als theoretische Abstützung für die Modellrechnungen verwendet, da Variationsrechnung und dynamische Programmierung bei komplexen Problemen Schwierigkeiten bereiten. Das Maximumprinzip ist oft der geeignetste Ansatz⁵⁶ für die Lösung intertemporaler ökonomischer Optimierungsprobleme: „by contrast to classical calculus of variations, it can cope directly with general constraints on the control variables and, by contrast to dynamic programming, it usually suggests the nature of the solution“ (Intriligator 1970, S. 344). Die Kontrolltheorie erlaubt eine analytische Lösung und in der numerischen Anwendung kann der Ansatz nach Lagrange bzw. Kuhn-Tucker (vgl. Abschnitt 4.2.5) verwendet werden, da rein mathematisch die Aufgabe der Maximierung einer Funktion unter Nebenbedingungen vorliegt (vgl. Conrad und Clark 1987 in Goetz 1997, S. 9). Die mathematische Grundlage liegt somit in der Optimierung (vgl. Abschnitt 4.2). Die Kontrolltheorie ist zudem als Anwendung des Theorems der Umhüllenden⁵⁷ zu betrachten, bei der der Parameter Zeit kontinuierlich variiert wird (Chow 1997).

Aus ökonomischer Sicht relevant sind die dynamischen Bewertungen der Veränderungen von Zustandsvariablen über die Kozustandsvariablen im analytischen Ansatz bzw. die Lagrange-multiplikatoren in der numerischen Anwendung (aus ökonomischer Sicht je die Schattenpreise).

Der Abschnitt 5.1 beschreibt das Kontrollproblem allgemein in einer kontinuierlichen und in einer diskreten Form. Die Erweiterung des Kontrollproblems um Nicht-Differential- bzw. Nicht-Differenzgleichungen wird im Abschnitt 5.2 erläutert.

5.1 Das Kontrollproblem

„Grundlegend für die intertemporale Allokationstheorie ist die Analyse des Verhaltens von Wirtschaftssubjekten, die bei ihren Entscheidungen mit intertemporalen Interdependenzen konfrontiert sind. Die Entscheidungsfindung wird dabei üblicherweise als Resultat eines Optimierungskalküls interpretiert, bei dem „Kosten“ und „Nutzen“ der verschiedenen Alternativen gegeneinander abgewogen werden. Dieser Ansatz führt im intertemporalen Kontext häufig auf die Formulierung eines optimalen Kontrollproblems“ (Toussaint 1984).

⁵⁶ Ein ausführlicher Vergleich der dynamischen Programmierung mit der Kontrolltheorie ist in Goetz und Keusch (1999, S. 327ff) und Goetz (1997, S. 7ff) zu finden.

⁵⁷ Vgl. <http://www.chass.utoronto.ca/~osborne/MathTutorial/MEEF.HTM>.

Im dynamischen ökonomischen Entscheidungsproblem geht es um die Allokation knapper Ressourcen auf unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten im Zeitintervall $[t_0, t_1]$ zwischen dem Startzeitpunkt t_0 und dem Endzeitpunkt t_1 . Aus mathematischer Sicht steht die Wahl der optimalen Zeitpfade für die Entscheidungsvariablen (Kontrollvariablen $x(t)$) im Zentrum des Interesses. Die Wahl erfolgt in Abhängigkeit von den Bewegungsgleichungen (Differentialgleichungen) und impliziert die Zeitpfade der Zustandsvariablen $n(t)$, die das Kontrollsystem beschreiben. Die Zielfunktion wird unter Berücksichtigung der Zeitpfade von Kontroll- und Zustandsvariablen maximiert (Hediger 1991, S. 263ff).

5.1.1 Analytische Darstellung des Kontrollproblems

Die Zielfunktion besteht aus dem Integral einer diskontierten Wertfunktion $V(\cdot)$ (Gegenwartswert der Wertfunktion) im Zeitintervall zuzüglich des diskontierten Endwertes $F(\cdot)$ der Ressource (Gegenwartswert). In den Nebenbedingungen wird die Veränderung der Zustandsvariablen ausgehend von einem Ausgangszustand zum Startzeitpunkt beschrieben. Der Wert der Zustandsvariablen $n(t+1)$ wird durch die Werte der Entscheidungs- ($x(t)$) und Zustandsvariablen ($n(t)$) zu früheren Zeitpunkten über die Funktion $f(\cdot)$ beeinflusst (dynamisches Entscheidungsproblem). Somit lässt sich das Kontrollproblem (Entscheidungsproblem eines Akteurs) wie folgt beschreiben⁵⁸:

Gleichung 2: Kontrollproblem mit fixem Startwert, Endwert und fixem Endzeitpunkt

$$\max_{x(t)} \int_{t_0}^{t_1} V(n(t), x(t), t) dt + F(n(t_1), t_1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\dot{n}(t) = f(n(t), x(t), t), \quad n(t_0) = a$$

Der Punkt über der Zustandsvariablen $n(t)$ bezeichnet den Operator $\frac{d}{dt}$. Die Zustandsvariable besitzt im Ausgangszeitpunkt t_0 den Wert a .

Zur Lösung des in Gleichung 2 dargestellten Maximierungsproblems kommen die Methoden der Variationsanalyse, der dynamischen Programmierung und der optimalen Kontrolle in Frage (Hediger 1991, S. 265). Wie oben erwähnt ist das Maximumsprinzip oft der geeignetste Ansatz für die Lösung intertemporaler Optimierungsprobleme. Die Lösung des allgemeinen Kontrollproblems basiert auf dem Maximumprinzip unter Verwendung der Hamiltonfunktion:

Gleichung 3: Hamiltonfunktion des Kontrollproblems in Gleichung 2 in laufenden Werten

$$H(n(t), x(t), \gamma(t), t) = V(n(t), x(t), t) + \gamma(t) f(n(t), x(t), t)$$

Die Hamiltonfunktion stellt die um die dynamische Restriktion (Bewegungsgleichung) erweiterte Zielfunktion dar. Die Kozustandsvariable $\gamma(t)$, aus ökonomischer Sicht der Schattenpreis, bewertet die Restriktion bzw. die Veränderung der Zustandsvariable. Zu jedem Zeitpunkt t erfasst die Kozustandsvariable alle künftigen (t bis t_1) Auswirkungen der Veränderungen der Zustandsvariablen im Zeitpunkt t auf die Zielfunktionsgröße. Die Zielfunktion ist durch eine geeignete Wahl der Zeitpfade für die Kontrollvariable $x(t)$, die Zustandsvariable $n(t)$ und die Kozustandsvariable $\gamma(t)$ im Zeitintervall $[t_0, t_1]$ zu maximieren. Das Maximumprinzip ist eine Erweiterung der statischen Lagrange-Methode für nichtlineare Optimierungs-

⁵⁸ Die folgenden Ausführungen stützen sich auf Goetz und Keusch 1999, S. 328f.

probleme auf dynamische Optimierungsprobleme (z.B. Kontrollprobleme) mit Differentialgleichungen (Seierstad und Sydsaeter 1987, S. 74ff, Kamien und Schwartz 1991, S. 218ff, Chow 1997, S. 145, Hediger 1991, S. 266). Die notwendigen Bedingungen für ein Maximum der in Gleichung 3 dargestellten Hamiltonfunktion lauten für t in t_0 bis t_1 (Feichtinger und Hartl 1986 in Goetz und Keusch 1999)⁵⁹:

Gleichung 4: Notwendige Bedingungen für ein Maximum der Hamiltonfunktion

1. $H_{x(t)} = V_{x(t)}(n(t), x(t), t) + \gamma(t) f_{x(t)}(n(t), x(t), t) = 0$
2. $\dot{n}(t) = f(n(t), x(t), t) = H_{\gamma(t)}$
3. $\dot{\gamma}(t) = -H_{n(t)}$
4. $\gamma(t_1) = F_n(n(t_1), x(t_1), t_1)$
5. $n(t_0) = a$

Die Bedingung 1 (Maximumsbedingung) stellt die Optimierung sicher. Die Bedingungen 2 und 3 sind die eigentlichen Bewegungsgleichungen für die Zustands- und die Kozustandsvariable. Die Randbedingungen 4 und 5 stellen die Transversalitätsbedingungen für den Fall mit festen Startbedingungen und nicht spezifizierten Endbedingungen dar. Die Bedingungen erlauben, die generelle Lösung des Systems der beiden Differentialgleichungen näher zu bestimmen, so dass man eine partikuläre Lösung erhält.

Die oben dargestellte Form des Maximumprinzips entspricht der Standarddarstellung in der ökonomischen Literatur, in der die Zeit als Kontinuum aufgefasst wird. In der Anwendung auf konkrete Fragestellungen ist dagegen der diskrete Ansatz besser geeignet⁶⁰. Dieser stützt sich zur Lösung auf das Lagrange-Verfahren ab.

5.1.2 Numerische Darstellung des Kontrollproblems

Die numerische Darstellung des Kontrollproblems in Gleichung 2 besitzt folgende Struktur: Maximiert werden die Gegenwartswerte aller künftigen diskreten Wertströme unter der Nebenbedingung der Differenzgleichung, die die Veränderung der Zustandsvariablen diskret beschreibt:

Gleichung 5: Numerische Darstellung des Kontrollproblems

$$\max_{x_t} \sum_{t=0}^{T-1} V(x_t, n_t, t) + F(n_T, T)$$

unter der Nebenbedingung

$$x_{t+1} - x_t = f(x_t, u_t, t)$$

$$x_0 = a$$

Für den diskreten Fall gelten zum kontinuierlichen Fall analoge Annahmen: Der Planungshorizont beschränkt sich auf T und die laufenden Funktionswerte der Wertfunktion $V(\cdot)$ werden mittels des Diskontfaktors $(1+\delta)^{-t}$ mit der periodischen Diskontrate δ diskontiert. Der Aus-

⁵⁹ Die Tiefstellung einer Variablen bei einer Funktion bedeutet immer die partielle Ableitung nach dieser Variablen.

⁶⁰ Die folgenden Ausführungen stützen sich im wesentlichen auf eine ausführliche Version des Papers (Goetz und Keusch 1999). Das Paper ist bei den Autoren erhältlich.

gangswert der Zustandsvariablen ist a . $F(n_T, T)$ beschreibt den diskontierten Endwert der Zustandsvariablen im betrachteten System, das beispielsweise ein landwirtschaftlicher Betrieb oder eine Unternehmung sein kann. Die Werte der Entscheidungs- (x_t) und Zustandsvariablen (n_t) zum Zeitpunkt t beeinflussen den Wert der Zustandsvariablen zu einem späteren Zeitpunkt ($t+1$) über den funktionalen Zusammenhang $f(\cdot)$ (dynamisches Entscheidungsproblem). Somit muss die Lösung des Problems in Gleichung 5 die optimalen Werte der Entscheidungs- und Zustandsvariablen zu jedem Zeitpunkt liefern. Die Lagrangefunktion des Problems der Maximierung einer Funktion unter T Nebenbedingungen präsentiert sich wie folgt:

Gleichung 6: Lagrangefunktion

$$L = \sum_{t=0}^{T-1} V(n_t, x_t, t) + \lambda_{t+1} (f(n_t, x_t) + n_t - n_{t+1}) + F(n_T, T)$$

Dabei ist der Lagrangemultiplikator λ_{t+1} , die Kozustandsvariable, mit der Zustandsvariablen x_{t+1} assoziiert. Die notwendigen Bedingungen⁶¹ für das Maximum der Lagrangefunktion im Innern des Definitionsbereiches der Funktion (d.h. Randwerte der Entscheidungsvariablen n_t sind ausgeschlossen) ergeben umgeformt⁶²:

Gleichung 7: Notwendige Optimalitätsbedingungen der Lagrangefunktion

$$L_{x_t} = 0 \quad \text{bzw.} \quad V_{x_t} + \lambda_{t+1} f_{x_t} = 0 \quad t = 0, \dots, T-1 \quad (1)$$

$$L_{\lambda_{t+1}} = 0 \quad \text{bzw.} \quad n_{t+1} - n_t = f \quad t = 0, \dots, T-1 \quad (2)$$

$$L_{n_t} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \lambda_{t+1} - \lambda_t = -V_{n_t} - \lambda_{t+1} f_{n_t} \quad t = 0, \dots, T-1 \quad (3)$$

$$L_{n_T} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \lambda_T = F_{n_T}(n_T), \quad n_0 = a \quad (4)$$

Wie im kontinuierlichen Fall lassen sich die notwendigen Bedingungen in eine Maximumbedingung (1) und zwei Differenzgleichungen ((2),(3)) mit zugehörigen Randbedingungen (4) unterteilen. Bedingung (1) besagt, dass die Wertänderung der Funktion $V(\cdot)$ der mit dem Schattenpreis der Folgeperiode bewerteten Veränderung des Wertes der Zustandsvariablen infolge Variation der Kontrollvariablen x um eine Einheit entspricht⁶³. Bedingung (2) besagt, dass die Funktion $f(\cdot)$ die Veränderung der Zustandsvariablen zwischen zwei unmittelbar folgenden Zeitpunkten abbildet. Gemäss Bedingung (3) entspricht die optimale Veränderung des Schattenpreises zwischen zwei sich unmittelbar folgenden Perioden der marginalen Veränderung der Zielfunktion korrigiert um die mit dem Wert der Kozustandsvariablen der Folgeperiode bewerteten Veränderung der Zustandsvariablen. Die Differenzgleichungen in den Bedingungen (2) und (3) geben lediglich die Veränderungen einer bestimmten Grösse an, sagen aber nichts über den Wert dieser Grösse aus. Daher sind Randbedingungen in Form eines Anfangs- und Endwertes für die exakte Bestimmung der optimalen Zeitpfade vonnöten. Gemäss Bedingung (4) muss der Schattenpreis in der Endperiode T dem marginalen Endwert der Res-

⁶¹ Damit die Bedingungen notwendig und hinreichend sind, muss das Problem konvex sein, d.h. die Lagrangefunktion muss konkav und die Constraint Qualification erfüllt sein. Konvexität ist gegeben im Falle der Maximierung bei einer mindestens pseudokonkaven Zielfunktion und mindestens quasikonvexen Restriktionsfunktionen im Standardansatz (vgl. Abschnitt 4.2.6).

⁶² Vgl. Fussnote 59.

⁶³ Dies bedeutet, dass die Intensivierung nicht bis zum Grenzgewinn von 0 erfolgt, sondern bis der Grenzgewinn dem mit dem Wert der Ressource in der Folgeperiode bewerteten Grenzschaten der Intensivierung entspricht. Die optimale Intensität ist daher im dynamischen Fall tiefer bei Funktionen mit abnehmendem Grenzertrag.

source entsprechen und der Ausgangswert der Ressource beträgt a (Fall mit freiem Endzustand).

Vergleicht man die notwendigen Bedingungen des dynamischen Problems in Gleichung 4 mit den notwendigen Bedingungen des entsprechenden statischen Problems, so hat im statischen Fall der künftige Schattenpreis der Ressource (λ_{t+1}) den Wert null, da der Wert der Zustandsvariablen in den Folgeperioden nicht berücksichtigt wird. Die dynamische Betrachtungsweise berücksichtigt dagegen die Auswirkungen des gegenwärtigen Wertes der Kontrollvariablen auf die künftigen Werte der Zustandsvariablen durch die Grösse f_{x_t} . Veränderungen der Zustandsgrösse werden über den gesamten verbleibenden Zeitraum mit Hilfe des Schattenpreises (Kozustandsvariable in der analytischen Darstellung) monetär bewertet. Im statischen Fall entspricht die Bedingung (1) der Marginalitätsbedingung, wie sie aus der statischen Produktionstheorie bekannt ist: Grenzerlös = Grenzkosten (Grenzgewinn = 0). Auch in Bedingung (3) ist die Optimalitätsbedingung der statischen Betrachtung enthalten. Setzt man λ_{t+1} auf den Wert null (statische Betrachtung), so lautet die Aussage der Gleichung, dass der Schattenpreis der Ressource der Veränderung der Zielfunktion bei einer Veränderung der Ressource um eine Einheit entspricht. Die Randbedingungen in Bedingung (4) entfallen im statischen Fall.

Ist die Gewinnfunktion $V(n_t, x_t, t)$ konkav, d.h. weist sie abnehmende Grenzerträge auf, so ist der Wert der Kontrollvariablen x_t in der dynamischen Betrachtung (Bedingung (1)) kleiner als derjenige im statischen Fall, wenn der Einfluss der Kontrollvariablen auf die Ressource, abgebildet in der Zustandsvariablen, negativ ist. Im dynamischen Ansatz werden die Ressourcen daher extensiver genutzt, da durch die Nutzung (Kontrollvariablenwert) zusätzliche Kosten im Sinne intertemporaler Opportunitätskosten oder sogenannte Nutzungskosten $\lambda_{t+1} * f_{x_t}$ entstehen. Die Nutzungsintensität der kurzfristigen Gewinnfunktion wird in der dynamischen Betrachtung nicht bis zu einem Grenzgewinn von null ausgedehnt, sondern nur solange erhöht, bis der kurzfristige Grenzgewinn (abnehmend, da konkave kurzfristige Gewinnfunktion) den intertemporalen Nutzungskosten entspricht. Die kurzfristige Sicht führt daher zu einer Übernutzung der Ressourcen und damit zu intertemporaler Ineffizienz, die langfristige (dynamische) Betrachtung dagegen zu einer intertemporal effizienten Ressourcennutzung.

5.2 Behandlung zusätzlicher Restriktionen

Wird das Kontrollproblem in Gleichung 2 um weitere Restriktionen (nicht Differentialgleichungen) erweitert, so kommt auch im kontinuierlichen Fall der Lagrange-Ansatz zum Tragen, indem die Hamiltonfunktion in Gleichung 3 als Zielfunktion verwendet und die zusätzlichen Restriktionen entsprechend des Lagrange-Ansatzes (vgl. Abschnitt 4.2.5) integriert werden.

5.3 Schlussfolgerungen für die Modellierung: Theoretische Abstützung

Die Kontrolltheorie liefert die theoretische Grundlage zur Analyse des Verhaltens von Akteuren, die bei den Entscheidungen mit intertemporalen Interdependenzen konfrontiert sind. Dabei stützt sich das ihr eigene Maximumprinzip für dynamische Optimierungsprobleme auf die statische Lagrange-Methode für nichtlineare Optimierungsprobleme ab. In der numerischen Darstellung sind der Modellgrösse aus mathematischer Sicht keine Grenzen gesetzt, in der analytischen Formulierung ist die Lösbarkeit je nach Art des Problems auf die Verwendung von 2 oder wenigen Zustandsvariablen limitiert. Diese Limitierung hängt von der gegenseitigen Abhängigkeit der verwendeten Restriktionen, den Transversalitätsbedingungen und dem Zeithorizont der Betrachtung (endlich oder unendlich) ab. Zustandsvariablen und deren Veränderung im Zeitablauf gestatten die Abbildung der Ressourcenentwicklung. Die Kontrollva-

riablen liefern die optimalen Entscheide im Zeitablauf. In den Kozustandsvariablen der Differential- bzw. Differenzgleichungen sind zudem alle künftigen Auswirkung einer Veränderung der Zustandsvariablen zu einem Zeitpunkt berücksichtigt und bewertet. Deshalb liefert der kontrolltheoretische Ansatz eine korrekte Schätzung des Wertes der Veränderung der Zustandsvariablen (Bsp.: Kosten der Ressourcennutzung) zu einem Zeitpunkt. Im Gegensatz dazu führt eine kurzfristige Betrachtung dynamischer Fragestellungen infolge Nichtbeachtung der Folgekosten der Ressourcennutzung zu deren Übernutzung und damit zu einer intertemporal ineffizienten Nutzung. Die Kontrolltheorie liefert daher eine geeignete theoretische Grundlage für die Modellierung von Fragestellungen im Bereich der Ressourcenökonomie, speziell für die Erosionsproblematik und führt zu intertemporaler Effizienz in der Ressourcennutzung.

TEIL 2: DAS EROSIONS- / PHOSPHORPROBLEM UND SEINE MODELLIERUNG

Übersicht Teil 2: Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung

Die Analyse des Erosions- / Phosphorproblems aus ressourcenökonomischer Sicht verlangt infolge der hohen Bedeutung der naturwissenschaftlichen (biophysikalischen) Ebene die Erfüllung spezieller Anforderungen bei der Modellierung für eine spätere Analyse. Aus den Schlussfolgerungen in den einzelnen Kapiteln im Teil 1 über die Grundlagen der Modellierung ergibt sich Klärungsbedarf über das zu betrachtende System und den relevanten Handlungsspielraum für die Analyse. Spezielle Herausforderungen stellen der zu wählende Modellansatz, die konvexe Formulierung des Modells und dessen Validierung.

Kapitel 6 diskutiert Aspekte des Erosions- / Phosphorproblems aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht. Verschiedene Methoden aus der Literatur zur Bewertung der Erosion und Analyse von Massnahmen werden im Kapitel 7 dargestellt. Eine Übersicht über Massnahmen zur Eindämmung der Wirkungen der Erosion und über Politikinstrumente zur Beeinflussung der Massnahmen folgt im Kapitel 8. Der Modellansatz der Kombination eines biophysikalischen Simulations- mit einem ökonomischen Optimierungsmodell wird im Kapitel 9 ausführlich dargestellt. Kapitel 10 vertieft aus mathematischer Sicht das sich aus dem Modellansatz ergebende Problem, dass die hektarbezogenen Daten des biophysikalischen Simulationsmodells ins ökonomische Modell eingebaut werden müssen und dabei die für die globale Lösbarkeit notwendigen Eigenschaften der verwendeten Funktionen nicht verloren gehen dürfen. Es werden Produktionsfunktionen aus der ökonomischen Literatur untersucht, und danach wird die Cobb-Douglas Funktion so modifiziert, dass sie den Anforderungen aus dem Modellansatz (Kapitel 9) und aus Sicht der Konvexität (Abschnitt 4.2.7) genügt. Im Kapitel 11 erfolgt die qualitative Analyse des ökonomischen Modells, die für die Interpretationsmöglichkeiten der numerischen Anwendung zentral ist. Sie hilft auch zu prüfen, ob das verwendete Modell qualitativ gut und gültig ist.

6 Beschreibung des Erosions- / Phosphorproblems

Durch die Nutzung der Ressource Boden entsteht an gefährdeten Standorten vor allem im Ackerbau das Problem der Erosion. Die Erosion führt neben den Auswirkungen auf Stufe Betrieb durch die Verschlechterung des Produktionsfaktors der Ressource Boden zum Eintrag von partikulärem Phosphor in die Gewässer. Zusammen mit dem in gelöster Form eingetragenen Phosphor ergibt sich daraus das Umweltproblem der Eutrophierung.

Dieses Kapitel beschreibt das Erosions- und Phosphorproblem aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht. Die naturwissenschaftliche Sicht geht im speziellen auf die Beschreibung des Standortes ein und definiert damit das System gemäss Abschnitt 2.1 für die Modellrechnungen (vgl. Kapitel 12 und 14). In der ökonomischen Sicht werden die Eigenheiten des Erosions- / Phosphorproblems zusammen mit Bewertungstechniken dargelegt. Die monetäre Bewertung der Erosion und ihrer Folgen in der Literatur schliesst sich im Abschnitt 6.2.3 an und gibt einen Überblick über Bewertungen in der internationalen Literatur.

6.1 Problembeschreibung naturwissenschaftlich

Phosphor in Gewässern stammt aus erodiertem Bodenmaterial (partikulärer Phosphor) oder aus der Abschwemmung (gelöster Phosphor). Bodenprozesse, die die Wasserqualität beeinflussen, sind die folgenden: Bodenerosion⁶⁴, Auswaschung⁶⁵, Makroporenflüsse⁶⁶ und Humusmineralisation⁶⁷ (Lal et al. 1983, S. 4). Der im Rahmen landwirtschaftlicher Produktion ausgebrachte Phosphor reichert sich in den obersten Bodenschichten an, indem der Nährstoff durch eine starke Bindung an einzelne Bodenpartikel immobilisiert wird. Dem Phosphor kommt eine Schlüsselrolle zu, da Phosphor in den meisten Seen bei natürlichen Bedingungen die limitierende Grösse des Algenwachstums ist, während C, H und O meist im Überfluss vorhanden sind. Das Gesamtsystem eines Sees bleibt im Gleichgewicht, solange die Phosphorzufuhr durch die Bindung an die Sedimente und den Austrag über den Abfluss ausgeglichen ist. Für den Bodensee wurde eine Zielgrösse bezüglich Sauerstoffkonzentration von 4mg/l auf einer Höhe von 1 m über dem Grund angegeben. Die Begründung für diese Grösse ist limnologisch (Bührer 1993, S. 3). Überdüngt ist ein See, wenn Situationen von Sauerstoffmangel auftreten. Dies kann dazu führen, dass toxische Elemente freigesetzt werden (Liechti 1994, S. 12ff). Unter aeroben Bedingungen reichert sich Phosphor im Sediment an, wird aber unter anaeroben Bedingungen wieder freigesetzt mit einer sprunghaften Zunahme, wenn die Sauerstoffkonzentration gegen 0 geht (Bührer 1993, S. 9).

Die folgende Aufzählung listet die Effekte einer Eutrophierung eines stehenden Gewässers mit Phosphor auf:

- Bei Sauerstoffarmut am Grund werden bedeutende Mengen von Phosphor aus dem Sediment gelöst
- Freisetzung weiterer toxischer Elemente
- Verminderung der Abbauqualität und –geschwindigkeit natürlicher und xenobiotischer Stoffe

⁶⁴ Transport von gelösten und gebundenen Sedimenten im Oberflächenabfluss.

⁶⁵ Bewegung von Nährstoffen, Agrarchemikalien und gelöstem organischem Kohlenstoff im versickernden Wasser.

⁶⁶ Rascher Transport von Wasser und Verschmutzern von der Oberfläche in den Unterboden und in das Drainagesystem.

⁶⁷ Freisetzung leicht löslicher Substanzen, die leicht abgeschwemmt oder ausgewaschen werden.

- Unterbindung der Entwicklung von Fischeiern und Brut
- Nachteilige Veränderung des seetypischen Artenspektrums

Die folgenden Abschnitte vertiefen das Erosions- sowie das Phosphorproblem in Gewässern.

6.1.1 Erosion

Bodenerosion⁶⁸ entsteht, wenn die Infiltrationskapazität des Bodens überschritten wird. Sie gilt weltweit als Hauptursache von Bodendegradation und als Hauptgefahr für die landwirtschaftliche Produktionsgrundlage (Schaub und Prasuhn 1990). Erosion verschlechtert die Produktivität⁶⁹ eines landwirtschaftlichen Standorts, indem die mögliche Durchwurzelungstiefe, das Wasserspeichervermögen, die Bodenstruktur, die Menge an organischem Material und an Nährstoffen sowie die Bodenfruchtbarkeit verschlechtert wird (Flörchinger 1999, S. 6f). Durch Erosion wird die Variabilität der Böden erhöht, was die Managementanforderungen steigert (Colacicco et al. 1989, S. 35). Putman et al. (1988) schätzen die Produktivitätsverluste für den Zeitraum von 100 Jahren in den USA auf 2.3 %, Colacicco et al. (1989) setzen dieselbe Grösse auf bis zu 4.6 % bei spezifischen Kulturen (Getreide, Baumwolle). Ein Hauptproblem besteht daher darin, dass die Auswirkungen der Erosion kurzfristig schwer erkennbar und mit geringfügigen ökonomischen Auswirkungen verbunden sind (vgl. auch Alfson et al. 1996, S. 132). Verbesserte Technologien und Schwankungen aufgrund anderer Einflussfaktoren überdecken negative Erosionseffekte auf Stufe Betrieb. Die Produktivitätsverluste des Bodens können nur zum Teil durch eine Steigerung des Inputeinsatzes pro Flächeneinheit kompensiert werden (Lal et al. 1983).

Die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Bodenerosion sind Wind und Wasser, das Bewirtschaftungssystem, die Bodenstruktur und -textur, die Hangneigung und die vorhandene Vegetation (Pimentel 1997, S. 198f).

Prasuhn und Braun (1994, S. 26) unterscheiden folgende Erosionsarten:

- **Bodenerosion auf Ackerland**

Es handelt sich hierbei um den durch menschliche Bewirtschaftung ausgelösten Abtrag des Bodens durch Wasser. Dieser schwankt mit der Vielfalt der Bodentypen, der Hangneigungsstufen und der Bodenbewirtschaftung.

Erosionsanfällig sind vor allem die Kulturen Mais, Rüben, Gemüse und Kartoffeln. Die höchsten flächenspezifischen Verluste treten ebenfalls bei diesen Kulturen und zusätzlich bei Reben auf (Braun et al. 1997, S. 21).

- **Natürliche Erosion**

Neben der Erosion auf Ackerland findet auf allen Flächen, ausser auf Siedlungsflächen und in stehenden Gewässern, zusätzlich eine „natürliche“ Erosion statt. Sie entsteht durch physikalische und chemische Verwitterung, fluviale Erosion, Rutschungen etc. (Braun et al. 1994, S. 22).

⁶⁸ Bodenerosion ist eine Verstärkung von Abtragsprozessen infolge menschlicher Nutzung.

⁶⁹ Mit Produktivität wird die Kapazität des Bodens bezeichnet, unter durchschnittlichen Standortbedingungen und bei einem bestimmten Managementsystem ein bestimmtes Pflanzenwachstum bzw. Ertragsniveau (auch in Folge) zu ermöglichen (National Soil Erosion - Soil Productivity Research Planning Committee 1981, S. 82).

Erosion hat vielfältige Auswirkungen auf das System Boden. Es stellt sich die Frage, wie die Auswirkungen der Erosion auf das Bodensystem für Modellzwecke abgebildet werden können (Abschnitt 6.1.1.1).

6.1.1.1 Bestimmung der Wirkungen der Erosion

Xu und Prato (1995) benutzen die Veränderung der Bodenmächtigkeit als Mass für die Bestimmung der Wirkung der Bodendegradierung durch Bodenerosion. Infolge des komplexen Systems Boden ist diese Grösse zur Bestimmung der Wirkungen der Bodenerosion aber zu grob. Durch Erosion geht primär Oberboden verloren. Durch die Bodenbearbeitung werden dann tiefere Bodenschichten mit dem Oberboden vermischt und die produktionsrelevanten Bodeneigenschaften verändern sich. Somit werden die Produktivitätswirkungen der Erosion und damit die Bewertungsmöglichkeiten für erosionsmindernde Massnahmen allein durch die Bodenmächtigkeit ungenügend abgebildet, da Veränderungen in den produktionsrelevanten Bodeneigenschaften, die nicht durch die Datengrundlage abgedeckt sind, im aggregierten Parameter Bodenmächtigkeit nicht ausreichend erfasst werden können.

Hoag (1998) empfiehlt die Verwendung eines Produktivitätsindex, des Pierce-Indexes (vgl. auch Colacicco et al. 1989, Flörchinger 1999, Lal et al. 1983), zwecks einer im Vergleich zur Bodenmächtigkeit besseren Abbildung der Bodenerosion. Der Index berücksichtigt den Ersatz und die Vermengung des Oberbodens mit Bodenmaterial aus tieferen Schichten neben der absoluten Veränderung der Bodenmächtigkeit (Hoag 1998, S. 423). Jede Bodenlage ist durch das verfügbare Wasser, den pH und die Lagerungsdichte charakterisiert. Hoag betont den Vorteil der Einfachheit des Produktivitätsindex gegenüber komplexen Bodenmodellen wie z.B. EPIC⁷⁰. Die Verwendung von EPIC wird vom Autor als schwierig und teuer betrachtet. Es werden aber keine Angaben gemacht, wie die funktionalen Zusammenhänge zwischen Erträgen und Pierce-Index sowie anderen Inputfaktoren bestimmt werden können. Vermutlich sind dazu Daten biophysikalischer Simulationsmodelle gleichwohl notwendig.

Goetz et al. (1998) betrachten die von Hoag (1998) gezogenen Schlussfolgerungen als unvollständig für allgemeine intertemporale Optimierungsmodelle und die Verwendung des Pierce-Indexes als falsche Richtung für die empirische Arbeit. Goetz et al. (1998) favorisieren den Einsatz biophysikalischer Simulationsmodelle wie beispielsweise EPIC, da sie nichtlineare Zusammenhänge zwischen Erträgen und Bodenverlusten in Funktion der Bodentiefe erlauben. Gemäss Goetz (1997, S. 341) erfordern die unterschiedlichen Bodencharakteristika in den verschiedenen Bodenlagen nichtlineare Beziehungen. Beispiele für die Verwendung eines solchen Ansatzes liefern LaFrance (1992) und Goetz (1997) in ihren qualitativen Analysen. Beide Studien untersuchen den Fall, in dem der Akteur die Möglichkeit besitzt, die Bodenverluste zu verringern. Goetz (1997) betrachtet dabei die Kulturenwahl als Verringerungsstrategie, während LaFrance (1992) wie auch Hoag (1998) den Einsatz bodenschonender Inputs betrachten. Zudem ist bei einem solchen Ansatz die Grösse Bodenmächtigkeit als Bodenqualität besser beschrieben, da das Zusammenwirken einer grossen Zahl von berücksichtigten Bodeneigenschaften und deren Veränderungen erfasst ist. Die Bodenparameter werden nicht wie bei Hoag (1998) pro Bodenlayer als konstant angenommen, sondern verändern sich durch die Bewirtschaftung und nicht nur durch Mischung. Die Variation der relevanten Bodenparameter (Beispiel Zustandsgrössen wie Bodenmächtigkeit, Nährstoffpools, etc.) und ihrer Einflussfaktoren (Bewirtschaftungsmassnahmen) erlauben in biophysikalischen Simulationsmodellen die Generierung von Daten, die es ermöglichen, die funktionalen Zusammenhänge im relevanten Bereich abzubilden (vgl. Kapitel 9.1 für eine Beschreibung von Parametern in EPIC). So kann auch die für die Schätzung der Funktionen notwendige Variabilität ga-

⁷⁰ EPIC = Erosion Productivity Impact Calculator, vgl. Sharpley und Williams 1990a.

rantiert werden. Ein bedeutender Vorteil liegt darin, dass sich durch die Verwendung von Poolgrößen (N-Pool, P-Pool etc.) Fruchtfolgeeffekte berücksichtigen lassen, indem sich die Poolgrößen in Abhängigkeit von Bewirtschaftungsmassnahmen (beispielsweise Fruchtfolge) und von nicht anthropogenen Einflüssen verändern. Diese Poolgrößen können als Gedächtnis der Vergangenheit des Bodens betrachtet werden. Es sind daher keine vorgegebenen Fruchtfolgen bei den biophysikalischen Simulationen notwendig, sondern diese können unabhängig von der Fruchtfolge durchgeführt werden. Damit ist die Fruchtfolge in der Verwendung im ökonomischen Modell bzw. in der weiteren Verwendung generell als Entscheidungsvariable weiterhin benutzbar. Diese Betonung der Vorteile der Verwendung biophysikalischer Simulationsmodelle lässt sich auch mit der Arbeit von Oriade und Dillon (1997) stützen, wo betont wird, dass die Verwendung von biophysikalischen Bodenmodellen für empirische Arbeiten notwendig ist.

Nach den Ausführungen zu den Möglichkeiten der Abbildung von Erosionswirkungen in Modellen folgt im Abschnitt 6.1.1.2 eine knappe Umschreibung der Erosionssituation in der Schweiz.

6.1.1.2 Erosionssituation in der Schweiz

Bei erosionsauslösenden Niederschlägen sind jeweils 10-20 % der offenen Ackerflächen von Bodenabtrag betroffen. Bei Starkregen können bis 40% der Flächen betroffen sein (Mosimann et al. 1990). Die Intensivierung der Landwirtschaft, die Ausweitung der offenen Ackerfläche, die Erschliessung neuer Kulturflächen und die Ausdehnung von erosionsanfälligen Kulturen auf abtragsgefährdeten Standorten haben die Bodenabtragsituation in der Schweiz verschärft.

Erosion führt zu Produktivitätsverlusten auf Stufe Betrieb. Daneben führt Erosion auch zum Eintrag von partikulärem Phosphor in die Gewässer (Abschnitt 6.1.2).

6.1.2 Phosphorverluste

6.1.2.1 Umweltauswirkungen des Phosphors

Erosion verursacht auf Stufe Betrieb negative Auswirkungen durch die Verschlechterung der Bodenressource (abnehmende Bodenmächtigkeit, Verlust von organischem Material und Nährstoffen, Abnahme der Bodenfruchtbarkeit). Mit dem erodierten Material wird Phosphor ausserhalb des erodierten Bodensystems (ausserhalb des betrieblichen Systems) in die Umwelt freigesetzt und verursacht dort Umweltauswirkungen.

Auf das terrestrische System besitzt der Phosphor infolge des Fehlens der Toxizität keine negativen Auswirkungen. Im aquatischen System führt biologisch verfügbarer Phosphor⁷¹ zur Eutrophierung und damit zur Verschlechterung der Wasserqualität (Sharpley 1995, S. 16). Eine minimale Phosphorkonzentration ist in aquatischen Ökosystemen nötig für die pflanzliche Produktion. Wegen der Eigenschaft als limitierender Faktor für das Algenwachstum führt eine Erhöhung der Phosphorzufuhr zu verstärktem Algenwachstum. Beim Absterben der Algen beginnen Bakterien mit deren Abbau, der Sauerstoff verbraucht, was zu Sauerstoffdefiziten führt. Sauerstoffdefizite können bis zur vollständigen Zerstörung biologischer aquatischer Systeme führen (van Vuuren et al. 1997, S. 225).

⁷¹ „Als biologisch verfügbarer Phosphor wird derjenige Anteil des Phosphors betrachtet, der durch das Phytoplankton des Sees aufgenommen werden kann. Dazu gehört der gelöste sowie ein Teil des in organischen Partikeln eingeschwemmten Phosphors“ (Wehrli und Wüest 1996, S. 23).

Abbildung 15 zeigt Boden- und Transportprozesse im Zusammenhang mit Phosphor:

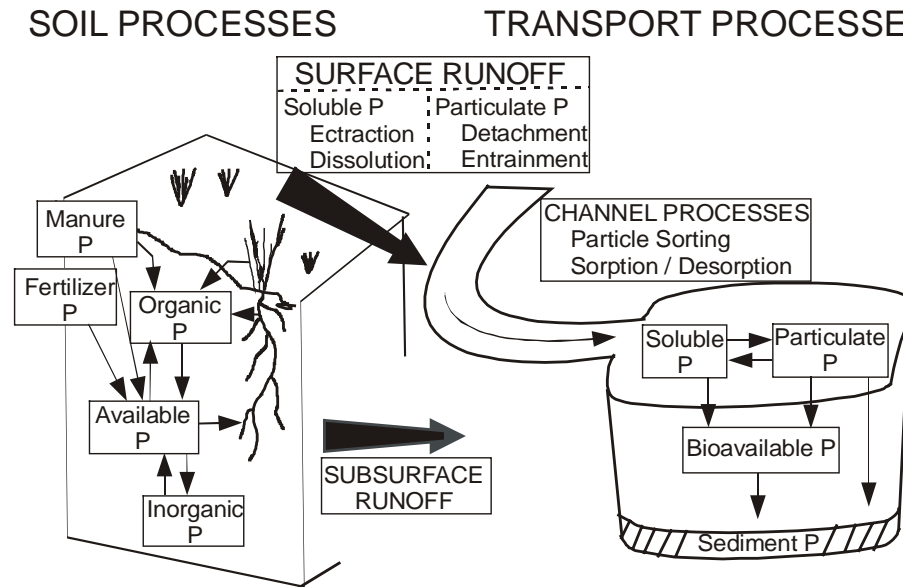


Abbildung 15: Einflussfaktoren auf die P-Verfügbarkeit in Boden und Wasser (Quelle: Sharpley und Halvorson 1994, S. 12)

Phosphat bindet sich stark an Bodenkolloide und deshalb geschehen die meisten Verluste partikulär im Oberflächenabfluss im erodierten Material. Der totale Abfluss bzw. die potentielle Abflussmenge eines Gebietes ergibt sich aus der Differenz von Gebietsniederschlag und -verdunstung. Bodenbearbeitung und Bodenbedeckung sind sehr wichtige Einflussfaktoren (Erosion). Düngungsniveau und pflanzliche Aufnahme sind weniger von Bedeutung (Vatn et al. 1996, S. 17).

„Phosphor gelangt aus diffusen Quellen zu ca. 44% durch Abschwemmung auf Grasland und zu ca. 24% durch Bodenerosion auf Ackerland in die Gewässer“ (Braun et al. 1997, S. 4). Die in die Oberflächengewässer gelangenden Frachten des Phosphorabtrages führen vor allem in Binnenseen zu deren Eutrophierung. Die gesamten Phosphorverluste lassen sich wie folgt aufteilen:

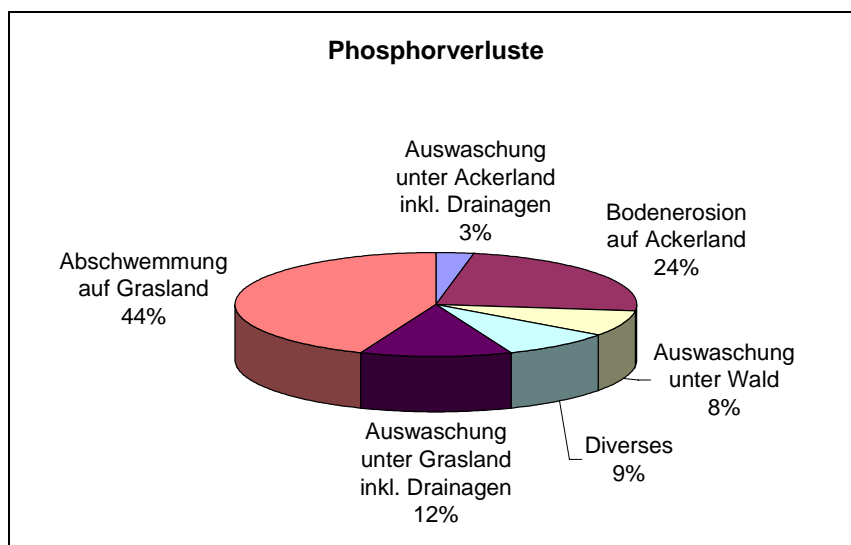


Abbildung 16: Aufteilung der Phosphorverluste in der Schweiz auf verschiedene Ursachen (Quelle: Braun et al. 1997, S. 18)

- **Verlust durch Oberflächenabfluss**

Oberflächenabfluss entsteht in der Schweiz nicht nur bei erosivem Starkregen, sondern auch bei der Schneeschmelze und hängt von der Niederschlagsmenge und –struktur, der Landnutzung, der Hangneigung und der Bodendurchlässigkeit ab (Prasuhn und Braun 1994, S. 20).

- **Verlust durch Drainagenabfluss**

Die Höhe der Niederschlagsmenge, die Wasserspeicherkapazität des Bodens und die Höhe der Evapotranspiration beeinflussen die Drainspende (im Mittel 35% der Niederschlagsmenge (Prasuhn und Braun 1994, S. 21)). Das Ausmass der Phosphorverluste im Unterbodenabfluss ist deutlich geringer als im Oberflächenabfluss und umfasst den natürlichen Abfluss und denjenigen in Drainagen.

- **Weitere Verlustquellen**

Weitere Verluste entstehen durch Zwischenabfluss (lateraler Abfluss im Boden über dem Grundwasserleiter), Quellenabfluss (oberflächlicher Wasserabfluss aus Grundwasser) und Grundwasserabfluss (direkt in Gewässer) sowie durch Wasserflüsse aus der natürlichen Hintergrundlast, beispielsweise aus dem Wald (Prasuhn und Braun 1994, S. 19ff).

Phosphor bindet sich stark an Bodenpartikel und wird im Vergleich zu Stickstoff wenig ausgewaschen. Das Phosphorproblem in Gewässern aus Abschwemmung und Erosion wird durch Phosphorüberschüsse auf den Parzellen noch verschärft. Abschnitt 6.1.2.2 beschreibt die Phosphorsituation in der Schweiz aus dieser Sicht.

6.1.2.2 *Phosphorsituation in der Schweiz*

„Beim Phosphor gelangten 1990 in der Schweiz 90% des Überschusses in den Boden und wurden dort gebunden und angereichert. Rund 10% des Überschusses waren Verluste. Diese gelangten praktisch vollständig in die Gewässer. Der zuviel gedüngte Phosphor reichert sich also in erster Linie in den Böden an“ (Braun et al. 1994, S. 44). Umweltrelevant sind nur die in die Gewässer gelangenden Phosphorverluste. Eine Anreicherung des Phosphors im Boden führt aber zu einer höheren Gefährdung der Gewässer bei Erosionsereignissen.

Nach diesen allgemeinen Ausführungen zum Erosions- und Phosphorproblem in der Schweiz folgt in den Abschnitten 6.1.3 und 6.1.4 die Beschreibung des Standorts für die Modellierung mit den Zielgrössen. Damit wird das System für die Analyse umschrieben (vgl. Abschnitt 2.1).

6.1.3 **Standortbeschreibung**

Zur Analyse der Erosions- und Phosphorproblems ist das System aus biophysikalischer Sicht zu spezifizieren. Aus Gründen der Datenverfügbarkeit wird ein Untersuchungsgebiet⁷² im Einzugsgebiet des Baldeggersees gewählt. Klimatisch gehört das Gebiet zum mässigfeuchten Mittelland. Das Muttermaterial der Böden im Untersuchungsgebiet besteht aus Moräne und/oder Molasse. Die Böden sind in der Regel tiefgründig und können durchlässig, mässig staunass oder zeitweise mässig grund- oder hangnass sein. Parabraunerde, Braunerde und Kalkbraunerde sind die vorherrschenden Bodentypen. Bei der Landnutzung ist die Graswirtschaft vorherrschend. Getreidebau mit Silomais ist in den Fruchtfolgen vorherrschend, in denen der Hackfruchtanteil etwa einen Drittel beträgt. Zudem wurde die offene Ackerfläche zwischen 1969 und 1985 um ca. 15% ausgedehnt und infolge des Siedlungsdruckes von der

⁷² Die Angaben beruhen auf Maurer 1995, S. 17ff.

Ebene auf die Hänge verlegt, wodurch sich die Erosionsgefährdung erhöhte (Maurer 1995, S. 8f). Maurer (1995) zieht S. 20 aus den Standortgegebenheiten folgendes Fazit:

„ ... dass die kultivierten Flächen im Einzugsgebiet des Baldeggersees grundsätzlich als sehr stark erosionsgefährdet eingestuft werden müssen.“

Im Rahmen der Modellierung werden nur Ackerstandorte modelliert. Phosphorprobleme entstehen zwar durch Abschwemmung von Grasland und durch Bodenerosion von Ackerland, aber die Datenverfügbarkeit erlaubte keine den Bedürfnissen entsprechende Modellierung der Abschwemmung. Bei der Abschwemmung wirken die Massnahmen „zeitgerechte Düngung“ und „bedarfsgerechte Düngung“ am besten. Auf Ackerstandorten wirken die Massnahmen „konservierende Bodenbearbeitung“ und „Fruchtfolge anpassen“ am stärksten (Prasuhn et al. 1997, S. III).

6.1.4 Zielgrössen

Bezüglich der Bodenerosion formulieren Mosimann et al. (1990, S. 35) aus Sicht eines Ökosystems im Gleichgewicht das Ziel, dass bei einer Bodenbildungsrate von $<0.1\text{mm pro Jahr}$ ⁷³ auf ackerfähigen Böden der durchschnittliche jährliche Bodenabtrag 1t pro ha nicht überschreiten sollte. Als generelle Zielgrösse geben die Autoren 1-3 t / ha und Jahr an. Andere Arbeiten (Bork 1988) gehen von einer unter landwirtschaftlicher Nutzung vernachlässigbaren Bodengenesse aus. Daraus wird klar, dass die Bodenerosion möglichst minim sein sollte⁷⁴.

Als Zielgrösse für Phosphoreinträge in Gewässer wird von Prasuhn et al. (1997, S. 119) gemäss Vorgaben des BLW eine Obergrenze für diffus anthropogene Verluste aus der Landwirtschaft von 300 g P je Hektar und Jahr angegeben. Prasuhn et al. (1997, S. 123) formulieren für die gesamten Phosphorverluste einen einheitlichen Richtwert von $<500\text{ g/ha/Jahr}$. Für gelöste Phosphorverluste wird ein einheitlicher Richtwert von $<300\text{ g/ha/Jahr}$ angegeben. Aus dem Gewässerschutzgesetz, das einen Sauerstoffgehalt von $4\text{ g O}_2/\text{m}^3$ vorsieht, lässt sich ein Zielwert für den P-Gehalt von 30 mg pro m^3 für Gewässer ableiten (Wehrli und Wüest 1996, S. 23).

6.1.4.1 Zielgrössen für das Gebiet des Baldeggersees

Das Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern formuliert im Bericht zur „Sanierung des Baldegger- und Hallwilersees und deren Einzugsgebieten“ (Stadelmann et al. 1993) Ziele für die Phosphorzufuhr in den Baldeggersee in gelöster und partikulärer Form pro Jahr:

Gesamtfracht	Pro ha LN bezogene Verluste in kg
Max. 6 t Gesamtphosphor	0.69321534
Max 4 t gelöster Phosphor	0.39823009
Max 2 t partikulärer Phosphor	0.29498525

Tabelle 1: Zielgrössen für den P-Eintrag in den Baldeggersee und für Flächenabträge

⁷³ Pimentel (1997) geht von einer Bodenreuebildungsrate von 2,5 cm in 200-1000 Jahren unter Ackerland aus. Dies entspricht 0.125 bis 0.025 mm pro Jahr.

⁷⁴ Bei mehreren Zielen (Gewinnmaximierung, Erosionsminimierung) würde sich der in Rae (1994) im Kapitel 6 erwähnte und von Louhichi et al. (1999) angewendete Ansatz des Compromise Programming als Modellansatz anbieten. Beim Compromise Programming werden die relativen Abweichungen von einer Zielgrösse minimiert. Dabei müssen die maximal möglichen Abweichungen bekannt sein. Im Gegensatz dazu werden beim Goal Programming die absoluten Abweichungen von einer Zielgrösse minimiert. In diesem Ansatz stellen sich Probleme, wenn die Einheiten bei den einzelnen Zielgrössen nicht dieselben sind.

Das gesamte Einzugsgebiet des Baldeggersees umfasst 6780 ha, die landwirtschaftliche Nutzfläche beläuft sich auf 5606 ha LN (Stadelmann et al. 1993, S. 9 und 13). Da der Hauptanteil des eingetragenen Phosphors von der landwirtschaftlichen Nutzfläche stammt⁷⁵, kann mit der Bezugsgrösse LN im Einzugsgebiet die oben dargestellte pro ha bezogene Zielgrösse bezüglich Phosphor berechnet werden⁷⁶, die die Erreichung des Gehaltsziels für Mittellandseen von 30 mg P pro m³ Wasser möglich machen sollte.

6.2 Problembeschreibung ökonomisch

Die Nutzung der Ressource Boden führt an gefährdeten Standorten zu Erosion mit Phosphorverlusten. Aus ökonomischer Sicht entstehen auf zwei Ebenen Probleme:

- On-site, d.h. am Standort in Form von Kosten für den Betrieb (on-farm-costs) durch die Beeinträchtigung der Produktionsgrundlage Boden
- Off-site, d.h. ausserhalb des Standorts in Form von Kosten für die Gesellschaft (off-farm-costs) durch die Eutrophierung der Gewässer.

Bei den Ursachen von Umweltproblemen wird zwischen point-source-pollution und non-point-source-pollution unterschieden. Verschmutzung, die abgrenzbar einzelnen Quellen bzw. Verschmutzern zugeordnet werden kann, fällt in den Bereich der point-source-pollution. Probleme dieser Art sind mit an der Quelle angreifenden Massnahmen beeinflussbar. Der P-Eintrag in die Gewässer entsteht heute zu einem bedeutenden Teil durch non-point-source-pollution aus landwirtschaftlichen Nutzflächen und stellt zusammen mit der Erosion eine negative Externalität der landwirtschaftlichen Produktion dar⁷⁷. Non-point-source-pollution stammt aus diffusen Quellen. Daher ist das Verschmutzungsproblem nicht mehr einzelnen Verursachern zuteilbar.

Im Bereich point-source-pollution wurden in der Vergangenheit mehr Massnahmen zur Eindämmung eingeführt als im Bereich der non-point-source-pollution⁷⁸. Diese Tatsache ist darauf zurückzuführen, dass im Falle von point-source-pollution die Verschmutzung im Gegensatz zur non-point-source-pollution messbar und die Messung mit nicht allzu hohen Kosten verbunden ist. Entsprechend stieg der landwirtschaftliche Anteil der point-source-pollution an der Gesamtfracht. Die zunehmende Rolle der Landwirtschaft bei der non-point-source-pollution ruft dringend nach Informationen über die Auswirkungen laufender und künftiger landwirtschaftlicher Managementpraktiken auf die Qualität von Oberflächengewässern (Lal und Stewart 1994, S. 8).

In den folgenden zwei Abschnitten werden deshalb die Begriffe non-point-source-pollution und Externalität ausführlicher diskutiert. Abschnitt 6.2.3 geht auf die Bewertung der Erosionswirkungen ein und führt drei Bewertungstechniken an.

⁷⁵ „Rund 90% der Phosphoreinträge stammen heute aus Bodenerosion sowie Ab- und Ausschwemmung von landwirtschaftlich genutzten Flächen. Dies bedeutet, dass das künftige Schwergewicht der zu ergreifenden Massnahmen im Bereich Landwirtschaft liegt“ (Stadelmann et al. 1997b, S. 17).

⁷⁶ Vgl. angegebene Richtgrössen pro ha in Stadelmann et al. (1993, S. 55): 0.7 kg Gesamtphosphor pro ha und Jahr, 0.4 kg gelöster Phosphor pro ha und Jahr.

⁷⁷ Der gesamte P-Eintrag aus der Landwirtschaft setzt sich aus partikulärem P-Eintrag aus der Erosion und dem Eintrag von gelöstem Phosphor aus der Abschwemmung zusammen.

⁷⁸ Non-point-source-pollution bedeutet Verschmutzung aus diffusen Quellen. Darunter fallen in Bezug auf Phosphoreinträge aus der Landwirtschaft aus Ackerflächen Einträge durch Oberflächenabfluss (Abschwemmung und Erosion) und Sickerung (Drainageverluste, Auswaschung) (Braun et al. 1991, S. 1).

6.2.1 Eigenheiten der non-point-source-pollution

Verluste aus landwirtschaftlich genutzter Fläche verursachen Probleme durch non-point-source-pollution⁷⁹. Gemäss Tietenberg (1988 in Johnson 1993, S. 400) können Nährstoffe, die das Wasser verschmutzen, in abbaubare und nicht abbaubare Belastungen unterteilt werden. Die Messung der Emissionen ist bei non-point-source-pollution technisch sehr schwierig und oft sehr teuer. Dies führt dazu, dass die Emission beeinflussende Massnahmen und Politikinstrumente nicht gezielt einsetzbar sind.

6.2.2 Externalitäten

Phosphorverluste und Erosion sind Externalitäten der landwirtschaftlichen Produktion. Externalitäten beeinflussen die Nutzenfunktion des Konsumenten oder die Gewinnfunktion des Unternehmens, ohne dass Kompensationen erfolgen. Es werden pekuniäre externe Effekte von technologischen externen Effekten unterschieden:

- Bei pekuniären externen Effekten handelt es sich im Prinzip um Pseudoexternalitäten. Sie laufen über den Markt (Bsp. Preiserhöhung wegen Nachfragezunahme) und haben Verteilungswirkungen, aber keine Fehlallokation zur Folge.
- Bei technologischen Externalitäten handelt es sich im eigentlichen Sinne um echte Externalitäten, da nicht marktmässige Interdependenzen zwischen ökonomischen Aktivitäten vorliegen. Sie werden von der Allokationswirkung des Markt-Preis-Mechanismus nicht beeinflusst und es finden keine monetären Kompensationen statt. Technologische Externalitäten liegen vor, wenn individuelle Nutzen- oder Produktionsfunktionen reale (d.h. nicht monetäre) Grössen enthalten, welche nicht durch die betreffende Person oder Unternehmung, sondern durch jemand anderen ohne Kompensation für die verursachten marginalen Nutzen oder Schäden festgelegt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich dann die sehr wichtige Frage nach der Internalisierung solcher externer Effekte (Ausführungen gemäss Vorlesungsunterlage von Hediger (1999)). Die technologischen externen Effekte beeinflussen nicht direkt die an der Produktion oder am Konsum von Gütern Beteiligten, sondern Dritte.

Fletcher (1985) führt die Argumente für Marktversagen im Bereich Bodenerosion (im speziellen mit Blick auf die Abbildung der langfristigen Erosionsauswirkungen in den Landpreisen) auf zwei wesentliche implizite Annahmen zurück: auf die Tatsache, dass die private Diskontrate langfristig höher ist als die soziale⁸⁰ und auf die Höhe der Kosten der Informationsbeschaffung über die Auswirkungen der Erosion auf die Produktivität. Weitere Argumente für Marktversagen liegen in der Länge des Planungshorizontes.

Die Phosphorverluste gehören in den Bereich der non-point-source-pollution. Daher sind bei diesem Problem keine an der Quelle angreifenden Massnahmen durchführbar. Die Messbarkeit ist on-site nicht möglich (diffuse Verlustquellen bei einzelnen Witterungsereignissen) und die Verluste können off-site nicht zugeordnet werden. Das Problem der Messbarkeit stellt sich ebenfalls im Zusammenhang mit der Erosion. Zur Internalisierung derartiger externer Effekte müssen indirekte Massnahmen gewählt werden, und es stellt sich die Frage, welche der Massnahmen möglichst effizient⁸¹ und zugleich möglichst effektiv⁸² sind. Ervin und Mill

⁷⁹ Dieser Abschnitt stützt sich im wesentlichen auf Johnson (1993, S. 400f).

⁸⁰ Eine Richtgrösse für die soziale Diskontrate ist der Zinssatz für risikofreies Kapital. Da die private Diskontrate höher liegt, werden aus privater Sicht künftige Auswirkungen bzw. künftige Grössen tiefer bewertet und beeinflussen daher Entscheide zu einem früheren Zeitpunkt weniger.

⁸¹ Effizient ist eine Massnahme, wenn eine zusätzliche beabsichtigte Wirkungseinheit im Vergleich zu anderen Massnahmen mit minimalen Kosten erreicht werden kann.

(1985) sowie Gardner und Barrows (1985) untersuchen ökonometrisch, wieviel der Preisvarianz von Landverkäufen mit Variablen, die die Effekte von Erosion und erosionsmindernden Massnahmen abbilden, erklärt werden können. Da es sich bei der Erosion und bei den Phosphorverlusten um Externalitäten handelt, stellt sich die Frage nach öffentlicher Einflussnahme. Produktivitätsverluste müssten im Falle der Erosion bei langfristiger Betrachtung eigentlich zu einem sozial optimalen Level des Bodenschutzes führen, da die Folgekosten in Form verringerter Produktivität in den Folgejahren direkt spürbar werden. Die zu geringe Berücksichtigung der Erosion ist gemäss Ervin und Mill sowie Gardner und Barrows primär im Informationsdefizit über den Nutzen von Erosionsschutzmassnahmen zu suchen. Daher ist eine Quantifizierung dieses Nutzens wichtig. Informationsbeschaffung und –verbreitung sind reale soziale Kosten. Diese müssen mit den Kostenveränderungen on- und off-site verrechnet werden. Verbesserungen führen meist zu on-farm-costs und off-farm-benefits. Durch den Vergleich von Kosten und Nutzen (aus der Schadensverminderung) kann entschieden werden, ob Erosionsschutzmassnahmen angezeigt und durch staatliche Intervention zu fördern sind, um die Abweichung von sozialen und privaten Kosten auszugleichen. Die Entscheidung über Massnahmen ist standortgebunden, da die Grundlagen der Entscheidung, Kosten und Nutzen on- und off-farm standortabhängig sind (van Vuuren et al. 1997, S. 233). Eine wichtige Grundlage für Entscheidungen über Massnahmen ist die Bewertung der Wirkungen der Erosion.

6.2.3 Aspekte der Bewertung der Erosionswirkungen aus ökonomischer Sicht

Dieser Abschnitt diskutiert aus ökonomischer Sicht die on-site und off-site Auswirkungen der Erosion und quantifiziert die Wirkungen monetär auf der Basis von Literaturangaben im Abschnitt 6.2.3.2.

On-site (on-farm) Auswirkungen und Kosten

On-farm-costs der Bodenerosion umfassen den Wert der Ertragsminderungen und der Veränderung der Inputkosten und lassen sich in der Grösse der monetären Bewertung der Veränderung der Produktivität des Bodens zusammenfassen (Ribaudo 1986, S. 402). Off-farm-costs bestehen in verschlechtertem Nutzen aus dem Oberflächengewässer, der Versandung von Stauseen oder Flüssen (erhöhte Hochwassergefahr) sowie in anderen Auswirkungen aus Sedimenten und sind in entwickelten Ländern meist grösser als die on-farm Kosten. Die off-farm Gewinne aus erosionsmindernden Massnahmen sind aus Sicht von Colacicco et al. (1989) ebenfalls meist grösser als die on-farm Gewinne. Diese Aussage machen Schaub und Prasuhn (1990, S. 51) sowohl für die ökonomische als auch für die ökologische Ebene.

Ein Hauptproblem ist, dass Landwirte bei Entscheidungen im Rahmen des Managements meist nur on-farm Effekte beachten und deren Auswirkungen auf die off-farm Ebene vernachlässigen. Produktivitätsverluste durch Erosion müssen wegen der lokalen Betroffenheit, der Erhöhung der Variabilität der Produktion und indirekten Wirkungen auf die Gesellschaft sowie wegen der Irreversibilität und Akkumulation der Bodenfruchtbarkeitsverluste aus gesellschaftlicher Sicht berücksichtigt werden (Colacicco et al. 1989). Infolge der Erosion sinken die betrieblichen Erträge aller künftigen Jahre der Bewirtschaftung, d.h. Erosion beeinflusst nicht nur den betrieblichen Ertrag im Jahr des Ereignisses sondern den Ertrag aller künftigen Bewirtschaftungsperioden. Für eine korrekte Bewertung der Kosten der Erosion auf die Stufe Betrieb müssen deshalb die Mindererträge aller künftigen Jahre berücksichtigt werden. Dieser Aspekt erfordert einen entsprechenden Modellierungsansatz (vgl. Kapitel 5 über

⁸² Eine Massnahme ist effektiv, wenn durch ihre Einführung das beabsichtigte Ziel möglichst vollständig erreicht werden kann.

die Kontrolltheorie). Die durch Erosion hervorgerufenen Gewinnminderungen werden als on-farm-costs bezeichnet. Da künftige Erträge somit in die Betrachtungen miteinbezogen werden müssen und es wahrscheinlich ist, dass der Bodenmarkt die on-farm-costs nicht entsprechend ihrer Bedeutung berücksichtigt sowie die private und soziale Diskontrate divergieren, stimmen das soziale und das private Optimum nicht überein. Daher stellt sich aus gesamtgesellschaftlicher Sicht die Frage nach einer Korrektur dieser Diskrepanz. Für die Beurteilung der Notwendigkeit einer Umsetzung von Korrekturen ist es notwendig, die on-farm-costs für schweizerische Verhältnisse zu kennen. Den on-farm-costs sind die Kosten der staatlichen Massnahmen gegenüber zu stellen. Auf der Grundlage beider Kostengrössen und der off-farm Schadensverminderung ist dann die Entscheidung für oder gegen staatliche Eingriffe zu fällen.

Die „sozialen Kosten“ von Erosionsschutzmassnahmen bestehen aus den Kosten der veränderten Produktion, was Auswirkungen auf das Preisgefüge hat (pekuniäre externe Effekte). Dem sind natürlich die verschiedenen Nutzen der geringeren Phosphorbelastung der Gewässer gegenüber zu stellen. Der Endwert der Ressource Boden wird je nach Verwendungszweck nach dem Endzeitpunkt durch Erosion beeinträchtigt (Baffoe et al. 1986, S. 56). Die Marktkräfte bilden infolge von Externalitäten die Erosionsproblematik nicht korrekt ab (S. 68).

Der Schwerpunkt bisheriger Arbeiten zur Analyse von Erosionsschutzmassnahmen lag vor allem auf der theoretischen Ebene (McConnel 1983 und Goetz 1997), empirische Arbeiten sind nur wenige vorhanden (Smith und Shaykewich 1990).

Auswirkungen auf das landwirtschaftliche Einkommen eines Betriebes (Colacicco et al. 1989, S. 37):

Falls der Einfluss der Erosion marktrelevant ist, kann der aggregierte Effekt der Erosion in einem Konkurrenzmarkt aus der Sicht des Landwirts positiv sein, weil die prozentuale Preiszunahme infolge der Angebotsminderung, die zwar mit höheren Produktionskosten verbunden ist, bei unelastischer Nachfrage grösser als die prozentuale Verringerung der Menge sein kann. In einer solchen Situation ist der Wohlfahrtsverlust der Konsumenten grösser als der positive Wohlfahrtsgewinn der Landwirte, was per Saldo zu einer Verringerung der Wohlfahrt der Gesellschaft führt.

Off-site (off-farm) Auswirkungen und Kosten

Die off-site Auswirkungen und deren monetäre Bewertung, die off-site Kosten, fallen meist auf einer höheren Stufe an und sind nicht internalisiert. Dabei handelt es sich unter anderem um die Eutrophierung stehender Gewässer, die Verstopfung von Drainagen, Probleme der Wasserqualität und Sedimentation in Reservoirs (Ribaudo 1986, S. 402). Die nicht punktförmige Wasserverschmutzung beeinflusst das Wasserangebot an Trink- und Industrierwasser durch Nährstoffanreicherung, Reduzierung der biologischen Diversität und beeinflusst den Erholungs- und Existenzwert negativ. Die ökonomischen off-farm Nutzen von Massnahmen zur Reduktion der Sediment- und Phosphorfrachten hängen vom Ausmass der Verbesserung der Wasserqualität, von der Zahl aktueller und künftiger Verwendungszwecke und von den Verbrauchern von Wasser sowie von der Zahlungsbereitschaft der Wassernutzer für Verbesserungen ab (van Vuuren et al. 1997, S. 224). Die off-site Nutzen der Verringerung der non-point-source Verschmutzung durch die Landwirtschaft können sehr bedeutend sein und die on-site Nutzen in Form von Produktivitätsgewinnen deutlich übertreffen. Der aus der Verschmutzung entstehende Schaden hängt neben den Substanzen auch vom Verschmutzungsausmass ab. Infolge der off-site Auswirkungen genügt es nicht, nur mit on-site Bewertungskriterien über Massnahmen zur Verschmutzungsreduktion zu entscheiden. Dies würde zu einer Fehlallokation von Ressourcen führen, vor allem, wenn es um eine Lokalisierung der Implementation von Massnahmen geht (Ribaudo 1986, S. 402f und S. 409f).

6.2.3.1 *Bewertungstechniken auf Mikrolevel*

Enters (1998, S. 14ff) diskutiert alternative Bewertungstechniken auf Stufe Mikrolevel und gibt in Tabelle 3 S. 16 eine Übersicht über verwendete Techniken:

- **Ersatzkostenansatz:** Es werden die Kosten zur Kompensation des Schadens, meist erhöhter Düngereinsatz, bestimmt. Wegen der vielfältigen Auswirkungen der Bodenerosion ist dieser Ansatz zu kritisieren (Düngereinsatz ist ein schlechter Proxy).
- **Produktivitätsänderungsansatz:** Bei diesem Ansatz wird der Erosionsschaden dem zu Marktpreisen bewerteten Ertragsverlust gleichgesetzt. Eine Schwierigkeit liegt darin, dass technologischer Fortschritt im Zeitablauf isoliert werden muss und unterschiedliche Kostenstrukturen mit und ohne erosionsmindernde Massnahmen berücksichtigt werden müssen. Dieser Ansatz soll in der Modellierung Verwendung finden (vgl. Abschnitt 9.2). Verbunden mit der Barwertmethode erscheint er am geeignetsten.
- **Kosten-Nutzen-Analyse:** Bei einer Kosten-Nutzen-Analyse von Massnahmen müssen das Umfeld des landwirtschaftlichen Haushaltes und die unterschiedlichen Faktoransprüche berücksichtigt werden.

6.2.3.2 *Monetäre Bewertung der Erosionsfolgen*

Stufe on-site costs

Williams et al. (1993) berechnen für die Böden der Northern Great Plains in den USA marginale Bodenwertbereiche über alle Risikotypen von Landwirten von \$ -0.247 bis \$ 0.494 /ha/Jahr für 0-6,35 cm erodiertes Bodenmaterial, von \$ 12.107 bis \$ 12.849 /ha/Jahr für 6,35 cm bis 12,7 cm erodiertes Bodenmaterial und von \$ 9.142 bis \$ 19.767 /ha/Jahr für 12,7 cm bis 19,05 cm erodiertes Bodenmaterial⁸³ /ha/Jahr.

Schmid et al. (1997, S. 4) berechnen on farm costs von Fr. 0.07 bis Fr. 36.82 pro mm für eine Fläche von 20 ha bei einem Betrachtungszeitraum von 66 Jahren.

Die on-farm-costs der Bodenerosion sind gemäss Colacicco et al. (1989) vernachlässigbar. Sie liegen in der Grössenordnung von \$ 0.2 bis \$ 1 (Diskontrate 4%) pro t erodiertes Material. In den Modellrechnungen soll u.a. diese Grösse für Schweizer Verhältnisse bestimmt werden.

Stufe off-site-costs

Moore und McCarl (1987) schätzen die mittleren und marginalen off-site-costs der Bodenerosion in Oregon's Willamette Valley (USA), im speziellen die Kosten der Wasseraufbereitung, des Unterhalts von Wasserwegen, von Flusskanälen sowie von Dämmen und Anlagen zur Elektrizitätsgewinnung. Entsprechend ihres Ansatzes über das ganze Gebiet bringt eine 1% Veränderung der Frachten marginal eine Veränderung der mittleren Kosten um 1/3% (S. 48). Die Veränderungen in den totalen Kosten (Bsp. der Wasseraufbereitung) werden dabei als Wohlfahrtsänderung (Zunahme der Konsumentenrente) eingesetzt. Als Annahme wird die gesellschaftliche Nachfragekurve nach Behebungsmassnahmen als vollkommen inelastisch vorausgesetzt. Methodisch werden Personeninterviews und Datenbasen über Kosten der Schadensbehebung verwendet. Pro acre ergeben sich Kosten von \$ 2.63 für Landwirtschaftsland und Kosten von \$ 0.28 für Wald.

⁸³ Capaul und Riedi 1999, S. 393: 1 acre = 0.4047 ha und 1 inch = 2.54 cm.

6.3 Fazit für die Modellierung des Erosions- und Phosphorproblems

Das System für die Analyse des Erosions- / Phosphorproblems ist aus naturwissenschaftlicher Sicht ein Ackerboden mit biophysikalischen Eigenschaften, die Erosions- / Phosphorprobleme verursachen. Der sinnvolle Handlungsspielraum der Akteure liegt in den Bereichen angepasste Fruchtfolge und konservierende Bodenbearbeitung. Diese beiden Aktivitäten müssen im Modell zur Analyse realitätsnah abgebildet werden. Die on-site Auswirkungen der Erosion führen zu Kosten, die sich aus der Verschlechterung des Produktionsfaktors bzw. der Ressource Boden ergeben (Mächtigkeit und Qualität). Off-site entstehen Umweltprobleme durch den Eintrag von partikulärem Phosphor aus der Erosion in die Gewässer. Zusammen mit dem gelösten Phosphor führt der in die Gewässer eingetragene Phosphor zu einer Eutrophierung. Bei den Auswirkungen der Bodennutzung handelt es sich aus ressourcenökonomischer Sicht um Externalitäten, die möglichst vermieden oder deren Kosten zumindest internalisiert werden sollten.

Das folgende Kapitel liefert eine Übersicht über Analysemethoden im Bereich Erosion auf der Basis der Literatur.

7 Methoden zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems und möglicher Massnahmen in der Literatur

Die Analyse des Erosions- / Phosphorproblems erfolgt in der Literatur mit verschiedenen Methoden. Diese werden in den folgenden Abschnitten mittels Beispielen aus der Literatur übersichtsmässig diskutiert.

7.1 Qualitative Analyse mit einem theoretischen Modell

Selbst Modelle mit dem Ziel des numerischen Einsatzes müssen qualitativ analysiert werden. Goetz et al. (1998) begründen dies in einem Kommentar zu einem Paper von Hoag (1998) und betonen, dass die qualitative Analyse und die theoretische Validierung eines Modells nicht nur von rein mathematischem Interesse sind, sondern dass relevante empirische Resultate nur sinnvoll interpretiert werden können, wenn das zugrunde liegende Modell theoretisch korrekt ist.

Saliba (1985) behandelt in seinem theoretischen optimalen Kontrollmodell Bodenkonservierung als explizite Entscheidungsvariable. Seiner Ansicht nach liegt der Zweck eines theoretischen Modells in der Beschaffung von Grundlagen für die Strukturierung und Ausrichtung der empirischen Arbeit. Dabei sollen neben Beziehungen zwischen ökonomischen, physikalischen und biologischen Systemen Bewertungen und Ziele des Landwirts sowie Hypothesen, die weitere Beachtung verdienen, generiert werden (S. 363). Die Hypothesen werden sinnvollerweise aus den Optimalitätsbedingungen hergeleitet.

Mit einem dynamischen Modell analysiert Goetz (1997) die Diversifikation der landwirtschaftlichen Produktion (privat und sozial optimale intertemporale Bodenallokation mit verschiedenen Kulturen) mit ihrem Einfluss auf die Bodenerosion. Aus der qualitativen Analyse lässt sich ableiten, dass es optimal ist, den steady-state durch den Anbau einer einzigen Kultur möglichst rasch zu erreichen und erst dann zu einem Mehrkulturanbau zu wechseln. Die Förderung von Erosionsschutzmassnahmen ausschliesslich bei stark erosiven Kulturen kann die langfristige Bodenmächtigkeit senken, während eine Landnutzungssteuer die langfristige Bodenmächtigkeit eindeutig erhöht. Spezielle Beachtung erhält die Konservierungsstrategie der Kulturwahl (S. 342). Die theoretische komparativ dynamische Analyse erlaubt, die Auswirkungen von Veränderungen in den Ausgangsparametern auf die Pfade der Kontroll-, Zustands- und Kozustandsvariablen zu untersuchen (S. 346). Mittels einer komparativ statischen Analyse lassen sich die Auswirkungen von Parameteränderungen auf den steady-state bestimmen. So können die Auswirkungen von Politikmassnahmen auf die langfristige Ressourcenentwicklung untersucht werden (S. 350).

7.2 Kosten-Nutzen-Analyse

Enters (1998) legt in seinem Bericht zu Methoden der ökonomischen Bewertung von on- und off-site impacts der Bodenerosion den Hauptfokus auf die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA)⁸⁴. Biophysikalische Modelle wie EPIC etc. besitzen seiner Ansicht nach Limiten bei der Benutzerfreundlichkeit und setzen bezüglich der Boden- und Pflanzenprozesse voll informierte Akteure voraus. Infolge dieser Schwierigkeiten und der begrenzten Information der Akteure hat die KNA in neuerer Zeit an Bedeutung gewonnen⁸⁵. Die KNA erlaubt die Bewertung ver-

⁸⁴ Cost-benefit-analysis (CBA)

⁸⁵ Auf der anderen Seite können Daten, die für die Verwendung in der KNA notwendig sind, oft nur durch den Einsatz biophysikalischer Simulationsmodelle wie EPIC beschafft werden. Beispiele sind der Nutzen von Massnahmen im Bereich Produktionstechnik etc..

schiedener Projekte (Alternativen) in Form von 0/1 Entscheiden. Als Projekt kann auch die Art der Ressourcennutzung bezeichnet werden. Folglich können Kosten- und Nutzenstrukturen der Bodenerosion mit solchen von Bodenkonservierungspraktiken verglichen und die Kosten der Bodenerosion bestimmt werden. Implizite Annahmen werden dabei der Analyse unterworfen und können einem partizipativen Prozess unterliegen.

Johnson (1993) verwendet zur sozio-ökonomischen Analyse von neun Massnahmen zur Phosphorreduktion die der KNA verwandte Kostenwirksamkeitsanalyse (vgl. Schleiniger 1995) in Verbindung mit Monte Carlo Simulation, da die Nutzen der Phosphormassnahmen monetär nicht quantifizierbar sind und die Unsicherheit in Verbindung mit der angenommenen Risikoaversion der Akteure wichtig ist. Geeignete Methoden in diesem Zusammenhang sind Kostenminimierung bei gleichem Nutzen, Nutzenmaximierung bei gleichen Kosten, Kostenwirksamkeit mit physikalischer Bezugsgrösse bei eindimensionaler physikalischer Grösse und mit einem Punktesystem bei mehrdimensionalen physikalischen Bezugsgrössen (Johnson 1993, S. 407f).

7.3 Programmierung

Die Methode der Programmierung erlaubt eine Analyse auf einzelbetrieblicher oder aggregierter Ebene mit Entscheiden, die auf einer kontinuierlichen Skala liegen.

7.3.1 Beispiele mit Linearer Programmierung

Jacobs und Casler (1979) benutzen ein lineares Programmierungsmodell (Wassereinzugsgebiet als Betrieb) zur Schätzung der Kosten der Reduktion der Phosphorverluste in Abhängigkeit der Fruchtfolge. Die Erosionsschätzung erfolgt mittels USLE wie in EPIC. Die Verwendung der Grössen enrichment-ratio und delivery-ratio führt zur Schätzung des Einflusses der Erosion auf die Gewässer (S. 309).

Baffoe et al. (1986) setzen ein mehrperiodisches lineares Programmierungsmodell ein, um die relative Profitabilität und die Erosionsraten verschiedener Fruchtfolgen in Südontario zu bestimmen. Im speziellen untersuchen sie die Wirkungen repräsentativer Fruchtfolgen aus ökonomischer und Erosionsperspektive.

Smith und Shaykewich (1990) bestimmen die Effekte der Bodenerosion auf die optimale Kulturenwahl und die Bodenbearbeitungsmassnahmen auf 6 Standorten in Manitoba (Kanada) mittels eines dynamischen linearen Programmierungsmodells. Die Grenzkosten des Bodens liegen in einem Bereich von \$ 0 bis \$ 0.99 pro Tonne Bodenmaterial oder \$ 0 bis \$ 2.55 pro Hektare und Jahr. Einflussfaktoren auf den Wert des Bodens sind der Produktivitätseffekt, die Erosion, die Produkt- und Faktorpreise, die Technologie und die Diskontrate.

7.3.2 Beispiele mit Nichtlinearer Programmierung

Schmid et al. (1997) verwenden auf der Grundlage des biophysikalischen Modells EPIC ein dynamisches nichtlineares ökonomisches Optimierungsmodell. Die biophysikalischen Simulationsdaten von EPIC sind in Form von Produktions-, Erosions- und Phosphorverlustfunktionen berücksichtigt. Optimiert wird das Verhalten eines Landwirts, was die Bestimmung der on-farm-costs der Erosion und der Kosten von Massnahmen zur Erosionsminderung und zur Senkung der Phosphorverluste erlaubt.

Louhichi et al. (1999) verwenden einen analogen Ansatz für die Analyse von Konservierungspolitiken im Bereich Wasser und Boden für einen tunesischen Landwirtschaftsbetrieb unter spezieller Berücksichtigung des Risikos. Sie erweitern den Ansatz, indem sie mehrere

Ziele (Compromise Programming⁸⁶) in die Diskussion der Lösung des ökonomischen Modells mit einbeziehen. Die Grenzen ihres verwendeten bio-ökonomischen Ansatzes sehen die Autoren in der Modellierbarkeit eines landwirtschaftlichen Betriebes für die Analyse und Formulierung von Politiken und in der Exogenität der Preise, weil keine Interaktionen zum Rest des Sektors und zu den übrigen Sektoren bestehen. Sie sehen eine Möglichkeit der Überwindung dieser Grenzen im Einsatz partieller oder allgemeiner regionaler Gleichgewichtsmodelle (vgl. Abschnitt 7.3.4).

Pagoulatos et al. (1989) entwickeln eine intertemporale Gewinnfunktion (Berechnung eines kumulativen diskontierten Nettogewinndifferentials) zur Bestimmung der optimalen Adoption von Bodenschutzstrategien unter verschiedenen Szenarien in Abhängigkeit von den Getreidepreisen, den relativen Erträgen, der Diskontrate und von anderen Annahmen. Von speziellem Interesse ist der Zeitpunkt des Wechsels von konventionellen zu bodenkonservierenden Bewirtschaftungsverfahren (S. 58). Aus der Differenz des Gegenwartswertes konventioneller Bodenbearbeitungsverfahren zum Gegenwartswert der erosionsbedingten Produktivitätsverluste bestimmen die Autoren eine Erosionsschadensfunktion für die verschiedenen Szenarien. Bezüglich der Szenarien zeigen sich die erwarteten Effekte auf die Adoption bodenkonservierender Bewirtschaftungsverfahren.

7.3.3 Beispiele mit stochastischer dynamischer Programmierung

Plantinga (1996) verwendet einen stochastischen dynamischen Programmierungsansatz zur Bestimmung der optimalen Landallokation zwischen Landwirtschaft und Waldbau bei Senkung der Preisstützung in der Milchproduktion. Grenzstandorte werden zunehmend dem Waldbau zugewiesen, was das Erosionsproblem reduziert und off-site zu Wasserqualitätsverbesserungen führt. Im Gegensatz zu früheren Studien erfolgt die Landressourcenallokation nicht binär oder mit gleicher Wahrscheinlichkeit, sondern es sind verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen möglich.

Weisensel und Van Kooten (1990) benutzen ein Markov Entscheidungsmodell, ein stochastisches dynamisches Programmierungsmodell, um optimale Entscheide bezüglich des Bewirtschaftungsverfahrens in trockenen Getreideproduktionsgebieten zu treffen (bei zufälliger Bodenmächtigkeit und Bodenfeuchtigkeit → stochastische Übergangsmatrix). Im Modell wird auf der Basis von Bodenfeuchtigkeit und Bodenmächtigkeit über die Art der Kultivierung, primär der Brache (chemisch oder Pflug), entschieden. Zugleich wird der Einfluss der Diskontrate analysiert. Mit der Optimierung werden Monte-Carlo Simulationen verbunden, in denen die Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit und die Bodenerosion simuliert werden. Die jährlichen laufenden Kosten der Erosion betragen \$ 16.08 pro ha und in Gegenwartswerten (diskontiert) über einen Zeitraum von 30 Jahren \$ 247.20 pro ha bei einer Diskontrate von 5% (S. 70). In Ergänzung zur ressourcenökonomischen Literatur zeigen die Autoren, dass der Einfluss der Diskontrate zweideutig sein kann: Der direkte Effekt einer tieferen Diskontrate fördert die Bodenkonservierung, da künftige Erträge relativ stärker gewichtet werden. Tiefere Diskontraten führen aber zu einem höheren Kapitaleinsatz, was die Bodenerosion fördert (Desinvestitionseffekt: Weisensel und Van Kooten 1990, S. 64).

7.3.4 Gleichgewichtsanalyse

Ribaudo et al. (1994) bestimmen mittels eines sektoralen Programmierungsmodells (U.S. Agricultural Resource Model USARM) die sozialen Kosten der Stilllegung von Ackerflächen in den USA und quantifizieren die Auswirkungen auf die Produktionsstruktur. Stilllegung ist gemäss ihren Ergebnissen nur bei gezieltem Einsatz (Zielgenauigkeit) sinnvoll.

⁸⁶ vgl. Fussnote 74.

Alfsen et al. (1996) untersuchen die makroökonomischen on-site Effekte der Bodenerosion in Nicaragua bei schlechter Datenbasis mittels eines Computable General Equilibrium (CGE) Modellansatzes, indem sie die direkten ökonomischen Effekte in Form von Produktivitätsverlusten in das Modell einbauen. In Ländern mit hoher Bedeutung des Agrarsektors und gleichzeitig bedeutender Erosion beeinflusst diese auch andere wirtschaftliche Sektoren (S. 130) und diese Aspekte sind bei der Politikformulierung zu berücksichtigen. Die Autoren vergleichen ein Szenario ohne Berücksichtigung der Erosion und ihrer Auswirkungen mit einem Szenario mit Berücksichtigung der Auswirkungen und leiten aus dem Vergleich die makroökonomischen Effekte her.

Coxhead und Jayasuriya (1995) benutzen ein Computable General Equilibrium Model (CGE), um Auswirkungen von Handelspolitikveränderungen auf die Allokation der Bodenressourcen (mehr oder weniger erosive Kulturen) und die Erosionsraten zu bestimmen. Bei Berücksichtigung von Auswirkungen auf die gesamte Ökonomie können indirekte Politikmassnahmen im Handelsbereich zur Erosionseindämmung adäquater sein (Effekt relativer Preisveränderungen, indirekte Auswirkungen der Wirtschaft). Vor den numerischen Simulationen führen die Autoren eine komparativ statische (qualitative) Analyse durch, um zu bestimmen, welche technischen Parameter und welche Marktparameter durch eine bestimmte Politikänderung beeinflusst werden (Coxhead und Jayasuriya 1995, S. 639).

Die Ansätze mit CGE beruhen meist auf sehr schwacher naturwissenschaftlicher bzw. biophysikalischer Datenbasis und besitzen die Schwierigkeit, lokal gebundenen Problemen gerecht zu werden. Die Ansätze können aber sehr gut Wirkungszusammenhänge in ganzen Volkswirtschaften aufzeigen und sind angezeigt, wenn Ressourcenprobleme grossräumig auftreten (wie z.B. Erosionsprobleme in Entwicklungsländern). Quantifizierungen u.a. auf Akteursebene sind mit diesen Ansätzen nicht möglich.

7.4 Simulation

Johnson (1993, S. 406) verwendet die Monte Carlo Simulation zur Analyse der betrieblichen Rentabilität und der sozio-ökonomischen Kosteneffektivität von 9 verschiedenen Massnahmen zur Phosphorreduktion⁸⁷ unter Unsicherheit. Er geht von einem risikoaversen Verhalten der Landwirte auf typischen Betrieben aus. Jeder unsicheren Inputgrösse wird anstelle einer spezifischen Zahl eine Wahrscheinlichkeitsverteilung unterstellt.

7.5 Statistische Methoden

Van Vuuren (1986) untersucht den Einfluss von Erosion auf Getreideerträge und Stückkosten der Produktion in Südontario mittels Regressionsanalyse auf Makroebene. Es lässt sich infolge von Substituten (Inputs, technologischer Fortschritt, Management etc.) kein Zusammenhang zeigen.

Williams et al. (1993) führen eine Evaluation der Auswirkungen der Erosion auf die Nettogewinne von Sommerweizen und deren Variabilität für verschiedene Kombinationen von Erosion und Raten der Düngerapplikation sowie bei der Möglichkeit einer Teilnahme an einem deficiency-payment Programm in den U.S. Northern Great Plains durch. Bestimmt werden die risikoeffizienteste Kombination (mittels stochastischer Dominanz) für verschie-

⁸⁷ Dabei zeigt es sich, dass bei Bewertung der inländischen Produktion zu Weltmarktpreisen die sozio-ökonomische Analyse bei einigen Massnahmen anstelle von Kosten zu Nutzen der Reduktion der Phosphorverluste führt (Johnson 1993, S. 411). Nutzen anstelle von Kosten stellten Häfliger et al. (1995) auch bei Massnahmen zur Reduktion von Stickstoffemissionen auf sozio-ökonomischer Ebene bei Verwendung der Methode der Linearen Programmierung fest (vgl. auch Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz - Roger Biedermann et al. 1996).

dene Risikotypen von Betriebsleitern und der erodierte Bodenwert risikoaverser Betriebsleiter (mittels Sensitivitätsanalyse). Der Bodenwert ist als annualisierter Gegenwartswert definiert (S. 117f).

7.6 Fazit für die Modellierung der Erosion

In der Literaturanalyse zeigt sich, dass Programmierungsansätze, im speziellen dynamische, eine grosse Bedeutung besitzen. Sie eignen sich besonders gut zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems, da dieses in der Schweiz lokaler Natur ist und vernachlässigbare Auswirkungen auf die Märkte hat. In der vorliegenden Arbeit soll ein Programmierungsansatz in Verbindung mit einer qualitativen Analyse verwendet werden. Es ist wichtig, vor der Anwendung eines Programmierungsansatzes mittels der qualitativen Analyse das zu verwendende Modell auf theoretische Korrektheit zu überprüfen. Im Kapitel 11 wird die qualitative Analyse für das in den Modellrechnungen im Kapitel 14 verwendete Modell durchgeführt. Die Bewertung der Erosion soll in der Modellierung auf der Grundlage der Veränderung der Produktivität erfolgen. Deshalb müssen Veränderungen in der Produktivität sehr genau abgebildet werden können. Dies legt nahe, ein biophysikalisches Modell, das die Produktivitätsveränderungen gut abbilden kann, mit einem ökonomischen Optimierungsmodell zu verbinden. Für die ökonomische Modellierung ist die Klärung des Handlungsspielraums der Akteure zentral. Dies setzt Kenntnisse über die Erosion eindämmende Massnahmen voraus. Im Modell soll weiter die Abbildung geeigneter Politikinstrumente zur Beeinflussung der Massnahmen möglich sein. Kenntnisse über die Eignung möglicher Massnahmen und Instrumente zur Erosionseindämmung bilden eine Grundlage für die Modellierung. Eine Diskussion von Massnahmen und Instrumenten folgt im nächsten Kapitel.

8 Massnahmen zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems

Kenntnisse über Massnahmen und Politikinstrumente sind für die Wahl und die Umsetzung eines Modellansatzes zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems zentral. In diesem Kapitel werden nach einer einleitenden Diskussion von Aspekten der Massnahmenbewertung mit einem Beispiel aus der Literatur Massnahmen zur Beeinflussung des Erosions- / Phosphorproblems beschrieben (Abschnitt 8.1) sowie Umweltschutzinstrumente, die eine Massnahmenergreifung bewirken sollen, diskutiert (Abschnitt 8.2).

Die Analyse von Massnahmen umfasst auf betrieblicher Ebene die Wirkungen von Phosphor- oder Erosionsschutzmassnahmen auf die Profitabilität der Betriebe. Auf gesellschaftlicher Ebene sollte die Analyse die Kosteneffektivität von Massnahmen überprüfen lassen (Johnson 1993, S. 399). Die Öffentlichkeit sollte mittels sozio-ökonomischer Kriterien Entscheide über zu ergreifende Massnahmen und Instrumente treffen können, ist aber aus Akzeptanzsicht auf die Berücksichtigung der betrieblichen Kosten der Massnahmen angewiesen. Eine betriebliche Modellierung zur Bestimmung dieser Kosten ist daher wichtig, bedingt aber Kenntnisse von möglichen Massnahmen und Instrumenten. Die betriebliche Analyse liefert zudem Ansatzpunkte für die Höhe allfälliger Steuern. Der Produktivitätsverlust führt zu Kosten des einzelnen Landwirts und aus gesellschaftlicher Sicht zur Beeinträchtigung der Bodenressource. Die Bodendegradierung führt zu einer Verringerung künftiger Einkommensströme (Alfsen et al. 1996, S. 131).

Ein Beispiel zur Massnahmenanalyse mittels eines Programmierungsansatzes liefern Park und Sawyer (1987). Sie untersuchen mit einem ganzzahligen Programmierungsansatz die Kostenwirksamkeit von drei Politikalternativen zur Bodenerosionskontrolle im North Fork Deer Watershed in West Tennessee: einheitliche Kostenbeteiligung des Staates, variable Kostenbeteiligung in Abhängigkeit von Standort- und Massnahmencharakteristika (administrative Kosten- und Politikrestriktionen aber bessere Zielgenauigkeit) sowie fixe Beiträge pro Tonne Erosionsreduktion (S. 21). Die Kostenwirksamkeit ist wegen knapper öffentlicher Mittel von Bedeutung. Sie sollte in Abhängigkeit der vermiedenen on- und off-site Schäden definiert werden. Park und Sawyer definieren Kostenwirksamkeit als Kosten pro Einheit Erosionsreduktion der mittleren Erosionsrate (S. 22). Dabei sind die Kosten der Erosionsverminderung unabhängig von der Erosionshöhe. Besondere Beachtung schenken Park und Sawyer dem Rentenproblem (Zahlungen > Kosten), wenn keine Preisdiskriminierung vorgenommen wird. Die grössten Probleme ergeben sich bei der einheitlichen Kostenbeteiligung und der variablen Kostenbeteiligung. Die variable Kostenbeteiligung differenziert zwischen Standorten mit erreichten Erosionszielen, solchen mit hohen Erosionsraten und solchen mit hohen Kosten der Erosionsminderung. Die Kosteneffizienz nimmt von der einheitlichen zur variablen Kostenbeteiligung und zum Fixbeitrag pro reduzierte Tonne zu.

8.1 Bewirtschaftungsmassnahmen im Bereich Phosphor und Erosion

Massnahmen im Bereich Phosphor und Erosion hängen sehr stark zusammen. Erosionsschutzmassnahmen sind in vielen Fällen die besten Massnahmen gegen Phosphorverluste (Johnson 1993, S. 400). Dies gilt speziell für partikuläre Phosphorverluste. Die Massnahmen können in solche mit mehrjähriger direkter Wirkung (Ausgaben für dauernden Erosionsschutz: Terrassierung) und solche mit einperiodischer Wirkung (Ausgaben mit einperiodischer direkter Schutzwirkung: Fruchtfolge, wirkt sich indirekt auch auf längere Sicht aus, da höhere Ausgangsbodenmächtigkeit für nächste Periode) unterteilt werden (Fletcher 1985, S.

954). In den Modellrechnungen sollen primär Massnahmen zur Verminderung der Erosion untersucht werden. Massnahmen im Bereich der Erosion und des Phosphorproblems können aus der Perspektive des transportierten Phosphors betrachtet werden. Sharpley und Halvorson (1994, S. 58) unterteilen die Bewirtschaftungsmassnahmen zur Minimierung der Phosphorverluste in Massnahmen im Bereich des Düngermanagements und der Erosionskontrolle. Erosion hat neben den negativen off-site Effekten durch Phosphor negative on-site Effekte, indem die für das Pflanzenwachstum verfügbare Bodenmächtigkeit reduziert wird. Massnahmen im Bereich Düngermanagement umfassen Einbringung des Düngers in den Boden, Förderung alternativer P-Quellen und Nutzung des bereits vorhandenen Phosphors im Boden. Massnahmen im Bereich der Erosionskontrolle beinhalten minimale Bodenbearbeitung, Pufferzonen und die Anpassung des Pflanzenbestandes. Gemäss Lakshminarayan et al. (1996, S. 292) ist Erosion bezüglich Bodenbearbeitung (Pflug) und Kulturwahl sensitiv.

Weitere mögliche kostengünstige Massnahmen liegen im Bereich der Kulturtechniken, der Fruchtfolge, der Vorgaben für Erosion und P-Abtrag in Form von Standards, der DGVE-Limiten, Landnutzungssteuern und im Bereich der indirekt wirkenden Massnahmen wie Bodenschutzpunkte etc..

Ein grosses Problem ist, dass eine Massnahme in anderen Umweltbereichen Verschlechterungen bewirken kann. So führt eine Verringerung der Intensität der Bodenbearbeitung im Sinne einer Verringerung der Erosion oft zu einer Erhöhung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln (Eiswerth 1993 S. 87).

Prasuhn et al. (1997, S. 109) geben folgenden zwei Massnahmen zur Reduktion der Phosphorverluste durch Bodenerosion auf Ackerland für das Mittelland die höchste Priorität:

- Konservierende Bodenbearbeitung
- Angepasste Fruchtfolgen.

Ihre Priorisierung stimmt mit derjenigen von Lakshminarayan et al. (1996) überein. Der Handlungsspielraum im Modellansatz muss daher vor allem in diesem Bereich gegeben und gut modelliert sein⁸⁸.

8.2 Umweltpolitische Instrumente zur Beeinflussung der Bewirtschaftungsmassnahmen der einzelnen Akteure

Im allgemeinen Trend der Liberalisierung wurde man sich immer mehr bewusst, dass Verbots- und Gebotsstrategien zunehmend an Grenzen stossen (Vollzugsprobleme, Ineffizienz, Verbrauchszunahmen, fehlende Marktkonformität) (Walter et al. 1993, S. 3ff). Da die Akteure gemäss Literatur nur einen geringen Anreiz haben, die durch Erosion on-site (vgl. Putman et al. 1988, Colacicco et al. 1989 und Alfsen et al. 1996 S. 132) und off-site (Externalität) hervorgerufenen Probleme zu entschärfen, stellt sich die Frage nach Instrumenten zur Beeinflussung der Akteure, damit diese problemschärfende Massnahmen (vgl. Abschnitt 8.1) ergreifen. Die Instrumente der Umweltpolitik lassen sich gemäss Frey et al. (1991) wie folgt unterteilen:

⁸⁸ Neben Bewirtschaftungsmassnahmen auf Stufe Betrieb können zur Entschärfung der non-point-source pollution in Gewässern auch seeinterne Massnahmen ergriffen werden. In den Proceedings zur Seesanie- rung anlässlich einer nationalen Konferenz in Minneapolis im Bundesstaat Minnesota werden verschiedene seeinterne Massnahmen vorgestellt. Ausbaggern (Peterson 1979, S. 114), Physikalische und chemische Be- handlung der Sedimente (Theis 1979), Künstliche Belüftung (Fast 1979), Verdünnung (Welch 1979), Nähr- stoffinaktivierung (Funk 1979). Die Analyse seeinterner Massnahmen besitzt in der vorliegenden Arbeit keine Bedeutung.

Information und Aufklärung (Moral, Suasion)	Wirtschaftliche Anreize		Handelbare Umweltzertifikate	Staatseigene Unternehmen und Beteiligungen	Regulatorische Instrumente
	negative Anreize	positive Anreize			
<ul style="list-style-type: none"> • Aufklärung über die Tatbestände, Zusammenhänge • Appelle zu Verhaltensänderungen • sozialer Druck zur Verhaltensänderung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abgaben • Gebühren • Steuern 	<ul style="list-style-type: none"> • Subventionen • Steuerliche Vergünstigungen • Darlehen • Bürgschaften • Zinsvergünstigungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Vermarktung von Energierechten • Vermarktung von Verschmutzungsrechten 	<ul style="list-style-type: none"> • Bau und/oder Betrieb von staatseigenen Energieversorgungsunternehmen • Fernheizwerke • Elektrizitätsunternehmen • Kraftwerke • Transmissions- oder Verteilnetze • Pipelines 	<ul style="list-style-type: none"> • Emissionsvorschriften • Prozessvorschriften • Institutionelle Vorschriften • Produktvorschriften • An-schreibepflichten • Aus-kunftspflichten • Kontingente

Tabelle 2: Typologische Übersicht über Umweltschutzinstrumente nach Mauch et al. (1992, S. 114)

Wegen der Nachteile von Geboten und Verboten wird seit einigen Jahren versucht, das umweltpolitische Instrumentarium durch Abgaben und andere marktwirtschaftliche Instrumente zu ergänzen.

Ziele von Massnahmen zur Reduktion der landwirtschaftlichen Umweltbelastung müssen sein (Vatn et al. 1996, S. 121):

- Zielerreichung zu minimalen Kosten bei vorgegebenen Zielen (Kosteneffizienz bei first-best und second-best⁸⁹ Massnahmen)
- Anreizkompatibilität der verschiedenen Massnahmen im Sinne der angesprochenen Zielerreichung

Bei den Verlusten von Phosphor und Boden aus dem landwirtschaftlichen System in die Umwelt handelt es sich um non-point-source Verschmutzung.⁹⁰ Emissionssteuern zur Minderung der Verluste sind nicht umsetzbar und es kann kein direkter Ansatz gewählt werden. Von daher liegen die Ansatzpunkte zur Problemschärfung auf der Input- und Outputseite sowie bei den agronomischen Praktiken. Bedeutend für das Ausmass der Emissionen sind Pflanzenwachstum, Fruchtfolge, Düngung, Fütterung, Handhabung organischer Dünger, Bodenbearbeitung und Bodenbedeckung ausserhalb der Wachstumsperiode (Vatn et al. 1996, S. xiii ff). Ansatzpunkte für Politikinstrumente sind Inputlevels, interne Prozesse und Emissionen. Wichtig ist es, im Zusammenhang mit Politikinstrumenten Verteilungswirkungen, Transaktionskosten, Umweltkosten und die Zielgenauigkeit zu beachten. Die Güte des indirekten Ansatzes ist mit drei Kriterien zu beurteilen: Zielgenauigkeit, Möglichkeit der Umsetzung (Braden und Segerson 1993, S. 28) und Korrelation der indirekten Massnahme mit der Zielgrösse.

Im folgenden werden Instrumente aus dem Bereich der wirtschaftlichen Anreize und der regulatorischen Instrumente, wie sie für die Modellrechnungen in Frage kommen, auf der Basis der Literatur diskutiert.

⁸⁹ First-best Massnahmen greifen direkt an der Problemursache an (Emissionen) und führen zu identischen marginalen Vermeidungskosten bei den Unternehmen, die den marginalen Schadenskosten entsprechen. Sind first best Massnahmen unmöglich oder zu teuer bei der Implementation, so sollten second-best Massnahmen ergriffen werden. Diese wirken indirekt und weisen daher Effizienzverluste im Vergleich zu den first-best Massnahmen auf.

⁹⁰ Bei non-point-source-pollution besteht das Informationsproblem darin, dass die Emissionen nicht messbar sind und damit keinen Ansatzpunkt für Politikmassnahmen darstellen. Deshalb kommen indirekte Politikmassnahmen zum Zuge (Braden und Segerson 1993, S. 27f).

8.2.1 Emissionssteuern

Generell sind Steuern in der Höhe des Grenzschadens effizienter als direkte die Emission angreifende Massnahmen. Idealerweise werden Emissionssteuern (mögliche first-best Massnahme) daher auf dem Niveau festgesetzt, bei dem die marginalen Kosten der Emissionsreduktion den marginalen sozialen Gewinnen entsprechen. Die Grösse der Emissionssteuer kann modellmässig vom Schattenpreis einer Restriktion auf den Umweltstandard hergeleitet werden. Emissionssteuern sind aus theoretischer Sicht effizient, da die von der Steuer betroffenen Akteure entsprechend des Verlaufs ihrer Funktion der marginalen Vermeidungskosten die Emissionen verringern, bis die marginalen Vermeidungskosten dem marginalen Steuerbetrag entsprechen.

Steuern führen zum gleichen Allokationsresultat (Flächennutzung), sind also nur einkommenswirksam aber ohne Einfluss auf die Allokationseffizienz (vgl. auch Pezzey 1992, der die Symmetrie zwischen preis- und mengenbasierten Instrumenten der Umweltpolitik bezüglich ihrer Effizienz betont). Sie haben Auswirkungen auf die Verteilung, die Administration und die politische und gesellschaftliche Akzeptanz (Jacobs und Casler 1979 S. 311). Deshalb schlagen Jacobs und Casler zur Entschärfung des Problems eine Besteuerung der Phosphorüberschüsse (second-best Massnahme) vor.

Im Falle von Phosphorverlusten handelt es sich um ein Problem der non-point-source-pollution und eine Emissionssteuer ist daher nicht durchführbar. Sie ist nicht zielgenau bei unbekannter individueller Verschmutzungsgrösse. Deshalb müssen Steuern auf Inputs oder andere Verschmutzung bewirkende Produkte angesetzt werden. Dabei stellt sich das Problem der unterschiedlichen Proportionalität zwischen Bezugsgrösse der Massnahme und der Verschmutzung (Tietenberg 1988, S. 401).

8.2.2 Inputsteuern

Gemäss Vatn et al. (1996) sind Steuern und handelbare Umweltzertifikate mögliche Massnahmen, um bei ökonomisch handelnden Akteuren Emissionsreduktionen zu bewirken. Im Falle von Stickstoff führen Steuern zu verteuerten Risikoprämien, die Landwirte in Form einer N-Düngung, die unterhalb der effizienten Produktionsfunktion liegt, bezahlen. N-Steuern führen neben verteuerten Risikoprämien zu einer Neubewertung subjektiver Kosten (Bsp.: Kosten der N-Ausbringung, Kosten der besseren Nutzung von Fruchtfolgeeffekten, etc.). Deshalb führen N-Steuern bei einer Einführung oft zu einer grösseren Veränderung als aus den durch veränderte Preis- / Kostenrelationen bewirkten Verschiebungen auf der Produktionsfunktion zu erwarten wäre. Reduktionen, die auf veränderte Risikoprämien zurückzuführen sind, sind schon bei tiefen Steuersätzen zu erreichen. Sind jedoch nur noch Verschiebungen auf der Produktionsfunktion möglich, so müssen die Steuersätze sehr hoch werden, um gewünschte Veränderungen zu bewirken und es stellt sich die Frage nach alternativen Massnahmen (vgl. Lehmann et al. 1993, S. 38ff).

Bei Phosphor und Erosion spricht wenig für Inputsteuern und mehr für andere Massnahmen. Die Beziehung zwischen Input und Emissionen ist bei Phosphor sehr schwach und daher würde eine Inputsteuer das Ziel der Reduzierung der Verluste nicht zielgenau erreichen (Vatn et al. 1996 S. 27). Eine regional differenzierte Besteuerung der Inputs ist zudem nicht möglich, da sonst ein Schwarzmarkt entstünde. Die maximale Differenzierung liegt in der Höhe der Summe aus Transport- und Transaktionskosten (Vatn et al. 1996 S. 113). Eine N-Steuer besitzt keine Effekte bezüglich Erosion (Vatn et al. 1996 S xv). Für Phosphor ist vor allem die Art der Bodenbearbeitung entscheidend (Vatn et al. 1996, S. 27).

Die Wirkungen von Umweltabgaben lassen sich unterteilen in einen Lenkungseffekt (Mittelerhebungsseite) und einen Einnahmenseffekt (Mittelverwendungsseite). Diese beiden Effekte bzw. Ziele von Umweltabgaben sind grundsätzlich unabhängig.

Gemäss dem erläuternden Bericht des Eidgenössischen Departements des Innern (EDI 1990) zur Änderung des Umweltschutzgesetzes wird eine Preiserhöhung um 30-50% als nötig erachtet, um einen spürbaren und nachhaltigen Lenkungseffekt zu erzielen. Dies entspricht Fr. 1.- pro kg N und P (Walter et al. 1993, S. A6-1). Lehmann et al. (1993) schätzen die Preiselastizität der Nachfrage nach N-Dünger auf -0.2 bis -0.6 . Bei einem Abgabesatz von 40% des Preises würde der Verbrauch um 8% bis 24% sinken.

8.2.3 Standards

Standards gehören zu den regulatorischen Instrumenten (vgl. Abschnitt 8.2). Direkte Kontrollmassnahmen berücksichtigen die unterschiedlichen marginalen Kosten der Verschmutzer nicht. Emissionsstandards sind aus ökonomischer Sicht ineffizienter als Emissionssteuern, da sie auf individueller Ebene nicht zu gleichen Grenzkosten der Reduktion führen. Das gleiche Reduktionsziel wäre mit tieferen durchschnittlichen Grenzkosten der Reduktion erreichbar.

8.2.4 Handelbare Zertifikate

Sind weder Schadensfunktionen noch private Kosten- und Produktionsfunktionen bekannt, so eignen sich handelbare Umweltzertifikate besonders gut zur Erreichung eines sozialen Optimums. Diese Berechtigungen müssen sich beim Phosphorproblem in quantifizierbare Mengen von einsetzbaren Düngemitteln umsetzen lassen (Goetz und Zilberman 2000, S. 11). Die Quantifizierung ist wegen der schwachen Beziehung zwischen Input und Emission nicht möglich. Ein grosses Problem besteht zudem im Controlling der Einhaltung der vom Zertifikat vorgegebenen Düngermengen.

8.2.5 Fazit und Beurteilung von Massnahmen

Geeignete Massnahmen zur Eindämmung des Erosions- / Phosphorproblems auf Stufe Betrieb sind konservierende Bodenbearbeitung und eine wenig erosive Fruchtfolge. Bodenkonservierung ist ein dynamischer Prozess, der kontinuierlich an die Veränderungen in der Bodenmächtigkeit angepasst werden muss (Goetz 1997, S. 341). Der Modellansatz muss die beiden Massnahmen sehr gut abbilden, die Untersuchung von Instrumenten der Umweltpolitik zu deren Beeinflussung erlauben und dynamisch sein. Die Massnahmenwirkung bedingt eine möglichst präzise Abbildung der Effekte der Massnahmen im biophysikalischen Bereich mit den Konsequenzen für die Profitabilität. Dies legt die Kalibrierung eines geeigneten biophysikalischen Simulationsmodells nahe. Um die Profitabilitätswirkungen bestimmen zu können, muss das Simulationsmodell mit einem ökonomischen Optimierungsmodell verbunden werden.

Mögliche Instrumente, die mit einem quantitativen Modellierungsansatz zur Analyse des Erosions- und Phosphorproblems abgebildet werden können, sind in der Kategorie der wirtschaftlichen Anreize (Steuern auf Emissionen und den Input) sowie bei der Kategorie der handelbaren Umweltzertifikate zu finden. In Frage kommen aber auch regulatorische Instrumente wie Standards. Dabei weisen Standards bei heterogenen Betrieben eine schlechtere Effizienz auf, da sie nicht zu identischen marginalen Vermeidungskosten führen. Nur Emissionssteuern sind in diesem Sinne effizient. Die ökonomische Analyse der Massnahmen erfolgt geeigneterweise in einem ökonomischen Optimierungsmodell.

Das folgende Kapitel diskutiert einen Modellansatz, der die Abbildung der Massnahmen und Instrumente erlaubt und eine realitätsnahe Analyse des Erosions- / Phosphorproblems aus biophysikalischer und ökonomischer Sicht ermöglicht.

9 Modellansatz: bioökonomische Modellierung

Die Landwirtschaft ist ein komplexes umweltökonomisches System mit Akteuren, die durch ihre Entscheide direkt und indirekt bedeutenden Einfluss auf die Umwelt nehmen. Da zwischen sozialen und privaten Grenzkosten der Produktion bei Vorliegen von Marktversagen oder öffentlichen Gütern Abweichungen vorliegen und aus sozialer Sicht die Internalisierung externer Effekte angestrebt werden soll, besteht ein Forschungsbedarf zur Beantwortung von Fragen, wo die angesprochenen Diskrepanzen bestehen und wie sie behoben werden sollen (Goetz 1996).

Diskrepanzen sind beobachtbar, aber der Weg zu ihrer Beseitigung nicht. Zur Entschärfung dieses Problems eignen sich normative Verfahren, die auf der Basis allgemeingültiger aus der positiven Ökonomie abgeleiteter Strukturen und Zusammenhänge Aussagen über Möglichkeiten der Beseitigung der Diskrepanzen zwischen privaten und sozialen Grenzkosten der Produktion erlauben. Im umweltökonomischen Bereich steht zum Beispiel ein ganzes Set von Instrumenten⁹¹ zur Verfügung, deren Anwendbarkeit auf bestimmte Problemstellungen aber vorerst bestimmt werden muss. Dazu eignen sich entsprechend formulierte umweltökonomische Modelle. Sie sollen nicht nur Art und Richtung der induzierten Veränderungen darstellen, sondern auch quantitative Schätzungen auf ökonomischer und physikalischer Ebene (dynamischer Ansatz) dazu liefern. Zusätzlich erlauben die Modelle die Simulation der Effekte potentieller Massnahmen zwecks Bestimmung der problembezogen besten Massnahme(nbündel). Quantitative umweltökonomische Modelle von Politiken mit Interaktionen zwischen Umwelt und Ökonomie helfen von einer reaktiven zu einer proaktiven Politik zu kommen (Perman et al. 1996, S. 348).

Zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems ist eine möglichst präzise Abbildung des komplexen biophysikalischen Systems Boden neben dem ökonomischen System zwingend. Daher basieren die Modellrechnungen zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems und zur Beurteilung der Effizienz von Massnahmen auf zwei Grundmodellen: einem ökonomischen und einem biophysikalischen Modell. Die beiden Modelle müssen miteinander verbunden werden, um einen guten Realitätsbezug zu erhalten. Bodenkonservierung ist zudem ein dynamischer Prozess, der kontinuierlich an die Veränderungen in der Bodenmächtigkeit angepasst werden muss (Goetz 1997, S. 341). Daher ist es notwendig, auf der ökonomischen Ebene einen dynamischen Modellierungsansatz zu wählen. Auf der biophysikalischen Ebene kann die Dynamik durch eine entsprechende Variation der Systemparameter berücksichtigt werden.

Im biophysikalischen Simulationsmodell (vgl. Abschnitt 9.1) werden die Erträge verschiedener Kulturen und die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion auf den Boden- und Wasserhaushalt simuliert. Hoag (1998) stellt zwar, wie schon auf S. 73 gesagt, die Verwendung biophysikalischer Simulationsmodelle infolge eines zu grossen Aufwandes in Frage und favorisiert die Verwendung des Pierce Indexes. Seine Argumentation ist aber nicht stichhaltig, da seine verwendete Produktionsfunktion als exogene Variablen zusätzlich erosionsfördernde und –neutrale Inputfaktoren aufweist. Er sagt nichts über die Spezifikation dieser Funktion und die verwendete Datenbasis bei den anderen Inputfaktoren. Die benötigte Datenbasis ist aus Zeitreihen kaum verfügbar und vermutlich nur über biophysikalische Simulationsmodelle bereitstellbar. Gemäss Goetz et al. (1998) und Oriade und Dillon (1997) ist die Verwendung biophysikalischer Simulationsmodelle notwendig für empirische Arbeiten, denn nur mit solchen Modellen können die benötigten funktionalen Zusammenhänge überhaupt hergeleitet werden. Sonst müssen ausreichende Zeitreihen mit genügender Varianz verfügbar sein. Das Problem ist allgemein, dass aus der Empirie keine Daten für die Spezifizierung der funktio-

⁹¹ Eine typologische Übersicht geben Mauch et al. (1992, S. 114) (vgl. Abschnitt 8.2).

nen Zusammenhänge, die sich aus unterschiedlichem Kapitaleinsatz, aus unterschiedlicher Bewirtschaftungsform und aus verschiedenen Düngungsformen ergeben, verfügbar sind. Bei der Verwendung biophysikalischer Simulationsmodelle können zudem Zeiteffekte wie biotechnischer Fortschritt mitberücksichtigt werden.

Das ökonomische Modell (vgl. Abschnitt 9.2) bildet das Verhalten eines den Gewinn maximierenden Landwirtes ab. Die Verknüpfung der Resultate des biophysikalischen Modells mit dem ökonomischen Modell erlaubt die Berechnung von on-farm-costs der Erosion und der Phosphorverluste. Bei der Einführung von Massnahmen oder Umweltschutzinstrumenten können diese beurteilt werden.

9.1 Biophysikalisches Simulationsmodell EPIC

EPIC⁹² simuliert die Interaktionen der Boden – Klima – Pflanzen – Management Prozesse der landwirtschaftlichen Produktion. Das Simulationstool⁹³ besteht aus Teilmodellen für die Simulation von Wetter und Hydrologie. Es erlaubt die Simulation der Erosionsarten Winderosion, Flächenspülung und Rinnenerosion. Weitere Teilmodelle sind jene für Pflanzennährstoffe, für das Pflanzenwachstum, für die Bodenbearbeitung und das Management sowie für die Steuerung des Pflanzen - Umweltsystems⁹⁴. Jedes der Submodelle ist sequentiell und interaktiv mit anderen Submodellen verbunden (Putman et al. 1988, S. 322). Im Bereich Phosphorprozesse werden Mineralisation, Immobilisierung, Sorption, Desorption, Pflanzenaufnahme, Düngung, Abschwemmung von gelöstem Phosphat und Sedimenttransport von mineralischem und organischem P abgebildet.

Zur Berechnung der für die Abbildung der Zusammenhänge gewünschten Grundlagendaten geht das EPIC Modell von einer homogenen Fläche von 1 ha aus. Die Eingabe von 32 Parametern erlaubt die spezifische Definition von Bodentypen. „Dem Modell ist ein unabhängiger Wettergenerator angegliedert, der als Ausgangspunkt zur Berechnung der Wassererosion, der Versickerung und der Evaporation dient. Das Pflanzenwachstum ist abhängig von der Einstrahlung, der Wasser- und Nährstoffversorgung sowie vom Temperaturstress. Für die Bestimmung des Pflanzenwachstums wird auf eine pflanzenspezifische Sättigungskurve zugegriffen. Der Stoffhaushalt ist einerseits abhängig von Prozessen, die durch den Wettergenerator ausgelöst werden, andererseits wird er durch den Entzug durch die Pflanzen bestimmt“ (Schmid et al. 1997, S. 2).

Die Anwendungsmöglichkeiten von EPIC sind breit, wie die Literatur zeigt. EPIC wird zur Schätzung von Produktivitätsverlusten infolge Erosion eingesetzt (Putman et al. 1988, Colacicco et al. 1989), zur Gefährdungsabschätzung der landwirtschaftlichen Produktion in Wasserschutzgebieten (Piehler 1990) wie auch als Inputgenerator für ökonomische Modelle (Boussemart et al. 1996, Mapp et al. 1994, Schmid et al. 1997, Louhichi et al. 1999).

Ein bedeutender Vorteil der Verwendung von EPIC für den Fall der Modellierung von Erosion liegt in der Tatsache, dass sich die Bodenmächtigkeit als Bodenqualität interpretieren lässt (Goetz et al. 1998, S. 572). Dadurch werden alle Aspekte der Bodendegradierung durch Erosion berücksichtigt.

⁹² EPIC = Erosion Productivity Impact Calculator. Für detailliertere Angaben vergleiche die Modelldokumentation (Sharpley und Williams 1990a) und das Handbuch (Sharpley und Williams 1990b) zum EPIC Simulationsmodell.

⁹³ Vgl. Abschnitt 2.3.2 für weitere allgemeine Details von Simulationsmodellen und eine ausführliche Darstellung dieses Modelltyps.

⁹⁴ Mit Umwelt werden Einflüsse wie Drainage, Bewässerung, Düngung, Kalkung und Pestizideinsatz berücksichtigt (Putman et al. 1988, S. 322).

9.2 Ökonomisches Optimierungsmodell

Das ökonomische Optimierungsmodell bildet das Entscheidungsverhalten unter Zielvorgaben bzw. Prämissen ab. Es besteht im wesentlichen aus einer Zielfunktion und einem Restriktionensystem. Das Restriktionensystem grenzt den Handlungsspielraum des betrachteten Systems ab. Im folgenden werden Aspekte für die Wahl der Zielfunktion und des für die Fragestellung geeigneten Restriktionensystems diskutiert, bevor im Abschnitt 9.2.2 die formale Darstellung des ökonomischen Optimierungsmodells erfolgt.

Ein grosses Problem liegt bei der Modellierung mit einem ökonomischen Modell in der Heterogenität der biophysikalischen Bedingungen und der landwirtschaftlichen Praktiken (Antle und Capalbo 1993, S. 166ff). Diese Heterogenität muss in den Funktionen, die im ökonomischen Modell die biophysikalischen Zusammenhänge abbilden, enthalten sein⁹⁵. Die Funktionen und Variablen eines Betriebsmodells zur Analyse von Verfahren der Bodenkonservierung sollten gemäss Saliba (1985, S. 357) die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- Funktionen müssen die Auswirkungen von betrieblichen Entscheidungen (Kontrollvariablen) auf die Bodeneigenschaften (Zustandsvariablen) abbilden. Letztere stellen die Zustandsgleichungen im optimalen Kontrollmodell dar.
- Zustandsvariablen sollen die Veränderungen in der Bodenmächtigkeit und anderen produktivitätsbezogenen Bodeneigenschaften abbilden.
- Erosions- und Produktivitätsfunktionen müssen die Auswirkungen in Bodeneigenschaften auf die Erträge abbilden.

Ertragsfunktionen sollen Bodenproduktivitäts- und Managementvariablen mit Substitutionsmöglichkeiten zwischen Boden und anderen Inputs explizit enthalten.

Abschnitt 8.1 zeigt, dass die Bewirtschaftungsmassnahmen konservierende Bodenbearbeitung und angepasste Fruchtfolge für die Eindämmung der Bodenerosion auf Ackerland höchste Priorität haben. Die Anteile erosionsanfälliger Hackfrüchte sind in der Fruchtfolge gestiegen. (Maurer 1995 S. 8f). Zudem wurde die offene Ackerfläche zwischen 1969 und 1985 um ca. 15% ausgedehnt und infolge des Siedlungsdruckes von der Ebene auf die Hänge verlegt, wodurch sich die Erosionsgefährdung erhöhte (Maurer 1995 S. 8f). Das im folgenden vorgestellte ökonomische Modell muss die beiden Massnahmen konservierende Bodenbearbeitung und angepasste Fruchtfolge daher gut abbilden lassen.

Da EPIC, wie es für schweizerische Verhältnisse kalibriert ist, primär für Ackerstandorte einsetzbar ist und die Massnahmen für Ackerstandorte mit dem gewählten Modellierungsansatz problemlos modellierbar sind, wird lediglich ein Ackerbaubetrieb modelliert.

9.2.1 Wesentliche Aspekte der Wahl der Zielfunktion

9.2.1.1 Bestimmung des Entscheidungskriteriums

Im folgenden werden wichtige Diskussionspunkte bei der Definition einer Zielfunktion beleuchtet.

Mögliche Entscheidungskriterien und Bewertungsmaassstäbe sind (Enters 1998, S. 20ff):

⁹⁵ Deshalb wird das ökonomische Modell mit dem biophysikalischen Simulationsmodell kombiniert.

Für den Fall von Entscheidungen mit Investitionscharakter:

- Interner Zinsfuß: Es ist schwierig, diese Grösse in ein Programmierungsmodell einzubauen, da die Bestimmung des Wertes ein iteratives Vorgehen erfordert. Zudem wird die Reinvestition der Gewinne zum gleichen Zinssatz unterstellt. Dies ist zwar durch Verwendung des angepassten IRR korrigierbar, löst aber das Problem der Berechenbarkeit nicht.
- Nettobarwert: Diese Grösse wird als gutes, breit verwendbares Kriterium angesehen und findet auch im folgenden Entscheidungskriterium, der Kosten-Nutzen Analyse, Anwendung. Probleme beim Vergleich verschiedener Verfahren bereiten unterschiedliche Investitionssummen der Alternativen und bei Umweltmassnahmen die langfristigen Effekte.
- Kosten-Nutzen-Analyse: Die Eigenschaften einer solchen Bewertung müssen diskutiert werden, insbesondere die Objektivität und die Wertneutralität.

Für den Fall von Entscheidungen über operative Tätigkeiten von Akteuren ohne Investitionscharakter:

- Gewinn: Gemäss Varian (1992, S. 23) findet der Gewinn als Entscheidungskriterium in der Ökonomie breite Anwendung: „A basic assumption of most economic analysis of firm behaviour is that a firm acts so as to maximize profits.“

In den Modellrechnungen (vgl. Kapitel 14) findet das Entscheidungskriterium Gewinnmaximierung Verwendung. Da es sich um ein dynamisches Problem handelt (vgl. Kapitel 7, insbesondere Abschnitt 7.6), werden künftige Gewinne diskontiert (Gegenwartswert). Dieser Ansatz steht der Nettobarwertmethode der Investitionsrechnung nahe. Das Entscheidungskriterium Gewinn vereinfacht von der Realität und diese Vereinfachungen müssen in Interpretationen von Resultaten berücksichtigt werden. Deshalb wird im folgenden auf Relativierungen des Prinzips der Gewinnmaximierung eingegangen.

Relativierungen des Gewinnmaximierungsprinzips

Das Gewinnmaximierungsprinzip abstrahiert von der Realität. Folgende Aspekte sind bei der Verwendung des Gewinnmaximierungsprinzips im Sinne starker Vereinfachungen zu beachten (Brandes 1985):

- Unsichere Zukunftserwartungen sind nicht berücksichtigt.

Das gebräuchlichste Konzept zur Berücksichtigung unsicherer Zukunftserwartungen gehört zur Entscheidungstheorie und beruht auf der Maximierung des Erwartungsnutzens. Risikoaversion führt in der Landwirtschaft zu vielseitigeren Betriebsorganisationen, relativ sparsamerer Verwendung dauerhafter Produktionsmittel, geringeren Wachstumsraten und geringerer Aufnahme von Fremdkapital als bei Risikoneutralität.

- Kosten der Beschaffung und Verarbeitung von Information sind nicht berücksichtigt.

Werden solche Kosten in Modellen endogenisiert, so werden die traditionellen Begriffe über Rationalität und Optimalität erweitert.

- Die zeitliche Dimension ist oft nicht berücksichtigt.

Bei intertemporaler Wahl ist die persönliche Zeitpräferenz des Entscheidenden zu berücksichtigen. Dies hilft, durch die statische Analyse nicht erklärable Phänomene zu erklären. Zudem wird das Angebots- und Nachfrageverhalten auch durch Preisentwicklungen und andere Faktoren beeinflusst. So ist das Investitionsverhalten gewinnmaximierender Individuen bei unterschiedlichen Zeitpräferenzen unterschiedlich. Dieser Aspekt wird für die Modellierung in den Abschnitten 9.2.1.2 und 9.2.1.3 weiter diskutiert.

- Es wird nur ein Ziel berücksichtigt.

„Für den landwirtschaftlichen Betrieb, insbesondere den bäuerlichen Familienbetrieb, sind die Beziehungen zwischen Gewinn und Freizeit als eigenständige Ziele von besonderem Interesse“ (Brandes 1985, S. 26). Umgesetzt werden solche Aspekte meist mittels des lexikographischen⁹⁶ Entscheidungskonzeptes.

Brandes (1985, S. 33) bezeichnet den aufgrund der Relativierungen vom homo economicus abweichenden Unternehmertyp als REMM (resourceful, evaluative, maximizing man). Die Folgen eines solchen Ansatzes sind aber, dass traditionelle neoklassische Aussagen wie z.B., dass die Angebotskurve des Mengenanpassers seiner Grenzkostenkurve entspricht, ihre Gültigkeit verlieren. Eine Erweiterung bringt die Einführung satisfizierenden Verhaltens.

Neben der Festlegung des Entscheidungskriteriums ist für den Fall einer dynamischen Analyse die Diskontrate und der Planungshorizont festzulegen.

9.2.1.2 Wahl der Diskontrate

Die Berechnung des Nettobarwerts erfordert die Wahl einer geeigneten Diskontrate für den Fall der sozialen und privaten Betrachtung. Die Höhe der Diskontrate hängt von der Zeitpräferenz ab. Diese wird für Individuen meist höher angesetzt als für die Gesellschaft und entsprechend ist die private Diskontrate höher als die soziale. Im Falle der Gewinnmaximierung liefert der Kapitalmarkt mit dem Zinssatz für risikofreies Kapital die zu wählende Diskontrate. Die höhere Diskontrate in der privaten Betrachtung ist Ausdruck der Zeitpräferenz privater Akteure, die Folgewirkungen von Entscheiden zu einem späteren Zeitpunkt der Diskontrate entsprechend tiefer gewichten.

9.2.1.3 Wahl des Zeithorizonts

Der Nettobarwert hängt nicht nur von der Diskontrate sondern auch vom Betrachtungszeitraum ab. Zudem weisen bei höheren Diskonraten Alternativen mit späteren Rückflüssen tiefere Nettobarwerte auf. In Studien zu beobachtende Zeiträume dauern bis zu 100 Jahre. Für private Betrachtungen werden meist kürzere Betrachtungszeiträume gewählt als bei Evaluationen aus sozialer Perspektive.

9.2.2 Formale Darstellung des ökonomischen Modellansatzes

Der Landwirt maximiert den betrieblichen Deckungsbeitrag über einen Planungshorizont mit der Länge T . Entscheidungsvariablen des Landwirtes sind die Düngungsart, die Art der Bodenbearbeitung und die Gestaltung der Fruchtfolge. Als Kulturen stehen ihm Kartoffeln, Mais, Winterweizen, Wintergerste, Sommerhafer sowie ein- oder zweijährige Kunstwiese und Körnermais wie auch Sommerhafer mit Gründüngung zur Verfügung. Die Bodenerosion bei unterschiedlichen Kulturen ist als Nebenbedingung festgehalten⁹⁷.

⁹⁶ Bei einer lexikographischen Auswahlregel handelt es sich um eine Entscheidungsregel, bei der sich die Auswahl der optimalen Aktion vorerst nach nur einer Zielgröße richtet. Erreichen dabei mehrere Alternativen den Optimalwert, werden schrittweise weitere Zielgrößen bis zur endgültigen Entscheidung (lexikographische Reihenfolge) herangezogen (Gabler 1993, S. 2095). Dies führt zu einer Ordnung der Alternativen nach der Rangfolge der verschiedenen Zielkriterien analog der alphabetischen Wortabfolge in einem Lexikon (Bamberg und Coenenberg 1992, S. 50).

⁹⁷ Die Darstellung des ökonomischen Modells orientiert sich an Schmid et al. (1997, S. 3f) mit geringfügigen Änderungen.

Die Formulierung des dynamischen ökonomischen Entscheidungsproblems lautet:

$$\max_{b_{ijm}(t)} \int_0^T \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 e^{-\delta t} [(p_i f_{ijm}(n(t)) - c_i f_{ijm}(n(t)) - k_{ijm}) b_{ijm}(t)] dt \quad (1)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\frac{dn}{dt} = \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 [\phi_{ijm}(n(t)) - \gamma_{ijm}(n(t))] b_{ijm}(t) / \bar{b} \quad n(0) = n_0 \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 b_{ijm} = \bar{b} \quad (3)$$

$$I \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 b_{ijm}(t) \leq \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 \alpha_{im} b_{ijm} \quad (4)$$

$$\varphi \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 [\phi_{ijm}(n(t)) b_{ijm}(t)] \leq \beta \bar{b} \quad (5)$$

$$b_{ijm}(t) \in S, \quad S \subset \mathbb{R}^l, \quad i = 1, \dots, 9, \quad j = 1, 2, \quad m = 1, 2 \quad (6)$$

mit den

Indices:

- i Kultur
- j Düngungsart (organische oder mineralische Düngung)
- m Bodenbearbeitung (minimal, normal),

Parametern:

- p_i Produktpreis der Kultur i
- c_i Variable Kosten der Kultur i in Abhängigkeit vom Ertrag (Erntekosten, Trocknungskosten etc.)
- k_{ijm} Fixe Kosten der Kultur, (Kapital und Arbeitskosten sowie von der Düngungsart abhängige Kosten)
- Y Betriebsfläche
- S Menge der Fruchtfolgerestriktionen bezüglich $y_{ijm}(t)$
- δ Diskontierungsrate
- α_{im} Bodenschutzpunkte der Kultur i bei entsprechender Bodenbearbeitung m
- I Minimaler durchschnittlicher Bodenschutzindex⁹⁸ pro ha

⁹⁸ Die Bodenschutzpunkte orientieren sich am Nitratauswaschungspotential der angebauten Kulturen (Bundesamt für Landwirtschaft 1999) und werden pro Betrieb an zwei Stichtagen (30. November und 15.

- β Maximal tolerierbarer durchschnittlicher Phosphorabtrag pro ha
 ϕ Gehalts- und Transferkoeffizient in Bezug auf den bioverfügbaren Phosphor pro erodierte Tonne Material
 n_0 Ausgangsgrösse der Bodenmächtigkeit
 \bar{b} Gesamte Betriebsfläche

Variablen:

$b_{ijm}(t)$ Angebaute Fläche der Kultur in Hektaren (Kultur i, Düngungsverfahren j, Verfahren der Bodenbearbeitung m)

$n(t)$ Bodenmächtigkeit in Millimetern,

Funktionen:

f_{ijm} Produktionsfunktion in Abhängigkeit von der Bodenmächtigkeit $n(t)$

ϕ_{ijm} Erosionsfunktion in Abhängigkeit von der Bodenmächtigkeit $n(t)$

γ_i Funktion der Bodengenesse in Abhängigkeit von der Bodenmächtigkeit.

Die Differenzgleichung (2) beschreibt die Entwicklung der Bodenmächtigkeit. Nebenbedingung (3) limitiert die Fläche der angebauten Kulturen auf die maximale Betriebsfläche. Die vierte Nebenbedingung setzt minimale Limiten für die Zahl der zu erreichenden Bodenschutzpunkte pro ha. Nebenbedingung (5) beschränkt den durchschnittlichen Phosphorabtrag. Die Fruchtfolgebedingungen sind in Nebenbedingung (6) zusammengefasst.

Um das vorliegende Entscheidungsproblem des Landwirtes zu lösen, wird die Lagrangefunktion $L(\cdot)$, die Summe der einzelperiodischen Hamiltonfunktionen

$$\begin{aligned}
 L(n(t), b(t), (t)) \equiv & \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 \left[(p_i f_{ijm}(n(t)) - c_i f_{ijm}(n(t)) - k_{ijm}) b_{ijm}(t) \right] e^{-\delta t} \\
 & + \lambda(t) \sum_{i=1}^9 \sum_{j=1}^2 \sum_{m=1}^2 (\phi_{ijm}(n(t)) - \gamma_i(n(t))) b_i(t) / \bar{b} \quad \forall \quad t = 1..T
 \end{aligned}$$

ergänzt um die Nebenbedingungen (3) bis (6) maximiert, wobei $\lambda(t)$ die Kozustandsvariable bezeichnet. Sie entspricht den on-farm-costs und bewertet die Veränderung der diskontierten Summe der Betriebsdeckungsbeiträge vom Zeitpunkt t bis zum Ende des Planungshorizontes T, wenn sich die Bodenmächtigkeit zum Zeitpunkt t um 1 Millimeter verändert. Durch die Erweiterung der Hamiltonfunktion entsteht eine intertemporale Lagrangefunktion.

9.2.3 Modellierung der Entwicklung des Baldeggersees

Ein zentrales Problem für das Gebiet des Baldeggersees ist die Eutrophierung des Gewässers⁹⁹. Deshalb erfolgt eine Prüfung der Möglichkeit der Modellierung der Phosphorabschwemmung und der Seentwicklung. Eine modellmässige Umsetzung der Seentwicklung zeigt der folgende Abschnitt mit der Entwicklungsgleichung für den Gehalt an biologisch verfügbarem Phosphor im Baldeggersee.

Februar) berechnet. In Abhängigkeit der Kultur und der Bodenbearbeitung werden Bodenschutzpunkte vergeben, wobei das Maximum bei 100 Punkten liegt. Im Rahmen der Integrierten Produktion muss ein Betriebsdurchschnitt von 50 Punkten erreicht werden.

⁹⁹ Vgl. Berichte Wehrli und Wüest 1996, Stadelmann et al. 1997a, Stadelmann et al. 1993 und Liechti 1994.

9.2.3.1 Modellierung der Phosphorentwicklung im Baldeggersee

Wehrli und Wüest (1996, S. 23ff) verwenden für die Modellierung der Phosphorentwicklung in Mittellandseen folgenden Ansatz:

Gleichung 8: $\Delta P / \Delta t = P_{ein}^{bio} - P_{aus} - S$

Die Inhaltsänderung des Sees berechnet sich aus dem Saldo aus Eintrag (P_{ein}^{bio}), Export über den Abfluss (P_{aus}) und Nettosedimentation (S). Der biologisch verfügbare Eintrag lässt sich mit einem Ein-Box-Modell wie folgt aufteilen:

Gleichung 9: $P_{ein}^{bio} = \alpha * P_{ein}^{partikulär} + P_{ein}^{gelöst}$

Der biologisch verfügbare P-Eintrag setzt sich aus einem Teil des partikulär gebundenen und eingetragenen Phosphors und dem in gelöster Form eingetragenen Phosphor zusammen. Der P-Abfluss ist direkt proportional zum P-Inhalt des Sees. Der Proportionalitätsfaktor pro Jahr ist β/τ mit τ als hydrologischer Aufenthaltszeit und β als Verhältnis der mittleren Abflusskonzentration zur mittleren P-Konzentration im See. Für die Nettosedimentation nehmen die Autoren an, dass sie bei P-Konzentrationen von kleiner als 100 mg P / m³ linear mit dem P-Inhalt abnimmt. Der Proportionalitätsfaktor ist die Sedimentationsrate σ . Die Modellparameter des folgenden Gesamtmodells abgeleitet aus Gleichung 8 und Gleichung 9:

Gleichung 10: $\Delta P / \Delta t = \alpha * P_{ein}^{partikulär} + P_{ein}^{gelöst} - \frac{\beta}{\tau} * P^{Inhalt} - \sigma * P^{Inhalt}$

lauten für den Baldeggersee: $\alpha^{100} = 0$, $\beta = 0.63$, $\sigma = 0.23$, $\tau = 5.6$

Der partikulär in den Baldeggersee eingetragene Phosphor trägt gemäss den Modellparametern nichts zur Belastung des Baldeggersees mit Phosphor bei. Nur der in gelöster Form eingetragene Phosphor trägt zur Eutrophierung bei. „Auch bei diesem See wird nur der gelöste Anteil des P-Eintrages für die Algen verfügbar ($\alpha=0$)“ (Wehrli und Wüest 1996, S. 27). Damit hat gemäss der Modellierung von Wehrli und Wüest (1996) der partikuläre Phosphor aus der Erosion für den Baldeggersee kein Eutrophierungsproblem zur Folge.

9.2.3.2 Begründung für die Nichtberücksichtigung der Phosphorentwicklung im Baldeggersee in den Modellrechnungen

Erste Testrechnungen des Modells mit Abschwemmungsdaten aus EPIC-Simulationen zeigten unbefriedigende Ergebnisse aus folgenden Gründen:

Ungenügende Datenqualität: Die im aktuellen Zeitpunkt verfügbaren EPIC Daten für die Abschwemmung sind im Kulturenvergleich inkonsistent und können mit der Realität nicht übereinstimmen. Die EPIC Simulationen erfolgten im organischen Düngerbereich ausschliesslich mit Rindergülle. Das Einzugsgebiet des Baldeggersees besitzt eine hohe Schweinedichte, entsprechend müsste eine Düngervariante mit Schweinegülle, die im Vergleich zur Rindergülle einen höheren Phosphorgehalt aufweist, in EPIC ebenfalls simuliert werden. Zusätzliche Simulationsrechnungen mit Einbezug der organischen Düngung mit Schweinegülle waren im

¹⁰⁰ Der Wert des Koeffizienten steht im Widerspruch zur allgemeinen Zielvorgabe für den Abtrag von partikulärem Phosphor im Gebiet des Baldeggersees (vgl. Abschnitt 6.1.4.1).

Rahmen dieser Arbeit nicht möglich und weitere nötige EPIC Kalibrationen zur Behebung der Inkonsistenzen sind erfahrungsgemäss sehr aufwendig.

Modellkonzept: Die ersten Modellrechnungen mit Einbezug der Abschwemmung und Seentwicklung zeigten, dass bei korrekter Datenlage eine Modellierung der Phosphorabschwemmung und der Seentwicklung problemlos möglich wäre. Um ökonomisch sinnvolle Resultate zu erhalten, muss der modellierte Ackerbaubetrieb um die für das Gebiet typische Tierhaltung mit den Bereichen Schweine und Rindvieh erweitert und die Interaktionen Ackerbau / Pflanzenbau müssen möglichst gut abgebildet werden. Für Naturwiesen fehlt die biophysikalische Datengrundlage. Ökonomische Bewertungen aus Lagrangemultiplikatoren und Kozustandsvariablen können erst bei Einbezug der Tierhaltung für die Realität relevante Aussagen erlauben. Mit den aktuell verfügbaren qualitativ ungenügenden Daten ergab sich ein ab dem 11. Bewirtschaftungsjahr stabiler Phosphorgehalt von $38 \text{ mg P} / \text{m}^3$ Seewasser. Im Gegensatz dazu rechnen Stadelmann et al. (1997b) bei unveränderter Phosphorbelastung mit einer bei $80 \text{ mg P} / \text{m}^3$ stabilen Phosphorkonzentration im See (S. 17). Die vorhandene Datenbasis erlaubt keine genügende Approximation der realen Verhältnisse.

Da keine qualitativ genügenden Daten verfügbar sind und eine Beschaffung sehr aufwendig ist, werden Phosphorabschwemmung und Seentwicklung in der weiteren Modellanalyse und in den Modellrechnungen nicht berücksichtigt.

9.3 Integration des biophysikalischen Simulationsmodells EPIC in ein ökonomisches Modell zur Analyse von Politikmassnahmen im Falle der non-point-source-pollution

Ein grosses Problem der Integration biophysikalischer Modelle in ökonomische Modelle liegt in der Tatsache, dass die Bezugseinheit aus Sicht der Relevanz der Fragestellung häufig unterschiedlich ist. So beziehen sich biophysikalische Modelle meist auf standortspezifische Gegebenheiten, ökonomische Modelle auf Betriebe und Politikmassnahmen auf eine geographische Region. Meist wird eine Region in Einheiten, die der Bezugsebene der ökonomischen und/oder biophysikalischen Ebene genügen, aufgeteilt. Danach wird mit statistischen Methoden aggregiert. Der im folgenden dargelegte Ansatz der Metamodellierung erlaubt, die für die ökonomische Modellierung relevanten biophysikalischen Zusammenhänge in eine in das ökonomische Modell integrierbare Form zu bringen. Dadurch werden die Auswirkungen betrieblicher Entscheidungen auf das biophysikalische System und die Veränderungen der biophysikalischen Systemvariablen mit Rückkopplung abgebildet.

9.3.1 Metamodellierung

Auf der Basis von Simulationsresultaten des biophysikalischen Simulationsmodells EPIC werden Zusammenhänge von Produktion und Umwelteinflüssen mit Massnahmen des Landwirts mittels Regressionsanalyse in funktionale Zusammenhänge übertragen. Lakshminarayan et al. (1996) bezeichnen diesen Ansatz als Metamodellierung¹⁰¹. Es handelt sich dabei um statistisch abgestützte in Funktionen abgebildete Zusammenhänge aus Simulationsdaten, die aus dem Einsatz biophysikalischer Simulationsmodelle resultieren. Lakshminarayan et al.

¹⁰¹ Das Konzept des Metamodells entspricht einem hierarchischen Modellierungsansatz. Ein komplexes reales Phänomen wird in ein gut strukturiertes biophysikalisches Simulationsmodell abstrahiert und dann werden auf der Basis der Simulationsresultate die Zusammenhänge zwischen Input und interessierenden anderen Grössen modelliert (Bsp. durch Abbildung in einer Funktion) (Bouzaher et al. (1995) in Lakshminarayan et al. (1996, S. 278)).

bauen diese funktionalen Zusammenhänge (Erosion) in das CRAM¹⁰²-Modell ein und simulieren neben dem Status quo in den Regionen ein Politikscenario ohne Pflügen, um den Effekt der Politikmassnahme auf die Bodenerosion und weitere ökonomische Auswirkungen zu bestimmen. Durch die Benutzung des Metamodells können aufwendige Neuberechnungen mit dem biophysikalischen Modell oder experimentelle Datenerhebungen im Feld umgangen werden. Lakshminarayan et al. (1996, S. 288) zeigen, dass der Einsatz eines Metamodells eine statistisch gut begründbare Technik mit hoher Stabilität ist. Schwierigkeiten bereiten Extremsituationen. Dies wird im gewählten Ansatz durch eine Gewichtung verschiedener Situationen (Witterungseinfluss auf Erosion) entschärft. Die folgende Abbildung zeigt die Struktur des Vorgehens bei den Modellrechnungen:

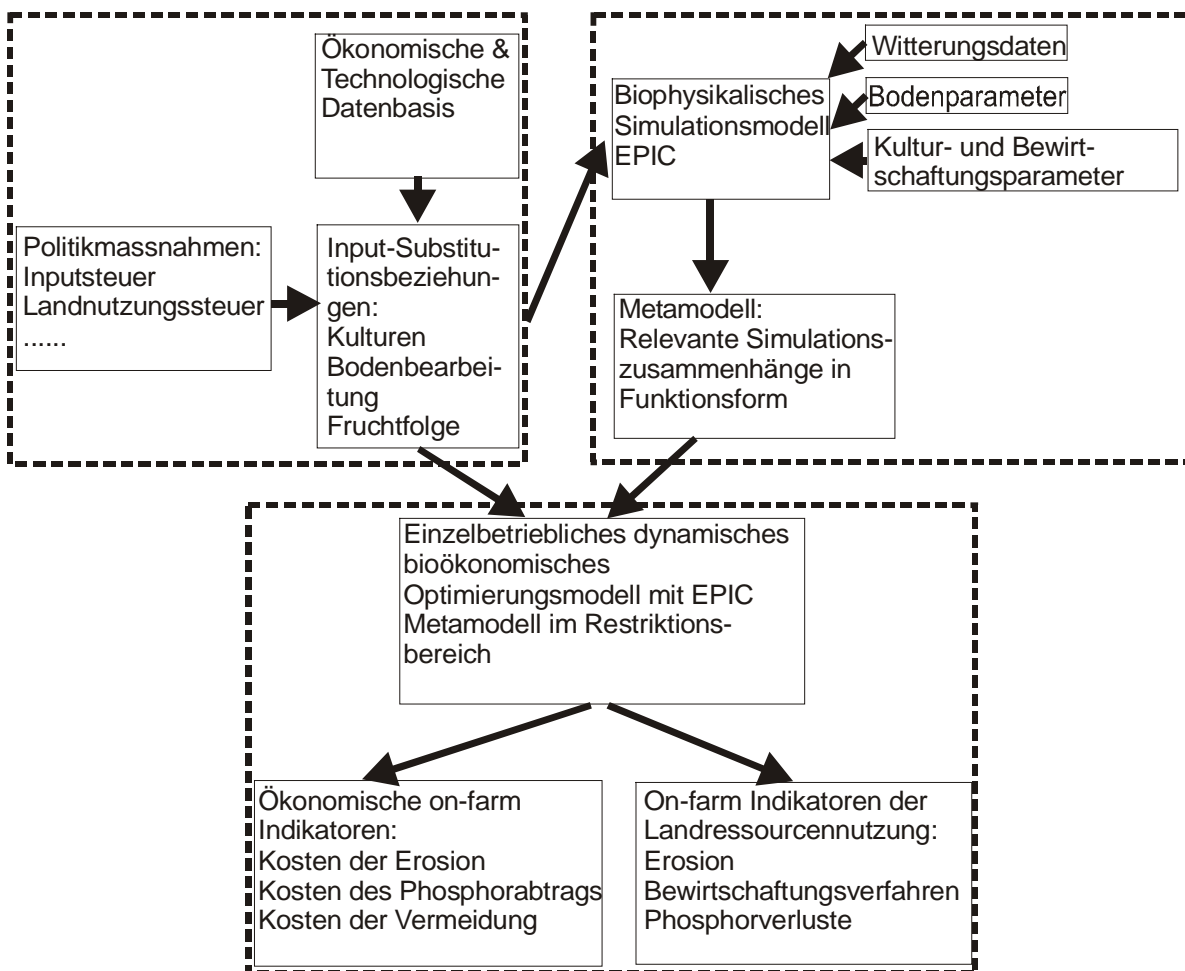


Abbildung 17: Struktur des Vorgehens für die Berechnungen

9.3.2 Fazit und Konsequenzen aus dem Modellansatz für die verwendeten Funktionen

Metamodellierung ist ein gut geeigneter Ansatz, da Ergebnisse aus Simulationen mit einem biophysikalischen Simulationsmodell in ein ökonomisches Optimierungsmodell integriert werden. Der Ansatz benötigt keine empirische Zeitreihe für den biophysikalischen Modellteil. Die Aufbereitung einer solchen Datengrundlage auf empirischer Basis wäre, wenn nicht un-

¹⁰² Canadian Regional Agricultural Model: vgl. Referenzen in Lakshminarayan et al. (1996, S. 278). Die Zielfunktion maximiert eine modifizierte Wohlfahrtsfunktion.

möglich, doch mit sehr grossem Aufwand verbunden. Die Modellierung der Entwicklung des Phosphorgehaltes im Rezeptor See ist aus Sicht des Modellansatzes problemlos möglich, scheitert aber an der dafür nicht verfügbaren Datenbasis im biophysikalischen Bereich.

Die Integration des biophysikalischen Simulationsmodells in das im Abschnitt 9.2 dargestellte ökonomische Modell durch den Ansatz der Metamodellierung verlangt nach Funktionen, die mit der Flächenvariablen skaliert die aus mathematischer Sicht gewünschte Eigenschaft der Konkavität bzw. Konvexität behalten (vgl. Abschnitt 4.1 und Abschnitt 4.2.7). Im Kapitel 10 erfolgt daher eine Darstellung und Diskussion möglicher Funktionsformen für Produktionsfunktionen.

10 Produktionsfunktionen für den Modellierungsansatz

10.1 Einleitung und Begründung

Aus der Modellbeschreibung ergibt sich die Notwendigkeit der Metamodellierung¹⁰³ für die Spezifikation der relevanten biophysikalischen Funktionen zur Verwendung im ökonomischen Modell (vgl. Abschnitt 9.3). Da die Metamodellierung in Form der Schätzung der Funktionen für die Produktion und Erosion auf Hektarbasis erfolgt, müssen die geschätzten Funktionen im ökonomischen Modell mit der Kontrollvariablen Kulturfläche skaliert werden. Am Beispiel der Produktionsfunktion sei das sich daraus ergebende Konvexitätsproblem¹⁰⁴ (vgl. Abschnitt 4.2.7) erläutert.

Die hektarbezogene Produktionsfunktion ist bei Verwendung einer quadratischen oder der Cobb-Douglas Produktionsfunktion konkav, so dass eine Summe solcher Funktionen aus Konvexitätssicht keine Probleme darstellen würde. Wird eine solche Funktion aber, wie im ökonomischen Modell notwendig, mit einer weiteren Variablen, der Fläche, skaliert, so ist die resultierende Funktion, wie Analysen mit Mathematica (Wolfram 1999) und MProbe¹⁰⁵ zeigen, nur noch quasikonkav. Gemäss der Diskussion der Konvexität in Kapitel 4 (besonders Abschnitt 4.2.7) besitzt die Summe solcher Funktionen die für globale Lösungen erforderlichen Konvexitätseigenschaften nicht mehr.

Eine Möglichkeit, das Problem der nicht summierbaren mit der Fläche skalierten Produktionsfunktionen zu entschärfen, liegt in der Trennung des Allokations- und Intensitätsproblems vom Problem der Entwicklung einer Zustandsvariablen¹⁰⁶, d.h. dass in einem ersten Schritt der optimale Ertrag in Abhängigkeit der Zustandsvariablen unabhängig von der Flächenallokation bestimmt wird und danach in einem zweiten Schritt die Optimierung der Allokation bei gegebener Entwicklung der Zustandsvariablen erfolgt. Diese Frage wird im Abschnitt 10.2 für ein stark vereinfachtes ökonomisches Modell (in Anlehnung an das in Abschnitt 9.2.2 beschriebene Modell) untersucht, das genügt, um die Frage der Trennung der Allokations- von der Intensitätsfrage zu klären. Aus den Erkenntnissen dieser Untersuchung ergibt sich die Notwendigkeit der Suche nach Funktionen, die mit einer Variablen skaliert werden können, ohne die gewünschten Eigenschaften zu verlieren. Deshalb werden Eigenschaften von Produktionsfunktionen diskutiert, Beurteilungskriterien für Produktionsfunktionen definiert und verschiedene Formen von Produktionsfunktionen für die Verwendung im vorgestellten Modellierungsansatz (vgl. Kapitel 9) untersucht. Dieses Kapitel beschreibt und beurteilt Produktionsfunktionen und andere Funktionen mit konkavem oder konvexem Verlauf bezüglich der Eignung für den Einsatz in komplexen nichtlinearen Modellen. Es wird keine vollständige Übersicht angestrebt, sondern es werden einige aus ökonomischer oder naturwissenschaftlicher Sicht interessante Funktionen nach einer Einleitung dargestellt.

10.2 Trennung der Allokations- von der Intensitätsfrage in einem zweistufigen Optimierungsprozess.

Im folgenden wird die Frage einer zweistufigen Optimierung untersucht, in der in einem ersten Schritt die optimale Intensität in Abhängigkeit des Wertes einer Zustandsvariablen und

¹⁰³ Die Simulationen im biophysikalische Simulationsmodell EPIC erfolgen auf Hektarbasis. Im ökonomischen Modell erfolgt die Optimierung bei freier Allokation der Betriebsfläche. Die Allokation wird in den Kontrollvariablen der einzelnen Kulturen abgebildet.

¹⁰⁴ Konvexität eines mathematischen Programmierungsproblems ist aus theoretischer Sicht die entscheidende Voraussetzung für die globale Lösbarkeit eines Optimierungsproblems (vgl. Abschnitt 4.1).

¹⁰⁵ Vgl. Chinneck 1999 und Chinneck 2000.

¹⁰⁶ Vorschlag zur Prüfung von Prof. Dr. Renan U. Goetz, Department of Economics, University of Girona.

im zweiten Schritt die optimale Allokation bestimmt wird. Es handelt sich um ein einfaches Illustrationsbeispiel mit Flächen von zwei Kulturarten (b_i = Allokationsvariable) und drei Perioden ($t=1,2,3$), einer Zustandsvariablen (n_t), die sich im Zeitablauf verändert, und einer Kontrollvariablen (x_{it}), die die Intensität beschreibt. Die um die ertragsabhängigen Kosten bereinigten Produktpreise seien mit p_i angegeben. Im Beispiel sei der Wert der Zustandsvariablen der Vereinfachung wegen als für alle Kulturen pro Periode einheitlich angenommen (Bsp.: durchschnittliche Bodenmächtigkeit). Obwohl in Abhängigkeit der Kultur individuelle Veränderungen der Zustandsvariablen auftreten, entspricht die Zustandsvariable für die Folgeperiode daher der Zustandsvariablen der Vorperiode bereinigt um die durchschnittliche Veränderung. Die Kontrollvariable sei beispielsweise die Düngung. Die Funktion $f_i(n_t, x_{it})$ bezeichne die Produktion pro ha in Abhängigkeit des Wertes der Zustands- und der Kontrollvariablen, die Funktion $g_i(n_t, x_{it})$ jene der Erosion pro ha in Abhängigkeit des Wertes der Zustands- und Kontrollvariablen. Die Datengrundlagen für die Schätzung der Parameter dieser Funktionen können z.B. mit dem biophysikalischen Simulationsmodell EPIC generiert werden.

Zielfunktion für zwei Kulturen und drei Perioden

Gleichung 11:

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^3 p_i * f_i(n_t, x_{it}) * b_{it} = Z \Rightarrow \max$$

Der Zielfunktionswert Z ist die Summe aus den Produkten von Produktpreis bereinigt um ertragsabhängige Kosten, Produktionsmenge pro ha und Anzahl ha. Von den übrigen Kosten wird zur Vereinfachung abstrahiert.

Startbedingung für n_1

Gleichung 12:

$$n_1 = a$$

Der Ausgangswert für die Variable n_t (in diesem Fall eine Zustandsvariable) ist a .

Differenzgleichungen für die Entwicklung von n_t

Gleichung 13:

$$n_{t+1} - n_t = \sum_{i=1}^2 g_i(n_t, x_{it}) * b_{it} / \bar{b} \quad \forall t = 1..2$$

Die Veränderung der Variablen n_t entspricht der mittleren Veränderung infolge der flächenspezifischen Erosion pro ha über alle Flächen.

Flächenrestriktionen

Gleichung 14:

$$\sum_{i=1}^2 b_{it} = \bar{b} \quad \forall t = 1..3$$

In jeder Periode entspricht die Summe der angebauten Flächen der gesamten verfügbaren Fläche \bar{b} .

Nichtnegativitätsrestriktionen**Gleichung 15:**

$$\begin{aligned}
 n_t &\geq 0 & \forall t = 1..3 \\
 x_{it} &\geq 0 & \forall i = 1..2, \forall t = 1..3 \\
 b_{it} &\geq 0 & \forall i = 1..2, \forall j = 1..3
 \end{aligned}$$

Alle Variablen müssen nichtnegativ sein.

Lagrangefunktion aus Zielfunktion und Differenzgleichung: entspricht der Summe diskret dargestellter Hamiltonfunktionen über die Zeit

Gleichung 16:

$$L = \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^3 p_i * f(n_t, x_{it}) * b_{it} + \sum_{t=1}^2 \gamma_{t+1} \left[n_{t+1} - n_t - \sum_{i=1}^2 \frac{g_i(n_t, x_{it}) * b_{it}}{\bar{b}} \right]$$

Lagrangefunktion erweitert um zusätzliche Restriktionen wie Startbedingung, Flächenrestriktionen, Nichtnegativitätsrestriktionen

Gleichung 17:

$$\begin{aligned}
 L = & \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^3 p_i * f(n_t, x_{it}) * b_{it} + \sum_{t=1}^2 \gamma_{t+1} \left[n_{t+1} - n_t - \sum_{i=1}^2 \frac{g_i(n_t, x_{it}) * b_{it}}{\bar{b}} \right] - \gamma_1 * (n_1 - a) \\
 & - \sum_{t=1}^3 \lambda_t \left[\sum_{i=1}^2 b_{it} - \bar{b} \right] + \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^3 \omega_{it} * b_{it} + \sum_{t=1}^3 \varpi_t * n_t + \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^3 \phi_{it} * x_{it}
 \end{aligned}$$

Kuhn-Tucker Bedingungen bzw. Lagrange- und Komplementärschlupfbedingungen¹⁰⁷

Gleichung 18:

$$L_{n_t} = \sum_{i=1}^2 p_i * f_{i n_t}(n_t, x_{it}) * b_{it} - \gamma_t - \gamma_{t+1} \left(\sum_{i=1}^2 g_{i n_t}(n_t, x_{it}) * b_{it} / \bar{b} + 1 \right) + \varpi_t = 0 \quad \forall t = 1..2$$

Die bewertete Grenzproduktivität über alle Flächen muss der Veränderung der Kozustandsvariablen (Veränderung des Werts der Variablen n_t) korrigiert um die mit der künftigen Kozustandsvariablen bewerteten Wirkungen der Erosionsmenge entsprechen. Der letzte Summand ist null ausser die Variable n_t sei gleich ihrem lower Bound in Gleichung 15. Die first order conditions (f.o.c.) in Gleichung 18 zeigen, dass Flächenallokation und Intensität nicht unabhängig voneinander sind, sondern dass sie in einer aktuellen Periode durch die Allokation beeinflusst sind. Über die Wirkung der Erosion hängen Intensität und Allokation zusammen und werden durch den Wert der Kozustandsvariablen in der nachfolgenden Periode beeinflusst. Aus mathematischer Sicht betrachtet kann die Flächenvariable nicht faktorisiert werden, so dass Allokation und Intensität (Variablen x_{it} und b_{it}) unabhängig wären.

¹⁰⁷ Die Tiefstellung einer Variablen bedeutet die partielle Ableitung nach dieser Variablen.

Gleichung 19:

$$L_{n_3} = \sum_{i=1}^2 p_i * f_{i n_t} (n_t, x_{it}) * b_{it} + \gamma_3 + \bar{\omega}_3 = 0$$

In der letzten Periode entspricht der Wert des Grenzproduktes der Variablen n_t über alle Flächen dem Wert der Kozustandsvariablen. Auch hier ist keine Unabhängigkeit der Allokations- von der Intensitätsfrage festzustellen.

Gleichung 20:

$$L_{x_{it}} = p_i * f_{i x_{it}} (n_t, x_{it}) * b_{it} - \gamma_{t+1} \frac{g_{i x_{it}} (n_t, x_{it})}{\bar{b}} + \varphi_{it} = 0$$

In jeder Periode (mit Ausnahme der letzten) und für jede Kultur entspricht der marginale Grenzerlös des Produktionsfaktors der Intensität der mit dem Wert der Ressource in der Folgeperiode bewerteten Veränderung der Zustandsvariablen. Die Zustandsvariable stellt die genutzte Ressource dar. In diesen f.o.c. ist die Allokationsfrage nicht unabhängig von der Intensitätsfrage, da die mittleren Kosten der Ressourcenveränderung berücksichtigt werden müssen.

Gleichung 21:

$$L_{x_{i3}} = p_i * f_{i x_{i3}} (n_t, x_{it}) * b_{i3} + \varphi_{i3} = 0 \quad \forall i = 1..2$$

In der letzten Periode ist der Grenzerlös des Produktionsfaktors, der die Intensität abbildet, auf jeder Fläche gleich null, da keine Kosten der Ressourcennutzung mehr berücksichtigt werden müssen. In dieser f.o.c. ist die Unabhängigkeit der Allokations- von der Intensitätsfrage gegeben.

Gleichung 22:

$$L_{b_{it}} = p_i * f_i (n_t, x_{it}) + \gamma_{t+1} \frac{g_i (n_t, x_{it})}{\bar{b}} - \lambda_i + \omega_{it} = 0 \quad \forall i = 1..2, \forall t = 1..2$$

Das Wertgrenzprodukt pro Fläche ist für alle Flächen in allen Perioden gleich dem Schattenpreis der Fläche zuzüglich der mit dem Wert der Kozustandsvariablen in der Folgeperiode bewerteten durchschnittlichen (Gewichtung durch die Gesamtfläche) Wirkung der Erosion auf die Zustandsvariable n_t . Hier ist kein Allokationsproblem enthalten, sondern ein reines Intensitätsproblem, das in einen Zusammenhang mit der mit dem Wert der Kozustandsvariablen der Folgeperiode bewerteten Wirkung der Erosion auf die Variable n_t und mit dem Schattenpreis der Fläche gebracht ist. Da dies für jede Kultur pro ha der Fall ist, ist kein Allokationsproblem vorhanden.

Gleichung 23:

$$L_{b_{i3}} = p_i * f_i (n_3, x_{i3}) - \lambda_3 + \omega_{i3} = 0 \quad \forall i = 1..2$$

In der letzten Periode entspricht das Wertgrenzprodukt dem Schattenpreis pro Fläche für jede Kultur. Ein implizites Allokationsproblem ist auch hier nicht vorhanden.

Die f.o.c. bezüglich des Schattenpreises der Differenzgleichung der Ressourcenveränderung entsprechen den Restriktionen in Gleichung 12 und Gleichung 13. In der Bedingung für den Ausgangszustand sind das Allokations- und das Intensitätsproblem unabhängig voneinander,

in den Restriktionen in Gleichung 13 dagegen nicht, da mit der durchschnittlichen Veränderung der Ressource gerechnet wird.

Gleichung 24:

$$L_{\lambda_t} = \sum_{i=1}^2 b_{it} - \bar{b} = 0 \quad \forall t = 1..3$$

Die Flächenrestriktion muss in jeder Periode erfüllt sein und ist ohne Bedeutung für die Frage nach der Möglichkeit der Trennung von Allokations- und Intensitätsproblem.

Komplementärschlupfbedingungen gemäss Kuhn-Tucker Ansatz (vgl. Abschnitt 4.2.5)

Gleichung 25:

$$b_{it} * \omega_{it} = 0 \quad \forall i = 1..2, \forall t = 1..3$$

$$n_t * \bar{\omega}_t = 0 \quad \forall t = 1..3$$

$$x_{it} * \varphi_{it} = 0 \quad \forall i = 1..2, \forall t = 1..3$$

Die Komplementärschlupfbedingungen ergeben sich aus den Nichtnegativitätsrestriktionen. Diese haben auf die Frage nach der Möglichkeit einer Trennung des Allokations- vom Intensitätsproblem keinen Einfluss.

10.2.1 Fazit für die Frage der zweistufigen Optimierung der Allokation und Intensität

Wie die f.o.c. in Gleichung 18 und Gleichung 19 zeigen, ist eine zweistufige Optimierung mit der Trennung der Allokations- von der Intensitätsfrage nicht möglich. Die Werte der Kozustandsvariablen in einander folgenden Perioden und die gewichtete mittlere Erosionswirkung beeinflussen die Wahl der optimalen Intensität in der früheren Periode. Die intertemporalen Kosten der Ressourcennutzung müssen bei der Wahl der optimalen Intensität zu einem Zeitpunkt berücksichtigt werden. Da die beiden Optimierungsaspekte nicht trennbar sind, ist die Suche nach konkaven / konvexen Funktionen (Produktions- und Erosionsfunktionen) in mehreren Variablen angezeigt, die auf der Grundlage der Simulationsdaten aus EPIC geschätzt und mit der Fläche skaliert werden können, ohne dass sie die funktionale Konvexitätseigenschaft (konkave oder konvexe Funktion) verlieren würden.

Die folgenden Abschnitte befassen sich mit der Frage alternativer ökonomischer Funktionen in mehreren Variablen (zur Verwendung als Produktions- und Erosionsfunktionen), die neben ökonomisch guten Eigenschaften die mathematischen Konvexitätsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.2.7) nicht verletzen. Die Funktionen müssen zudem ohne die Flächenvariable geschätzt und danach mit dieser skaliert werden können. Den Ausgangspunkt bilden in der Literatur verwendete Typen von Produktionsfunktionen.

10.3 Produktionsfunktionen allgemein

Die Produktionsfunktion ist ursprünglich ein mikroökonomisches Konzept für Prozesse, Unternehmen, Anlagen, unabhängig von Marktbedingungen oder Preisen. Die Produktionsfunktion beschreibt den geometrischen Ort, wo die Gesamtheit der technisch effizienten Produktionspunkte liegt. Die Produktionsfunktion grenzt die Menge der Produktionsmöglichkeiten ab (Heathfield und Wibe 1987, S. 12f). Produktion beinhaltet die Aspekte Quantität, Qualität, geographische und zeitliche Dislozierung (Verteilung) und führt generell zu einer Transformation der Welt (in einem präferierten Sinne).

Eine Produktionsfunktion beschreibt aus mikroökonomischer Sicht¹⁰⁸ den Zusammenhang zwischen dem Einsatz an Produktionsfaktoren und dem Output bei gegebener Technologie¹⁰⁹. Es interessiert in erster Linie die mengenmässige Umwandlung von Materie unter Einsatz von Energie und technischem Wissen, jedoch nicht die Organisation oder die Art oder der Ablauf der Produktion (Gabler 1993, S. 2657).

Aus makroökonomischer Sicht wird der Output als homogenes Produkt im Sinne der Wertschöpfung aller Industrien oder als Produkt einzelner Industrien bzw. Industriezweige, das aus dem Einsatz verschiedener Inputfaktoren resultiert, definiert. Beispiele von Bereichen sind Investitions-, Konsumgüter und landwirtschaftliche Produkte. Algebraisch erfolgt die Darstellung wie folgt: $Y=f(K,A,F)$ mit Y als Output, K als Kapitaleinsatz, A als Arbeitseinsatz und F bei dynamischer Betrachtungsweise als Wirkungsgrad des technischen Fortschritts (Gabler 1993, S. 2657).

10.3.1 Produktionsfunktionen in der Geschichte der Ökonomie

Im klassischen Produktionsmodell (widerspricht dem neoklassischen) wird Gewicht auf die Beziehungen zwischen Industrien gelegt. Das von einem Sektor produzierte Kapital (produzierter Output) dient wieder als Input. Dadurch werden bestimmte neoklassische Resultate der Produktionstheorie ungültig. Beispielsweise ist es nicht zwingend, dass eine Kapitalzinserhöhung zu einem sparsameren Einsatz des Kapitals führt. Deshalb ist es nicht möglich, simultan Faktor- und Produktpreise wie im neoklassischen Ansatz zu bestimmen.

Neoklassische Produktionsfunktionen besitzen drei wesentliche Charakteristika (Heathfield und Wibe 1987, S. ix f):

- Sie repräsentieren die Art und Weise, wie Produktionsfaktoren (Arbeit, Kapital, Boden) zur Produktion von Gütern eingesetzt werden können.
- Sie unterstellen, dass Kapital ein separater unabhängiger und direkt mit Arbeit und Boden substituierbarer Input ist.
- Sie legen den Fokus auf die Produktionsmöglichkeiten und –entscheidungen in Prozessen, Unternehmen und Industrien.

Produktionsfunktionen aus Gleichgewichtsmodellen dagegen legen Gewicht auf die Beziehungen zwischen produzierenden Unternehmen. Ein Beispiel ist das Leontief Produktionsmodell, in dem keine Substitution zwischen Inputs möglich ist. Die Inputmenge ist ausschliesslich durch den Output bestimmt (\Rightarrow Input-Output Analyse). Die Technologiewahl an sich ist folglich von geringerer Bedeutung als die gegenseitigen Beziehungen, ausser die Input-Output Analyse bezieht sich auf Technologien.

10.3.2 Die Produktionsfunktion aus Sicht der Empirie, der Ökonomie, der Landwirtschaft und der Mathematik

Der wichtigste Punkt bei der Wahl einer Funktionsform ist aus empirischer Sicht die Erfassung und präzise Abbildung zugrundeliegender ökonomischer Beziehungen (Casler 1997, S. 1483).

¹⁰⁸ Synonym zum Begriff der Produktionsfunktion ist derjenige des Produktionsprozesses.

¹⁰⁹ Mit Technologie wird das Produktionsverfahren, das durch das relative Verhältnis der eingesetzten Produktionsfaktoren charakterisiert ist, beschrieben. In diesem Sinn sind die Begriffe Produktionsfunktion und Produktionsverfahren keine (exakten) Synonyme.

Aus ökonomischer Sicht sind quasikonkave oder konkave Produktionsfunktionen sinnvoll, da sie konvexe Isoquanten besitzen. Die Eigenschaft geht mit abnehmenden Grenzerträgen der Produktionsfaktoren einher¹¹⁰.

Die Verwendung von Produktionsfunktionen mehrerer Variablen erlaubt dem Ökonomen, technische Veränderungen, Substitutionsbeziehungen zwischen Inputs, returns to scale¹¹¹ etc. in der Analyse eines bestimmten Sachverhaltes zu berücksichtigen (Modellierung: Baffes und Vasavada 1989, S. 1053 erwähnen dies im Zusammenhang mit Sektoranalysen). Die Frage nach der Art von Substitutionsbeziehungen ist im Falle mehrerer Variablen von zentraler Bedeutung.

Bei der Schätzung eines funktionalen Zusammenhangs auf der Basis einer gegebenen Datengrundlage kann nicht eine beliebige Funktion arbiträr vorausgesetzt werden. Verschiedene funktionale Formen, die auf der gleichen Datengrundlage und mit den gleichen Annahmen geschätzt werden, liefern meist ökonomisch inkonsistente Resultate (Baffes und Vasavada 1989, S. 1053). Dies hebt die Bedeutung der Kenntnis der Eigenschaften verschiedener funktionaler Formen hervor. Aus dem Problemverständnis ergibt sich meist ein sinnvoller technisch plausibler funktionaler Zusammenhang und die für die Schätzung verwendete Funktionsform muss diesen Zusammenhang adäquat abbilden können. Daher darf keine Schätzung mit einer beliebigen Funktionsform durchgeführt werden, sondern das Problemverständnis muss die zu verwendende Funktionsform vorschreiben. Selbstverständlich kann sich das Problemverständnis im Laufe der Schätzung erweitern und zu einem begründeten Einsatz neuer Funktionsformen führen.

Aus landwirtschaftlicher Sicht sind konkave Funktionen, die im Funktionsverlauf eine Sättigung erreichen, zugleich aber einen sehr flexiblen Funktionsverlauf aufweisen, interessant. Verschiedene davon werden im Abschnitt über ökonomische Eigenschaften einiger Funktionen untersucht.

Konvexe und konkave Funktionen sind aus mathematischer Sicht von Bedeutung, da solche Funktionen addiert werden können und die Summe diese Eigenschaft behält. Dies ist mit quasikonkaven Funktionen nicht möglich. Ein mathematisches Programmierungsproblem der Maximierung einer mindestens pseudokonkaven Zielfunktion unter mindestens quasikonvexen Restriktionen ist konvex, d.h. führt bei Erfüllung der Constraint Qualification zu einer globalen Lösung (vgl. Abschnitt 4.2.7).

10.4 Wichtige Eigenschaften von Produktionsfunktionen

Produktionsfunktionen ordnen bestimmten Inputmengen den höchstmöglichen mit ihnen herstellbaren Output im Sinne einer Input-Output Relation zu. Diese Beziehungen hängen vom Stand des technischen und organisatorischen Wissens ab. Bestehen aufgrund des vorhandenen technischen Wissens unterschiedliche Produktionsverfahren, so entsteht ein technisches Maximierungsproblem, dessen Lösung erlaubt, den höchstmöglichen Output mit den bestehenden Produktionsfaktoren (Arbeit, Boden, Kapital) zu bestimmen. Produktionsverfahren, die nicht zur Anwendung kommen, sind in diesem Falle ökonomisch ineffizient, die eingesetzten ökonomisch effizient (Allokationseffizienz). Davon unterscheidet sich die effiziente Faktor-

¹¹⁰ Auf wichtige ökonomische Eigenschaften von Produktionsfunktionen wird im Abschnitt 10.4 vertieft eingegangen.

¹¹¹ Returns to scale bezeichnen den Größeneffekt bei gleicher Skalierung aller Inputfaktoren. Es wird zwischen increasing, constant und decreasing returns to scale unterschieden. Im Gegensatz dazu beschreiben die economies of scale den langfristigen Verlauf der Durchschnittskosten, die aus einer Outputausdehnung resultieren (long run increasing returns) (Pearce 1989, S. 122 und S. 371). Diese sind oft auf eine Veränderung des Produktionsverfahrens zurückzuführen.

kombination, bei der c.p. der Einsatz keines Faktors gesenkt werden kann, ohne die Produktionsmenge zu verringern (technische Effizienz). Weiter sind gesellschaftliche (z.B. die politische Organisationsform) und sachliche (z.B. die natürlichen Gegebenheiten) Produktionsbedingungen von Bedeutung. Da die letzten beiden Aspekte häufig nicht direkt in die Produktionsfunktion einfließen, führt dies in Abhängigkeit solcher Aspekte zu unterschiedlichen Produktionsfunktionen. Bei aggregierten Produktionsfunktionen geht es um die Beziehung zwischen Input- und Outputaggregaten (Hesse und Linde 1976, S. 11ff).

10.4.1 Skalen- und Kostenelastizität sowie Homogenitätsgrad von Produktionsfunktionen

Im folgenden werden wesentliche ökonomische Charakteristika und damit ökonomische Beurteilungskriterien von Produktionsfunktionen erläutert. Darauf wird dann in den folgenden Abschnitten bei der Diskussion und Bewertung verschiedener Typen von Produktionsfunktionen Bezug genommen.

Eine Produktionsfunktion setzt den Input an Produktionsfaktoren und den Output in Beziehung und kann mathematisch wie folgt dargestellt werden:

Gleichung 26: $Q = f(X_i)$

mit $i=1..n$ Produktionsfaktoren X , Output Q und f als funktionalem Zusammenhang

Wichtige Eigenschaften von Produktionsfunktionen des Typs in Gleichung 26 sind:

- Kurvenverlauf: konkav, quasikonkav, konvex, quasikonvex etc. (vgl. Kapitel 4)
- Verlauf der Grenz- und Durchschnittserträge: abnehmend oder steigend, progressiv oder degressiv
- Veränderbarkeit der Input- und Outputmengen
- Steigung der Isoquanten und deren Veränderung (Grenzrate der technischen Substitution essentieller Faktoren: GRTS)
- Art der returns to scale: $f(t(X_i)) = t^\alpha f(X_i)$

d.h. ein t -facher Faktorinput aller Faktoren führt zu einem t^α -fachen Output, wobei α den Homogenitätsgrad der Funktion bezeichnet, der bei homogenen Produktionsfunktionen gerade der Skalenelastizität entspricht (Bairam 1994, S. 8):

- $\alpha > 1$: Homogenitätsgrad $> 1 \Rightarrow$ increasing returns to scale
- $\alpha = 1$: Homogenitätsgrad $1 \Rightarrow$ constant returns to scale
- $\alpha < 1$: Homogenitätsgrad $< 1 \Rightarrow$ decreasing returns to scale
- $\alpha = 0$: Homogenitätsgrad $0 \Rightarrow$ returns to scale $= 0$, d.h. in der Produktion existieren keine Skalenerträge.

- Ein abnehmender Grenzertrag lässt sich beispielsweise mit der Heterogenität der Faktoren oder mit einem existierenden optimalen Faktoreinsatzverhältnis erklären.

Grenzerträge

Die neoklassischen Annahmen für die Produktionsfunktion in Gleichung 26 sind für den Verlauf der Grenzerträge in Gleichung 27 aufgeführt.

$$\frac{dQ}{dX_i} = f_{X_i} > 0$$

Gleichung 27:

$$\frac{d^2Q}{dX_i dX_i} = f_{X_i X_i} < 0$$

Die erste Bedingung besagt, dass die marginalen Outputs des Faktoreinsatzes positiv sind (ist bei landwirtschaftlichen Produktionsfunktionen nicht zwingend, vgl. Lagerung bei Getreide). Die zweite Bedingung besagt, dass die Grenzerträge abnehmen und damit die Produktionsfunktion bezüglich zweier Produktionsfaktoren einen konkaven Verlauf aufweist.

Skalen- und Kostenelastizität

Die Skalenelastizität bezeichnet das Verhältnis von relativer Output- zu relativer Inputveränderung. Die Kostenelastizität ist die relative Veränderung der Kosten zur relativen Veränderung der Outputmenge.

Wird eine prozentual gleichmässige Veränderung des Einsatzes der einzelnen Inputfaktoren unterstellt, so kann die Skalen- und die Kostenelastizität wie folgt ausgedrückt werden:

Gleichung 28: $\varepsilon = \frac{(dQ/Q)}{(dX/X)} = \sum_{i=1}^n f_i * (X_i/Q)$ mit $f_i = dQ/dX_i$

$$\varepsilon = 1 / \text{Kostenelastizität} = \frac{(dQ/Q)}{dC/C} = \frac{1}{E_C}$$

$$E_C = \frac{MC}{AC} \Rightarrow \begin{array}{ll} \varepsilon > 1 & AC \text{ fallend} \\ \varepsilon = 1 & AC \text{ konstant} \\ \varepsilon < 1 & AC \text{ steigend} \end{array}$$

AC=Durchschnittskosten, MC=Grenzkosten, C=Kosten, E_C =Kostenelastizität
(Quelle: Heathfield und Wibe 1987, S. 56f und Bairam 1994, S. 8)

Bei einer Skalenelastizität von grösser als eins ist die Kostenelastizität entsprechend kleiner als eins und umgekehrt.

Nur bei homogenen Produktionsfunktionen ist die Skalenelastizität konstant. Wird die neoklassische Bedingung abnehmender Grenzerträge und fallender Durchschnittserträge vorausgesetzt, so wird aus Gleichung 28 ersichtlich, dass jede Skalenelastizität kleiner als 1 sein muss, damit die Summe davon ebenfalls kleiner als eins sein kann. Also müssen alle Grenzprodukte kleiner als die Durchschnittsprodukte sein. In der Folge weisen die Produktionsfunktionen fallende Durchschnittserträge auf. Die Zunahme der Outputs muss geringer als diejenige der Inputs sein. Dies impliziert die zweite Bedingung in Gleichung 27, die besagt, dass die Veränderung des Grenzertrages negativ ist. Abnehmende Durchschnittserträge bedingen aber nicht zwingend sinkende Produktivitäten.

10.4.1.1 Spezielle Eigenschaften homogener Funktionen

Das Euler Theorem (Bairam 1994, S. 8) für homogene Funktionen besagt, dass die Summe der mit dem Faktoreinsatz gewichteten ersten Ableitungen der Produktionsfunktion dem mit dem Homogenitätsgrad multiplizierten Output entspricht:

Gleichung 29:
$$\sum_{i=1}^n \frac{dQ}{dX_i} X_i = \alpha Q$$

Im Falle einer linear homogenen Produktionsfunktion mit $\alpha = 1$ besagt Gleichung 29, dass keine Gewinne oder Verluste entstehen, falls die Faktoren im Rahmen ihres Grenzproduktes entschädigt werden. Dies entspricht der Marktsituation vollständiger Konkurrenz. Alle linear homogenen Produktionsfunktionen können zudem als um eine Variable reduzierte Funktion geschrieben werden.

Ökonomisch betrachtet bedeutet lineare Homogenität, dass jeder Inputfaktor im Betrag seines Grenzproduktes entschädigt wird. Daher wird der gesamte Ertrag zur Abgeltung der Ansprüche aus den Anteilen einzelner Inputfaktoren verbraucht, so dass ein Reingewinn von null die Folge ist. Dies ist das langfristige Gleichgewicht in einer Marktsituation vollständiger Konkurrenz (Bairam 1994, S. 14f) und mit konstanten Skalenerträgen der Produktion zu begründen.

Der Einfluss konstanter Skalenelektizitäten lässt sich am Verlauf der Durchschnittskostenkurve illustrieren.

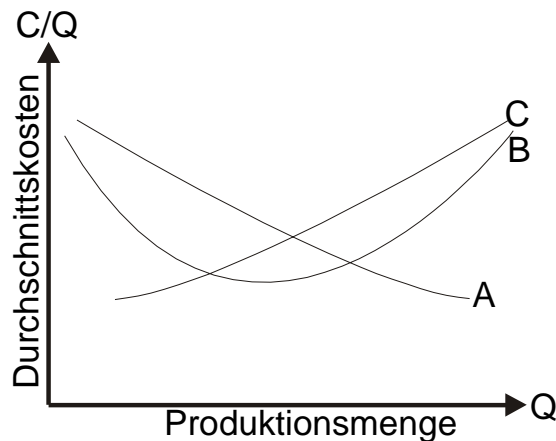


Abbildung 18: Durchschnittskostenkurven homogener und nichthomogener Produktionsfunktionen (Quelle: Bairam 1994, S. 13)

In Abbildung 18 zeigt die Kurve A den Verlauf der Durchschnittskosten einer homogenen Produktionsfunktion mit einer Skalenelektizität grösser als eins, C denjenigen einer homogenen Produktionsfunktion mit einer Skalenelektizität kleiner als eins. In diesem Fall ist die Kostenelektizität grösser als eins. Daher ist die relative Veränderung der Kosten je grösser als die relative Veränderung des Outputs, was zu steigenden Durchschnittskosten führt. B zeigt den Verlauf einer inhomogenen Produktionsfunktion mit einer von grösser als eins zu kleiner als eins abnehmenden Skalenelektizität (Bairam 1994, S. 15). Der Verlauf B bedingt einen S-förmigen Verlauf der Funktion der totalen Kosten.

10.4.2 Grenzrate der technischen Substitution und Substitutionselektizität

Die Substituierbarkeit von Faktoren wird durch die Grenzrate der technischen Substitution ausgedrückt. Sie lässt sich aus dem totalen Differential der Produktionsfunktion ableiten, indem die Outputmenge konstant gesetzt wird.

Gleichung 30:
$$GRTS = \frac{dX_j}{dX_i} = - \frac{df/dX_i}{df/dX_j} = - \frac{r_i}{r_j} \quad \forall \quad i = 1 \dots n, \quad j = 1 \dots m$$

$r_i = \text{Preis des Faktors } X_i$

Das Verhältnis der Grenzprodukte der Faktoren entspricht bei der Marktsituation vollständiger Konkurrenz im Falle eines allgemeinen Marktgleichgewichts dem Verhältnis der Faktorpreise¹¹². Dies ist der Fall für einen Akteur in einem Markt bei vollständiger Konkurrenz und entspricht dem Kostenminimierungsprinzip. Aus dem Gewinnmaximierungsprinzip ergibt sich, dass das mit dem Produktpreis bewertete Grenzprodukt eines Faktors (Wertgrenzprodukt) gleich dem Faktorpreis ist. Es entstehen somit keine Gewinne:

Gleichung 31:
$$p * \frac{dQ}{dX_i} = r_i$$

- Die Substitutionselastizität ist das Verhältnis der relativen Veränderung des Faktoreinsatzverhältnisses zur relativen Veränderung der Isoquantensteigung. Die Isoquantensteigung entspricht im Kostenminimierungsfall der relativen Veränderung des Preisverhältnisses der Produktionsfaktoren (Steigung der Budgetgeraden):

Gleichung 32:
$$\sigma(X_i, X_j, r_i, r_j) = \frac{\left| \frac{d\left(\frac{X_i}{X_j}\right) / \left(\frac{X_i}{X_j}\right)}{d\left(\frac{dX_i}{dX_j}\right) / \left(\frac{dX_i}{dX_j}\right)} \right|}{\left| \frac{d \ln(X_i / X_j)}{d \ln(GRTS)} \right|} = \left| \frac{d \ln(X_i / X_j)}{d \ln(r_i / r_j)} \right|$$

$r_i = \text{Preis des Faktors } X_i$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Falle der Kostenminimierung die Steigung der Isoquante der Steigung der Kostengerade entspricht. Daher ist die relative Veränderung des Faktoreinsatzverhältnisses gleich der relativen Veränderung der Faktorpreise (Heathfield und Wibe 1987, S. 59 und Varian 1992, S. 14).

Bairam (1994, S. 8-11) erachtet folgende Spezifitäten von Produktionsfunktionen als wichtig:

- Die Substitutionselastizität ist immer positiv.
- Bei einer Produktionsfunktion vom Homogenitätsgrad 1 (konstante Skalenerträge) ist die Form einer Produktionsfunktion durch die Substitutionselastizität eindeutig bestimmt.
- Die Substitutionselastizität ist je nach Produktionsfunktion konstant oder variabel.
- Flexibel ist eine Funktion, wenn die Substitutionselastizität variabel ist.

Bei homogenen und homothetischen Funktionen ist die technische Rate der Substitution unabhängig vom Produktionsumfang (Varian 1992, S. 19).

Der Verlauf der zu einer Produktionsfunktion gehörenden Isoquanten ist eine wichtige Eigenschaft der Produktionsfunktionen. Die Funktion einer Isoquante kann durch Umformung einer Produktionsfunktion (in Anlehnung an Henderson und Quandt 1980, S. 72) erreicht werden. Isoquanten besitzen konstante Produktionsniveaus. Wird in einer Produktionsfunktion das Outputniveau konstant gesetzt, resultiert eine implizite Darstellung der Funktion, die die Iso-

¹¹² Diese Effizienzbedingung für die Allokation gilt analog in ressourcenökonomischen Fragestellungen (vgl. Perman et al. 1996, S. 118).

quante darstellt. Durch Auflösung nach einer Inputvariablen wird eine explizite Darstellung erreicht.

Ein konvexer Verlauf ist aus ökonomischer Sicht in den meisten Fällen sinnvoll. Gemäss Varian (1992, S. 9) garantiert eine quasikonkave Produktionsfunktion konvexe Isoquanten: "Convex input requirement set is equivalent to quasiconcave production function"¹¹³. Daher ist es bei mindestens quasikonkaver Produktionsfunktion nicht nötig, den Verlauf der Isoquanten (diese sind ein Spezialfall des input requirement sets, indem ein konstantes Produktionsniveau vorausgesetzt ist) speziell zu diskutieren, da Konvexität gegeben ist.

Die Anforderung der Konkavität an Produktionsfunktionen aus Gründen der globalen Lösbarkeit nichtlinearer Programmierungsprobleme garantiert aus ökonomischer Sicht wünschenswerte Eigenschaften, wie abnehmende Grenz- und Durchschnittserträge und konvexe Isoquanten.

10.4.3 Grenz- und Durchschnittserträge von Produktionsfunktionen

Die Entwicklung von Grenz- und Durchschnittserträgen hängt mit den ökonomischen Eigenschaften der Produktionsfunktion bezüglich Skalenträgen und Substitutionselastizität zusammen. Die beiden Grössen sind gut zur Illustration der entsprechenden ökonomischen Eigenschaften zu gebrauchen. Die Durchschnittserträge sind bei degressiv abnehmenden Grenzerträgen degressiv sinkend und immer positiv. Formal bedeutet dies:

Gleichung 33:

Die Durchschnittserträge sind immer positiv:

$$\frac{Q}{X_i} = \frac{f(X_i)}{X_i} > 0$$

Die marginalen Durchschnittserträge sind negativ, daher sinken die Durchschnittserträge, wenn die marginalen Grenzerträge kleiner als die Durchschnittserträge sind:

$$\frac{d\left(\frac{Q}{X_i}\right)}{dX_i} = \frac{d\left(\frac{f(X_i)}{X_i}\right)}{dX_i} < 0$$

Der Absolutbetrag der Veränderung der marginalen Durchschnittserträge ist abnehmend. Sie sinken degressiv (konvexer Verlauf der Durchschnittserträge):

$$\frac{d\left(\frac{Q}{X_i}\right)}{dX_i^2} = \frac{d\left(\frac{f(X_i)}{X_i}\right)}{dX_i^2} > 0$$

10.4.4 Flexibilität von Funktionen in mehreren Variablen

Die Funktionen werden u.a. bezüglich ihrer Flexibilität diskutiert. Flexibilität umfasst mehrere Bereiche. Inputseitig bedeutet Flexibilität, dass die Allan Substitutionselastizität möglichst variabel sein soll. Der Begriff lässt sich erweitern in Bezug auf Output und Zeit. Flexibilität bezüglich Output bedingt keine fixen returns to scale. Die Berücksichtigung des Zeitaspekts erfordert den Einbezug von technischem Fortschritt (Diewert und Ostensoe 1987, S.

¹¹³ "The input requirement set ist the set of all bundles that produce at least y units of output" (Varian 1992, S. 3).

44). Die Funktionen sollen dabei möglichst wenige zu schätzende Parameter aufweisen. Eine flexible funktionale Form als Approximation der realen effizienten Input-Output Beziehung sollte an irgendeinem Punkt auch eine beliebige und den realen Verhältnissen entsprechende Substitutionselastizität annehmen. Flexible funktionale Formen sollen zudem an einem bestimmten Punkt einen beliebigen Funktionswert und beliebige erste und zweite Ableitungen annehmen. Sie werden meist Approximationen zweiter Ordnung an Kurven gleichgesetzt (Barnett 1985, S. 35f).

Der Zweck flexibler funktionaler Formen liegt darin, Aussagen ohne vorgängige Beschränkungen in Bezug auf Elastizitäten machen zu können (Barnett et al. 1985, S. 24). Flexible funktionale Formen erlauben schwache oder keine Restriktionen auf die Elastizitäten zwischen Inputfaktoren, während inflexible Funktionsformen wie die Cobb-Douglas oder die CES Funktion die Elastizitäten stark einschränken (Konstanz oder sogar gleich eins).

Die Flexibilität und die Anforderungen aus Sicht der ökonomischen Theorie stehen häufig im Widerspruch zur Anwendung (z.B. in mathematischen Modellen). So hat die Implementation einer Konkavität und Monotonie bewirkenden Parameterrestriktion oft starke Einschränkungen bezüglich der Flexibilität zur Folge (Terrell 1996, S. 179). Es besteht im Prinzip ein Trade-Off zwischen der Flexibilität einer funktionalen Form und den globalen "well-behaved" Spezifikationen der Funktion wie Konkavität, variable Substitutionselastizität etc. (Barnett 1985, S. 33). Grundsätzlich sollte die flexible Funktionsform der Funktion, die sie approximiert, in möglichst allen Eigenschaften gleichkommen und gleichzeitig möglichst viele aus ökonomischer Sicht relevante Eigenschaften in einem maximalen Bereich erfüllen.

Die Frage nach der Flexibilität verwendeter Produktionsfunktionen stellt ein bedeutendes Problem der angewandten Ökonomie. Bei der Schätzung flexibler funktionaler Formen in der Produktion gehen die theoretischen Bedingungen der Kurvenform (Konvexität, Konkavität, Quasikonkavität), die aus ökonomischer Sicht sinnvoll sind, häufig verloren (Diewert und Ostensoe 1987, S. 43). In der Literatur wurde diesem Problem wiederholt Aufmerksamkeit geschenkt. Terrell (1996) zeigt auf, wie Bedingungen der Monotonie und Konkavität in flexiblen funktionalen Formen berücksichtigt werden können. Rossi (1984), Barnett et al. (1985) und Casler (1997) vergleichen verschiedene flexible Funktionsformen bezüglich ihrer ökonomischen Eigenschaften im industriellen Bereich, Baffes und Vasavada (1989) führen dieselbe Analyse für den landwirtschaftlichen Sektor durch. Die Eigenschaften haben nicht nur aus ökonomischer Sicht eine grosse Bedeutung. Die Konvexitäts- oder die Konkavitätseigenschaft ist für den Einsatz flexibler Funktionsformen in nichtlinearen Programmierungsmodellen Voraussetzung, sobald Additionen und Subtraktionen von Funktionen vorgenommen werden müssen. Andernfalls ist die verallgemeinerte Form der Konkavität, die Quasikonkavität, die Minimalbedingung für den Einsatz (vgl. Abschnitt 4.2.7). In diesem Sinne laufen die Anforderungen an die Funktionsformen für die Schätzung aus der Perspektive der Ökonomie und der Mathematik parallel. Zudem müssen diese Bedingungen global gültig sein, ausser es können für die Definitionsbereiche einzelner Variablen entsprechende Einschränkungen gemacht werden.

10.4.5 Produktionsfunktionen in der angewandten Forschung

In der angewandten Forschung im Bereich der Produktion werden häufig homogene oder sogar linear homogene Funktionen angenommen, was nicht für alle Aspekte der Produktionstheorie angepasst ist. Die Homogenitätsannahme hat zur Folge, dass die Skalenelelastizität konstant ist. In theoretischen Arbeiten werden oft Produktionsfunktionen mit abnehmender Skalenelelastizität bei steigendem Output verwendet, in angewandten Studien meist solche mit konstanter (Cobb-Douglas und CES Produktionsfunktion). Ein weiteres bedeutendes Problem ist, dass die Substitutionselelastizität als konstant vorausgesetzt wird. Die Flexibilität einer Pro-

duktionsfunktion ist bei Konstanz der Substitutionselastizität beschränkt, was aber Vorteile bei durchzuführenden Schätzungen bringt. Konstante Substitutionselastizitäten in der gewählten Form der Produktionsfunktion erschweren die Anpassungsfähigkeit an die Realität, erleichtern dagegen die Einhaltung ökonomisch erwünschter Eigenschaften wie abnehmende Grenzerträge (konkave Produktionsfunktion).

Flexible Funktionen weisen diese Konstanz bei der Skalen- und der Substitutionselastizität nicht auf. Daher ist die Flexibilität ein gutes Beurteilungskriterium für Funktionen, die im Modellansatz Verwendung finden sollen.

10.5 Beurteilungskriterien / Motivation

Für die Diskussion funktionaler Formen für den Einsatz als Produktionsfunktionen im gewählten Modellansatz (Kapitel 9) kommen folgende Beurteilungskriterien zur Anwendung:

1. Gewährleistung der Konkavität bei Skalierung mit einer Variablen: Der Ansatz über die Metamodellierung (vgl. Abschnitt 9.2.3) bedingt eine Schätzbarkeit der Funktion auf der Datenbasis aus den EPIC Simulationen. Diese ist pro ha ausgewiesen, was zur Folge hat, dass die geschätzte Funktion für die Verwendung im ökonomischen Modell mit einer Flächenvariablen skaliert werden muss. Dabei muss die Konkavität der Funktion (vgl. Kapitel 4) gewährleistet bleiben. Für die Verwendung in detaillierten Programmierungsmodellen kommen nur Funktionen in Frage, die mindestens konkav sind.
2. Flexibilität bezüglich Skalen- und Substitutionselastizität: Eine gute Flexibilität, gekennzeichnet durch veränderliche Skalenerträge und Substitutionselastizitäten, ist aus ökonomischer Sicht eine sehr erwünschte Eigenschaft.
3. Realitätsbezug Landwirtschaft: Die Funktionen müssen die in der Realität beobachtbaren Input-Outputbeziehungen ausreichend genau abbilden können. Beispielsweise sollen die Funktionen nicht über den ganzen Definitionsbereich der exogenen Variablen steigen, sondern sie sollten ein Maximum, evtl. über einen Bereich, erreichen und auch wieder sinken können (Bsp. Effekt der Lagerung von Getreide bei übermäßigem Einsatz an N-Dünger / physiologische Grenze des Produktionspotentials).
4. Schätzbarkeit: Die Funktion muss auf Hektarbasis geschätzt werden können, d.h. sie muss in der allgemeinen Form im ökonomischen Modell linear in der Flächenvariablen sein bzw. die geschätzte Funktion muss mit der Flächenvariablen skalierbar sein und dabei die Eigenschaft der Konkavität bewahren. Gleichzeitig dürfen keine unlösbaren Probleme bei den Schätzverfahren auftauchen wie Singularität etc..

In der Anwendung der Kriterien wird das erste als Ausschlusskriterium behandelt, da in detaillierten Modellen Konvexität (vgl. Abschnitt 4.2.7) unbedingt vonnöten ist, um ein globales Optimum zu ermöglichen. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, so ist eine Funktion als für die Verwendung im Modellansatz ungeeignet zu betrachten.

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine ausführliche Übersicht über verschiedene Produktionsfunktionen aus landwirtschaftlicher und ökonomischer Sicht. Diese werden bezüglich der oben diskutierten Beurteilungskriterien bewertet und es zeigt sich, dass keine der in der Literatur gefundenen Funktionen alle Beurteilungskriterien erfüllt. Deshalb wird im Abschnitt 10.8 auf S. 137 auf Erweiterungen der Cobb-Douglas Produktionsfunktion eingegangen, die zur für die Metamodellierung geeigneten modifizierten Cobb-Douglas Produktionsfunktion führen (S. 147ff Abschnitte 10.8.4 und 10.8.5). Für die Modellierung in dieser Arbeit ist einzig die modifizierte Cobb-Douglas Produktionsfunktion wichtig.

10.6 Produktionsfunktionen aus landwirtschaftlicher Sicht

Aus naturwissenschaftlicher und landwirtschaftlicher Sicht kommen verschiedene Funktionsformen in Frage. Die Funktionen sollen im Gegensatz zu neoklassischen Produktionsfunktionen, die durchgehend positive Grenzerträge aufweisen, ein Maximum erreichen können. Dieses repräsentiert beispielsweise pflanzenphysiologische Grenzen.

In der naturwissenschaftlichen Literatur werden als typische Produktionsfunktionen ($Y = f(X)$) folgende Funktionstypen verwendet (Fuchs und Löthe 1996, S. 494):

- Quadratische Funktion: $Y = a + b * X + c * X^2$
- Quadratwurzelfunktion: $Y = a + b * X^{0.5} + c * X$
- Mitscherlichfunktion: $Y = a * (1 - b * e^{c * X})$
- Linear limitationale Funktionen: $Y = a + b * X \quad \forall X \leq d$
 $Y = c \quad \forall X > d$
- Cobb-Douglas Funktion in einem Faktor: $Y = a * X^b$

Letztere ist eine typische in der Ökonomie verwendete Funktionsform (vgl. Fuss und McFadden 1979, S. 217ff) und wird daher im Abschnitt 10.7 weiter diskutiert. Frank et al. (1990, S. 600) diskutieren zusätzlich noch eine Translog Approximation an die Produktionsfunktion in der Anwendung im landwirtschaftlichen Bereich:

$$Y = a * (X + b)^c * e^{d * \log(X + b)} - f * \log(X + b)$$

10.6.1 Quadratische Funktion

Beurteilung des Kriteriums 1 in Abschnitt 10.5: Die in Frank et al. (1990, S. 600) dargestellte quadratische Funktion in den Variablen Stickstoff und Phosphor ist konkav. Wird diese Funktion aber mit der Fläche skaliert, so verliert sie die Eigenschaft der Konkavität. Die Skalierungsvariable lässt sich bei jedem Principal Minor der geränderten Hessischen Matrix zwar ausklammern, der dritte Principal Minor der geränderten Hessischen Matrix ist aber positiv und nicht wie für Quasikonkavität gefordert negativ.

10.6.2 Wurzelfunktion

Fuchs und Löthe (1996, S. 497) untersuchen diese Funktion bezüglich ihrer ökologischen und ökonomischen Eigenschaften. Sie beurteilen die Funktionsform als für die Ermittlung der optimalen speziellen Intensität und deren ökologischen Auswirkungen ungeeignet.

Beurteilung des Kriteriums 1 in Abschnitt 10.5: Auch aus Sicht der globalen Lösbarkeit ist die Funktion nicht verwendbar. Die Produktionsfunktion ist ohne Skalierung mit der Fläche konkav im Verlauf, denn der erste Principal Minor der Hessischen Matrix ist bei positiven Variablenwerten immer negativ, der zweite dagegen positiv bei zwei exogenen Variablen. Wird diese Funktion mit der Flächenvariablen skaliert, so besitzen die entsprechenden Principal Minors der Hessischen Matrix folgende Vorzeichen (1. Principal Minor ist negativ, 2. Principal Minor ist positiv, 3. Principal Minor ist positiv). Die Funktion ist damit nicht konkav und es lassen sich auch keine Beschränkungen des Definitionsbereichs einführen, damit die Funktion konkav wäre, da der dritte Principal Minor über den gesamten positiven Variablenwertebereich ein positives und nicht wie gefordert ein negatives Vorzeichen aufweist. Die Funktion ist quasikonkav, wie die Vorzeichen der Determinanten der Principal Minors der geränderten Hessischen Matrix zeigen.

10.6.3 Mitscherlich-Baule Funktion

Beurteilung des Kriteriums 1 in Abschnitt 10.5: Die in Frank et al. (1990, S. 600) dargestellte Mitscherlich-Baule Funktion in den Variablen Stickstoff und Phosphor ist nicht konkav. Die Determinante des ersten Principal Minors der Hessischen Matrix besitzt ein negatives Vorzeichen (lokales Maximum von 0 und lokales Minimum von -0.035), die Determinante des zweiten Principal Minors der Hessischen Matrix besitzt unterschiedliche Vorzeichen (lokales Maximum von 0.00004 und lokales Minimum von -0.00002). Damit ist die Mitscherlich-Baule Funktion nicht konkav und eine graphische Analyse der Determinanten der Principal Minors zeigt, dass die Vorzeichenverletzung der Determinante des zweiten Principal Minors der Hessischen Matrix bei Werten der Düngungsintensität von <50 auftritt. Da die Funktion bereits vor der Skalierung mit der Fläche nicht konkav ist, erübrigt sich ein Test auf Quasikonkavität der mit der Flächenvariablen skalierten Funktion.

10.6.4 Translog - Approximation

Beurteilung des Kriteriums 1 in Abschnitt 10.5: Die in Frank et al. (1990, S. 600) dargestellte "Translog" Funktion (in nicht logarithmierter Schreibweise dargestellt) in den Variablen Stickstoff und Phosphor ist nicht konkav und nicht konvex, da der erste Principal Minor der Hessischen Matrix ein positives, der zweite Principal Minor ein negatives Vorzeichen aufweist. Eine Verwendung dieser Produktionsfunktion in nichtlinearen Modellen ist nicht sinnvoll. Die Translog Funktion in der logarithmierten Darstellung findet in der Ökonomie Anwendung und wird im Abschnitt 10.7.3.2 ausführlicher diskutiert.

10.6.5 Linear-limitationale Funktion / Von Liebig Funktion

Beurteilung des Kriteriums 1 in Abschnitt 10.5: Die in Frank et al. (1990, S. 600) dargestellte von Liebig Funktion ist eine linear limitationale Funktion, was zur Folge hat, dass eine einseitige Erhöhung des Faktoreinsatzes zu keinem höheren Ertrag führt. Die Funktion ist von der Formulierung her nicht für die Nichtlineare Programmierung geeignet, da es sich nicht um eine stetig differenzierbare Funktion handelt. Die Funktion ist in ihrem Verlauf dachförmig.

10.6.6 Konsequenzen aus der Analyse von im landwirtschaftlichen Bereich verwendeten Produktionsfunktionen

Interessante Formen von Produktionsfunktionen mit konkavem Verlauf sind vorzugsweise im Bereich der Ökonometrie zu suchen, da bei Verwendung dieser Methode Beziehungen zwischen Output- und meist mehreren Inputgrößen bestimmt bzw. geschätzt werden. Grundlagen für die Schätzung müssen ökonomisch plausible Funktionsformen sein, die im Falle von Kosten- und Produktionsfunktionen typischerweise einen konkaven Verlauf aufweisen.

Im folgenden Abschnitt werden einige in der Ökonomie typische Produktionsfunktion bezüglich ihrer Eignung für den Einsatz in nichtlinearen Programmierungsmodellen diskutiert. Referenz für den Realitätsbezug (Kriterium 3) bildet die quadratische Funktion¹¹⁴, die gemäss Fuchs und Löthe (Fuchs und Löthe 1996, S. 501f) zusammen mit der Mitscherlich Funktion unter ökonomischen und ökologischen Aspekten¹¹⁵ als etwa gleichwertig und sehr anpas-

¹¹⁴ Die quadratische Funktion als Referenzfunktion wurde gewählt, da lediglich das Produkt von Variablen, aber keine Exponierung oder Logarithmierung vorkommt.

¹¹⁵ Das ökologische Kriterium wurde von den Autoren anhand des Fits an die Daten, die mittels des CREAMS - Modells, einem deterministisch - physikalisch - empirischen Simulationsmodell generiert wurden, beurteilt. Eigene Berechnungen auf der Basis von mit EPIC generierten Daten zeigen, dass die quadratische Produktionsfunktion aus ökologischer und ökonomischer Sicht (Marginalbetrachtungen) sehr gut verwendbar ist (Schmid et al. 1997).

sungsfähig anzusehen sind. Somit ist die quadratische Funktion eine gute Referenz zur Beurteilung des Kriteriums 3 in Abschnitt 10.5 (vgl. auch Abschnitt 10.7.1.5).

10.7 Produktionsfunktionen aus ökonomischer Sicht

Zuerst wird jeweils die Eignung aus ökonomischer Sicht diskutiert. Dann folgt auch die Diskussion des Kriteriums 1 in Abschnitt 10.5.

10.7.1 Cobb-Douglas Funktion

10.7.1.1 *Eigenschaften der Funktion allgemein*¹¹⁶

In der Cobb-Douglas Funktion vorkommende Produktionsfaktoren sind essentiell, d.h. dass von jedem Faktor etwas in der Produktion sein muss. Andernfalls kann nicht produziert werden.

Die Funktion ist homothetisch, d.h. die Steigung der Isoquanten entlang einer Ursprungsgerade entspricht einem konstanten Faktoreinsatzverhältnis.

Die Substitutionselastizität ist für jedes Outputniveau und für jede Faktorkombination gleich 1. Die Cobb-Douglas Funktion stellt damit einen Spezialfall der CES Funktion dar (vgl. Abschnitt 10.7.2).

Die Skalenelastizität (elasticity of scale) der Cobb-Douglas Funktion ist konstant (und gleich der Summe der Exponenten). Bei einer Summe grösser 1 gibt es wachsende, bei einer Summe gleich 1 konstante und bei einer Summe kleiner als 1 sinkende Skalenerträge (increasing, constant, decreasing returns to scale). Eine Skalenelastizität von >1 führt zu generell sinkenden Durchschnittskosten, von $=1$ zu konstanten und von <1 zu zunehmenden Durchschnittskosten. Im Falle konstanter Skalenerträge führt eine relative Veränderung des Einsatzes aller Faktoren zu einer entsprechenden proportionalen Veränderung des Outputs.

10.7.1.2 *Schätzbarkeit der Funktion*

Durch einfache Umformung kann die Cobb-Douglas Funktion so modifiziert werden, dass Linearität in der Fläche gegeben ist. Dies wird am Beispiel des Düngereinsatzes exemplarisch ausgeführt. Dabei bezeichnen Q den Gesamtertrag pro Kultur, Y die gesamte Kulturfläche, X den gesamten Düngereinsatz.

Gleichung 34: $Q = \alpha * X^\beta * Y^{(1-\beta)}$

Gleichung 35¹¹⁷: $Q = \alpha * \left(\frac{X}{Y}\right)^\beta * Y^1 = \alpha * x^\beta * y^1$

In Gleichung 35 bezeichnet der Klammerausdruck die Intensität, im gewählten Beispiel die Düngungsintensität, sie ist im zweiten Gleichungsausdruck mit x bezeichnet. Die Datengrundlage für die Metamodellierung besteht aus zur Düngungsintensität analogen Intensitäten. Diese sind als Ertrag / ha in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit / ha ausgedrückt. Der Exponent β ist nun zu schätzen und danach in die allgemeine Cobb-Douglas Funktion in Gleichung 34 einzusetzen. Die zu schätzende Funktion reduziert sich auf den Intensitätsteil der Funktion mit $x = X / Y$:

¹¹⁶ Der Abschnitt stützt sich auf Heathfield und Wibe (1987, S. 77ff).

¹¹⁷ Besprechung mit Dr. Werner Hediger vom 20.4.1998.

Gleichung 36:
$$\frac{Q}{Y} = Q = \alpha * x^\beta = \alpha * \left(\frac{X}{Y}\right)^\beta$$

Durch dieses Vorgehen ist garantiert, dass die Fläche Y linear in der geschätzten Funktion enthalten ist. Der allgemeinen Annahme, dass die Erträge linear in der Fläche sind, wird im formalen Modell nicht widersprochen. X bezeichnet den gesamten pro Kultur ausgebrachten Dünger, Y entsprechend die gesamte Kulturfläche.

Gemäss Gleichung 35 und Gleichung 36 eignet sich die Cobb-Douglas Funktion bestens für die Metamodellierung im gewählten Modellansatz. Die Schätzung kann auf Grund von Daten auf der Basis eines Hektars vorgenommen und die Funktion durch Umformung in die im ökonomischen Modell verwendete Form gebracht werden. Dabei bleiben die Konkavitätseigenschaften erhalten.

Weitere Aspekte der Schätzung (Bairam 1994, S. 20)

Durch die Möglichkeit einer log-linearen Spezifikation der Cobb-Douglas Funktion können die Parameter mittels OLS sehr einfach direkt geschätzt werden. Bestehen Probleme der Multikollinearität zwischen Variablen, so kann über Differenzierung, d.h. Schätzung der Parameter auf der Basis von Variablenveränderungen das Problem entschärft werden (keine Inferenzprobleme und keine Schwierigkeiten beim Testen der Hypothesen). Wird vor der Schätzung im Falle zweier Variablen eine Transformation vorgenommen, indem durch eine Variable dividiert wird, so wird aus dem Exponenten der Variablen, durch die dividiert wurde, direkt ersichtlich, ob konstante oder nicht konstante Skalenerträge vorhanden sind, je nachdem ob der Exponent 0 ist oder nicht (Bairam 1994, S. 21). Dieses Verfahren lässt sich generell für konstante Skalenerträge und damit für linear homogene Produktionsfunktionen anwenden.

Indirekte Verfahren basieren auf der dualen Form der Produktionsfunktion, der Kostenfunktion, bei der Daten über Produktionsmengen, Kosten und Inputpreise genügen, ohne dass Daten über den Faktoreinsatz nötig wären (Bairam 1994, S. 23).

10.7.1.3 Konkavitätseigenschaft und Beurteilung für NLP

Cobb-Douglas Produktionsfunktionen sind im einfachsten Falle Funktionen zweier Faktoren. Bezüglich der Frage der Konkavität bzw. Konkavität besitzen sie folgende Eigenschaften:

Funktionen der allgemeinen Cobb-Douglas Form $f(x_1, x_2) = x_1^\alpha x_2^\beta$, $0 < \alpha, \beta < 1$ sind:

- konkav, wenn $\alpha + \beta = 1$,
strikt konkav, wenn $\alpha + \beta < 1$.
- Sind $\alpha, \beta > 0$ und $\alpha + \beta > 1$, dann ist der Cobb-Douglas Funktionstyp quasikonkav (Takayama 1994, S. 61)

Für den Einsatz in Programmierungsmodellen ist lediglich der Fall der (strikten) Konkavität geeignet, da die Summe (strikt) konkaver Funktionen wieder konkav ist (vgl. Abschnitt 4.1.3.5). Produktionsfunktionen des Cobb-Douglas Typs lassen sich wegen der Eigenschaft der Konkavität beliebig summieren, ohne diese wichtige Eigenschaft zu verlieren.

10.7.1.4 Flexibilität der Cobb-Douglas Funktion aus ökonomischer Sicht

Die Cobb-Douglas Funktion besitzt decreasing returns to scale, die aber nie negativ werden, so dass die Funktion monoton wachsend ist. Dies lässt sich mittels der ersten Ableitung gut nachvollziehen:

$$Q = \gamma * X^\alpha * Y^\beta \quad \text{mit } Q = \text{Menge}, \quad X, Y = \text{Inputfaktoren}$$

Gleichung 37: 1. Ableitung nach X : $\frac{dQ}{dX} = \gamma * \alpha * X^{\alpha-1} * Y^\beta$

1. Ableitung nach Y : $\frac{dQ}{dY} = \gamma * \beta * X^\alpha * Y^{\beta-1}$

Der Parameter γ der Cobb-Douglas Produktionsfunktion ist ein Skalierungsparameter, der die technologische Effizienz beschreibt. Die Exponenten sind gerade die partiellen Skalenelastizitäten.

Für die Konkavität ist es, wie schon gezeigt, erforderlich, dass alle Koeffizienten positiv sind und sich die Exponenten maximal zu eins ergänzen. Die ersten Ableitungen der Cobb-Douglas Funktion können nicht negativ werden, so dass die Funktion in beiden Inputfaktoren monoton wachsend ist. Die konstante Skalenelastizität mit der Summe der Exponenten als Betrag und vor allem die Substitutionselastizität von 1 haben zur Folge, dass die Krümmung der Funktion unflexibel ist. Diese Eigenschaften relativieren die aus mathematischer Sicht wegen der Konkavität gute Eignung für Nichtlineare Programmierungsmodelle, da aus ökonomischer Sicht die Grenzproduktivitäten bestimmend sind. Im ökonomischen Optimum gilt:

$$\text{Grenzkosten} = \text{Grenzerlös}$$

d.h. aus dem Optimierungsproblem:

$$\max \quad p * f(x) - c(x)$$

ergibt sich die Optimalitätsbedingung:

$$p * \frac{df(x)}{dx} = \frac{dc(x)}{dx}$$

Das Wertgrenzprodukt muss im Optimum den Grenzkosten (bei linearem Kostenverlauf den Faktorkosten) entsprechen.

10.7.1.5 Realitätsbezug der Funktion

Die folgenden Ausführungen diskutieren den Realitätsbezug der Cobb-Douglas Funktion im Vergleich zur quadratischen Funktion (vgl. Abschnitt 10.6.6) bei realen Daten.

Tabelle 3 zeigt die Datengrundlage aus EPIC Simulationen und die entsprechenden Schätzergebnisse bei Verwendung einer Cobb-Douglas Produktionsfunktion und einer quadratischen Produktionsfunktion.

Datengrundlage ¹¹⁸		Regressionswerte	
Bodenmächtigkeit	Ertrag	Cobb-Douglas	Quadratisch
120.00	50.26	50.71	50.27
105.00	49.26	48.95	49.23
90.00	47.38	46.88	47.27
75.00	44.02	44.33	44.38
60.00	40.88	40.96	40.56
45.00	35.74	35.71	35.82

Tabelle 3: Datengrundlage und geschätzte Funktionswerte

Die Tabelle 4 zeigt die Resultate der Schätzung der Koeffizienten für die quadratische und die Cobb-Douglas Funktion:

LS // Dependent Variable is LOG(ERTRAG)									
Quadratische Funktion					Cobb-Douglas Funktion				
Included observations: 6									
Convergence achieved after 1 iterations					Convergence achieved after 97 iterations				
LOG(ERTRAG)=LOG(C(1)+C(2)*BODEN+C(3)*(BODEN^2))					LOG(ERTRAG)=LOG(C(1)*(BODEN-C(2))^C(3))				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.		Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	16.034	1.304	12.293	0.001	C(1)	21.405	2.574	8.317	0.004
C(2)	0.532	0.035	15.184	0.001	C(2)	30.613	4.165	7.350	0.005
C(3)	-0.002	0.000	-9.532	0.002	C(3)	0.192	0.026	7.387	0.005
R-squared	0.998	Mean dependent var		3.791	R-squared	0.997	Mean dependent var		3.791
Adjusted R-squared	0.997	S.D. dependent var		0.130	Adjusted R-squared	0.994	S.D. dependent var		0.130
S.E. of regression	0.007	Akaike info criterion		-9.683	S.E. of regression	0.010	Akaike info criterion		-8.955
Sum squared resid	0.000	Schwarz criterion		-9.787	Sum squared resid	0.000	Schwarz criterion		-9.059
Log likelihood	23.536	F-statistic		918.000	Log likelihood	21.350	F-statistic		442.161
Durbin-Watson stat	3.397	Prob(F-statistic)		0.000	Durbin-Watson stat	2.087	Prob(F-statistic)		0.000

Tabelle 4: Schätzergebnisse aus EVIEWS (Quantitative Micro Software 1998) für die quadratische und die Cobb-Douglas Funktion

Beide Funktionstypen bilden die realen Daten mit ihren Koeffizienten signifikant (t-Wert) und gut (F-Wert) ab. Das Bestimmtheitsmass liegt nahe bei eins und die Summe der quadrierten

¹¹⁸ Die Datengrundlage ist mit 6 Datenpunkten sehr schmal und für eine Regressionsschätzung im Prinzip ungenügend. Die Daten stammen aus EPIC Simulationen, bei denen sich zeigte, dass bei Simulation weiterer Punkte keine zusätzliche Varianz in den Daten erscheint. Im Prinzip könnten mit einer Funktion, deren Fit sehr gut ist, problemlos zusätzliche Datenpunkte generiert werden, ohne dass dafür neue EPIC Simulationen (aufwendig) notwendig sind.

Residuen ist klein. Die Schätzungen scheinen beide annähernd gleichwertig zu sein, mit Vorzügen beim quadratischen Funktionsansatz.

Die Abbildung 19 zeigt graphisch den Vergleich der geschätzten Funktionswerte mit der Datenbasis:

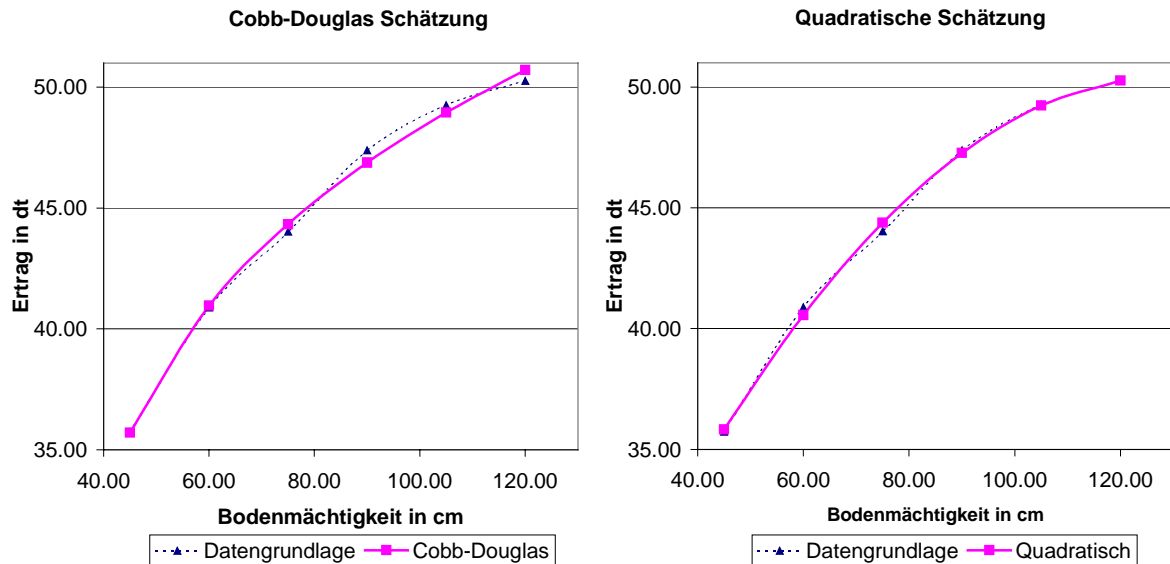


Abbildung 19: Vergleich geschätzter Funktionen mit der Datengrundlage

Abbildung 19 zeigt, dass der Fit der quadratischen Funktion bedeutend besser ist. Aus ökonomischer Sicht ist besonders relevant, dass mit zunehmendem Variablenwert der Fit der Cobb-Douglas Funktion schlechter wird und vor allem die Steigung abweicht. Falls die Inputvariable die Düngung wäre, so würde im Cobb-Douglas Fall bei sich aufweitendem Produkt-/Faktorpreisverhältnis immer mehr gedüngt, da die Skalenerträge der Cobb-Douglas Funktion zwar abnehmend, aber immer positiv sind. Im quadratischen Fall wird der Skalenertrag negativ und die Zunahme der Düngung ist nicht unbeschränkt bei sich vergrößerndem Produkt- / Faktorpreisverhältnis. In dieser Beziehung ist der Realitätsbezug der Cobb-Douglas Produktionsfunktion nicht gut und es sind geeignetere Funktionen zu suchen.

10.7.1.6 Vergleich der Steigungen der Cobb-Douglas - und der quadratischen Produktionsfunktion

Die in Abbildung 19 dargestellten Funktionen (mit a, b, c, k, l als positiven Koeffizienten und l kleiner gleich eins für den konkaven Cobb-Douglas Fall) lauten:

Gleichung 38: Quadratisch: $y = a + bx - cx^2$

Gleichung 39: Cobb-Douglas: $y = kx^l$

Die Funktionen können bezüglich ihrer Steigung verglichen werden. Die Steigung beträgt im

Gleichung 40: quadratischen Fall: $b - 2cx$

Gleichung 41: Cobb-Douglas Fall: klx^{l-1}

Der Unterschied der Steigung wird mit zunehmendem Variablenwert immer grösser, d.h. die ökonomisch relevanten Grenzbetrachtungen weichen immer mehr voneinander ab. Dies belegt die Grenzwertbetrachtung des Unterschiedes in den Steigungen der beiden Funktionen:

Gleichung 42: $\lim_{x \rightarrow \infty} b - 2cx - klx^{l-1} = \lim_{x \rightarrow \infty} b - x \left(2c + kl \frac{x^l}{x^2} \right) = -\infty \quad \forall 0 \leq l \leq 1$

Mit zunehmendem Variablenwert weichen die Steigungen immer mehr voneinander ab und dies zuungunsten der Cobb-Douglas Funktion, da die quadratische Funktion einen besseren Fit aufweist. In der Nähe des Extremums der quadratischen Produktionsfunktion wird diese durch eine Cobb-Douglas Funktion schlecht approximiert. Die für das Optimalitätskriterium relevanten Steigungen weichen zuungunsten der Cobb-Douglas Produktionsfunktion sehr stark voneinander ab.

10.7.1.7 Bewertung der Cobb-Douglas Produktionsfunktion

Die Cobb-Douglas Funktion ist bezüglich der Kriterien Konkavität und Schätzbarkeit für die Verwendung im Modellansatz (vgl. Kapitel 9) sehr gut geeignet. Die Kriterien Flexibilität und Realitätsbezug werden dagegen schlecht erfüllt, und es stellt sich die Frage, ob andere funktionale Formen diesbezüglich Vorteile aufweisen. In den folgenden Abschnitten werden weitere in der Ökonomie verwendete Funktionen diskutiert.

10.7.2 CES-Funktion

10.7.2.1 Eigenschaften der CES-Funktion

Die CES Funktion ist eine Verallgemeinerung der Cobb-Douglas Funktion und besitzt ebenfalls konstante Substitutionselastizitäten, die aber einen von eins verschiedenen Wert annehmen können. Sie besitzt folgende Form:

$$Q = A [\delta K^{-\rho} + (1-\delta) L^{-\rho}]^{-\nu/\rho} \quad \text{bzw. allg.:} \quad y^\rho = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i^\rho$$

Q bzw. y bezeichnen die produzierte Menge, K und L bzw. x_i sind die Produktionsfaktoren. Die CES-Produktionsfunktion besitzt wichtige Parameter:

- A bzw. a_i ist ein Effizienzparameter und bezeichnet, wie im Cobb-Douglas Fall, den Zustand der zum Einsatz kommenden Technologie.
- Der Parameter δ ist ein Distributionsparameter und beschreibt analog zum Exponenten im Cobb Douglas Fall den relativen Faktoranteil am Produkt.
- Der Parameter ρ ist der Substitutionsparameter und bestimmt die Substitutionselastizität.
- ν ist der Homogenitätsparameter.

Die Funktion ist homogen vom Grade 1, falls ν gleich 1 ist (also linear homogen) und besitzt dann konstante Skalenerträge (Chiang 1984, S. 426). Dies führt dazu, dass die langfristigen Durchschnitts- und Grenzkostenkurven nicht parabelförmig sind, sondern eine horizontale Gerade darstellen. Zudem ist die Funktion homothetisch. Ist die Substitutionselastizität 0, so sind die Inputfaktoren perfekte Komplemente, ist sie ∞ , so sind die Inputfaktoren perfekte Substitute. Die anderen Fälle liegen dazwischen (Heathfield und Wibe 1987, S. 95). Der Vorteil der Funktion liegt darin, dass die Funktion nicht wie im Cobb-Douglas Fall eine fixe Substitutionselastizität von 1 aufweist, sondern lediglich eine konstante. Dadurch kann die Funktion verschiedene Isoquantenverläufe abbilden. Ohne den Parameter a_0 der allgemeinen Darstellung ist die Funktion linear homogen (Fuss und McFadden 1979, S. 238). Liegt der Substitutionsparameter ρ zwischen -1 und 0 , so sind die Isoquanten konvex zum Ursprung.

Ist er gleich -1 , so sind die Isoquanten linear mit negativer Steigung (Hesse und Linde 1976, S. 11). Die Substitutionselastizität ist $(1+\rho)^{-1}$.

Schätzung: Eine OLS Schätzung ist nicht möglich, da die Funktion nichtlinear in den Parametern ist. Eine Möglichkeit besteht in einer linearen Approximation nach Taylor (Bronstein und Semendjajew 1991, S. 269ff). Heutige EDV-Möglichkeiten erlauben Approximationen höherer als zweiter Ordnung (Bairam 1994, S. 25). Die Schätzung ist mit nichtlinearen Schätzverfahren durchführbar (NLSQ).

10.7.2.2 *Konvexitätseigenschaft und Beurteilung für die Verwendung im Modellansatz*

Die CES-Funktion ist quasikonkav für positive Faktoreinsätze (Varian 1992, S. 9 und Heathfield und Wibe 1987, S. 95). Für die Verwendung in NLP Modellen ist die Eignung nur bedingt, da wie im quasikonkaven Cobb-Douglas Fall eine Summierung nicht möglich ist, ohne die geforderten Konvexitätseigenschaften für globale Optima zu verletzen (vgl. Kapitel 4).

10.7.3 *Verallgemeinerungen mit variabler Substitutionselastizität (VES)*

Die Cobb-Douglas (Substitutionselastizität von 1) und die CES Funktion (konstante Substitutionselastizitäten zwischen jedem Inputpaar) sind sehr restriktiv in ihrer Natur.

CES- und Cobb-Douglas Produktionsfunktionen können um einen Faktor aus dem Verhältnis der beiden Inputfaktoren erweitert werden (2-Variablenfall).

10.7.3.1 *Transzendente VES - Produktionsfunktion*

Die Transzendente Produktionsfunktion ist eine verallgemeinerte Cobb-Douglas Produktionsfunktion, da letztere um den Faktor einer Exponentialfunktion erweitert worden ist (Fuss und McFadden 1979, S. 242):

$$\text{Gleichung 43: } Q(X_1, X_2) = a * X_1^\alpha * X_2^\beta * e^{\mu(X_1/X_2)}$$

Der Homogenitätsgrad (und damit auch die Skalenelelastizität) ist mit dem der Cobb-Douglas Funktion identisch und entspricht der Summe der Exponenten der Inputfaktoren. Die Substitutionselastizität ist variabel und vom Faktoreinsatzverhältnis abhängig.

Die Funktion ist nicht über den ganzen zulässigen Definitionsbereich der Variablen konkav oder quasikonkav (v.a. bei extremen Unterschieden in den Variablenwerten) und weist daher auch nicht konvexe Isoquanten auf. Sie kommt v.a. aus Sicht der Konvexitätsanforderung als mögliche Funktionsform nicht in Frage, da sie keine globale Lösung wahrscheinlich macht.

10.7.3.2 *Translog Funktion*

10.7.3.2.1 *Eigenschaften der Funktion:*

Die Translog Produktionsfunktion besitzt folgende Form (Heathfield und Wibe 1987, S. 106):

$$\log q = \log \gamma_0 + \sum_i \alpha_i \log v_i + \sum_i \sum_j \beta_{ij} \log v_i \log v_j \quad \text{mit } \beta_{ij} = \beta_{ji} \quad \forall i, j$$

Die Logarithmusfunktion erlaubt nicht, dass bei einem Input von 0 ein von 0 verschiedener Output besteht (der log von 0 ist nicht definiert). Die Skalenelastizität ist nicht konstant, sondern ändert sich mit der Veränderung des Outputniveaus und der Veränderung des Faktoreinsatzverhältnisses. Sind alle Koeffizienten $\beta_{ij} = 0$, so entspricht die Translog Formulierung einer Cobb-Douglas Form. Wird die Translog Funktion in den Koeffizienten so formuliert, dass konstante Skalenerträge resultieren, so ist sie der CES Funktion gleichwertig. Die Isoquanten haben eine negative Steigung, wenn alle Koeffizienten und Faktoren positive Werte aufweisen, andernfalls kann die Steigung positiv oder negativ sein. Die Funktion ist so flexibel, dass jede ihrer Eigenschaften separat evaluiert werden muss. Dies kann sehr aufwendig sein. Die Translog Funktion ist wegen des engen Bereiches, in welchem abnehmende Grenzerträge auftreten, nur bedingt für Produktionsfunktionen geeignet und daher nicht für den ganzen Bereich von 0 bis unendlich einsetzbar. Die Substitutionselastizität ist variabel und von der Menge an Output und von den eingesetzten Inputfaktoren abhängig. Ist die Summe aller α_i Koeffizienten gleich 1 und die Summe der β_{ij} Koeffizienten gleich null, so ist die Funktion linear homogen (Diewert und Wales 1987, S. 46):

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i = 1 \quad \text{und} \quad \sum_{j=1}^n \beta_{ij} = 0 \quad \text{bzw.} \quad \sum_{i=1}^N \beta_{ij} = 0$$

Bei bestimmten Parameterkonstellationen ist die Skalenelastizität unabhängig von der Outputmenge und nur vom relativen Faktoreinsatzverhältnis beeinflusst. Andererseits ist es auch möglich, eine Unabhängigkeit von einzelnen Faktorinputs zu haben. Sinkende Durchschnittserträge und Grenzerträge bedingen ebenfalls entsprechende Parameterkonstellationen. Diese Zusammenhänge sind in Heathfield und Wibe (1987, S. 107ff) dargestellt.

10.7.3.2.2 *Konvexitätseigenschaft und Beurteilung für NLP*

Die Schätzung der Parameter einer Translog Funktion garantiert nicht, dass die resultierende Funktion konkav ist. Um dies zu erreichen, muss bei der Schätzung eine Parameterrestriktion auferlegt werden, die die globale Konkavität gewährleistet: die Matrix der Koeffizienten der gemischten Glieder muss negativ semidefinit sein. Der Nachteil dieses Vorgehens ist aber, dass die flexiblen Eigenschaften der Translog Funktion verloren gehen. Das Ausmass der Substituierbarkeit der Inputs wird überschätzt, die Parametermatrix ist "zu negativ semidefinit". Aus diesem Grund verwenden Diewert und Wales (1987, S. 48) ein alternatives Verfahren und testen die Konkavität dann an der gesamten Translog Funktion (S. 49). Für das Vorgehen heisst das, dass, wenn möglich ohne Parameterrestriktion geschätzt wird und die Konkavität erst nachträglich nachgeprüft wird, da die Schätzung ansonsten zu einschränkend erfolgt. In der empirischen Anwendung implementieren die Autoren (S. 58) dagegen zur Sicherung der Konkavität die kritisierte Parameterrestriktion auf die Koeffizienten der gemischten Glieder. Wird die Translog Funktion mittels Parameterrestriktionen auf Konkavität gezwungen, führt das zu verzerrten Elastizitäten (Diewert und Wales 1987, S. 58 und 61f).

Der Einsatz als konkave Alternative zur weniger flexiblen Cobb-Douglas Funktion ist daher nicht sinnvoll.

10.7.3.3 *Generalized Leontief Funktion*

Die verallgemeinerte Leontief Funktion besitzt folgende allgemeine Form (Fuss und McFadden 1979, S. 238):

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \sqrt{x_i} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \sqrt{x_i x_j}$$

Sind die Koeffizienten a_i alle gleich null, so ist die Funktion linear homogen. Da die Wurzelfunktion konkav ist, ist die Funktion bei ausschliesslich positiven Koeffizienten konkav und erfüllt zudem die Bedingung der Monotonie. Diese Bedingung ist aber gemäss Diewert und Wales (1987, S. 50) zu restriktiv als Anforderung für globale Konkavität, da Komplementarität zwischen Inputpaaren ausgeschlossen wird bzw. alle Inputs Substitute sein müssen. Auch hier empfiehlt es sich für das Schätzverfahren wieder, die restriktiven Nichtnegativitätsbedingungen an die Parameter bei der Schätzung nicht zu implementieren, dafür aber nach der Schätzung die gesamte Funktion nachträglich auf Konkavität und Monotonie zu überprüfen.

10.7.3.3.1 Bewertung der Taylor-Series Funktionen

Die Translog und die Generalized Leontief Funktion sind Taylor¹¹⁹ - Reihenentwicklungen. Im Vergleich zu Laurent - Reihenentwicklungen variieren die Summenterme mit gemischten Variablen weniger. Der letzte Term der Taylorreihe ist eine inhärente lokale Approximation im Zentrum und variiert zu grossen Werten ausserhalb. Die letzten Terme der Taylorreihe sind zudem ausschliesslich Potenzfunktionen, die der Laurentreihe setzen sich aus Potenzfunktionen mit positivem und negativem Exponent zusammen. Daher ist mehr Flexibilität und eine Anwendbarkeit über eine grössere Region bei Funktionen des Laurentreihentyps gegeben. Funktionen auf der Basis von Taylorreihen sind flexibel und regulär am Mediandatenpunkt. Bei Laurentreihenfunktionen sind diese Eigenschaften am selben Punkt ebenfalls gegeben, erweitern sich aber im Datenbereich (Barnett et al. 1985, S. 9 und 28f). Die Eignung für die Verwendung im Ansatz der Metamodellierung ist nicht gegeben, da eine Skalierung mit einer Variablen ohne Verlust der Eigenschaft der Konkavität nicht möglich ist.

10.7.3.4 Minflex-Laurent Funktion

Die Minflex-Laurent Funktion ist im Gegensatz zur Translog und Generalized Leontief Funktion, die Taylor - Reihenentwicklungen darstellen, eine Laurent - Reihenentwicklung zweiter Ordnung in den Quadratwurzeln der Variablen, was im Vergleich zu den beiden erstgenannten Funktionsformen unterschiedliche regionale und globale Eigenschaften zur Folge hat. Dies drückt sich vor allem in den letzten Gliedern der Funktionen aus: im Laurent Fall wirken die letzten zwei Summanden entgegengesetzt (konvex bzw. konkav und unterschiedliche Vorzeichen)¹²⁰. Im Gegensatz dazu sind die letzten Summanden bei Translog und Generalized Leontief Funktion inhärente lokale Approximationen, die aber rasch aus dem Konvergenzbereich fallen (Barnett und Lee 1985, S. 1425).

Die Minflex-Laurent-Flexible Funktionsform hat in ihrer Grundstruktur folgendes Aussehen:

$$Q(w_i) = a_0 + 2 \sum_{i=1}^n a_i w_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} w_i^2 + \sum_{(i,j \in S)} a_{ij}^2 w_i w_j - \sum_{(i,j \in S)} b_{ij}^2 w_i^{-1} w_j^{-1}$$

mit $S = \{(i, j) / i \neq j, i, j = 1 \dots n\}$

¹¹⁹ Die Taylorreihenentwicklung an einen Funktionswert besteht aus der Summe aus dem Funktionswert an einem anderen Punkt und den Ableitungen jeden Grades mal die Distanz im Definitionsbereich dividiert durch die Fakultät der die Abschreibung bezeichnenden Zahl (Bronstein und Semendjajew 1991, S. 525).

¹²⁰ Die Laurentreihe setzt sich aus einer Potenzreihe als erstem regulärem Teil und einem zweiten, dem Hauptteil der Laurentreihe zusammen. Letzterer unterscheidet sich von der Potenzreihe durch einen negativen Exponenten und durch die Integration der Reihe ab 1 (Bronstein und Semendjajew 1991, S. 526).

Es können je nach Form von w_i folgende zwei Funktionen unterschieden werden:

- a.) $w_i = X_i^{0.5}$: Minflex-Laurent-Generalized Leontief Funktionsform
 b.) $w_i = \text{Log}(X_i)$: Minflex-Laurent-Translog Funktionsform

Die Bestimmung der Determinanten der Principal Minors der Hessischen Matrix (und auch der geränderten Hessischen Matrix) ermöglicht folgende Aussagen bezüglich der Eigenschaft der Konkavität: Im Fall a.) ist die Funktion konkav, wenn alle Koeffizienten ein positives Vorzeichen besitzen. Im Fall b.) ist keine globale Aussage machbar, da die gemischten Logarithmusterme nicht konkav bzw. konvex oder quasikonkav bzw. quasikonvex sind. Die Eignung für die Verwendung im Ansatz der Metamodellierung ist nicht gegeben.

10.7.3.5 Produktionsfunktion mit konstanten Veränderungsraten der Faktorproduktivität (constant marginal share CMS)

Bairam (1994, S. 42) formuliert auf der Basis der Arbeit von Bruno (1968, S. 49 und 52) eine Produktionsfunktion mit konstanten Veränderungsraten der Faktorproduktivität (constant marginal share), da diese dual in Abhängigkeit der Faktorentscheidung linear ausgedrückt werden können. Dabei handelt es sich um eine typische Cobb-Douglas Funktion mit einem zusätzlichen linearen additiven Term:

$$Q(X_1, X_2) = d * X_1^\alpha * X_2^\beta - c * X_1$$

Gleichung 44:

$$\text{mit } d > 0, \quad \alpha, \beta > 0, \quad \alpha + \beta < 1$$

Im folgenden werden die Eigenschaften diskutiert, wobei für den Fall, dass $c = 0$ die Eigenschaften der Cobb-Douglas Funktion gelten. Im von Bairam (1994, S. 42) verwendeten Modell handelt es sich beim Faktor X_1 um Arbeit und beim Faktor X_2 um Kapital.

Die Funktion ist von der Struktur her konkav, da der erste Teil der Cobb-Douglas Funktion entspricht und diese bei einer Exponentensumme von kleiner oder gleich 1 strikt konkav oder konkav ist. Der zweite Term ist linear und daher gleichzeitig konvex und konkav. Die Summe konvexer oder konkaver Funktionen behält je die funktionale Eigenschaft.

Die von Bairam (1994, S. 42) ausgewiesenen Skalen- und Substitutionselastizitäten sind falsch und werden daher der Korrektur wegen hier explizit aufgeführt:

Skalenelastizitäten:

Gleichung 45:

$$\varepsilon_{X_1} = \frac{\alpha * d * X_1^\alpha * X_2^\beta - c * X_1}{Q}$$

$$\varepsilon_{X_2} = \frac{\beta * d * X_1^\alpha * X_2^\beta}{Q}$$

Die partiellen Skalenelastizitäten sind nicht wie in Bairam (Bairam 1994, S. 42f) behauptet bezüglich eines Faktors konstant, sondern wie Gleichung 45 zeigt, bezüglich beider Faktoren variabel. Auch die globale Skalenelastizität ist variabel, ausser die Exponenten ergänzen sich zu 1. In diesem Fall ist die Skalenelastizität konstant gleich 1 bei variablen partiellen Skalenelastizitäten und damit ist die Produktionsfunktion homogen. Die Funktion ist als erweiterte Cobb-Douglas Funktion zu betrachten. Auch die in Bairam (1994, S. 43) angegebene Substitutionselastizität ist nicht korrekt berechnet, sie beträgt:

$$\text{Gleichung 46: } \sigma(X_1, X_2) = - \frac{(cX_1 - \alpha d X_1^\alpha X_2^\beta) * (cX_1 - (\alpha + \beta)d X_1^\alpha X_2^\beta)}{(\beta - 1)c^2 X_1^2 + 2\alpha c d X_1^{1+\alpha} X_2^\beta - \alpha(\alpha + \beta)d^2 X_1^{2\alpha} X_2^{2\beta}}$$

Ist die dargestellte Funktion linear homogen (Exponenten ergänzen sich zu 1 bzw. $\beta=1-\alpha$), so vereinfacht sich die Substitutionselastizität zu

$$\text{Gleichung 47: } \sigma(X_1, X_2) = \frac{dX_1^\alpha X_2^{1-\alpha} - \frac{cX_1}{\alpha}}{Q}$$

Die Substitutionselastizität ist kleiner als 1, wenn $\alpha < 1$, 1 wenn $\alpha = 1$ und grösser als 1 wenn $\alpha > 1$. Die letzten beiden Situationen sind aber nicht typische Werte der Koeffizienten für die Exponenten der linear homogenen Produktionsfunktion in Gleichung 44. Wird jedoch die allgemeine Form der Produktionsfunktion gemäss Gleichung 44 vorausgesetzt, so sind eindeutige Aussagen über den Betrag der Substitutionselastizität schwierig.

Die Grenzrate der technischen Substitution beträgt:

$$\text{Gleichung 48: } \frac{dX_2}{dX_1} = X_2 * \frac{\left(-\frac{\alpha d}{X_1} + \frac{c}{X_1^\alpha * X_2^\beta} \right)}{bd}$$

Je grösser der Koeffizient d wird, umso grösser wird der Betrag von d. Die Steigung der Isoquante wird dadurch steiler und dies führt zu einer Substitution von Faktor X_2 durch den Faktor X_1 . Der Koeffizient d ist der Effizienzparameter der Cobb-Douglas Funktion und kann bei Zeitabhängigkeit den technologischen Fortschritt abbilden.

Schätzung: Ausser die Exponenten ergänzen sich zu 1, müssen nichtlineare Schätzmethoden wie Maximum-Likelihood oder NLSQ verwendet werden. Ergänzen sich die Exponenten zu 1, so ist durch den Inputfaktor, der in beiden Summanden vorkommt, zu dividieren. Die Koeffizienten sind dann auf der Basis einer Intensitätsfunktion zu schätzen (Bairam 1994, S. 43).

10.7.3.5.1 Bewertung der erweiterten Cobb-Douglas Produktionsfunktion

Die Funktion entsteht durch die Subtraktion eines Summanden von einer Cobb-Douglas Funktion, der linear in der Variablen ist. Die Konvexitätseigenschaften bleiben so erhalten, die Skalen- und die Substitutionselastizität ist nicht mehr konstant bzw. gleich eins wie bei der Cobb-Douglas Produktionsfunktion, sondern variiert in Abhängigkeit der Werte der exogenen Variablen. Die Flexibilität der Funktion wird durch den negativen Summanden in Gleichung 44 grösser und damit sollte auch der Realitätsbezug besser werden.

Die Modifikation der Cobb-Douglas Funktion verbessert die ökonomischen und realitätsbezogenen Eigenschaften bei Erhaltung der guten Eigenschaften bezüglich Konkavität und Schätzbarkeit.

Die folgenden Produktionsfunktionen werden aufgeführt, da einzelne Formen der Summanden für die Konstruktion möglicher alternativer Produktionsfunktionen in Frage kommen.

10.7.3.6 Additive nichthomogene Produktionsfunktion¹²¹

$$Q(X_1, X_2) = a + \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_1 \text{Log}(X_2) + \delta X_2 \text{Log}(X_1)$$

mit $\text{Log} = \text{natürlicher Logarithmus}$

Die Funktion erlaubt je nach Vorzeichen von γ und δ zunehmende oder abnehmende Grenzerträge. Die Skalanelastizität ist variabel und grösser oder kleiner als eins, die Substitutionselastizität variabel. Die Funktion ist nicht konkav, aber quasikonkav, sofern alle Koeffizienten ein positives Vorzeichen aufweisen. Kommen negative Vorzeichen bei Koeffizienten vor, ist die einzelne Funktion auf ihre Konvexitätseigenschaft zu überprüfen, wenn eine Verwendung in einem nichtlinearen Programmierungsmodell beabsichtigt ist. Das Kriterium der Schätzbarkeit ist in Verbindung mit der Skalierbarkeit nicht erfüllbar.

10.7.3.7 Multiplikativ nichthomogene Produktionsfunktion

Eine log-lineare Produktionsfunktion spezifiziert Bairam (Bairam 1994, S. 45) wie folgt:

$$Q(X_1, X_2) = a * X_1^{\alpha + \beta \text{Log}(X_2)} * X_2^{\gamma + \delta \text{Log}(X_1)}$$

Gleichung 49:

$$\text{mit } a, \alpha, \gamma > 0, \quad \beta, \delta \begin{matrix} \geq \\ \leq \end{matrix} 0$$

Die Skalen- und die Substitutionselastizität dieser Funktion sind variabel. Die Grenzprodukte können positiv oder negativ sein. Sind $\beta = 0$ und $\delta = 0$, so entspricht die Funktion der Cobb-Douglas Funktion.

Die Schätzung der Funktion erfolgt nichtlinear mit Maximum-Likelihood oder NLSQ. Nach der Logarithmierung kann die Funktion auch mittels OLS geschätzt werden.

Die Funktion erfüllt die Anforderungen für die Konkavität nicht. Sind alle Koeffizienten positiv, so ist die Funktion quasikonkav, beim Vorhandensein von Koeffizienten mit negativem Vorzeichen ist die Funktion jeweils zu testen. Eine Eignung für den Modellansatz ist nicht gegeben.

10.7.4 Weitere Produktionsfunktionen

10.7.4.1 Verallgemeinerte Cobb-Douglas Funktion

Von der klassischen Cobb-Douglas Funktion lässt sich gemäss Fuss und McFadden (1979, S. 239) folgende verallgemeinerte Funktion bilden:

Gleichung 50: Generalized Cobb-Douglas Funktion

$$Q(X) = a_0 * \prod \left(\frac{X_i + X_j}{2} \right)^{\alpha_{ij}} \quad \text{bzw.} \quad \log(Q(X)) = a_0' + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \log \frac{(X_i + X_j)}{2}$$

Die Funktion ist linear homogen, wenn sich die Koeffizienten a_{ij} zu 1 ergänzen. Die Skalanelastizität ist konstant und entspricht der Summe der Exponenten der Funktion. Die Substitutionselastizität ist variabel. Die Steigungen der Isoquanten sind grundsätzlich negativ, deren Veränderung positiv, was auf einen konvexen Verlauf schliessen lässt. Die Determinanten der Principal Minors der geränderten Hessischen Matrix zeigen, wie auch der Verlauf der Iso-

¹²¹ Der Abschnitt stützt sich auf Bairam 1994, S. 44.

quanten, dass die Produktionsfunktion mindestens quasikonkav ist. Ist die Summe positiver Exponenten kleiner gleich 1, so kann die Funktion konkav sein.

Einsatz in NLP

Wegen des konvexen Verlaufs der Isoquanten ist die diesen zugrundeliegende Produktionsfunktion, sofern sie konkav ist, direkt in nichtlinearen Programmierungsmodellen verwendbar, bei Quasikonkavität dagegen nur zur Optimierung als isolierte Funktion. Da die Skalenelastizität konstant ist, ist die Funktion diesbezüglich nicht als flexibel zu beurteilen. Die Schätzbarkeit für den Ansatz der Metamodellierung in Kapitel 9 ist nicht gegeben, da keine Variable einzeln aus der Funktion faktorisiert ist.

10.8 Cobb-Douglas Funktion - Erweiterungen

10.8.1 Verallgemeinerung der linear homogenen Cobb-Douglas Funktion

Die in Abschnitt 10.7.1 dargestellte Cobb-Douglas Funktion kann für den Fall mehrerer Variablen unter Beibehaltung der linearen Homogenität verallgemeinert werden¹²². Eine Funktion vom Homogenitätsgrad 1 kann durch Umformulierung als in einer Variablen lineare Funktion ausgedrückt werden. Dies wird im folgenden am Beispiel der Cobb-Douglas Produktionsfunktion illustriert, was die Möglichkeit der Schätzung der Funktionsparameter auf der Basis von EPIC Resultaten (ha-Bezug) zeigt:

Gleichung 51:

$$Q(X_i, Y) = a * \left(\prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i} \right) * Y^{1 - \sum_{i=1}^n \alpha_i} = a * \left[\prod_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{Y} \right)^{\alpha_i} \right] * Y$$

Bezeichnet Y die Fläche, so handelt es sich in der letzten formalen Darstellung in Gleichung 51 um Intensitäten. Für das Optimum spielt die Fläche eine lineare Rolle, so dass ein Allokationsextrem als Lösung erscheint, für die übrigen Variablen gilt, dass eine innere Lösung resultiert. Bei linearer Homogenität ist die Lösung somit bezüglich einer Variablen immer extrem (Rand- bzw. Ecklösung) und keine innere Lösung (analog zum LP Fall).

10.8.2 Linear homogene CMS - Funktion

Im folgenden wird die linear homogene Form der constant marginal share Produktionsfunktion als Spezialfall der in Abschnitt 10.7.3.5 dargestellten Funktion bezüglich ihrer Flexibilitätseigenschaften und bezüglich des Realitätsbezugs¹²³ weiter untersucht. Die Funktion stellt eine mögliche Erweiterung der Cobb-Douglas Funktion mit besseren Flexibilitätseigenschaften und besserem Realitätsbezug dar und bildet die Grundlage für weitere Verallgemeinerungen.

Die linear homogene CMS Funktion besitzt folgende Form:

Gleichung 52: $Q(X, Y) = a_0 * X^\alpha * Y^{1-\alpha} - a_1 * X$

Alle Koeffizienten sind nichtnegativ und α ist kleiner als 1.

¹²² Ein Homogenitätsgrad von 1 (Bsp.: wenn sich Exponenten der Cobb-Douglas Produktionsfunktion zu 1 ergänzen) führt dazu, dass bei der Optimierung bezüglich der Variablen, die linear darstellbar sind, keine inneren Lösungen resultieren, sondern Extrem Lösungen bezüglich dieser linearen Variablen erscheinen (bei Parameterveränderungen verändert sich die Lösung nicht kontinuierlich, sondern in Sprüngen).

¹²³ Vgl. Abschnitt 10.5 für Beurteilungskriterien.

Für die Verwendung im Modellansatz muss die Funktion in der aggregierten Form intensitäts-spezifisch, d.h. auf die Hektare bezogen formuliert werden. X bezeichnet die gesamte Düngermenge, Y die gesamte eingesetzte Fläche. Nach einer Umformung wird die Funktion durch die Fläche dividiert:

$$\text{Gleichung 53: } Q(X, Y) = a_0 * \left(\frac{X}{Y}\right)^\alpha * Y^1 - a_1 * X$$

$$\frac{Q(X, Y)}{Y} = a_0 * \left(\frac{X}{Y}\right)^\alpha - a_1 * \frac{X}{Y}$$

Die zweite Funktion besagt, dass der Flächenertrag eine Funktion der Flächenintensität in Form der Cobb-Douglas abzüglich einer linearen Funktion ist¹²⁴. Die Regressionsresultate¹²⁵ sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

LS // Dependent Variable is LOG(ERT)				
Date: 08/11/98 Time: 16:11				
Sample: 1901 1906		Included observations: 6		
Cobb-Douglas mit linearer Modifikation				
Convergence achieved after 6 iterations				
LOG(ERT)=LOG(C(1)+C(2)*BOD^C(3)-C(4)*BOD)				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	-60.66443	567.425	-0.106912	0.9246
C(2)	38.68104	439.8557	0.08794	0.9379
C(3)	0.26645	1.701144	0.15663	0.8899
C(4)	0.228255	1.008521	0.226326	0.842
R-squared	0.998066	Mean dependent var		3.79068
Adjusted R-squared	0.995164	S.D. dependent var		0.129854
S.E. of regression	0.00903	Akaike info criterion		-9.179597
Sum squared resid	0.000163	Schwarz criterion		-9.318424
Log likelihood	23.02516	F-statistic		343.9589
Durbin-Watson stat	2.700121	Prob(F-statistic)		0.0029

Tabelle 5: Regressionsresultate CMS Funktion

Der Vergleich mit den Regressionsresultaten der Cobb-Douglas Funktion in Abschnitt 10.7.1.4 deutet auf eine leicht bessere Schätzung hin, was zu einer besseren Approximation des realen Verlaufs im hohen Intensitätsbereich führt. Die folgende Abbildung zeigt den zu Abbildung 19 analogen Fall mit der linear homogenen CMS-Funktion, die die reale Input-Outputbeziehung besser annähert. Die Formulierung ermöglicht eine Annäherung an das aus

¹²⁴ Aus Gleichung 53 ist die Rücktransformation der Schätzung in die Form der Gleichung 52 ersichtlich (Skalierung mit der Fläche Y und Umformung).

¹²⁵ Datengrundlage: vgl. Abschnitt 10.7.1.5.

der Empirie abgeleitete Wachstumsplateau (Frank et al. 1990, S. 598), das zum Beispiel pflanzenphysiologisch gegeben ist:

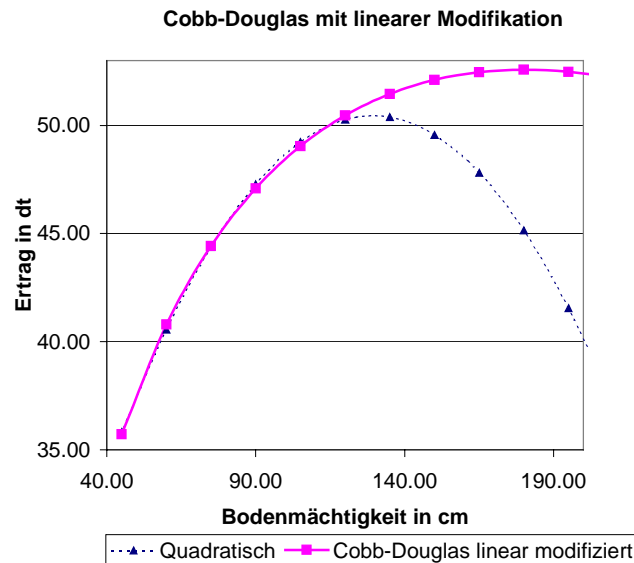


Abbildung 20: Verlauf der linear homogenen CMS Produktionsfunktion

Durch die stärkere Krümmung im Bereich 100-120 cm Bodenmächtigkeit ergibt sich ein leicht besserer Fit. Die Steigungen stimmen bei hohen Intensitäten schlecht überein. Der Fehler bei einer Marginalbetrachtung wird jedoch weniger gross, da ein fallender Kurvenverlauf (negative Grenzerträge) möglich ist.

Ökonomisch wichtige Eigenschaften sind die Skalen- und Substitutionselastizität sowie der Verlauf der Grenzerträge, der Durchschnittserträge und der Isoquanten. Diese Eigenschaften werden nachfolgend für die durch die Subtraktion einer linearen Funktion modifizierte Cobb-Douglas Funktion diskutiert:

Die Skalenelelastizität der Funktion in Gleichung 52 beträgt eins und ist damit wie in der Cobb-Douglas Funktion konstant. Die Substitutionselelastizität dagegen variiert und lässt sich formal wie folgt darstellen:

$$\text{Gleichung 54: } \sigma(X, Y) = \frac{\alpha * a_0 * X^\alpha * Y - a_1 * X * Y^\alpha}{\alpha * a_0 * X^\alpha * Y - \alpha * a_1 * X * Y^\alpha}$$

Damit führt die Modifikation der Cobb-Douglas Funktion durch die Subtraktion einer linearen Funktion zu variablen Substitutionselelastizitäten, was aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist. Nur wenn der Koeffizient der linearen Funktion a_1 gleich 0 ist, wird die Substitutionselelastizität konstant und gleich 1 und entspricht dann der Cobb-Douglas Funktion. Der Zähler ist um $(1-\alpha)*X*Y^\alpha$ kleiner als der Nenner.

Die Grenzerträge bezüglich der beiden Produktionsfaktoren betragen:

$$\text{Gleichung 55: Grenzerträge der Funktion} \quad \frac{dQ}{dX} = -a_1 + \alpha * a_0 * X^{\alpha-1} * Y^{1-\alpha}$$

$$\frac{dQ}{dY} = (1-\alpha) * \alpha * a_0 * X^\alpha * Y^{-\alpha}$$

Gleichung 56: Veränderung der Grenzerträge
$$\frac{d\left(\frac{dQ}{dX}\right)}{dX} = (-1 + \alpha) * \alpha * a_0 * X^{\alpha-2} * Y^{1-\alpha}$$

$$\frac{d\left(\frac{dQ}{dY}\right)}{dY} = (-1 + \alpha) * \alpha * a_0 * X^{\alpha} * Y^{-1-\alpha}$$

Es werden gemäss der Formulierung der Funktion alle Koeffizienten als nichtnegativ vorausgesetzt. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass X den gesamten Düngereinsatz (Düngung pro ha * Anzahl ha) darstellt. Die Grenzerträge bezüglich Y sind positiv (Gleichung 55) aber abnehmend (negative Veränderung gemäss Gleichung 56). Dies gilt auch für den Faktor X, wenn die Koeffizienten jene Grössenordnung haben, die eine Produktionsfunktion abbilden. X ist im Nenner, da α kleiner als 1 ist. Daraus folgt, dass mit wachsendem X der positive Summand immer kleiner wird und negative Grenzerträge auftreten können. Bezüglich X sind positive und negative Grenzerträge möglich, was realen Situationen durchaus entsprechen kann und mit Blick auf die Abbildung realer Verhältnisse sinnvoll und wünschenswert ist (Flexibilität).

Für die Durchschnittserträge der Funktion gelten folgende Zusammenhänge:

Gleichung 57: Durchschnittserträge

$$\frac{Q(X, Y)}{X} = -a_1 + a_0 * X^{\alpha-1} Y^{1-\alpha}$$

$$\frac{Q(X, Y)}{Y} = \frac{-a_1 * X}{Y} + a_0 * X^{\alpha} * Y^{-\alpha}$$

Gleichung 58: Veränderung der Durchschnittserträge

$$\frac{d\left(\frac{Q(X, Y)}{X}\right)}{dX} = (\alpha - 1) * a_0 * X^{\alpha-2} * Y^{1-\alpha}$$

$$\frac{d\left(\frac{Q(X, Y)}{Y}\right)}{dY} = \frac{a_1 * X}{Y^2} - \alpha * a_0 * \frac{X^{\alpha}}{Y^{1+\alpha}}$$

Bezüglich X ist die Veränderung des Durchschnittsertrages negativ wie die erste Zeile in Gleichung 58 zeigt. Die Durchschnittserträge sinken bei zunehmendem Einsatz des Faktors X. Der Klammerausdruck ist negativ bei einem α kleiner als 1. Bei konstantem Faktoreinsatz X verkleinert sich der negative Summand in der zweiten Gleichung in Gleichung 58 weniger rasch als der positive. Bei real zu erwartenden Parameterkonstellationen mit a_0 deutlich grösser als a_1 und α nahe bei eins ist der Ausdruck für die Veränderung der Durchschnittserträge negativ, und diese sind damit sinkend.

10.8.2.1 Bewertung der linear homogenen CMS Produktionsfunktion

Die Funktion bewahrt die Eigenschaften der Konkavität und die Eignung für die Verwendung im Modellansatz. Der Realitätsbezug wird durch die variable Substitutionselastizität besser, ist aber in den ökonomisch interessanten Wertebereichen bei aktuellen Preis-Kostenrelationen (nahe des Maximums der quadratischen Funktion) noch zu unpräzise (vgl. Kritik an Cobb-

Douglas Produktionsfunktion im Vergleich zur quadratischen Produktionsfunktion in den Abschnitten 10.7.1.5 bis 10.7.1.7).

10.8.3 Korrektur mittels einer allgemeinen konvexen Funktion

Viele flexible Funktionsformen basieren auf dem Prinzip, dass die nichtnegative Summe konkaver Funktionen konkav ist (Diewert und Wales 1987, S. 64). Daher können gegebenenfalls neue Produktionsfunktionen gebildet werden, indem unterschiedliche konvexe und konkave Funktionen zu einer neuen Funktion zusammengefasst werden. Für den gewählten Modellansatz kommen nur Erweiterungen in Frage, die das in Abschnitt 10.7.1.2 dargestellte Schätzverfahren erlauben, d.h. die Funktionen müssen die Eigenschaft der linearen Homogenität bewahren.

Die Ausführungen in Abschnitt 10.7.1.4 zeigen, dass zwischen der Cobb-Douglas Funktion und der quadratischen Funktion in der Steigung und damit auch in den Funktionswerten ein systematischer Fehler auftritt mit zunehmenden Variablenwerten. Dieser Fehler kann vermindert werden durch die Subtraktion einer konvexen Funktion. Dabei bleibt die Eigenschaft der Konkavität erhalten. Mögliche Beispiele sind lineare, quadratische oder exponentielle Funktionen. Die Konvexität ist erforderlich, da die Cobb-Douglas Funktion die Erträge überschätzt und deshalb ein Korrekturterm subtrahiert werden muss. Die Funktion darf zudem ihre lineare Homogenität nicht verlieren.

Modifikationsidee: Korrektur der konkaven Cobb-Douglas Produktionsfunktion mit einer konvexen Funktion, die die guten Eigenschaften bezüglich Schätzbarkeit und Konkavität der Cobb-Douglas Funktion nicht beeinträchtigt:

Gleichung 59: $Q(X, Y) = a * X^b * Y^c - \text{konvexe Funktion}$

Die Spiegelung der Cobb-Douglas Produktionsfunktion führt zu einer konvexen Funktion. Es wird daher von folgender allgemeiner Funktionsform für den negativen Summanden bzw. die konvexe Funktion ausgegangen:

Gleichung 60: $f(X, Y) = d * X^e * Y^g$

Die an die Funktion zu stellende Anforderung ist die der Konvexität. Eine Funktion ist genau dann konvex, wenn alle Determinanten der Principal Minors der Hessischen Matrix nichtnegativ sind (Takayama 1994, S. 59, vgl. dazu Kapitel 4 und Anhang A2). Anhand der Determinanten der zwei relevanten Principal Minors der Hessischen Matrix soll versucht werden, Anforderungen an die Koeffizienten der Funktion zu stellen.

Die Determinanten der Principal Minors sind:

$$1: \quad f_{XX} \quad = \quad d * (e-1) * e * X^{e-2} * Y^g$$

Gleichung 61:

$$2: \quad f_{XX}f_{YY} - f_{XY}^2 \quad = \quad -d^2 * e * g * (e + g - 1) * X^{2*(e-1)} * Y^{2*(g-1)}$$

Der Parameter d wird als nichtnegativ vorausgesetzt. Eine nichtnegative Determinante des ersten Principal Minors ist in zwei Fällen gegeben:

Fall 11: $e \geq 1$

Fall 12: $e \leq 0$

Für die Determinante des zweiten Principal Minors ist für Nichtnegativität folgende Parameterrestriktionen vonnöten:

$$e * g * (e + g - 1) \leq 0$$

Dies ist gegeben, wenn:

Fall 21: $e + g \geq 1 \implies e > 0$ oder $g < 0$ aber nicht beide

Fall 22: $e + g \leq 1 \implies e * g \geq 0$

Aus der Schnittmenge der zulässigen Parameterbereiche für die Determinanten der Principal Minors lassen sich mögliche Parameterrestriktionen für einen konvexen Funktionsverlauf ableiten.

- Parameterrestriktion 1 für einen konvexen Verlauf (Fall 11 + Fall 21): $e > 0, g < 0, e + g \geq 1$

- Parameterrestriktion 2 für einen konvexen Verlauf (Fall 12 + Fall 21): $e < 0, g > 0, e + g \geq 1$

- Parameterrestriktion 3 für einen konvexen Verlauf (Fall 12 + Fall 22): $e < 0, g < 0, e + g \leq 1$

Die möglichen Parameterrestriktionen 1 und 2 sind Umkehrungen voneinander und lassen sich zusammenfassen. Somit ergeben sich zwei mögliche Parameterrestriktionen für einen konvexen Verlauf:

➤ Parameterrestriktion A: $e \vee g > 0 \wedge e \vee g < 0 \wedge e + g \geq 1$

➤ Parameterrestriktion B: $e \wedge g \leq 0$

Die Parameterrestriktion A ist für die Modifikation der Cobb-Douglas Funktion geeignet.

10.8.3.1 Schätzbarkeit

Um ausgehend von Intensitätsdaten die modifizierte Cobb-Douglas Funktion schätzen zu können, ist die konvexe Funktion (Modifikation), die subtrahiert wird, umzuformen:

$$\text{Gleichung 62: } f(X, Y) = d * X^e * Y^g = d * \left(\frac{X}{Y}\right)^e * Y^{g+e}$$

Ist nun in Gleichung 62 $g+e = 1$ so kann die Gleichung durch den Inputfaktor Y dividiert werden und die Modifikation der Cobb-Douglas Funktion ist auf der Basis der Intensitätsdaten schätzbar. Die Funktion ist in diesem Fall linear homogen.

10.8.3.2 Flexibilität der mit einer konvexen Funktion modifizierten Cobb-Douglas Funktion

Im folgenden werden die Auswirkungen der Modifikation bezüglich ökonomisch relevanter Größen diskutiert. Ausgehend von Gleichung 52 und Gleichung 60 präsentiert sich die modifizierte Cobb-Douglas Funktion in allgemeiner Form wie folgt:

$$\text{Gleichung 63: } Q(X, Y) = a * X^b * Y^c - d * X^e * Y^g$$

mit $a, d, b, c, e \vee g$ positiv, $b + c \leq 1, e + g \geq 1$

Unter den angegebenen Parameterrestriktionen ist die in Gleichung 63 dargestellte Funktion konkav, da der positive Summand konkav, der negative konvex ist. Die Skalenelastizität lässt sich formal wie folgt darstellen:

$$\text{Gleichung 64: } \varepsilon = \frac{\frac{dQ}{dX} * X + \frac{dQ}{dY} * Y}{Q} = \frac{a * (b + c) * X^b * Y^c - d * (e + g) * X^e * Y^g}{a * X^b * Y^c - d * X^e * Y^g}$$

Aus Gleichung 64 wird deutlich, dass die Skalenelastizität konstant gleich 1 ist, falls sich die Exponenten der Summanden je auf 1 ergänzen. Sind nur intensitätsbezogene Daten vorhanden, so ist durch den Schätzansatz (vgl. Umformungsprinzipien in Gleichung 53 und Gleichung 62) die Skalenelastizität von eins gegeben. Der Grund liegt darin, dass die Exponenten gegenseitig abhängig sind (Bsp.: $c=1-b$).

Die Substitutionselastizität ist nicht konstant, wie die folgende Gleichung zeigt. Sie hängt von Inputmengen und Exponenten ab:

Gleichung 65:

$$\sigma = \frac{\left[d\left(\frac{X}{Y}\right) / \left(\frac{X}{Y}\right) \right]}{\left[d\left(\frac{dX}{dY}\right) / \left(\frac{dX}{dY}\right) \right]} = \frac{v}{w}$$

$$\text{mit } v = (a * b * X^b * Y^c - d * e * X^e * Y^g) * (a * c * X^b * Y^c - d * g * X^e * Y^g) * \\ (a * (b + c) * X^b * Y^c - d * (e + g) * X^e * Y^g)$$

$$\text{und } w = a^3 * b * c * (b + c) * X^{3b} * Y^{3c} - d^3 * e * g * (e + g) * X^{3e} * Y^{3g} + \\ a^2 * d * (c^2 * (e - 1) * e + b^2 * (g - 1) * g - 2 * b * c * (e + g + e * g)) * X^{2b+e} * Y^{2c+g} \\ - a * d^2 * (c^2 * e^2 + b * g * (g * (b - 1) - 2e) - c * e * (e + 2(b + 1) * g)) * X^{b+2e} * Y^{c+2g}$$

Auch im Falle, dass sich die Exponenten der beiden Summanden zu 1 ergänzen ($e+g=1$, $b+c=1$), ist die Substitutionselastizität nicht konstant.

Die Grenzerträge bezüglich der allgemein formulierten modifizierten Cobb-Douglas Funktion betragen:

$$\text{Gleichung 66: } \frac{dQ}{dX} = \frac{a * b * X^{b-1} * Y^c - d * e * X^{e-1} * Y^g}{X}$$

$$\frac{dQ}{dY} = \frac{a * c * X^b * Y^{c-1} - d * g * X^e * Y^{g-1}}{Y}$$

Es wird angenommen, dass $a \gg d$, $e > b$ und $g < 0$. Mit diesen Annahmen:

- ist der Korrekturterm absolut deutlich kleiner als der Wert der Cobb-Douglas Funktion allein,
- besitzt die Korrektur bezüglich X eine geringere Krümmung als die Cobb-Douglas Funktion bezüglich des gleichen Faktors,
- ist die Konkavität der erweiterten Cobb-Douglas Funktion gewährleistet.

Bei zunehmendem X werden die Grenzerträge kleiner und evtl. negativ, bei Vergrößerung von Y wechseln die Grenzerträge das Vorzeichen nicht. Dies kann mit folgenden Grössen, den Veränderungen der Grenzerträge, verdeutlicht werden:

$$\text{Gleichung 67: } \frac{d\left(\frac{dQ}{dX}\right)}{dX} = \frac{a*(b-1)*b*X^b*Y^c - d*(e-1)*e*X^e*Y^g}{X^2}$$

$$\frac{d\left(\frac{dQ}{dY}\right)}{dY} = \frac{a*(c-1)*c*X^b*Y^c - d*(g-1)g*X^e*Y^g}{Y^2}$$

Die Veränderung der Grenzerträge bei wachsendem Einsatz des Faktors X ist negativ und im Absolutbetrag abnehmend. Bei zunehmendem Einsatz des Faktors Y sinken die Grenzerträge ebenfalls abnehmend.

Die folgenden Formeln beschreiben den Verlauf der Durchschnittserträge:

$$\text{Gleichung 68: } \frac{Q(X,Y)}{X} = \frac{a*X^b*Y^c - d*X^e*Y^g}{X}$$

$$\frac{Q(X,Y)}{Y} = \frac{a*X^b*Y^c - d*X^e*Y^g}{Y}$$

Bei wachsendem Einsatz des Faktors X sinken die Durchschnittserträge, da $e > b$ ist. Bei zunehmendem Y verringern sich die Durchschnittserträge ebenfalls, da der Exponent von Y im Nenner grösser ist als derjenige im Zähler.

Der analoge Schluss lässt sich auch aus der Veränderung der Durchschnittserträge ableiten:

$$\text{Gleichung 69: } \frac{d\left(\frac{Q(X,Y)}{X}\right)}{dX} = \frac{a*(b-1)*X^b*Y^c - d*(e-1)*X^e*Y^g}{X^2}$$

$$\frac{d\left(\frac{Q(X,Y)}{Y}\right)}{dY} = \frac{a*(c-1)*X^b*Y^c - d*(g-1)*X^e*Y^g}{Y^2}$$

Die Veränderung des Durchschnittsertrages bezüglich X ist negativ, da beide Summanden im Zähler ein negatives Vorzeichen aufweisen. Falls $e > 2$ ist, sind die Durchschnittserträge progressiv abnehmend, andernfalls degressiv abnehmend.

Die Veränderung des Durchschnittsertrages bezüglich Y ist ebenfalls negativ bei $a \gg d$, da der erste und dominante Summand ein negatives Vorzeichen aufweist.

Die Isoquanten der modifizierten Funktion nehmen im ökonomisch sinnvollen Bereich des Einsatzes von Inputfaktoren einen konvexen Verlauf, da die Produktionsfunktion die Eigenschaft durch die Modifikation nicht verliert.

10.8.3.3 Realitätsbezug

Im folgenden wird nun eine Schätzung mit der mit einer allgemeinen konvexen Funktion modifizierten Cobb-Douglas exemplarisch am im Abschnitt 10.8.2 verwendeten Beispiel durchgeführt. Wie schon in Gleichung 62 gezeigt, ist für die Schätzung der Funktionsparameter auf der Basis von Intensitätsdaten eine restringierte allgemeine modifizierte Cobb-Douglas Funktion zu verwenden, in der sich die Exponenten je Summand auf 1 ergänzen. Beim Cobb-

Douglas Teil müssen beide Exponenten positiv sein, bei der Modifikation besitzen die Exponenten unterschiedliche Vorzeichen.

Die zu schätzende Funktion lautet:

$$\begin{aligned}
 Q(X, Y) &= a * X^b * Y^{1-b} - d * X^e * Y^{1-e} \\
 \text{Gleichung 70:} \quad &= a * \left(\frac{X}{Y}\right)^b * Y - d * \left(\frac{X}{Y}\right)^e * Y \\
 \Rightarrow \frac{Q(X, Y)}{Y} &= a * \left(\frac{X}{Y}\right)^b - d * \left(\frac{X}{Y}\right)^e
 \end{aligned}$$

Sind die Koeffizienten a,b,d,e geschätzt, so lässt sich die allgemeine Form in der ersten Zeile in Gleichung 70 daraus ableiten.

LS // Dependent Variable is LOG(ERT)				
Date: 08/27/98 Time: 15:56				
Sample: 1901 1906		Included observations: 6		
Cobb-Douglas modifiziert mit nichtlinearer konvexer Funktion				
Convergence achieved after 4 iterations				
LOG(ERT)=LOG(C(1)*BOD^C(2)-C(3)*BOD^2.8)				
	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C(1)	5.665361	0.536375	10.56232	0.0018
C(2)	0.488206	0.024382	20.02347	0.0003
C(3)	1.26E-05	2.26E-06	5.571786	0.0114
R-squared	0.998515	Mean dependent var		3.79068
Adjusted R-squared	0.997525	S.D. dependent var		0.129854
S.E. of regression	0.00646	Akaike info criterion		-9.777328
Sum squared resid	0.000125	Schwarz criterion		-9.881448
Log likelihood	23.81835	F-statistic		1008.582
Durbin-Watson stat	3.37221	Prob(F-statistic)		0.000057

Tabelle 6: Regressionsresultate der modifizierten Cobb-Douglas Funktion

Die Schätzung ist in der Testgröße (S.E. of regression / Mean dependent variable) sogar leicht besser (0.17%) als die der quadratischen Funktion in Abschnitt 10.7.1.5 (0.185%)¹²⁶. Die geschätzte Funktion lautet:

$$\text{Gleichung 71: } Q(X, Y) = 5.665361 * X^{0.488206} * Y^{0.511794} - 1.26 * 10^{-5} * X^{2.8} * Y^{-1.8}$$

¹²⁶ Die übrigen Testgrößen sind nicht aussagekräftig, da die Zahl der Beobachtungen zu klein ist. Die Signifikanz der allgemeinen Teststatistiken ist damit nicht gewährleistet.

Die Funktion, dargestellt im Vergleich zu den Grunddaten zeigt folgende Abbildung:

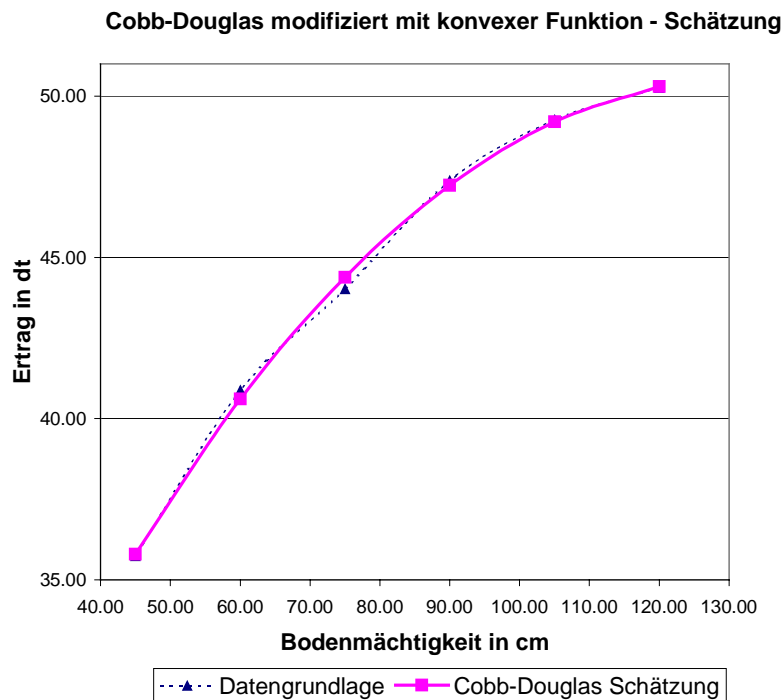


Abbildung 21: Vergleich Datengrundlage mit konvex modifizierter Cobb-Douglas Funktion

Abbildung 21 zeigt einen guten Fit der geschätzten Funktion zur Datengrundlage. Die Krümmung der Kurve lässt aus ökonomischer Sicht (Marginalbetrachtung: Grenzkosten = Grenzenerlös) sinnvolle Lösungen erwarten. Numerische Untersuchungen haben ergeben, dass die Funktion eine mit der quadratischen Funktion vergleichbare Krümmung in jedem Punkt erreichen kann.

10.8.3.4 Zusammenfassende Darstellung der modifizierten Cobb-Douglas Funktion

Die allgemeine Form der modifizierten Cobb-Douglas Funktion besitzt folgende Struktur (Fall mehrerer Variablen bei linearer Homogenität):

Gleichung 72:
$$Q(\vec{X}^T) = a * \prod_{i=1}^n X_i^{b_i} * Y^{1-\sum_{i=1}^n b_i} - \sum_{i=1}^n d_i * X_i^{e_i} * Y^{1-e_i}$$

mit $i = 1..n$ Anzahl Variablen / Inputfaktoren

$$\begin{aligned} \frac{Q(\vec{X}^T)}{Y} &= a * \prod_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{b_i} - \sum_{i=1}^n d_i * \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{e_i} \\ &= a * \prod_{i=1}^n (x_i)^{b_i} - \sum_{i=1}^n d_i * (x_i)^{e_i} \end{aligned}$$

Nur über das gleich 0 setzen der linear darstellbaren Variablen (Bsp. Fläche bzw. Produktionseinheiten Y) nimmt der Funktionswert den Wert 0 an. Dies bedeutet, dass die Produktionsfaktoren essentiell sind.

10.8.4 Erweiterung und Verallgemeinerung

Gemäss Takayama (1994, S. 55) ist jede nichtnegative Linearkombination konkaver Funktionen ebenfalls konkav. Auf dieser Basis kann die Cobb-Douglas Produktionsfunktion weiter verallgemeinert werden¹²⁷. Ein zusätzlicher konstanter Term ermöglicht positive Funktionswerte bei Werten von null der Variablen. Zusätzliche Summanden aus je einer Variablen und der Anforderung, dass der nichtnegative Exponent kleiner als eins ist, führen zu einer höheren Zunahme des Funktionswertes in spezifische Variablenrichtungen. Die verallgemeinerte Funktion besitzt folgende Struktur:

Gleichung 73:
$$Q(\vec{X}^T) = A + b * \prod_{i=1}^n X_i^{c_i} * Y^{1-\sum_{i=1}^n c_i} + \sum_{i=1}^n d_i * X_i^{e_i} * Y^{1-e_i} - \sum_{i=1}^n f_i * X_i^{g_i} * Y^{1-g_i}$$

mit $i = 1..n$ Anzahl Variablen / Inputfaktoren

Für die Wertebereiche der einzelnen Parameter gelten folgende Bedingungen:

$$\begin{aligned} A &= \{A \mid A \in \mathfrak{R}\} & d_i &= \{d_i \mid d_i \geq 0\} \\ b &= \{b \mid b \geq 0\} & e_i &= \{e_i \mid 0 \leq e_i < 1\} \\ c_i &= \{c_i \mid 0 \leq c_i < 1\} \wedge \sum_{i=1}^n c_i \leq 1 & f_i &= \{f_i \mid f_i \geq 0\} \\ & & g_i &= \{g_i \mid 1 \leq g_i\} \end{aligned}$$

Bei Erfüllung dieser Parameterrestriktionen sind alle positiven Summanden konkav, die negativen konvex. Die durch Gleichung 73 dargestellte Produktionsfunktion ist damit über den ganzen nichtnegativen Wertebereich der exogenen Variablen konkav.

Die intensitätsbezogene Formulierung, geeignet für die Schätzung, besitzt folgende Struktur:

Gleichung 74:
$$Q(\vec{X}^T) = A + b * \prod_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{c_i} * Y + \sum_{i=1}^n d_i * \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{e_i} * Y - \sum_{i=1}^n f_i * \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{g_i} * Y$$

mit $i = 1..n$ Anzahl Variablen / Inputfaktoren

$$\frac{Q(\vec{X}^T)}{Y} = \frac{A}{Y} + b * \prod_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{c_i} + \sum_{i=1}^n d_i * \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{e_i} - \sum_{i=1}^n f_i * \left(\frac{X_i}{Y}\right)^{g_i}$$

mit $i = 1..n$ Anzahl Variablen / Inputfaktoren

Für die Parameter gelten die für die Gleichung 73 angegebenen Wertebereiche.

10.8.4.1 Flexibilität der verallgemeinerten modifizierten Cobb-Douglas Funktion

Im folgenden werden nun ökonomisch interessante Grössen wie Skalen- und Substitutionselastizität sowie Grenz- und Durchschnittserträge für den Zwei-Variablenfall diskutiert. Damit

¹²⁷ Den Anlass zur Erweiterung ergaben Diskussionen mit Hansjörg Schmid am 13. August 1999. Er stellte Probleme bei der empirischen Schätzung der vorgeschlagenen Funktion fest, indem das Bestimmtheitsmass sehr tief und in bestimmten Variablenrichtungen ein zu geringes Wachstum des Funktionswertes zu beobachten war.

sollen die Flexibilität der Funktion und weitere ökonomisch wichtige Eigenschaften beurteilt werden.

Die intensitätsspezifisch dargestellte Funktion (in Anlehnung an Gleichung 74: zweite Formelzeile) besitzt folgende Struktur:

$$q(x_1, x_2) = a + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_1 * x_1^{e_1} + d_2 * x_2^{e_2} - f_1 * x_1^{g_1} - f_2 * x_2^{g_2}$$

Gleichung 75:
mit $a = \frac{A}{Y}, x_1 = \frac{X_1}{Y}, x_2 = \frac{X_2}{Y}$

Bei den Variablen in Kleinbuchstaben handelt es sich um Intensitäten.

Skalenelastizität:

Die Skalenelastizität der intensitätsspezifisch formulierten Produktionsfunktion in Gleichung 75 lautet wie folgt:

Gleichung 76: Partielle Skalenelastizität bezüglich der Intensität x_1

$$\varepsilon_{x_1} = \frac{d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{a + d_1 * x_1^{e_1} - f_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * x_2^{e_2} - f_2 * x_2^{g_2}}$$

Gleichung 77: Partielle Skalenelastizität bezüglich der Intensität x_2

$$\varepsilon_{x_2} = \frac{d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2} + b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{a + d_1 * x_1^{e_1} - f_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * x_2^{e_2} - f_2 * x_2^{g_2}}$$

Die Skalenelastizität der gesamten Funktion ist die Summe aller partiellen Skalenelastizitäten und berechnet sich nach folgender Formel:

Gleichung 78:

$$\varepsilon = \frac{d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} * (c_1 + c_2) + d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2}}{a + d_1 * x_1^{e_1} - f_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * x_2^{e_2} - f_2 * x_2^{g_2}}$$

Die Skalenelastizität ist bezüglich der Faktorintensitäten, bzw. bezüglich des Faktoreinsatzes auf einer Hektare nicht konstant. Die Flexibilität der Funktion ist bei Skalierung des Faktoreinsatzes pro ha durch die Erweiterung und Verallgemeinerung erhöht worden.

Substitutionselastizität auf einer Fläche von 1 Hektare:

Die Substitutionselastizität besitzt folgende Struktur und ist von Exponenten und Inputmengen der zu Grunde liegenden Produktionsfunktion abhängig:

$$\sigma = \frac{v}{w}$$

mit

$$v =$$

$$-((d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}) * (b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2}) - (d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2}))$$

und

w =

$$\begin{aligned}
 & (-2 * b * c_1 * c_2 * x_1^{e_1} * (d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}) \\
 & * (b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2}) + (d_1 * (-1 + e_1) * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * (-1 + g_1) \\
 & * g_1 * x_1^{g_1} + b * (-1 + c_1) * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}) * (b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2})^2 \\
 & + (d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2})^2 * (b * (-1 + c_2) * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 \\
 & * (-1 + e_2) * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * (-1 + g_2) * g_2 * x_2^{g_2}))
 \end{aligned}$$

Die Substitutionselastizität zwischen den auf einer Hektare eingesetzten Produktionsfaktoren ist, wie die obigen Formeln zeigen, nicht konstant. Dies ist aus ökonomischer Sicht sehr erwünscht, und die Funktion ist als flexibel zu betrachten.

Grenzerträge:

Grenzertrag bezüglich der Faktorintensität x_1 :

$$\frac{d_1 * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} + b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{x_1}$$

Veränderung des Grenzertrages bezüglich x_1 :

$$\frac{d_1 * (-1 + e_1) * e_1 * x_1^{e_1} - f_1 * (-1 + g_1) * g_1 * x_1^{g_1} + b * (-1 + c_1) * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{x_1^2}$$

Entsprechend der zulässigen Wertebereiche für Variablen und Parameter ist die Veränderung des Grenzertrages immer negativ, d.h. der zusätzliche Ertrag wird geringer mit zunehmenden Variablenwerten. Die Funktion weist daher abnehmende Grenzerträge auf.

Grenzertrag bezüglich der Faktorintensität x_2 :

$$\frac{d_2 * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * g_2 * x_2^{g_2} + b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{x_2}$$

Veränderung des Grenzertrages bezüglich x_2 :

$$\frac{d_2 * (-1 + e_2) * e_2 * x_2^{e_2} - f_2 * (-1 + g_2) * g_2 * x_2^{g_2} + b * (-1 + c_2) * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{x_2^2}$$

Auch bezüglich der Faktorintensität x_2 ist entsprechend der zulässigen Wertebereiche für Variablen und Parameter die Veränderung des Grenzertrages immer negativ, d.h. der zusätzliche Ertrag wird geringer mit zunehmenden Variablenwerten.

Durchschnittserträge:

Der Durchschnittsertrag bezüglich des Faktors x_1 berechnet sich wie folgt:

$$\frac{a + d_1 * x_1^{e_1} - f_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * x_2^{e_2} - f_2 * x_2^{g_2}}{x_1}$$

Die Veränderung des Durchschnittsertrages bezüglich der Faktorintensität x_1 entwickelt sich gemäss folgender Formel:

$$\frac{-a + d_1 * (-1 + e_1) * x_1^{e_1} + f_1 * x_1^{g_1} - f_1 * g_1 * x_1^{g_1} - b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2}}{x_1^2} + \frac{b * c_1 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} - d_2 * x_2^{e_2} + f_2 * x_2^{g_2}}{x_1^2}$$

Der Durchschnittsertrag bezüglich der Faktorintensität x_2 berechnet sich wie folgt:

$$\frac{a + d_1 * x_1^{e_1} - f_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * x_2^{e_2} - f_2 * x_2^{g_2}}{x_2}$$

Die Veränderung des Durchschnittsertrages bezüglich des Faktors x_2 entwickelt sich gemäss folgender Formel:

$$\frac{a + d_1 * x_1^{e_1} - f_1 * x_1^{g_1} + b * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} - b * c_2 * x_1^{c_1} * x_2^{c_2} + d_2 * x_2^{e_2} - d_2 * e_2 * x_2^{e_2}}{x_2^2} + \frac{-f_2 * x_2^{g_2} + f_2 * g_2 * x_2^{g_2}}{x_2^2}$$

Die Veränderung der Durchschnittserträge ist variabel, aber negativ, da die Produktionsfunktion konkav ist. Die Durchschnittserträge sinken mit steigendem Faktoreinsatz je Hektare.

10.8.4.2 Diskussion der einzelnen Summanden der Funktion

Die intensitätsbezogene Darstellung der konvex modifizierten Cobb-Douglas Funktion in Gleichung 74 lautet

Summand: 1 2 3 4

$$q(\vec{x}^T) = a + b * \prod_{i=1}^n (x_i)^{c_i} + \sum_{i=1}^n d_i * (x_i)^{e_i} - \sum_{i=1}^n f_i * (x_i)^{g_i}$$

mit $i = 1..n$ Anzahl Variablen / Inputfaktoren, $q = \frac{Q}{Y}$, $a = \frac{A}{Y}$, $x_i = \frac{X_i}{Y}$

Bei der Schätzung der Funktion fallen nicht relevante Summanden aus der Funktion. Die Funktion behält dabei die Eigenschaft der Konkavität.

Summand 1:

Bei diesem Summanden handelt es sich um den Achsenabschnitt, der erlaubt, dass bei einem Faktoreinsatz von 0 (Beispiel: Düngung) gleichwohl ein positiver Ertrag vorhanden sein kann. Dies ist von Vorteil in der landwirtschaftlichen Produktion, in der beispielsweise ohne den Einsatz von Stickstoffdünger ein Ertrag anfällt. Bei Berücksichtigung des Faktoreinsatzes an Arbeit wird der Summand vom Arbeitseinsatz abhängig und der Achsenabschnitt würde 0, da ohne den Einsatz von Arbeit im Falle einer Ackerkultur keine Produktion stattfindet.

Summand 2:

Dies ist die klassische Cobb-Douglas Funktion in mehreren Inputfaktoren mit positivem Grenzertrag über den ganzen Definitionsbereich der Variablen.

Summanden 3:

Die einzelnen Summanden dieser Summe erlauben isolierte, verstärkte Zunahmen des Funktionswertes. Es handelt sich dabei um Cobb-Douglas Funktionen in einer Faktorintensität. Bei Skalierung mit der Flächenvariablen wird die Funktion dieses Summanden linear homogen wie alle übrigen Summanden (vgl. Gleichung 73).

Summanden 4:

Die einzelnen Summanden dieser Summe sind konvexe Funktionen. Die Funktion aus den Summanden 1, 2, und 3 besitzt über den ganzen Definitionsbereich der exogenen Variablen positive Grenzerträge. Zusammen mit den Summanden 4 sind aber Grenzerträge von 0 und negativ möglich.

10.8.4.3 Diskussion des Verlaufs der Isoquanten

Ein Beispiel einer graphischen Darstellung einer Funktion mit zwei Variablen in Gleichung 74 liefert die folgende Abbildung (alle Parameter erfüllen die zugehörigen Parameterrestriktionen):

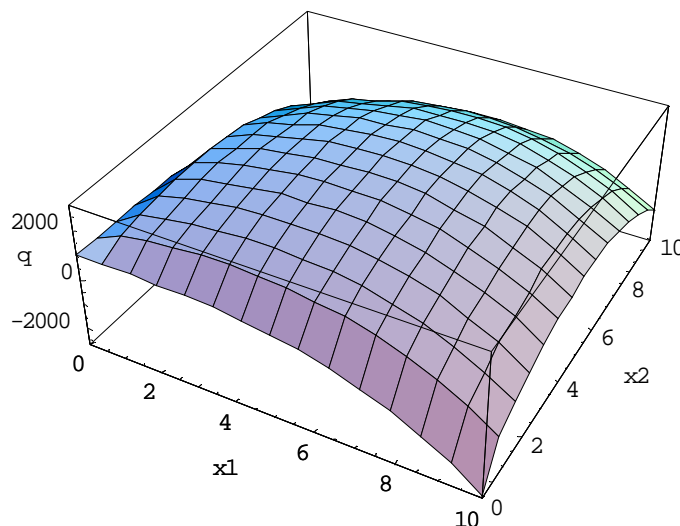


Abbildung 22: Beispiel eines Funktionsverlaufs der modifizierten Cobb-Douglas Funktion

Die Isoquanten der in Abbildung 22 dargestellten Funktion¹²⁸ aus Gleichung 74 (Projektion der Höhenlinien in die Ebene x_1, x_2) sind kreisförmig. Da die Funktion konkav ist, sind die Isoquanten konvex.

10.8.5 Bewertung der Verwendbarkeit der allgemeinen Form der modifizierten Cobb-Douglas Produktionsfunktion

Die in Gleichung 73 dargestellte modifizierte Cobb-Douglas Produktionsfunktion ist konkav, aus ökonomischer Sicht flexibel, erlaubt eine gute Abbildung realer Input-Outputbeziehungen und ermöglicht die Schätzung der Koeffizienten im Rahmen des in Kapitel 9 dargestellten Modellansatzes (Metamodellierung auf Basis EPIC Daten). Somit erfüllt die Funktion die in Abschnitt 10.5 dargestellten Beurteilungskriterien.

¹²⁸ $a=1000, b=600, c_1 = 0.45, c_2 = 0.45, d_1 = 10, d_2 = 10, e_1 = 0.3, e_2 = 0.3, f_1 = 1.8, f_2 = 1.8, g_1 = 3.3, g_2 = 3.3$

Die modellmässige Verwendung ist für aggregierte Inputbetrachtungen¹²⁹ sehr gut geeignet und erlaubt eine konvexe Problemformulierung, die eine globale Lösung ermöglicht. Für den Einsatz in Fragestellungen, in denen Inputgrössen nicht aggregiert, sondern im Modell beispielsweise auf Basis eines Hektars bilanziert werden müssen, ist die Funktion dagegen nur bedingt geeignet. Die konvexe Formulierung der Umrechnung des aggregierten Inputfaktors (Anzahl ha * Inputfaktor/ha) auf die durchschnittliche Hektargrösse ist ungelöst. Diesbezüglich besteht Forschungsbedarf.

Für konvexe Funktionen stellt sich ebenfalls das Problem, dass im Rahmen der Metamodellierung eine konvexe Funktion mit einer Variablen skaliert werden muss und die Eigenschaft der Konvexität dabei erhalten bleiben soll. Im folgenden wird dargestellt, wie aus der modifizierten Cobb-Douglas Produktionsfunktion durch Umformung eine Funktion entsteht, die konvex ist und analog gute Eigenschaften bezüglich Realitätsbezug, Schätzbarkeit und Flexibilität aufweist wie die modifizierte Cobb-Douglas Funktion.

Die Funktionsform ist nicht nur als Produktionsfunktion verwendbar. Die Grundstruktur kann für die Formulierung einer konvexen Funktion (Bsp: für Erosionsfunktionen) verwendet werden. Für konvexe Funktionen ist die konkave modifizierte Cobb-Douglas Funktion mit -1 (Spiegelung an der Abszisse) zu multiplizieren. Die so erhaltene Funktion ist konvex und erfüllt die übrigen Kriterien wie Schätzbarkeit, Realitätsbezug und Flexibilität entsprechend der modifizierten Cobb-Douglas Funktion. Somit ist sie problemlos für die Metamodellierung bei Bedarf an konvexen Funktionen verwendbar. Damit der Funktionsverlauf keine negativen Funktionswerte aufweisen kann, muss die Funktion um einen fixen Achsenabschnitt in den nichtnegativen Bereich der abhängigen Variablen verschoben werden:

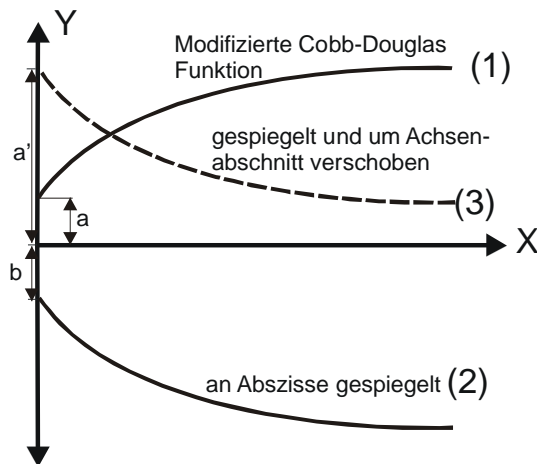


Abbildung 23: Transformation der modifizierten Cobb-Douglas Funktion in eine konvexe Funktion

Abbildung 23 zeigt das Vorgehen, um die konkave modifizierte Cobb-Douglas Funktion mit Achsenabschnitt a in eine konvexe Funktion umzuwandeln. Die ursprüngliche Kurve (1) wird an der Abszisse gespiegelt (Skalierung der abhängigen Variablen mit -1). Dies ergibt die Kurve (2). Danach wird die Kurve (2) um den Achsenabschnitt $(a'+b)$ in positiver Ordinatenrichtung verschoben. Die neue Kurve (3) ist konvex und verläuft ausschliesslich im nichtnegativen Orthanten.

¹²⁹ Beispiel: Besteuerung des Einsatzes an Stickstoffdünger.

10.9 Fazit aus der Analyse ökonomischer Produktionsfunktionen

Eine Trennung des Allokationsproblems vom Intensitätsproblem ist im Falle mehrerer Variablen bei Verwendung eines Modellierungsansatzes, der auf der Kontrolltheorie basiert, nicht möglich, da zu einem Zeitpunkt die Allokation in Kombination mit der Intensität die künftige Allokation und Intensität beeinflusst. In der Optimierung zu einem Zeitpunkt fließen im dynamischen Fall künftige Ressourcenbewertungen mit ein, die von den aktuellen Entscheidungen abhängen (Rückkopplung). Die intertemporalen Folgekosten der Ressourcennutzung müssen daher in den Entscheidungen zu einem Zeitpunkt berücksichtigt werden und beeinflussen die Wahl der Intensität und Allokation. Damit ist nur eine simultane Lösung des Allokations- und Intensitätsproblems möglich.

Produktionsfunktionen für den Einsatz im Rahmen der Metamodellierung bei Verwendung eines biophysikalischen Simulationsmodells in Kombination mit einem ökonomischen Optimierungsmodell müssen bezüglich Flexibilität, Schätzbarkeit, Realitätsbezug und Konkavität nach der Skalierung mit einer Variablen gute Eigenschaften aufweisen.

Typische landwirtschaftliche Produktionsfunktionen sind für den Einsatz im kombinierten Modellansatz nicht verwendbar, da sie die Eigenschaft der Konkavität bei Skalierung mit einer Variablen verlieren und da die Funktionen in keiner Variablen linear sind. Die Cobb-Douglas Funktion hat bezüglich Schätzbarkeit und Konkavität sehr gute Eigenschaften. Die Kriterien Realitätsbezug und Flexibilität schliessen dagegen eine Verwendung in der Metamodellierung aus. Von den typischen Produktionsfunktionen aus der Ökonomie zeigt die constant marginal share Produktionsfunktion Verbesserungen gegenüber der Cobb-Douglas Produktionsfunktion. Weitere Verallgemeinerungen erlauben die Spezifikation einer flexiblen Produktionsfunktion mit gutem Realitätsbezug. Die Funktion ist konkav und schätzbar. Da sie linear in einer Variablen formulierbar ist, ist sie für die Metamodellierung verwendbar. Mit der Multiplikation der Funktion mit -1 entsteht eine konvexe Funktion mit identischen Eigenschaften in Bezug auf Realitätsbezug, Flexibilität und Schätzbarkeit wie bei der modifizierten Cobb-Douglas Funktion. Für die Modellierung gemäss dem Modellansatz in Kapitel 9 ist die verallgemeinerte Cobb-Douglas Funktion bedingt verwendbar. Die Umrechnung von Grössen auf der Basis eines Hektars auf die aggregierte Grösse unabhängig von der Fläche ist nicht möglich, ohne dass die Konvexitätsanforderung des Optimierungsproblems verletzt würde.

11 Qualitative Analyse des Erosionsmodells

In diesem Kapitel¹³⁰ erfolgt die qualitative Analyse des in Kapitel 9 in allgemeiner Form dargestellten kontrolltheoretischen Modells für den Fall der Modellierung der Erosion in Anlehnung an die Modellbeschreibung im Abschnitt 9.2. Dabei werden in einem ersten Schritt (Abschnitt 11.1) die relevanten nichtlinearen Funktionen (Produktionsfunktion bzw. Erosionsfunktion) in ihren qualitativen Eigenschaften diskutiert. Im zweiten Abschnitt (Abschnitt 11.2) wird die qualitative Analyse für das kontrolltheoretische Allokations- / Intensitätsmodell, das das Grundmodell für die Modellrechnungen in Kapitel 14 darstellt, durchgeführt. Die qualitative Analyse liefert eine gute Grundlage zur Beurteilung der Modellqualität und –validität (vgl. Abschnitt 2.2.7).

Goetz et al. (1998) begründen in einem Kommentar zu einem Paper von Hoag (1998), dass die qualitative Analyse und die theoretische Validierung eines Modells nicht nur von ausschliesslich mathematischem Interesse sind, sondern dass relevante empirische Resultate nur sinnvoll interpretiert werden können, wenn das zugrunde liegende Modell theoretisch korrekt ist.

11.1 Das ökonomische Modell: verwendete Funktionen

Ausgangspunkt bildet eine zweifach differenzierbare stetige Produktionsfunktion in den zwei Variablen $u(t)$ als Inputvariable und $n(t)$ als Variable der Bodenmächtigkeit: $f(n(t), u(t))$. Die verschiedenen Bodencharakteristika und die verschiedenen Bodenhorizonte lassen nichtlineare Beziehungen zwischen Bodenerosion und Kultureertrag vermuten (Goetz 1997, S. 341). Daher werden nichtlineare Funktionen angenommen und diskutiert.

Die Bodenmächtigkeit sei in der spezifizierten Form der Produktionsfunktion eine Zustandsvariable und damit das Resultat des Einflusses des Inputfaktors und der Entwicklung der Bodenmächtigkeit über die Zeit. Sie unterliegt damit nicht direkt der Entscheidung des Akteurs, wird aber durch dessen laufende Entscheide kontinuierlich beeinflusst.

Die Annahmen über die Produktionsfunktion sind in der folgenden Übersicht zusammengefasst:

Gleichung 79: Annahmen über die Produktionsfunktion¹³¹

$$f_{n(t)} \geq 0, f_{x(t)} \leq 0, f_{nn} < 0, f_{xx} < 0$$

$$f_{nn} * f_{xx} - (f_{nx})^2 \geq 0$$

$$f_{nx} \leq 0, f(n_{\min}, 0) = a_0, f(n, 0) = a(n)$$

$$f_x(n, x) \leq 0, \forall x \geq x_{\max}$$

Die Produktionsfunktion ist konkav in den beiden Variablen Bodenmächtigkeit n (Variable für die Bodenqualität, Bodenfruchtbarkeit) und Intensität x (Düngung oder andere Faktoren). Daher ist f_{xx} kleiner als 0 und f_{nn} kleiner als 0. Bodenmächtigkeit und Intensität sind Substitute, wenn die Grenzproduktivität der Inputfaktoren mit zunehmender Bodenmächtigkeit ab-

¹³⁰ Die Darstellung lehnt sich im wesentlichen an die Darstellung von Goetz (1997). Abänderungen erfolgen spezifisch im Hinblick auf die in den folgenden Kapiteln dargestellten Modellresultate.

¹³¹ Die Tiefstellung einer Variablen bei einer Funktion bedeutet die partielle Ableitung nach dieser Variablen.

nimmt. In diesem Fall ist f_{nx} kleiner als 0. Sind Bodenmächtigkeit und Intensität dagegen Komplemente, so ist f_{nx} grösser als 0, d.h. die Grenzproduktivität der Inputvariablen Düngung steigt mit zunehmender Bodenmächtigkeit. Im modellierten Fall beeinflusst die Bodenmächtigkeit die Grenzproduktivität des Inputfaktors nicht, da der Input keine Kontrollvariable darstellt¹³² und der Handlungsspielraum des Landwirts nur in der Flächenallokation besteht. Eine minimale Bodenmächtigkeit ohne gewisse Inputs (beispielsweise ohne Düngung) bringt den minimalen Ertrag a_0 . Oberhalb der minimalen Bodenmächtigkeit für die Bewirtschaftung steigen die Erträge entsprechend der zunehmenden Bodenfruchtbarkeit, bzw. aus Erosionssicht, entsprechend der weniger verringerten Bodenfruchtbarkeit. Über einer bestimmten Intensität wird der Grenzertrag 0 oder negativ, d.h. der zusätzliche Einsatz von Inputfaktoren führt zu keiner Ertragserhöhung mehr, sondern kann sogar zu einer Ertragsdegression führen ($f_x(n,x) \leq 0$)¹³³. Die Bodenmächtigkeit ist ein limitierender Faktor der Produktion, wenn die Bodenmächtigkeit die minimale Bodenmächtigkeit für die Bewirtschaftung unterschreitet. Boden (Bodenmächtigkeit) ist essentiell für die Produktion, der variable Inputfaktor Düngung dagegen nicht. Die Konkavität der Produktionsfunktion in n , der Bodenmächtigkeit, ist eine Folge der Nichthomogenität der verschiedenen Bodenhorizonte.

Die Bodenmächtigkeit beeinflusst nicht nur die Erträge, sondern auch die Höhe der Erosion bei einem Erosionsereignis. Deshalb wird eine zweimal differenzierbare Erosionsfunktion h in den Variablen x und n angenommen ($h(n,x)$). Der Erosionsfunktion werden die folgenden Eigenschaften unterstellt:

Gleichung 80: Eigenschaften der Erosionsfunktion

$$h_n < 0, h_x < 0, h_{nn} > 0, h_{xx} > 0$$

$$h_{nn} * h_{xx} - (h_{nx})^2 > 0$$

$$h_{nx} < 0$$

$$h_n(n,0) = b(n)$$

Die Erosionsfunktion ist strikt konvex in den Variablen Bodenmächtigkeit und Inputfaktor Düngung. Bei abnehmender Bodenmächtigkeit verändert sich die Bodenstruktur in der Art, dass der Gehalt an organischer Substanz und damit die Aggregatstabilität sinken. Der Regen kann daher die Bodenpartikel zunehmend besser angreifen. Reduzierte Infiltrationskapazität und Durchlässigkeit führen zu höherer Erosionsanfälligkeit ($h_n < 0$). Eine höhere Produktionsintensität führt zu einem dichteren Pflanzenbestand und senkt die Erosivität von Regen. Daher ist $h_u < 0$. Strukturelle Veränderungen im Boden infolge von Erosion lassen auf das Vorzeichen von h_{nn} schliessen. Regentropfen zerstören Krümelaggregate an der Oberfläche und führen zu Verkrustung. Die abnehmende Bodenmächtigkeit erhöht die Erosivität von Regenereignissen und daher ist $h_{nn} > 0$. Eine zunehmende Produktionsintensität senkt durch einen dichteren Pflanzenbestand das auftretende Erosionsausmass mit abnehmender Zusatzwirkung. Daher ist $h_{uu} > 0$. Auch bei keinem Einsatz des Inputfaktors u findet Erosion statt. Diese ist aber nur noch von der Bodenmächtigkeit bzw. der dadurch definierten Bodenfruchtbarkeit abhängig. Dies gilt auch unterhalb der eine landwirtschaftliche Produktion erlaubenden Bodenmächtigkeit. Auch wenn keine landwirtschaftliche Produktion stattfindet, wächst auf dem Boden ein Pflanzenbestand, der die Erosionsanfälligkeit beeinflusst.

¹³² Die Datengrundlage aus EPIC erlaubte keine Modellierung der Intensität.

¹³³ Beispielsweise bei Weizen durch Lagerung.

11.2 Intensitätswahl und die Allokation von Land im Falle von Bodenerosion

In der folgenden qualitativen Analyse werden die Kriterien der optimalen Allokation von Flächen zu verschiedenen Kulturen im Zeitablauf unter Berücksichtigung der Erosion und des Einflusses verschiedener Diskontraten untersucht.

Gleichung 81: Kontrolltheoretisches¹³⁴ Allokations- / Intensitätsmodell

Maximiert wird die Summe der mit der Kulturfläche $b_{ij}(t)$ skalierten einperiodischen Wertfunktion pro Kultur und $h_{ij} V^{ij}(t)$ über alle Perioden zuzüglich des Endwertes $F(\cdot)$ der Ressourcenpools am Ende der letzten Periode. Der Pool $n(t)$ und die Intensitätsvariable $x_{ij}(t)$ beeinflussen die Wertfunktion auf der Fläche. Der zweite Pool $s(t)$ ist als Senke zu betrachten, in der Immissionen durch die Ressourcennutzung im Pool $n(t)$ auftreten. Dabei wird die Entwicklung der zwei Ressourcenpools im Zeitablauf berücksichtigt. Die betriebliche Fläche ist in jedem Jahr auf maximal \bar{b} limitiert:

$$\max_{x_{ij}(t), b_{ij}(t)} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [V^{ij}(x_{ij}(t), n(t), t) * b_{ij}(t)] + F(n(T+1), s(T+1), T+1)$$

subject to

$$I. \quad s(t+1) - s(t) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [G^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) * b_{ij}(t)] - Z(s(t)) \quad \forall t = 1..T$$

$$s(1) = \bar{s}_0$$

$$II. \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [b_{ij}(t)] * (n(t+1) - n(t)) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [(E^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) - Y^{ij}(n(t)) * b_{ij}(t))] \quad \forall t = 1..T$$

$$n(1) = \bar{n}_0$$

$$III. \quad \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij}(t) \leq \bar{b} \quad \forall t = 1..T$$

$$IV. \quad \begin{array}{ll} -x_{ij}(t) \leq 0 & \text{Nichtnegativitätsbedingungen} \\ -b_{ij}(t) \leq 0 & \text{je } \forall t = 1..T, i = 1..I, j = 1..J \end{array}$$

Indizes:

$i = 1..I$ = Kulturen, $j = 1..J$ = Anbauverfahren, $t = 1..T$ = Jahre der Bewirtschaftung

Funktionen:

$V^{ij}(\cdot)$ = Gegenwartswertfunktion aller Gewinne

$G^{ij}(\cdot)$ = Eintragsfunktion in Pool S

$Z(\cdot)$ = Zerfallsfunktion im Pool S

$E^{ij}(\cdot)$ = Eintragsfunktion in Pool Bodenmächtigkeit

¹³⁴ Die Grundlagen der Kontrolltheorie in der analytischen Darstellung und ihre diskrete Umsetzung in der Optimierung durch die Anwendung des Lagrange- bzw. Kuhn-Tucker Ansatzes sind in Kapitel 5 ausführlich dargestellt.

$Y^{ij}(\cdot)$ = Zerfallsfunktion im Pool Bodenmächtigkeit

$F(\cdot)$ = Restwertfunktion

Variablen:

$x_{ij}(t)$ = Faktoreinsatz an Kapital (Dünger etc.) ==> Kontrollvariable

$b_{ij}(t)$ = Lineare Variable (Fläche, die mit Kultur i und Verfahren j bewirtschaftet wird)

$n(t)$ = Bodenmächtigkeit pro Einheit $b_{ij}(t)$ (Mächtigkeit des A-Horizonts, aber auch Pool gehalt an Stickstoff etc.) ==> Zustandsvariable

$s(t)$ = Poolgröße des Rezeptors (Phosphor im See, Nitrat im Grundwasser) ==> Zustandsvariable

Für die Maximierung einer Funktion unter Gleichungen und Ungleichungen wird von der Lagrangefunktion¹³⁵ ausgegangen. Als notwendige Bedingungen werden die Kuhn-Tucker Bedingungen vorausgesetzt (vgl. Kapitel 4 besonders Abschnitt 4.2.5). Die Lagrangefunktion des in Gleichung 81 dargestellten Maximierungsproblems, des Grundmodells für die Modellrechnungen, lautet:

Gleichung 82: Lagrangefunktion¹³⁶

$$\begin{aligned}
 L = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [V^{ij}(x_{ij}(t), n(t), t) * b_{ij}(t)] + F(n(T+1), s(T+1), T+1) \\
 & - \sum_{t=1}^T \lambda(t+1) \left[s(t+1) - s(t) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J G^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) * b_{ij}(t) - Z(s(t)) \right] \\
 & - \lambda(1)(s(1) - \bar{s}_0) - \mu(1)(n(1) - \bar{n}_0) \\
 & - \sum_{t=1}^T \left[\mu(t+1) \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij}(t) * (n(t+1) - n(t)) - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (E^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) - Y^{ij}(n(t))) * b_{ij}(t) \right] \right] \\
 & - \sum_{t=1}^T \left[\nu(t) \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij}(t) - \bar{b} \right] \right] + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [\omega_{ij}^x(t) x_{ij}(t) + \omega_{ij}^b(t) b_{ij}(t)] \Rightarrow \max
 \end{aligned}$$

Lagrangemultiplikatoren:

$\lambda(1)$ = Schattenpreis der Ausgangszustandes des Nicht-Bodenpools

$\lambda(t+1)$ = Kozustandsvariable des Nicht-Bodenpools

$\mu(1)$ = Schattenpreis des Ausgangszustandes des Bodenpools

$\mu(t+1)$ = Kozustandsvariable des Bodenpools

$\nu(t)$ = Schattenpreis des Bodenpools

$\omega_{*}^{*}(t)$ = Lagrangemultiplikatoren der Nichtnegativitätsbedingungen (Grenzverluste) der jeweiligen Variablen

Die Zeilen 1, 2 und 4 in Gleichung 82 entsprechen der Summe der einzelperiodischen Hamiltonfunktionen des Kontrollproblems aus Zielfunktion und den zwei Differentialgleichungen

¹³⁵ Vgl. Conrad und Clark (1987) in Goetz und Zilberman (2000, S. 9).

¹³⁶ Die Zeilen 1, 2 und 4 der Lagrangefunktion entsprechen der Summe der einzelperiodischen Hamiltonfunktionen des kontrolltheoretischen Ansatzes (vgl. Kapitel 5).

gen in diskreter Form. Die dritte und die letzte Zeile berücksichtigen die weiteren Restriktionen gemäss dem Lagrange-Ansatz.

Die Kuhn-Tucker Bedingungen zu diesem Problem lauten:

F.O.C. DER KONTROLLVARIABLEN DER INTENSITÄT

$$L_{x_{ij}(t)} = V^{ij}_{x_{ij}(t)}(x_{ij}(t), n(t), t) * b_{ij}(t) + \lambda(t+1)(G^{ij}_{x_{ij}(t)}(x_{ij}(t), n(t)) * b_{ij}(t)) + \mu(t+1)(E^{ij}_{x_{ij}(t)}(x_{ij}(t), n(t)) * b_{ij}(t)) + \omega_{ij}^x(t) = 0$$

$$\forall i = 1..I, j = 1..J, t = 1..T$$

λ_{t+1} , die Kozustandsvariable des Rezeptors, kann als laufender Wert des Schattenpreises bzw. der Nutzungskosten des Rezeptors interpretiert werden. Entsprechend beschreibt μ_{t+1} den laufenden Wert des Schattenpreises bzw. die Nutzungskosten des Bodenpools. Diese notwendige Bedingung als Ganzes besagt bis auf die letzte Periode T, dass für jede Intensität der Grenzgewinn (Grenzerlös abzüglich Grenzkosten) der Intensität (erster Summand) den intensitätsbezogenen Nutzungskosten einer Veränderung des Bodenpools und des Rezeptors entsprechen muss. Ist die Intensität 0, so unterscheiden sich der Grenzerlös und die Kosten infolge Veränderung des Boden- und Rezeptorpoolen um den Betrag von $\omega_{ij}^x(t)$.

Spezialfall:

Ist der Wert der Ressource Bodenpool $\mu(T+1)$ in der Periode T+1 gleich 0 und die Bewertung $\lambda(T+1)$ des Schadens im Rezeptor in der Periode T+1 ebenfalls gleich 0, so gilt für die Periode T, dass der Grenzgewinn der Intensität ($x_{ij}(t)$) 0 sein muss. Das heisst, dass der statische Grenzerlös den statischen Grenzkosten entsprechen muss. Es werden keine intertemporalen Kosten der Ressourcennutzung mehr berücksichtigt. Dies entspricht dem statischen Optimalitätskriterium. Die Nutzungskosten der Poolgrössen (Zustandsvariablen) beeinflussen damit die optimalen Werte der vorkommenden Variablen nicht mehr. Ein Unterschied zwischen Grenzkosten und Grenzerlös der Produktion in bezug auf die Intensitätsvariable $x_{ij}(t)$ ist nur im Umfang von $\omega_{ij}^x(T)$, dem Wertgrenzprodukt des Produktionsfaktors $x_{ij}(t)$, bei einer Intensität von 0 möglich.

F.O.C. DER ZUSTANDSVARIABLEN BODENPOOL

$$L_{n(t)} = \mu(t+1) - \mu(t) + \mu(t+1) \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(E^{ij}_{n(t)}(x_{ij}(t), n(t)) - Y^{ij}_{n(t)}(n(t))) * b_{ij}(t)] \right) / \bar{b} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [V^{ij}_{n(t)}(x_{ij}(t), n(t), t) * b_{ij}(t)] / \bar{b} + \lambda(t+1) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [G^{ij}_{n(t)}(x_{ij}(t), n(t)) * b_{ij}(t)x] / \bar{b} = 0$$

$$\forall t = 1..T$$

$$L_{n(T+1)} = \mu(T+1) \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J b_{ij}(T) + F_{n(T+1)}(n(T+1), s(T+1), T+1) = 0$$

$\lambda(t+1)$, der Schattenpreis der Veränderungsfunktion des Nicht-Bodenpools, beinhaltet auch hier wie in der ersten f.o.c. die Nutzungskosten der Veränderung des Nicht-Bodenpools. Entsprechend umfasst $\mu(t+1)$ die Nutzungskosten der Veränderung des Bodenpools. Die Veränderung der Kozustandsvariablen des Bodenpools (on-farm-costs der Ressourcennutzung) entspricht dem durchschnittlichen marginalen Gewinn einer bestimmten Periode, korrigiert um

die mit dem Wert des Bodenpools in der Folgeperiode bewerteten Nettoveränderung der Poolgröße Boden sowie korrigiert um die mit dem Wert des Nichtbodenpools in der Folgeperiode bewerteten Veränderung dieses Nichtbodenpools.

In der Periode $T+1$ muss der marginale Wert des Bodenpools über die gesamte Fläche dem marginalen Endwert bezüglich des Bodenpools entsprechen. Ist der marginale Endwert bezüglich des Bodenpools gleich 0, so ist auch der marginale Wert des Bodenpools in der Periode $T+1$ gleich 0. Dies ist die Übergangsbedingung (transversality condition) am Ende der letzten Periode T .

F.O.C. DER ZUSTANDSVARIABLEN DES REZEPTORS

$$L_{s(t)} = \lambda(t+1) - \lambda(t) + \lambda(t+1) Z_{s(t)}(s(t)) = 0 \quad \forall t = 1..T$$

$$L_{s(T+1)} = F_{s(T+1)}(n(T+1), s(T+1), T+1) + \lambda(T+1) = 0$$

Die Nutzungskosten der Nicht-Bodenressource in Periode $t+1$ zusammen mit der mit denselben Nutzungskosten bewerteten Veränderung des Zerfalls im Rezeptor müssen den Nutzungskosten der aktuellen Periode entsprechen. Dies bedeutet, dass sich die Nutzungskosten zwischen zwei Perioden nur um die mit den künftigen Nutzungskosten bewertete Veränderung des Zerfalls im Rezeptor unterscheiden dürfen.

In der Periode $T+1$ muss der bezüglich des Rezeptors marginale Endwert den Nutzungskosten in der Periode $T+1$ entsprechen. Die Betrachtung erfolgt eigentlich am Ende der Periode T und stellt die Übergangsbedingung (transversality condition) dar.

F.O.C. DER KONTROLLVARIABLEN KULTURFLÄCHE

$$L_{b_{ij}(t)} = V^{ij}(x_{ij}(t), n(t), t)$$

$$-\lambda(t+1)(G^{ij}(x_{ij}(t), n(t))) - \mu(t+1)(n(t+1) - n(t) - E^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) + Y^{ij}(n(t)))$$

$$-v(t) + \omega_{ij}^b(t) = 0 \quad \forall i = 1..m, j = 1..n, t = 1..T$$

Der Grenzerlös jeder Flächeneinheit lässt sich ausdrücken als Summe, die sich zusammensetzt aus:

- den Nutzungskosten des Rezeptors pro Flächeneinheit
- den Nutzungskosten der Bodenressource pro Flächeneinheit
- dem Schattenpreis pro Flächeneinheit.

Ist in der letzten Periode T der Wert des Bodenpools am Ende der Periode gleich 0 ($\mu(T+1) = 0$) und ist der Wert der Zustandsvariablen im Rezeptor ebenfalls gleich 0 ($\lambda(T+1) = 0$), entspricht in der Periode T der Schattenpreis dem Grenzerlös pro Flächeneinheit wie in der statischen Optimierung. Damit entfällt in der f.o.c. die ganze zweite Zeile der Bedingung.

Bemerkung zu den F.O.C. der Kontrollvariablen Kulturfläche und Intensität:

Das Optimierungsmodell ist bezüglich der Kontrollvariablen Kulturfläche linear homogen. Ohne Berücksichtigung der dynamischen Wirkungen würde in der Optimierung die Kultur mit der höchsten Landrente gewählt. Über die Lagrangemultiplikatoren $\mu(t+1)$ und $\lambda(t+1)$ fließen in den f.o.c. der Kontrollvariablen der Intensität intertemporale Bewertungen in die Optimalitätsbedingung für die Intensität mit ein. Die Allokation zu einem Zeitpunkt hängt von der Intensitätswahl zu früheren Zeitpunkten ab, bzw. die Intensitätswahl zu einem Zeit-

punkt muss die dynamischen Kosten der Intensitätswahl berücksichtigen. Daher muss das Allokations- und Intensitätsproblem simultan gelöst werden.

F.O.C. DER KOZUSTANDSVARIABLEN EINES POOLS IM REZEPTOR

$$L_{\lambda(t+1)} = s(t+1) - s(t) - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n G^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) * b_{ij}(t) - Z(s(t)) = 0 \quad \forall t = 1..T$$

$$L_{\lambda(1)} = s(1) - \bar{s}_0 = 0$$

Die Veränderung des Pools im Rezeptor entspricht dem bewirtschaftungsabhängigen Eintrag korrigiert um den Zerfall im Pool. Diese f.o.c. entspricht der Veränderungsgleichung (Differenzgleichung) des Rezeptors.

In der Periode 1 entspricht die Zustandsvariable des Rezeptor dem Ausgangszustand des Rezeptors (Anfangsbedingung).

F.O.C. DER KOZUSTANDSVARIABLEN DES BODENPOOLS

$$L_{\mu(t+1)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n b_{ij}(t)[n(t+1) - n(t)] - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [(E^{ij}(x_{ij}(t), n(t)) - Y_{ij}(n(t)) * b_{ij}(t))] = 0 \quad \forall t = 1..T$$

$$L_{\mu(1)} = n(1) - \bar{n}_0 = 0$$

Diese f.o.c. entspricht der Veränderungsgleichung (Differenzgleichung) für den Bodenpool, die besagt, dass die Summe aller Veränderungen der Bodenmächtigkeiten der Erosion korrigiert um die Bodengenesse entspricht. Dabei werden die Veränderungen flächenspezifisch differenziert.

In der Periode 1 entspricht die Bodenmächtigkeit der Ausgangsbodenmächtigkeit.

Nach den Lagrangemultiplikatoren der Ungleichheitsrestriktionen muss nicht abgeleitet werden, dafür wird das System der f.o.c. um die Komplementärschlupfbedingungen ergänzt.

Komplementärschlupfbedingungen (Erweiterung von Lagrange zu Kuhn-Tucker infolge Ungleichheitsrestriktionen):

Die grundlegende Aussage ist, dass das Produkt aus dem Grenzverlust einer Aktivität und ihrer Abweichung von ihrem Bound ebenfalls null sein muss, bzw. bei einer Ungleichheitsrestriktion, dass die Lagrangemultiplikatoren nur von null verschieden sein dürfen, wenn der Schlupf null, d.h. die Restriktion bindend ist.

$$v_t \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [b_{ij}(t) - \bar{b}] = 0 \quad \forall t = 1..T$$

$$\omega_{ij}^x(t) x_{ij}(t) = 0 \quad \forall i = 1..m, j = 1..n, t = 1..T$$

$$\omega_{ij}^b(t) b_{ij}(t) = 0 \quad \forall i = 1..m, j = 1..n, t = 1..T$$

11.2.1 Interpretation der Schattenpreise von Restriktionen und Differenzgleichungen im dynamischen Modell

Die Schattenpreise aller nicht Differenzgleichungen, d.h. die Lagrangemultiplikatoren des Lagrange-Ansatzes, sind im dynamischen Modell aus langfristiger Sicht (d.h. mit den Folgewirkungen bis zum Endzeitpunkt) zu interpretieren. Dies bedeutet, dass sie Folgeeffekte der Veränderung eines limitierenden Faktors von einem bestimmten Zeitpunkt t bis zum Ende des Planungshorizontes T beinhalten. Ebenso berücksichtigen die Schattenpreise der Differenzgleichungen des kontrolltheoretischen Ansatzes, die Kozustandsvariablen, alle künftigen Auswirkungen einer Veränderung einer Ressource zu einem bestimmten Zeitpunkt mit und bewerten diese im durch die gewählte Zielfunktion vorgegebenen Bewertungsrahmen. Diese Berücksichtigung führt dazu, dass bezüglich der in den Differenzgleichungen bzw. Zustandsgleichungen abgebildeten Größen die Folgewirkungen einer Veränderung dieser Zustandsgrößen in den Optimierungsentscheid mit einfließen und diesen zu jedem Zeitpunkt entsprechend beeinflussen.

11.3 Fazit aus der qualitativen Analyse

Die qualitative Analyse erweist sich als gutes Instrument zu einer ersten Modellvalidierung. Die theoretische Analyse der verwendeten Produktions- und Erosionsfunktionen zeigt, dass die Funktionen aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht konsistent sind. Die Interaktionen werden durch die Argumente der Funktionen korrekt abgebildet. Das kontrolltheoretische Allokations- / Intensitätsmodell weist in den first order conditions (f.o.c.) aus ökonomischer Sicht richtige Kriterien der Optimalität auf und auch die dualen Größen, insbesondere die aus kontrolltheoretischer Sicht interessanten Kozustandsvariablen, erlauben aus theoretischer Sicht die gewünschten Interpretationsmöglichkeiten.

Mit der qualitativen Analyse zur theoretischen Modellvalidierung sind die theoretischen und methodischen Grundlagen für die Modellrechnungen zur Analyse des Erosions- und Phosphorproblems gelegt. Die Modellrechnungen erfolgen im Teil 3.

TEIL 3: DATENGRUNDLAGEN, EDV-KONZEPT UND MODELLRECHNUNGEN

Theoretische und methodische Grundlagen für Modellrechnungen zur quantitativen Analyse des Erosions- und Phosphorproblems auf einem Ackerbaubetrieb im Gebiet des Baldeggersees legen Teil 1 „Grundlagen der Modellierung“ und Teil 2 „Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung“.

Teil 1 diskutiert Grundlagen der Modellbildung und Methodenwahl und gibt eine Übersicht über Modellierungsansätze im Bereich Ressourcenökonomie. Ein dynamischer nichtlinearer Programmierungsansatz zur Optimierung ist für die Fragestellung geeignet, stellt aber spezielle Anforderungen aus mathematischer Sicht für die Lösbarkeit und aus ökonomischer Sicht durch die Berücksichtigung der Systementwicklung in Form von Differenzen- bzw. Differentialgleichungen. Die minimalen mathematischen Bedingungen aus Sicht der Konvexität sind eine pseudokonkave Zielfunktion und quasikonvexe Restriktionen bei Erfüllung der Constraint Qualification. Die Kontrolltheorie liefert die theoretische ökonomische Grundlage für dynamische Analysen. Intertemporale Kosten werden im Gegensatz zu statischen Ansätzen in den dynamischen Optimierungsentscheid mit einbezogen.

Im Teil 2 erfolgt die Beschreibung des Erosions- und Phosphorproblems aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht. Die Problemstellung erfordert zwingend eine dynamische ökonomische Analyse mit einem biophysikalischen Modellteil von grossem Gewicht. Wichtige Massnahmen zur Bekämpfung des Erosions- / Phosphorproblems sind jene der Anpassung der Fruchtfolge und der konservierenden Bodenbearbeitung. Instrumente der Umweltpolitik zur Beeinflussung der Massnahmen liegen in den Bereichen ökonomische An- und Abreize (Steuern) und bei den regulatorischen Instrumenten (Standards). Der Modellansatz der bioökonomischen Modellierung erlaubt die Abbildung der Massnahmen und Instrumente. Durch Metamodellierung kann ein biophysikalisches Simulationsmodell mit einem ökonomischen Modell kombiniert werden, was zu einem bioökonomischen Modellansatz führt. Die Modellvalidierung durch die qualitative Analyse zeigt theoretische Konsistenz aus ökonomischer und naturwissenschaftlicher Sicht.

Übersicht Teil 3: Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen

Im Kapitel 12 erfolgt die Vorstellung des Berechnungskonzeptes für die numerische Analyse des Erosions- und Phosphorproblems im Gebiet des Baldeggersees. Danach werden die Datengrundlagen aus ökonomischer und biologischer Sicht (Metamodellierung: Parameter der Produktions- und Erosionsfunktionen) dargelegt. In den Berechnungen sollen betriebliche Kosten der Erosion und Vermeidungskosten bestimmt sowie Massnahmen und Instrumente zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems analysiert werden. Dabei werden private und soziale sowie kurz- und langfristige Betrachtungsweisen miteinander verglichen. Kapitel 13 beschreibt das EDV Konzept für die Modellrechnungen und geht speziell auf die verwendete algebraische Modellierungssprache und den Inputgenerator auf Datenbankbasis ein. In Kapitel 14 erfolgt die Präsentation und Diskussion der Resultate in Anlehnung an das Berechnungskonzept in Kapitel 12. Das Fazit in diesem Kapitel besteht im wesentlichen aus Bewertungen für den Bereich der Modellierung und der Ergebnisse. Kapitel 15 präsentiert die Schlussfolgerungen aus der ganzen Arbeit.

12 Grundlagen der Modellrechnungen

12.1 Konzept für die quantitative Analyse

12.1.1 Ziele der quantitativen Analyse

Der Focus liegt auf der quantitativen Analyse des Erosions- / Phosphorproblems auf einem Ackerbaubetrieb im Gebiet des Baldeggersees. Durch die Berechnungen sollen die Entwicklungspfade für Kontrollvariablen (Flächenallokation) und Zustandsvariablen (Bodenmächtigkeit) im Zeitablauf aufgezeigt werden. Daraus ergeben sich Entwicklungspfade für die Größen Erosion, P-Abträge, betriebliche Gewinne sowie für die Kozustandsvariable (Bewertung der Ressource Boden). Die Berechnungen werden unter privater und sozialer Perspektive durchgeführt. In der privaten Betrachtung wird in Bezug auf das Umweltproblem keine Beschränkung eingeführt. In der sozialen Betrachtung wird für den Phosphorabtrag eine Limite pro ha eingeführt. Wegen des direkten Bezugs des Phosphorabtrags zur Erosion (Proportionalität) ist die Erosion pro ha auf dem Betrieb ebenfalls eingeschränkt. Die Orientierungsgrösse ist 0.3 kg partikulärer Phosphorverlust pro ha, bei der das Qualitätsziel für das Einzugsgebiet und damit für den Eintrag in den Baldeggersee erreicht wird (vgl. Abschnitt 6.1.4 über Zielgrößen für den Baldeggersee). Aus dem Vergleich des privaten Optimums mit dem sozialen Optimum (Vorgabe eines sozialen Standards bezüglich Erosion/P-Abtrag) lassen sich Vermeidungskosten berechnen, die die minimalen Anpassungskosten¹³⁷ zur Erreichung des sozialen Standards darstellen. Diese Vermeidungskosten bilden die Referenzgrösse (least-cost¹³⁸) zur Beurteilung von Massnahmen und Instrumenten zur Eindämmung des Erosions- / Phosphorproblems. Die Abweichung der Anpassungskosten einer Massnahme oder eines Instrumentes von den minimalen Vermeidungskosten (least-cost) wird als Effizienzverlust definiert und erlaubt die Bewertung von Alternativen.

Das Ziel der Modellrechnungen besteht darin, die Effizienz der einzelnen Massnahmen zur Entschärfung des Problems der Bodenerosion zu evaluieren bzw. zu vergleichen und die Kosten des Landwirts, die durch die Einführung der Massnahmen oder Instrumente entstehen, zu quantifizieren.

In Bezug auf den Zeithorizont werden die Resultate einer rekursiven Optimierung mit denjenigen einer dynamischen Optimierung verglichen. Im ersten Fall wird jedes Jahr der Optimierung einzeln optimiert (Betrachtungshorizont 1 Jahr) unter Berücksichtigung der Grösse der Zustandsvariablen in der Vorperiode. In der dynamischen Optimierung ist der Betrachtungszeitraum auf zwei Generationen bzw. auf 66 Jahre festgelegt. Durch die Variation des Betrachtungszeitraumes (kurzfristig und langfristig) wird die Bedeutung des Planungshorizontes aufgezeigt, und es werden Abweichungen quantifiziert.

12.1.2 Forschungsfragen für die quantitative Analyse

Die dargestellten Ziele der Berechnungen lassen sich in Forschungsfragen konkretisieren. Die folgende Liste zeigt die durch die quantitative Analyse zu klärenden Fragen:

1. Wie hoch sind die on-farm-costs der Erosion aus privater und sozialer Sicht bei kurz- und langfristiger Betrachtung und bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit zu verschiedenen Zeitpunkten im Betrachtungszeitraum? Welchen Einfluss übt die Diskontrate darauf aus?

¹³⁷ Anpassungskosten beinhalten die Gewinneinbussen des Betriebes, die auf zur Zielerreichung notwendige betriebsstrukturelle Anpassungen zurückzuführen sind.

¹³⁸ Minimale betriebliche Anpassungskosten bzw. Vermeidungskosten des partikulären P-Abtrags.

2. Wie entwickelt sich die Betriebsstruktur im Zeitablauf aus privater und sozialer Sicht? Diese Analyse soll bei kurz und langfristiger Betrachtung und bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit erfolgen. Welchen Einfluss hat die Diskontrate auf die Betriebsstruktur im Zeitablauf?
3. Wie hoch sind die Vermeidungskosten bzw. die betrieblichen Anpassungskosten zur Erreichung des sozialen Standards im Zeitablauf aus kurz- und langfristiger Perspektive bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit?
4. Wie hoch sind die Schattenpreise einer P-Abtragsrestriktion für unterschiedliche Limiten in Abhängigkeit des Planungshorizontes bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit? Die Schattenpreise dienen als Grundlage für eine P-Abtragssteuer.
5. Wie entwickelt sich die Betriebsstruktur bei unterschiedlichen P-Abtragslimiten? Welchen Einfluss haben die Grössen der Diskontrate, der Bodenmächtigkeit und die Länge des Planungshorizontes auf die Betriebsstruktur im Zeitablauf bei unterschiedlichen P-Abtragslimiten?
6. Wie hoch sind die Vermeidungskosten und die marginalen Vermeidungskosten der least-cost Massnahme P-Abtragssteuer. Die beiden Grössen der Vermeidungskosten dienen als Referenz für die Beurteilung weiterer Massnahmen bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit.
7. Welches ist die Effizienz der Massnahme Bodenschutzindex¹³⁹ der integrierten Produktion aus Sicht der Vermeidungskosten? Wie verlaufen die marginalen Vermeidungskosten? Die jeweiligen Referenzgrössen liefert die least-cost Massnahme P-Abtragssteuer.
8. Welches ist die Effizienz der Massnahmen Landnutzungssteuer und Erosionspunkte aus Sicht der Vermeidungskosten? Wie verlaufen die marginalen Vermeidungskosten der beiden Massnahmen? Die jeweiligen Referenzgrössen liefert die least-cost Massnahme P-Abtragssteuer.

Das im folgenden Abschnitt dargestellte Konzept für die quantitative Analyse soll die Antworten auf die acht Forschungsfragen liefern.

12.1.3 Vorgehen bei der quantitativen Analyse

In den Berechnungen wird jeweils zwischen einer kurzfristigen und einer langfristigen Betrachtung unterschieden. Die kurzfristige Sicht wird dabei als der Realität der Akteure angepasster betrachtet. Aus Sicht der Gewinnmaximierung ist die kurzfristige Sicht aber nicht wirklich gewinnmaximierend, da die Folgekosten der kurzfristig gewinnmaximierenden Entscheide nicht berücksichtigt werden. Der Gewinn wird nur in der langfristigen Betrachtung unter Berücksichtigung der Folgekosten von Entscheiden wirklich maximiert.

Stufe 1: Bestimmung der betrieblichen Kosten der Erosion (on-farm-costs), der Vermeidungskosten und der Schattenpreise einer P-Abtragsrestriktion

- Bestimmung des sozialen Optimums je bei langfristigem (66 Jahre bzw. zwei Generationen) und bei kurzfristigem (einzeljährliche rekursive Optimierung) Betrachtungshorizont. Zur Bestimmung des sozialen Optimums wird die im Abschnitt 6.1.4 beschriebene maximale Verlustgrösse von 0.3 kg partikulärem Phosphorverlust pro ha vorgegeben.

¹³⁹ Vgl. Fussnote 88.

- Bestimmung des privaten Optimums je bei lang- (über 66 Jahre) und bei kurzfristigem (einzeljährliche rekursive Optimierung) Betrachtungshorizont. In diesem Fall wird keine maximale Verlustlimite für Phosphor vorgegeben.

Aus dem Vergleich des privaten mit dem sozialen Optimum je bei lang- und kurzfristiger Betrachtung lassen sich die betrieblichen Anpassungskosten in Abhängigkeit des Planungshorizontes bestimmen, die zur Erfüllung der sozial motivierten Norm einer Verlustgrösse für partikulären Phosphorabtrag von 0.3 kg / ha notwendig sind (bei dieser Verlustgrösse wird der Phosphoreintrag als gesellschaftlich akzeptabel betrachtet). Die resultierende Grösse ist die Höhe der Vermeidungskosten für den Betrieb, der minimalen Anpassungskosten zur Erreichung des sozialen Standards.

Stufe 2: Least-cost bzw. emissionsseitige Massnahmen: P-Steuer und P-Abtragslimiten

Emissionsseitige Massnahmen greifen bei Problemen der Verschmutzung direkt an der Emission an und führen aus einzelbetrieblicher Sicht zu einer kostenminimalen Anpassung an ein Emissionsziel. Sie sind nur bei point-source-pollution anwendbar, da in diesem Fall die Emission technisch messbar ist und zugeordnet werden kann. Im Falle von non-point-source-pollution ist oft die technische Messbarkeit und eine eindeutige Zuordnung nicht gegeben oder zu teuer.

- Einführung einer P-Steuer in der Höhe der Schattenpreise der Phosphorrestriction in Stufe 1 je bei lang- und bei kurzfristiger Betrachtung. Diese Massnahme gehört in die Kategorie der emissionsseitigen (least-cost) Massnahmen, ist aber, da es sich um non-point-source-pollution handelt, nicht implementierbar, da die P-Abträge nicht messbar sind. Die Massnahme erlaubt die Bestimmung der minimalen Anpassungskosten (least-cost).

In dieser Stufe wird hypothetisch der Effekt einer emissionsseitigen Massnahme aufgezeigt und untersucht, ob die Schattenpreise der Phosphorrestrictionen eine korrekte Grösse für die Festlegung einer P-Verluststeuer darstellen. Gleichzeitig erfolgt mit dieser Berechnung eine numerische Überprüfung des Modells und damit zusätzlich zur qualitativen Analyse (vgl. Abschnitt 11.2) eine weitere Verifikation / Modellvalidierung.

- Variation des P-Abtrags in Schritten von 100 g pro ha ausgehend von der Ausgangsgrösse der privaten Betrachtung in Stufe 1. Die Ausgangsgrösse ist jener partikuläre Phosphorabtrag, der im privaten Optimum abgetragen und evtl. in die Oberflächengewässer eingetragen wird, aufgerundet auf die erste Kommastelle.

Es ist das Ziel, die Vermeidungskosten des Landwirts (Differenz der Zielfunktionswerte), die mit der Beschränkung des Phosphoreintrages einhergehen, zu berechnen. Dabei handelt es sich um die Vermeidungskosten für unterschiedliche Niveaus der Limitierung des partikulären Phosphorabtrages.

Stufe 3: Indirekte bzw. inputseitige Massnahmen: Bodenschutzindex

Unter indirekten Massnahmen werden nicht emissionsseitige Massnahmen mit dem Ziel der Erreichung des sozialen Optimums in Stufe 1 verstanden. Es handelt sich dabei meist um inputseitige Proxy-Grössen. Indirekte Massnahmen sind solche Massnahmen, die nicht direkt an der Emission greifen (was wegen der non-point-source-pollution auch nicht möglich ist), sondern indirekt über besser beobachtbare Grössen das Umweltproblem eindämmen. Aus dem Vergleich der least-cost Massnahme mit einer indirekten Massnahme lässt sich der zugehörige Effizienzverlust der indirekten Massnahme aus der Differenz zwischen den Vermeidungskosten der beiden Massnahmen zur Zielerreichung errechnen. Die least-cost Massnahme führt zu minimalen Anpassungskosten, den Vermeidungskosten und diese dienen als Referenzgrösse.

Der Entscheid, ob es aus volkswirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist, Massnahmen zur Beschränkung der Umweltbelastung durch Phosphorabtrag oder von Schäden infolge von Erosion einzuführen, hängt vom volkswirtschaftlichen Nutzen der Massnahmenauswirkungen und den damit verbundenen Kosten ab. Die gesamten Kosten setzen sich aus den Kosten der Implementierung der Massnahmen und den Vermeidungskosten des Akteurs, auf den die Massnahme wirkt, zusammen. Administrative Kosten und die Verringerung des volkswirtschaftlichen Schadens werden in den Berechnungen nicht analysiert. Die Berechnungen können aber erste Grundlagen für eine umfassendere Analyse der Massnahmen liefern, indem die Vermeidungskosten des Landwirts quantifiziert werden.

- Variation des Niveaus des Bodenschutzindex, implementiert gemäss IP-Verordnung (Bundesamt für Landwirtschaft 1999), in Schritten von 5 Bodenschutzpunkten pro ha.

Der Bodenschutzindex wäre leicht beobachtbar und auch leicht durchsetzbar. Diese Eigenschaften lassen tiefe administrative Kosten erwarten, da er im Produktionsverfahren der integrierten Produktion bereits durchgesetzt wird. In diesen Berechnungen soll geprüft werden, inwieweit sich durch Erosion bedingte Phosphorabträge und die Erosion selbst durch eine evtl. Verschärfung der bestehenden Massnahme des Bodenschutzindex verringern lassen.

Stufe 4: Untersuchung weiterer Massnahmen

- Erosionsindex für Gebiete mit hoher Erosionsgefährdung
- Landnutzungssteuer: Besteuerung der Flächennutzung in Abhängigkeit der Kultur, des Anbauverfahrens und des Düngungsverfahrens

Das Beurteilungskriterium für die Massnahmen ist der Effizienzverlust. Diese Massnahmen stellen Alternativen zu den nicht implementierbaren emissionsseitigen Massnahmen in Stufe 2 dar (vgl. auch Kapitel 14.3).

Parametervariationen in den Berechnungen für die einzelnen Stufen

Neben der Diskontrate, die Werte von 6%, 3% und 0% annimmt, wird die Ausgangsbodenmächtigkeit mit Werten von 1.05 m, 0.7 m und 0.35 m angenommen.

Die Variation der Diskontrate erlaubt, die Bedeutung dieser Grösse für die Massnahmenbewertung herauszuschälen. Die unterschiedlichen Ausgangsbodenmächtigkeiten liefern den Differenzierungsbedarf für die Massnahmen in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit¹⁴⁰.

12.1.4 Übersicht über das Konzept der quantitativen Analyse

Die folgende Abbildung zeigt das Berechnungsschema mit den erwarteten Resultaten und Verweisen auf die Abschnitte im Kapitel 14 Resultate.

Stufe		Ergebnis	Abschnitt
1	Privates / Soziales Optimum		
	Privates Optimum ohne Standard	Auswirkungen verschiedener Planungshorizonte Bodenmächtigkeiten Diskontraten Verfahren der Düngung und Bodenbearbeitung	14.1.2 14.1.3 14.1.4 14.1.5

¹⁴⁰ Die Variation des Parameters Bodenmächtigkeit vermeidet die Notwendigkeit, langfristige Analysen über mehrere Tausend Jahre durchzuführen, wie sie im Prinzip zur Analyse des Erosionsproblems nötig wären. In den EPIC Simulationen sind bei jeder Bodenmächtigkeit entsprechende A-Horizonte mit zugehörigen C/N-Verhältnissen vorausgesetzt.

Stufe		Ergebnis	Abschnitt
1	Privates / Soziales Optimum		
	Soziales Optimum mit sozialem Standard	Auswirkungen verschiedener Planungshorizonte Bodenmächtigkeiten Diskontraten	14.1.7 14.1.8 14.1.9
	Vergleich privates/soziales Optimum	Zielfunktionsdifferenz = Vermeidungskosten	14.2
2	First best Massnahmen		
	P-Abtragslimiten	Vermeidungskosten / marginale Vermeidungskosten Auswirkungen verschiedener Diskontraten Bodenmächtigkeiten Planungshorizonte	14.3.2 14.3.2.2 14.3.2.3 14.3.2.4
	P-Steuer	Optimale Steuersätze Zielfunktionsdifferenz Steuerbetrag Anpassungskosten Marginale Vermeidungskosten	14.3.3.1 14.3.3.2 14.3.3.3 14.3.3.4 14.3.3.5
3	Second best Massnahme		
	Bodenschutzpunkte	Vermeidungskosten Marginale Vermeidungskosten Effizienz	14.4.1.1 14.4.1.2 14.4.1.3
4	Weitere Massnahmen		
	Landnutzungssteuer	Vermeidungskosten Marginale Vermeidungskosten	14.5.1.1 14.5.1.2
	Erosionspunkte	Marginale Vermeidungskosten	14.5.2.1

Tabelle 7: Konzept der quantitativen Analyse

12.2 Datengrundlagen

12.2.1 Abkürzungen bei Kulturen

Die Tabelle 8 listet die für die Bezeichnungen bei einzelnen Kulturen in diesem Kapitel und im Kapitel 14 (Resultate) verwendeten Abkürzungen auf:

Kultur		Bodenbearbeitung	
KA	Kartoffeln	MIN	minimale Bodenbearbeitung (ohne Pflug)
KM	Körnermais	STA	Bodenbearbeitung mit Pflug
KMZW	Körnermais mit Zwischenfutter	Düngungsverfahren	
KW1	Kunstwiese erstes Jahr	HD	Hofeigene Düngemittel
KW2	Kunstwiese zweites Jahr	MD	Mineralische Düngung
SH	Sommerhafer		
SHZW	Sommerhafer mit Zwischenfutter		
WG	Wintergerste		
WW	Winterweizen		
ZW	Zwischenfutter nach Kulturen		
ZWKM	Zwischenfutter vor Körnermais		
ZWSH	Zwischenfutter vor Hafer		

Tabelle 8: Liste der Abkürzungen bei Kulturen

12.2.2 Metamodellierung: Schätzung der Produktions- und Erosionsfunktionen

Die Schätzung der Erosions- und Produktionsfunktionen (vgl. Abschnitt 9.2 und Abschnitt 11.2) für die Verwendung im ökonomischen Modell (Metamodellierung vgl. Abschnitt 9.3) erfolgt je für einen quadratischen Funktionstyp und den modifizierten Cobb-Douglas Funktionstyp (vgl. Abschnitt 10.8.4). Im Falle der modifizierten Cobb-Douglas Funktion wird für die Produktionsfunktion die konkave modifizierte Cobb-Douglas Funktion, für die Erosionsfunktion die mit -1 skalierte modifizierte Cobb-Douglas Funktion verwendet.

12.2.2.1 Datengrundlage für die Schätzung

Die Datengrundlage für die Schätzung der Produktions- und Erosionsfunktionen stammt aus Simulationen mit dem biophysikalischen Simulationsmodell EPIC (Sharpley und Williams 1990), die von Dr. Daniel Schaub am geographischen Institut der Universität Basel durchgeführt wurden. Die Simulationen erfolgten für unterschiedlich erosive Jahre (erosiv, normal erosiv, wenig erosiv). Die Erosivität eines Jahres korreliert mit der erodierten Bodenmenge an einem Standort, aber nicht mit der Nässe eines Jahres (nass, trocken, normal), da die Erosivität eines Jahres von der Niederschlagsverteilung in Bezug auf die Vegetationsperiode abhängt¹⁴¹. Aus den Daten der unterschiedlich erosiven Jahre berechnet sich die Datengrundlage für die Schätzung als gewichteter Durchschnitt¹⁴². Die Datengrundlage erlaubt keine Schätzung in Abhängigkeit von Kontrollvariablen, sondern es existiert lediglich die Bodenmächtigkeit als exogene Variable.

12.2.2.2 Methodische Aspekte der Schätzung

Die Schätzung von Beziehungen bzw. Funktionen für ein normatives Modell auf der Basis von empirischen Daten bedarf einiger Überlegungen:

Die Regressionen liefern Beziehungen, die sich an Mittelwerten orientieren, da z.B. quadrierte Abweichungen minimiert werden. In Programmierungsmodellen wird vom normativen Ansatz her aber nicht ein Mittelwert, sondern das datenmässige Optimum verlangt. Wird auf der Basis von Betriebsdaten eine Produktionsfunktion in Abhängigkeit des Düngereinsatzes geschätzt, so gibt die geschätzte Funktion für jeden Düngereinsatz annähernd den mittleren Ertrag der Datenbasis an. Bei der Schätzung werden die Abweichungen der Funktion in beide Ordinatenrichtungen minimiert. In einem Diagramm der Erträge in Abhängigkeit des Düngereinsatzes müsste die erhaltene Regressionsfunktion entsprechend vertikal verschoben werden, um eine umhüllende Funktion zu erhalten, die auf der Datenbasis den Maximalertrag bei einer bestimmten Düngungsintensität abbildet. Nur so wird die geschätzte Funktion dem normativen Ansatz gerecht. Die Frage ist, ob diese Verschiebung, die gleichbleibende Grenzerträge voraussetzt, zulässig ist, oder ob mit einem anderen Verfahren eine bessere Funktion geschätzt werden könnte.

Werden die Daten aus einem Modell (Bsp. EPIC (Sharpley und Williams 1990)) gewonnen, so existiert das Problem nicht, da die der Simulation zugrundeliegenden Funktionen aus der Forschung stammen und somit um andere Einflüsse bereinigt bzw. diese nicht berücksichtigt

¹⁴¹ Ein nasses Jahr, d.h. ein Jahr mit viel Niederschlägen, muss nicht erosiv sein, wenn die Niederschläge in einer Vegetationsperiode mit guter Bodenbedeckung anfallen oder sehr gleichmässig verteilt sind. Die Erosion tritt an einzelnen Ereignissen im Laufe des Jahres auf. Eine andere Referenzgrösse als die Erosivität eines Jahres führt bei einer Durchschnittsbildung zu einer entsprechenden Verzerrung.

¹⁴² Ein normal erosives Jahr hat das Gewicht 0.46, ein erosives 0.2 und ein wenig erosives 0.34 (Angaben von Dr. Daniel Schaub, Geographisches Institut der Universität Basel).

sind (Bsp: Risikoverhalten bei der Düngung, vgl. Lehmann et al. 1993, S. 42). In diesem Sinne stellen aus solchen Modellen erhaltene Erträge Optimalerträge im Sinne der technischen Effizienz dar und sind problemlos in normativen Modellen einsetzbar.

12.2.2.2.1 Regressionsanalyse allgemein

Regressionen basieren auf der Minimierung der Quadrate der Abweichungen und setzen eine grosse Zahl von Beobachtungen und meist normalverteilte Abweichungen voraus. Letzteres ist oft nötig für die Gültigkeit der statistischen Tests. Die grosse Zahl ist für die durchzuführenden Regressionen zur Schätzung der Produktionsfunktionen bei einer Datengrundlage mit lediglich sechs Punkten nicht gegeben. Die Tatsache, dass EPIC - Modellergebnisse verwendet werden, lässt auch nicht auf normalverteilte Streuungen schliessen, da die simulierten Modellergebnisse auf einer bis auf die variierten Parametergrössen identischen Modellgrundlage beruhen. Diese Einschränkungen bewirken, dass die resultierende Teststatistik verfälscht wird, da aufgrund der Dateneigenschaften, die eine quadratische Funktion nahelegen, drei Punkte zur Bestimmung der nichtlinearen Funktionen für Produktion und Bodenerosion reichen würden. Die zusätzlichen Punkte liefern keine zusätzliche erklärende Varianz, so dass ein überhöhtes Bestimmtheitsmass die Folge ist. Gute Beurteilungsgrössen sind daher neben dem direkten Vergleich der geschätzten mit den realen Daten das Verhältnis aus der Standardabweichung der Regression¹⁴³ und dem Mittelwert der erklärenden Variablen sowie die Summe der quadrierten Residuen¹⁴⁴. Beide Grössen sollten möglichst tief sein.

Probleme, die sich aus der Verletzung der Prämissen des linearen Regressionsmodells ergeben, sind (Backhaus et al. 1986, S. 34ff):

- Die Linearitätsprämisse bezieht sich immer auf die Parameter des Regressionsmodells.
- Nichtlinearität: Die Beziehung zwischen abhängiger und unabhängiger Variablen ist nichtlinear oder die Verknüpfung von unabhängigen Variablen im Falle mehrerer Variablen nicht additiv. Für die Abweichungen von der Linearitätsprämisse existieren statistische Testmöglichkeiten. Hinweise geben die Autokorrelation und die Heteroskedastizität.
- Autokorrelation: Die Residuen sind voneinander nicht unabhängig. Dies ist bei Zeitreihen wichtig. Die Folge sind Verzerrungen bei der Ermittlung des Standardfehlers der Regression und bei der Bestimmung der Konfidenzintervalle für die Regressionskoeffizienten. Das gebräuchlichste Testverfahren ist der Durbin-Watson Test.
- Heteroskedastizität: In diesem Fall ist die Streuung der Residuen in einer Beobachtungsreihe über die Werte der abhängigen Variablen nicht konstant, d.h. der Betrag oder die Reihenfolge der Beobachtungen der abhängigen Variablen beeinflusst die Residualgrösse. Die Folge sind ein verfälschter Standardfehler der Regressionskoeffizienten und damit eine verzerrte Schätzung des Konfidenzintervalls.
- Multikollinearität: Regressoren sind nicht unabhängig, was zu zunehmenden Standardabweichungen der Regressionskoeffizienten und zu unzuverlässigeren Schätzungen für diese Koeffizienten führt. Beispiele sind ein signifikantes Bestimmtheitsmass bei nicht signifikanten Koeffizienten und eine geringe Stabilität der Regressionskoeffizienten. Festgestellt werden kann die paarweise Multikollinearität über die Korrelationsmatrix, für Erweiterungen sind spezielle Verfahren notwendig.

Muster in den Residuen deuten immer auf eine Verletzung der Prämissen des Regressionsmodells hin.

¹⁴³ Standardabweichung der geschätzten endogenen Variablen von der beobachteten abhängigen Variablen.

¹⁴⁴ Angaben von Dr. P. Stalder, WIF ETHZ, vom 20.4.1998.

12.2.2.2 Schätzprinzipien

Das Vorgehen wird für eine Cobb-Douglas Produktionsfunktion in einer Variablen $q=f(x)$ erläutert¹⁴⁵. Für die Schätzung der Koeffizienten der quadratischen Produktionsfunktion gilt das analoge. Eine erste zu entscheidende Frage ist, ob die Koeffizienten der Cobb-Douglas direkt aus

Gleichung 83: $q = \alpha * x^\beta$

oder nach Logarithmierung aus

Gleichung 84: $\log(q) = \alpha' + \beta * \text{Log}(x)$

geschätzt werden sollen. Die Beantwortung dieser Frage ist bedeutend, v.a. wenn der Wertebereich der endogenen Variablen relativ gross ist. In diesem Falle stellt sich die Frage nach der Gewichtung der absoluten Abweichungen bei grossen im Vergleich zu kleinen Variablenwerten. Die geschätzte Funktion gemäss Gleichung 83 präsentiert sich wie folgt:

Gleichung 85: $q = \hat{\alpha} * x^\beta + u = \hat{q} + u$

Die analoge geschätzte Funktion aus Gleichung 84 lautet:

Gleichung 86: $\log(q) = \hat{\alpha}' + \hat{\beta} * \text{Log}(x) + u$ bzw. in nicht logarithmischer Darstellung

Gleichung 87: $q = e^{\hat{\alpha}'} * x^{\hat{\beta}} * e^u = \hat{q} * e^u$

In Gleichung 85 fliessen die Abweichungen in absoluter Grösse ein, d.h. eine Abweichung von 1 bei einem Schätzwert von 10 hat das 10 mal kleinere Gewicht als eine Abweichung von 10 bei einem Schätzwert von 100. Die prozentuale bzw. relative Abweichung ist in beiden Fällen gleich gross. Sind die relativen Abweichungen vom Schätzwert relevant, so ist der logarithmische Ansatz zu wählen, da die Abweichung u in Gleichung 86 in der nicht logarithmischen Darstellung in den Multiplikationsfaktor (e-Funktion) als Exponent einfliesst. Dieser Multiplikationsfaktor wirkt als Skalierungsgrösse für die geschätzte Grösse \hat{q} (vgl. Gleichung 87). Durch diese Wirkung werden die Abweichungen nicht absolut und unabhängig, sondern relativ und abhängig von Grösse der endogenen Variablen gewichtet. Aus ökonomischer Sicht relevant ist, dass durch die logarithmierte Schätzung konkave Funktionen stärker und damit realitätsgerechter steigen. Dies ist bedeutend und korrekt, da bei kleinen endogenen Variablenwerten durch die relative Gewichtung der Abweichungen die geschätzte Regressionsfunktion im Vergleich zu grossen endogenen Variablenwerten relativ gleich nahe bei den beobachteten Werten liegt. Diese Zusammenhänge können noch graphisch veranschaulicht werden:

¹⁴⁵ Dieser Abschnitt basiert im wesentlichen auf einer Besprechung mit Dr. P. Stalder, WIF ETHZ, vom 20.4.1998.

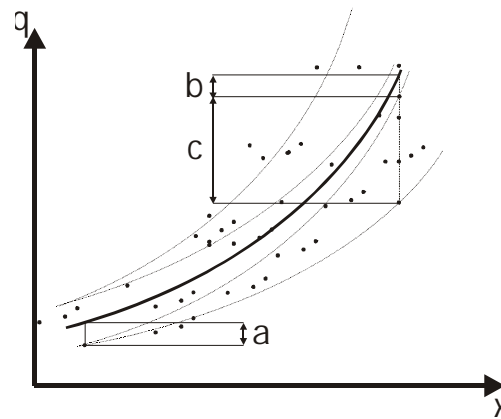


Abbildung 24: Wahl des Schätzvorgangs

In Abbildung 24 bezeichnet q die abhängige bzw. endogene (Bsp. Ertrag), x die unabhängige bzw. exogene Variable (Bsp. Düngung). Die fett ausgezeichnete Kurve bezeichnet die mittels Regression geschätzte Kurve, das dünn ausgezogene und aussen liegende Kurvenpaar bezeichnet Abweichungen von der Schätzgröße mit relativ gleichem Gewicht und absolut stark unterschiedlicher Grösse. Entsprechend bezeichnet das innen liegende dünn ausgezogene Kurvenpaar die Abweichungskurven für den Fall der direkten Schätzung mit gleichem Gewicht für die absoluten Abweichungen (Abweichung $b \cong$ Abweichung a). Die mit zunehmender Grösse von N sich öffnenden Abweichungskurven charakterisieren den Fall der logarithmischen Schätzung (Abweichungen $b+c \cong$ Abweichung a).

Aus ökonomischer Sicht ist die Logarithmierung bedeutend, da die Steigung der geschätzten Funktion ohne Logarithmierung bei stark variierenden endogenen Variablenwerten weniger realitätsnah ist.

12.2.2.2.3 Bemerkung zur knappen Datengrundlage aus EPIC

Die Schätzung von Produktions- und anderen Funktionen basiert auf der Grundlage von sechs Datensätzen aus EPIC. Da die Zahl der Beobachtungen grösser ist als die Zahl der zu schätzenden Funktionsparameter, ist die zu schätzende Funktion eindeutig bestimmbar. Die Datengrundlage ist in gewissem Sinne bereits normativ, da sie einem Simulationsmodell mit normativen Inputdaten entstammt. Damit ist der Fit der Funktion die entscheidende Grösse. Die Datengrundlage könnte beliebig erweitert werden für den interessierenden Bereich, ohne aber wirklich zusätzliche erklärende Varianz zu liefern, die einen evtl. anderen Funktionsverlauf zur Folge hätte oder zumindest die Teststatistik vertrauenswürdiger machen würde. Zusätzliche Datenpunkte im interessierenden Bereich haben die gleiche Qualität wie die bereits vorhandenen. Daher genügt die Schätzung auf der Basis einer auf den ersten Blick sehr beschränkten Datengrundlage. Dies hat aber die Konsequenz, dass die typische Teststatistik für Regressionen nicht vertrauenswürdig ist. Eine geeignete Beurteilungsgrösse ist das Verhältnis aus Standardfehler der Regression und dem Mittelwert der abhängigen Variable.

12.2.2.3 Durchführung der Schätzung

Die Schätzung der bezüglich Kultur, Bodenbearbeitung und Düngungsverfahren spezifischen Produktions- und Erosionsfunktionen erfolgt mit der Software EVIEWS¹⁴⁶. Die zu schätzenden nichtlinearen Regressionsfunktionen lauten in der Grundstruktur:

¹⁴⁶ Vgl. <http://www.eviews.com/>, Quantitative Micro Software 1998a, Quantitative Micro Software 1998b, Quantitative Micro Software 1998c.

Gleichung 88: Schätzfunktionen

Produktionsfunktion $q = f(x)$:

Quadratisch: $\text{Log}(q) = \text{Log}(C1 + C2 * x - C3 * x^2)$

Cobb-Douglas mod: $\text{Log}(q) = \text{Log}(C1 + C2 * x^{C3} - C4 * x^{C5})$

Erosionsfunktion $q = f(x)$:

Quadratisch: $\text{Log}(q) = \text{Log}(C1 + C2 * x - C3 * x^2)$

(-1)*Cobb-Douglas mod: $\text{Log}(q) = \text{Log}(C1 - C2 * x^{C3} + C4 * x^{C5})$

Mit: $C_1 \dots C_5 =$ Koeffizienten, $q =$ Ertrag/Erosion, $x =$ Bodenmächtigkeit, Cobb-Douglas mod = modifizierte Cobb-Douglas Produktionsfunktion (vgl. Abschnitt 10.8.4).

Die Koeffizienten bei den Schätzungen der modifizierten Cobb-Douglas Funktionen werden als positiv vorausgesetzt, die der quadratischen Schätzfunktionen sind in den Vorzeichen frei.

Für die Schätzung der modifizierten Cobb-Douglas Funktion ist es nötig, durch Transformation der Parameter (Quadrierung, Subtraktion und Addition von/zu 1) die Vorzeichen der Parameter vorzugeben und die Wertebereiche der Parameter einzuschränken (vgl. Abschnitt 10.8.4). Diese Transformationen ersetzen eine Schätzung der Regression unter Restriktionen. Die Transformationen gewährleisten die Konkavität der geschätzten Funktion. Das Beispiel für die Produktionsfunktion Cobb-Douglas mod lautet:

$$\text{Log}(q) = \text{Log}(C1 + C2^2 * x^{(1-C3^2)} - C4^2 * x^{(1+C5^2)})$$

Zusammen mit vorgegebenen Startwerten verbessert sich so das Konvergenzverhalten deutlich. Bei der Schätzung der quadratischen Funktionen zeigten sich numerisch keine Probleme, ausser dass die zu schätzenden Koeffizienten sehr hoch korreliert sind. Durch die Parametertransformation Zentrierung¹⁴⁷ (Verschiebung der exogenen Variablen in einen Bereich mit Mittelwert 0) konnte die Korrelation¹⁴⁸ bei der quadratischen Funktion deutlich verringert werden. Aus statistischer und numerischer Sicht war die Zentrierung nicht zwingend und sie wurde deshalb beim Schätzvorgang weggelassen.

Bei der Funktion Cobb-Douglas mod wurde keine geeignete Parametertransformation gefunden, die die Korrelation zwischen den zu schätzenden Parametern deutlich verringert hätte. Probleme aus numerischer und statistischer Sicht stellten sich in der Folge, welche auf numerischer Ebene durch die Vorgabe geeigneter Startwerte¹⁴⁹ behoben werden konnten. Mit der Vorgabe der Startwerte konvergierten die Algorithmen für die Schätzung in EViews rasch.

¹⁴⁷ Solche Parametertransformationen werden vor allem dazu benutzt, um die lineare Approximation der Parameter zur Bestimmung der Konfidenzintervalle und damit das Konvergenzverhalten der Algorithmen und die Qualität der Konfidenzintervalle der Parameter zu verbessern. Das Konvergenzverhalten kann zum Teil auch damit verbessert werden, dass den Parametern Einschränkungen auferlegt werden. Parametertransformationen verändern im Gegensatz zu Transformationen des Modells weder den deterministischen noch den stochastischen Teil des Modells. „Es sind die Qualität der linearen Approximation und die darauf beruhenden statistischen Aussagen, die damit geändert werden“ (Ruckstuhl 1996 S. 12f).

¹⁴⁸ Sie errechnet sich als Kovarianz beider Koeffizienten dividiert durch das Produkt ihrer Standardabweichungen (Köhler et al. 1995, S. 48).

¹⁴⁹ Für die oben angegebene transformierte Funktion der Form Cobb-Douglas mod wurden folgende Startwerte vorgegeben: $C1 = -20$, $C2 = 2.4$, $C3 = 0.5$, $C4 = 0.001$, $C5 = 1.7$. Eine der Schätzungen konvergierte nicht. Durch iterative Anpassung der Startwerte konnte die Konvergenz erreicht werden: $C1 = -62.4$, $C2 = 2.4$, $C3 = 0.3$, $C4 = 0.0001$, $C5 = 1.1$.

Die Schätzung erfolgte für alle Gleichungen mit der Methode NLS (nonlinear least squares regression).

Der Programmcode zur Schätzung ist zusammen mit den detaillierten Resultaten im Abschnitt A3.1 im Anhang dargestellt. In Tabelle 9 erfolgt eine konzentrierte Übersicht der Resultate (nur Koeffizienten). Die Koeffizienten sind in die in Gleichung 88 dargestellte Form umgerechnet.

RegNr	Produktion quadratisch			Produktion CD mod					Erosion quadratisch			Erosion CD mod				
	C(1)	C(2)	C(3)	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)	C(1)	C(2)	C(3)	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)
WW-ORG-STA	16.034	53.242	20.594	-48.549	98.595	0.195	1.356	4.949	11.791	-6.846	-2.863	37.946	30.569	0.080	0.446	2.918
WW-ORG-MIN-	17.465	49.842	18.767	-30.088	88.687	0.309	10.228	1.466	7.517	-4.751	-2.067	38.108	34.409	0.065	1.153	1.398
WW-MIN-STA	15.659	56.507	21.883	17.268	48.608	1.000	15.549	2.306	12.376	-8.164	-3.576	37.204	33.867	0.162	4.486	1.000
WW-MIN-MIN-	16.118	56.176	22.371	-7.574	59.725	0.368	2.127	4.747	6.920	-3.635	-1.590	36.124	32.930	0.065	1.698	1.000
WG-ORG-STA	7.240	61.930	20.718	-44.591	93.282	0.264	0.000	52.461	14.419	-6.299	-2.500	46.498	36.936	0.077	1.083	1.422
WG-ORG-MIN-	15.732	47.750	15.489	-43.401	91.449	0.207	0.000	57.015	9.916	-5.629	-2.289	44.424	39.896	0.078	2.072	1.000
WG-MIN-STA	18.973	51.634	19.441	-31.022	83.010	0.226	0.705	7.195	13.892	-6.616	-2.749	53.323	45.834	0.080	2.566	1.000
WG-MIN-MIN-	19.169	51.353	19.620	-35.786	87.942	0.214	1.233	5.110	9.353	-5.858	-2.608	43.254	40.064	0.089	2.941	1.000
KW2-ORG-STA	89.590	115.371	45.340	-42.343	266.533	0.337	65.018	1.000	0.489	-0.311	-0.146	34.204	33.890	0.002	0.009	6.095
KW2-MIN-STA	63.254	133.119	51.334	-62.410	287.672	0.387	80.724	1.000	0.802	-0.634	-0.317	36.926	36.855	0.011	0.417	1.000
KW1-ORG-STA	69.286	21.735	1.386	68.128	24.193	0.893	2.692	1.000	0.995	-0.421	-0.198	35.769	35.248	0.008	0.254	1.000
KW1-MIN-STA	61.323	30.792	5.124	39.327	47.938	0.408	0.000	2.057	4.627	-0.889	-0.310	33.001	28.954	0.011	0.000	44.354
KM-ZWI-ORG-STA	34.077	73.557	34.528	-52.528	195.030	0.381	69.731	1.000	21.790	-8.779	-3.944	51.442	37.228	0.123	2.778	1.333
KM-ZWI-MIN-STA	36.761	66.317	30.319	16.502	81.443	0.603	25.333	1.713	22.656	-8.695	-3.684	53.968	36.687	0.077	0.368	3.999
KM-ORG-STA	31.566	77.972	36.341	-19.247	145.374	0.494	53.219	1.248	27.072	-8.972	-3.751	50.293	29.836	0.133	1.425	1.756
KM-ORG-MIN-	33.048	75.224	35.052	-30.669	158.300	0.434	54.717	1.159	26.893	-9.533	-3.943	50.072	29.066	0.108	0.295	4.778
KM-MIN-STA	29.336	83.354	39.542	14.600	94.783	0.698	36.556	1.667	27.369	-8.454	-3.302	26.693	5.397	1.000	0.834	4.343
KM-MIN-MIN-	30.902	80.505	38.224	-66.545	216.009	0.374	76.659	1.000	27.259	-9.373	-3.689	51.178	29.765	0.104	0.153	6.352
KA-ORG-STA	23.675	17.626	7.422	-7.921	43.966	0.169	2.217	2.090	15.917	-4.245	-1.424	43.502	30.424	0.052	0.001	27.761
KA-MIN-STA	23.775	17.354	7.260	-11.193	46.169	0.137	1.137	3.028	17.231	-3.295	-1.000	45.139	30.209	0.044	0.000	47.993
HA-ZWI-ORG-STA	22.177	44.640	17.507	-25.174	92.861	0.330	18.549	1.128	3.578	-2.061	-1.000	39.847	38.530	0.033	1.211	1.000
HA-ZWI-MIN-STA	15.303	55.178	21.924	-51.100	129.545	0.321	30.119	1.000	3.548	-1.545	-0.551	41.130	38.733	0.017	0.163	1.228
HA-ORG-STA	16.567	50.641	17.222	-74.220	134.180	0.198	10.167	1.000	15.590	-10.340	-4.389	47.207	39.795	0.124	2.267	1.488
HA-ORG-MIN-	15.033	55.479	20.740	-83.704	133.925	0.142	0.313	10.369	9.619	-6.920	-2.994	43.192	40.686	0.102	3.219	1.000
HA-MIN-STA	11.919	62.955	24.204	-30.944	90.882	0.358	9.442	1.884	15.773	-10.418	-4.402	46.629	41.877	0.159	5.050	1.000
HA-MIN-MIN-	14.753	55.473	20.312	-32.550	99.178	0.359	16.909	1.216	9.079	-5.926	-2.503	34.470	30.380	0.098	1.592	1.284
ZWI-KM-MIN-STA	4.427	10.588	4.399	-15.295	31.328	0.232	5.464	1.000								
ZWI-KM-ORG-STA	2.809	11.000	4.097	-10.286	24.725	0.308	4.769	1.000								
ZWI-HA-MIN-STA	10.264	27.695	12.829	-30.598	77.891	0.313	22.293	1.000								
ZWI-HA-ORG-STA	8.642	27.989	12.074	-26.828	70.895	0.332	19.633	1.000								

Tabelle 9: Koeffizienten der verschiedenen Schätzfunktionen

12.2.3 Ertrag und Erosion bei einzelnen Kulturen

Tabelle 10 liefert einen Überblick über die Erträge und die Erosion bei einzelnen Kulturen. Die Werte sind mit den auf Basis der EPIC Daten geschätzten Ertrags- und Erosionsfunktionen (vgl. Tabelle 9) für die maximale und die minimale Bodenmächtigkeit berechnet und zeigen den Variationsbereich der Erträge und der Erosion in Abhängigkeit der Kultur, der Bodenbearbeitung und des Düngungsverfahrens. Zusätzlich ist der zur Erosion direkt proportionale P-Verlust / ha noch aufgeführt.

Die Erosion nimmt mit sinkender Bodenmächtigkeit zu, die Erträge sinken:

Kultur	Situation bei 1.05 m			Situation bei 0.35 m			Relative Veränderung	
	Ertrag dt/ha	Erosion t/ha	P-Verlust kg/ha	Ertrag dt/ha	Erosion t/ha	P-Verlust kg/ha	δ % Ertrag	δ % Erosion
KA-STA-HD	379.9957	13.0290	1.2117	329.3494	14.6054	1.3583	-13.33	12.10
KA-STA-MD	379.9224	14.8740	1.3833	329.5972	16.2002	1.5066	-13.25	8.92
KM-MIN-HD	99.3880	21.2307	1.9745	81.0829	24.0399	2.2357	-18.42	13.23
KM-MIN-MD	99.2896	21.4846	1.9981	80.3963	24.4305	2.2720	-19.03	13.71
KM-STA-HD	99.3703	21.7868	2.0262	80.4046	24.3915	2.2684	-19.09	11.96
KM-STA-MD	99.2625	22.1323	2.0583	79.6661	24.8147	2.3078	-19.74	12.12
KMZW-STA-HD	99.2455	16.9206	1.5736	81.5926	19.2003	1.7856	-17.79	13.47
KMZW-STA-MD	98.9669	17.5874	1.6356	82.2579	20.0636	1.8659	-16.88	14.08
KW1-STA-HD	112.5795	0.7724	0.0718	98.7236	0.8724	0.0811	-12.31	12.95
KW1-STA-MD	110.0057	1.2140	0.1129	93.4726	1.5329	0.1426	-15.03	26.27
KW2-STA-HD	68.7428	0.3234	0.0301	32.4160	0.3980	0.0370	-52.84	23.08
KW2-STA-MD ¹⁵⁰	54.4339	0.4857	0.0452	11.5579	0.6186	0.0575	-78.77	27.36
SH-MIN-HD	53.4205	5.6538	0.5258	34.9100	7.5641	0.7035	-34.65	33.79
SH-MIN-MD	53.6050	5.6168	0.5224	34.6801	7.3117	0.6800	-35.30	30.17
SH-STA-HD	53.7522	9.5725	0.8902	35.1812	12.5091	1.1633	-34.55	30.68
SH-STA-MD	54.3357	9.6868	0.9009	33.9878	12.6656	1.1779	-37.45	30.75
SHZW-STA-HD	52.7466	2.5164	0.2340	38.6560	2.9794	0.2771	-26.71	18.40
SHZW-STA-MD	52.0679	2.5330	0.2356	34.9293	3.0745	0.2859	-32.92	21.38
WG-MIN-HD	59.7923	6.5292	0.6072	41.5466	8.2265	0.7651	-30.52	26.00
WG-MIN-MD	62.4582	6.0774	0.5652	45.7385	7.6221	0.7089	-26.77	25.42
WG-STA-HD	60.4244	10.5612	0.9822	37.3774	12.5209	1.1644	-38.14	18.55
WG-STA-MD	62.7547	9.9765	0.9278	45.6632	11.9134	1.1079	-27.24	19.41
VW-MIN-HD	60.1086	4.8062	0.4470	43.6106	6.1068	0.5679	-27.45	27.06
VW-MIN-MD	61.4397	4.8567	0.4517	44.0396	5.8427	0.5434	-28.32	20.30
VW-STA-HD	60.2324	7.7594	0.7216	43.1456	9.7455	0.9063	-28.37	25.60
VW-STA-MD	61.8647	7.7461	0.7204	43.7552	9.9562	0.9259	-29.27	28.53

¹⁵⁰ Die Erosionsmengen bei Kunstwiesen im ersten Jahr sind gemäss EPIC Resultaten bei Mineraldüngung und 1.05 m Bodenmächtigkeit um mehr als einen Faktor 10 höher als bei Düngung mit Hofdünger. Diese Unplausibilität wird unter Beibehaltung der Entwicklung der Erosion in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit durch die Anpassung der Konstante der Funktion korrigiert. Der relative Effekt des Düngungsverfahrens bei Kunstwiesen im Jahr 2 wird auf die Konstante der Erosionsfunktion der Kunstwiesen im Jahr 1 übertragen. Die Basis für das erste Jahr bildet die Hofdüngervariante.

Kultur	Situation bei 1.05 m			Situation bei 0.35 m			Relative Veränderung	
	Ertrag dt/ha	Erosion t/ha	P-Verlust kg/ha	Ertrag dt/ha	Erosion t/ha	P-Verlust kg/ha	δ % Ertrag	δ % Erosion
ZWKM-STA-HD	37.3422			33.6568			-9.87	
ZWKM-STA-MD	38.1950			35.0938			-8.12	
ZWSH-STA-HD	39.2196			31.4596			-19.79	
ZWSH-STA-MD	39.7002			32.8862			-17.16	

Tabelle 10: Erträge und Erosion der einzelnen Kulturen pro Jahr bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit gemäss EPIC-Simulationen

Die Erträge der einzelnen Kulturen sinken zwischen 12% und 35% bei einer Abnahme der Bodenmächtigkeit (Mächtigkeit des A-Horizontes) von 1.05 m auf 0.35 m. Die Düngung mit organischem Dünger zeigt bei Hackfrüchten (<5%) und vor allem bei Kunstwiesen (<20%) positive Ertragswirkungen, bei Getreide leicht negative (0% bis -5%). Minimalbodenbearbeitung führt bei den Kulturen zu leicht höheren Erträgen (<2%). Bei 0.35 m Bodenmächtigkeit sind die Auswirkungen des Düngungsverfahrens und der Bodenbearbeitung ausgeprägter.

Hackfrüchte weisen den höchsten Bodenabtrag pro ha und Jahr auf. Der Anbau von Körnermais führt zu einem grösseren Abtrag als der Anbau von Kartoffeln. Dann folgen die Getreidekulturen. Wintergerste besitzt bei diesen einen grösseren Abtrag als Sommerhafer und der Sommerhafer einen grösseren Bodenabtrag als Winterweizen. Sind auf der Fruchtfolgefläche Kunstwiesen angebaut, so ist die Erosion dort am geringsten. Minimalbodenbearbeitung ohne Pflug senkt die erodierte Menge gegenüber Standardbodenbearbeitung mit Pflug. Ausser bei Kunstwiesen, wo mineralische Düngung die Erosionsmenge gegen 50 % erhöht (EPIC Ergebnis), ist der Verfahrenseffekt der mineralischen Düngung meist leicht positiv, bei einzelnen Kulturen dagegen geringfügig negativ. Prozentual betrachtet nimmt die Erosion in t/ha zwischen 8 und 34 % zu bei einer Abnahme der Bodenmächtigkeit von 1.05 m auf 0.35 m. Minimalbodenbearbeitung senkt die Erosion um ca. 40% bei Getreidekulturen, bei Körnermais dagegen lediglich um ca. 3%.

12.2.4 Festlegung der Ertrags- und Kostenniveaus

Die EPIC Resultate liefern in der absoluten Höhe nicht realitätskonforme Ertragsniveaus für durchschnittliche Bedingungen im Ackerbau. Deshalb wird der Achsenabschnitt der Ertragsfunktionen für die Modellierung korrigiert, so dass die relativen Ertragsverhältnisse zwischen den Kulturen und die absolute Ertragshöhe auf das Gebiet des Baldeggersees abgestimmt sind. Für die Festlegung der Ertragsniveaus erweisen sich die im Bericht der LBL (1999) angegebenen Werte als ungeeignet, deshalb werden für die Ertragsniveaus der einzelnen Kulturen die Durchschnitte dreier Jahre (96-98) gemäss Kostenstellenbericht der FAT (1998b) eingesetzt. Da es sich um ein typisches Maisanbaugebiet handelt, wird für die Kultur Körnermais in Übereinstimmung mit den im LP Modell des IAW (Wolf und Eggenschwiler 2000) angegebenen Ertragsniveaus der Ertrag um zusätzliche 7 dt /ha erhöht. So ergeben sich korrekte Konkurrenzbeziehungen zwischen den einzelnen Kulturen. Die relativen Verhältnisse der Ertragsentwicklungen bei Standard- oder Minimalbodenbearbeitung und Mineral- oder Hofdüngerdüngung bleiben unverändert. Die Ertragskorrekturen für die EPIC Daten sind im Anhang im Abschnitt A4.1 aufgeführt.

Die Grundlage für die Berechnung der Kosten stellen die im Deckungsbeitragskatalog der LBL (1999) aufgestellten Kostenpositionen dar. Es wird dabei von den Positionen für den konventionellen Anbau ausgegangen, da die Modellrechnungen nicht auf der Annahme einer

Extensoproduktion¹⁵¹ basieren. Die folgenden Abschnitte vertiefen zwei Aspekte der Kostenberechnung.

12.2.4.1 Bewertung der Arbeitsstunden in der Kostenrechnung

Werden die je Kultur anfallenden Arbeitsstunden entsprechend einem Normansatz von Fr. 20.- bis Fr. 25.- entlohnt, so sind arbeitsintensive Kulturen nicht attraktiv. Real wird auf einem Ackerbaubetrieb von 20 ha der grosse Teil der Arbeit durch familieneigene Arbeitskräfte erledigt, ergänzt durch Tagelöhner in Zeiten von Arbeitsspitzen. Gemäss dem Tagesverdienst auf Ackerbaubetrieben von Fr. 130.- bis Fr. 140.- (FAT 1998a, S. 144 f) dürfte der Stundenverdienst unter Fr. 20.- liegen. Deshalb wird in der Kostenkalkulation von einem Stundenansatz von Fr. 17.50 ausgegangen. Dies entspricht 8 voll anrechenbaren Stunden pro Tag. Für einen Ackerbaubetrieb von 20 ha dürfte die Zahl der Arbeitsstunden pro Tag kaum höher liegen. Auch dies führt zu einer besser der Realität angepassten Konkurrenzskraft der Kulturen, kann aber der Tatsache, dass in der Realität bei den einzelnen Aktivitäten unterschiedliche Stundenverdienste erzielt werden, nicht gerecht werden. Diese Tatsache ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Stundenverdienste eine Restgrösse der Produktion darstellen.

12.2.4.2 Aufteilung der Kosten zwecks Berücksichtigung der Intensität und von Ertragsveränderungen

In den Modellrechnungen sind die Intensitäten der Düngung fix, die Erträge dagegen eine Funktion der Zustandsvariablen Bodenmächtigkeit. Die Kosten müssen wegen der Abhängigkeit von der Zustandsvariablen in düngungs- und ertragsabhängige sowie fixe Kosten aufgeschlüsselt werden. Die Kostendaten sind im Anhang im Abschnitt A4.2 zu finden.

12.2.5 Trennung von Haupt- und Zwischenkulturen

Haupt- und Zwischenkulturen weisen in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit signifikant abweichende Ertragsverläufe auf. Die Hauptkultur und der zugehörige Zwischenfutteranbau werden in den Modellrechnungen als getrennte Aktivitäten behandelt.

12.3 Prinzip der Darstellung der Resultate

Die Resultate werden tabellarisch dargestellt und wo hilfreich mit graphischen Darstellungen versehen.

In den Resultattabellen werden im Prinzip pro Jahr die folgenden Resultatgrössen präsentiert. Sind die Grössen für die dargestellte Berechnungsvariante nicht relevant, so fehlen sie:

Resultatgrösse	Erläuterung
Erosion t/ha	Durchschnittliche Erosion in t pro ha und Jahr.
Erosion mm	Erodierte Bodenmächtigkeit in mm pro Jahr.
Erosion ofc / mm	On-farm-costs der Erosion (Kozustandsvariable) pro mm pro Jahr für eine Hektare. In der langfristigen Betrachtung (dynamisch über 66 Jahre) berücksichtigt der Wert alle induzierten künftigen Auswirkungen, bei kurzfristiger Betrachtung

¹⁵¹ Extensoproduktion ist ein Produktionsverfahren in der Schweizer Landwirtschaft, in welchem der Einsatz von Fungiziden, Insektiziden und Wachstumsregulatoren untersagt ist. Der Anbau einer Kultur im Extensoverfahren wird mit speziellen Direktzahlungen abgegolten.

Resultatgrösse	Erläuterung
	handelt es sich dagegen um den Schattenpreis des Bodens im Einzeljahr ohne Berücksichtigung irgendwelcher Folgekosten.
BS-Punkte	Erreichte Anzahl Bodenschutzpunkte gemäss IP Verordnung pro ha (Bundesamt für Landwirtschaft 1999).
SP / BS-Punkt	Bewertung eines Bodenschutzpunktes (Schattenpreis). Diese Grösse berücksichtigt bei dynamischer Betrachtung ebenfalls alle künftigen Auswirkungen einer Veränderung der betrieblichen Anzahl Bodenschutzpunkte um einen Punkt zu einem Zeitpunkt, bei kurzfristiger Betrachtung dagegen nur die wertmässigen Auswirkungen zum gegebenen Zeitpunkt. Bei langfristiger Betrachtung ist daher ein tieferer Schattenpreis zu erwarten.
P-Loss kg / ha	Phosphorverluste in kg pro ha.
SP / kg Phosphor	Wert der Veränderung des partikulären Phosphorabtrages um ein kg. Bei langfristiger Betrachtung (Laufzeit 66 Jahre) sind alle künftigen Effekte der Veränderung der Veränderung des Abtrages um ein kg berücksichtigt, bei kurzfristiger Betrachtung nur jene zum Betrachtungszeitpunkt.
SP / ha LN	Schattenpreis einer ha landwirtschaftliche Nutzfläche. Auch hier bewertet der Schattenpreis bei dynamischer Betrachtung alle künftigen Auswirkungen mit, im Gegensatz zur einzeljährlichen Betrachtung (rekursive Optimierung).
A-Horizont	Mächtigkeit des A-Horizontes in m, wobei der auf die zweite Dezimalstelle gerundete Wert des ersten Jahres den Ausgangswert darstellt.
ZF laufend	Zielfunktionswert eines spezifischen Jahres in laufenden Werten ohne Diskontierung.
ZF diskontiert	Mit der Diskontrate diskontierter Zielfunktionswert eines spezifischen Jahres. Die Summe davon über den Gesamtzeitraum wird maximiert.
Kulturen	Flächennutzung im Einzeljahr in ha für eine bestimmte Kultur.

Tabelle 11: In Tabellen dargestellte Resultatgrössen und Erläuterungen¹⁵²

Bei den Schattenpreisen ist zu beachten, dass es sich um marginale Wertaussagen handelt, die nur am Optimalpunkt gelten. Bei nichtlinearen Programmierungsmodellen ist im Falle nichtlinearer Funktionen im Gegensatz zum Fall in linearen Programmierungsmodellen kein Stabilitätsbereich für die primalen und dualen Resultatgrössen vorhanden, sondern die Resultatgrössen gelten nur am Optimalpunkt. Jede infinit dezimale Veränderung einer Resultatgrösse führt zu einer Veränderung der zugehörigen Bewertungsgrösse. Dies gilt für die primale wie die duale Lösung. Im konkreten Modellierungsfall trifft dies speziell für die Kozustandsvariablen der Differenzgleichungen zu (kein Stabilitätsbereich).

In den Tabellen wird generell das erste und das letzte Jahr des Betrachtungszeitraumes dargestellt. Weitere Jahre erscheinen nur, wenn Veränderungen in der Flächennutzung stattfinden. Erfolgen die Veränderungen kontinuierlich, so wird die Situation in jedem zwanzigsten Jahr dargestellt, bei diskreter Veränderung der Flächennutzung wird das erste Jahr mit der geänderten Flächennutzung dargestellt.

Für jede Berechnungsart (vgl. Abschnitt 12.1.2) werden in drei zusätzlichen Zeilen zusammenfassende Informationen für einzelne Grössen angegeben: Durchschnitt über den gesamten Betrachtungszeitraum pro ha und Jahr, dasselbe bezogen auf die gesamte Betriebsfläche sowie das Total über den ganzen Betrieb und den ganzen Betrachtungszeitraum.

¹⁵² Am Ende der Arbeit ist ein ausklappbares Faltblatt mit den Resultatgrössen zwecks besserer Lesbarkeit der Resultattabellen eingefügt.

12.4 Berechnung und Interpretation wichtiger Schattenpreise

Die Kozustandsvariable der Differenzgleichung für die Bodenveränderung (vgl. Abschnitt 11.2) beschreibt die betrieblichen Kosten der Veränderung der Bodenmächtigkeit (Gewinneinbussen infolge Erosion). In der langfristigen Betrachtung (simultan dynamische Optimierung) sind die Folgekosten zu allen späteren Zeitpunkten im Wert der Kozustandsvariablen inbegriffen. In der kurzfristigen Betrachtung werden diese Folgekosten nicht berücksichtigt.

Im folgenden wird die ökonomische Interpretation und die Nachkalkulation bestimmter Schattenpreise auf unterschiedliche aussagekräftige Bezugsgrößen hin ausgehend von der Restriktionsdefinition kurz erläutert.

Restriktion zur Limitierung der Phosphorverluste

Aussage der Restriktion: Der gesamte Phosphorverlust auf der Betriebsfläche in kg ist kleiner oder gleich der Limite für Phosphorverluste in kg pro ha skaliert mit der entsprechenden Anzahl ha.

Formale Umsetzung:

$$P_{\text{lim}} * \bar{b} \geq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [F_{\text{Erosion}} * \phi_{ij}(n(t)) * b_{ij}(t)] \quad \forall t = 1..T$$

mit P_{lim} = ha-bezogene P-Verlustlimite, \bar{b} = Landwirtschaftliche Nutzfläche, F_{Erosion} = Umrechnungsfaktor von Erosion in t/ha auf kg P-Verlust / ha, ϕ_{ij} = Erosionsfunktion, $n(t)$ = Bodenmächtigkeit, b_{ij} = Kultur, i = Düngungsverfahren, j = Bodenbearbeitungsverfahren.

Der Schattenpreis dieser Restriktion entspricht dem Wert der Emission eines zusätzlichen kg Phosphors.

Bei einer Betriebsfläche von 20 ha entspricht der Schattenpreis der P-Restriktion dem Wert einer Lockerung der Limite für Phosphorverluste pro ha im Umfang von 50 g auf der gesamten Betriebsfläche (1 kg / 20 ha = 0.05 kg/ha). Um die Bezugsbasis in 100 g pro ha zu erhalten, ist der ausgewiesene Schattenpreis entsprechend mit dem Faktor zwei zu multiplizieren. Dies entspricht dann dem Wert der Änderung der Limite für Phosphorverluste in der Größenordnung von 100 g pro ha auf der gesamten Betriebsfläche. Soll der durchschnittliche Wert einer solchen Änderung für eine einzelne ha errechnet werden, so ist der entsprechende Wert durch die Betriebsfläche (20 ha) zu dividieren.

Restriktion mit der Vorschrift einer minimalen Anzahl Bodenschutzpunkte gemäss IP Verordnung

Aussage der Restriktion: Die mit der Fruchtfolge erreichten Bodenschutzpunkte auf dem Betrieb sind grösser oder gleich dem Bodenschutzindex pro ha multipliziert mit der Betriebsfläche in ha.

Formale Umsetzung:

$$BS_{\text{min}} * \bar{b} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [BSPunkte_{ij} * b_{ij}(t)] \quad \forall t = 1..T$$

mit BS_{min} = ha-bezogene minimale Bodenschutzlimite, \bar{b} = Landwirtschaftliche Nutzfläche, $BSPunkte_{ij}$ = kulturspezifischer Bodenschutzindex, b_{ij} = Kultur, i = Düngungsverfahren, j = Bodenbearbeitungsverfahren.

Der Schattenpreis der Restriktion entspricht dem Wert der Veränderung der gesamtbetrieblichen Anzahl Bodenschutzpunkte um einen Punkt. Bezogen auf eine ha entspricht die Wertgrösse 1/20 Punkt. Soll nun der Wert einer Veränderung der Bodenschutzpunkte um einen

Punkt pro ha bestimmt werden, so ist der entsprechende Schattenpreis der gegebenen Restriktionsformulierung mit 20 zu multiplizieren. Damit ergibt sich der Wert der Veränderung der geforderten Anzahl Bodenschutzpunkte pro ha um eine Einheit auf den Gesamtbetrieb. Ist der durchschnittliche Wert der Veränderung um einen Bodenschutzpunkt auf eine einzelne ha gesucht, so muss der gesamtbetriebliche Wert durch die Betriebsfläche (20 ha) dividiert werden.

12.5 Fazit und Ausblick

Dieses Kapitel präsentiert Ziele, Forschungsfragen und das Konzept der quantitativen Analyse sowie die Datengrundlagen für die Modellierung, mit der das Erosions- / Phosphorproblem im Gebiet des Baldeggersees auf der Grundlage eines Ackerbaubetriebes quantitativ analysiert werden soll. Der Modellansatz besteht in der Kombination eines biophysikalischen Simulationsmodells mit einem dynamischen ökonomischen Optimierungsmodell durch Metamodellierung. Die Umsetzung des Modellansatzes der bioökonomischen Modellierung (vgl. Abschnitt 9.2) stellt auf EDV-Basis Herausforderungen im Bereich der Anzahl durchzuführender nichtlinearer Optimierungen und des Datenmanagements, die im Rahmen dieser Arbeit durch die Nutzung verschiedener Softwarepakete gelöst werden. Das folgende Kapitel geht auf das EDV Konzept für die Modellrechnungen ein.

13 EDV-Konzept für die quantitative Analyse mit Resultataufbereitung

In diesem Kapitel erfolgt eine Darstellung des EDV-Konzeptes für die quantitative Analyse. Die Beschreibung orientiert sich an der in Abbildung 25 für die einzelnen Stufen eingefügten Numerierung. Ein Kästchen bezeichnet in der Darstellung die Verwendung eines EDV-Tools.

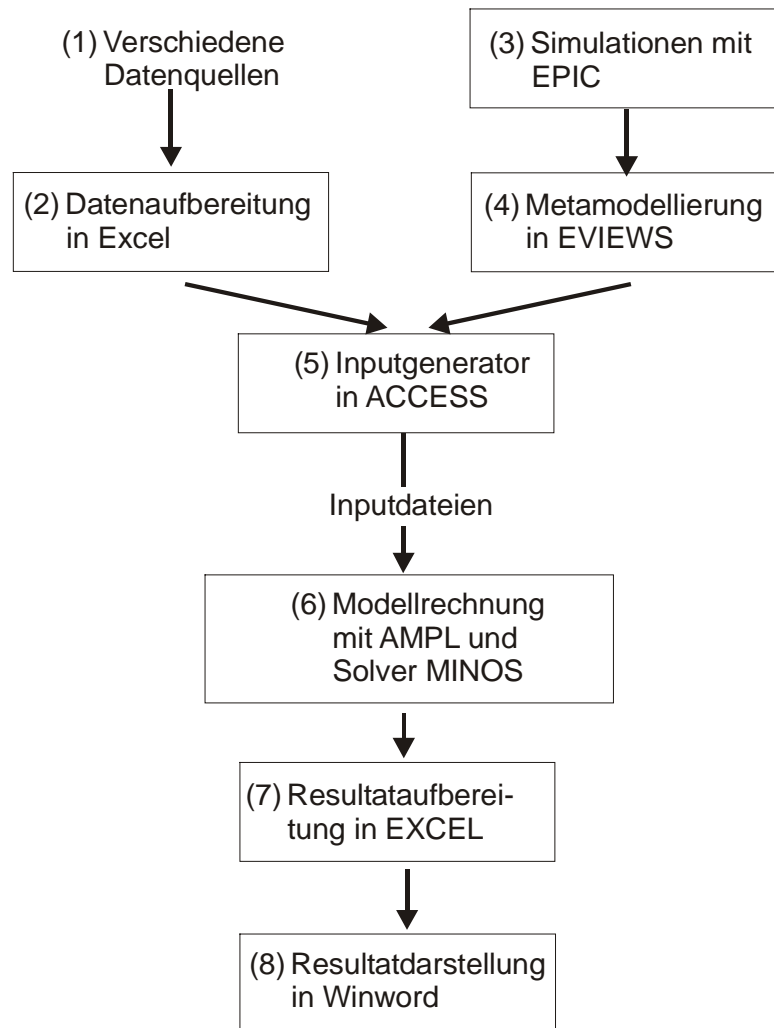


Abbildung 25: Umsetzung des Konzeptes der quantitativen Analyse auf EDV Basis

Position 1:

Verschiedene Datenquellen meist, in schriftlicher Form, liefern Datengrundlagen zur weiteren Aufbereitung in Position 2. Beispiele sind Unterlagen der FAT¹⁵³, LBL¹⁵⁴ etc.. Zum Teil sind die Informationen auch in elektronischer Form verfügbar.

Position 2:

In EXCEL¹⁵⁵ werden die Daten der verschiedenen Quellen zu Modelldatengrundlagen weiterverrechnet, bevor die Daten in den Inputgenerator in Position 5 einfließen.

¹⁵³ FAT = Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Agrartechnik in Tänikon. Vgl. auch <http://www.admin.ch/sar/fat/fathomed.html>

¹⁵⁴ LBL = Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau. Vgl. auch <http://www.lbl.ch/>.

Position 3:

Dr. Daniel Schaub vom geographischen Institut der Universität Basel führte mit dem biophysikalischen Simulationsmodell EPIC¹⁵⁶ Simulationen durch und lieferte damit auf Hektarbasis für die einzelnen Kulturen die Datengrundlage zur Schätzung der Produktions- und Erosionsfunktionen in Position 4.

Position 4:

Mit der Software für ökonomische Analysen EVIEWS¹⁵⁷ erfolgt die Schätzung der Koeffizienten der Erosions- und Produktionsfunktionen im Rahmen der Metamodellierung. Die Koeffizienten fließen ebenfalls in den Inputgenerator in Access in Position 5 ein. Die Schätzung ist programmiert, so dass mit einem Startbefehl alle Schätzungen erfolgen (Programmcode: vgl. Abschnitt A3.1).

Position 5:

Im Inputgenerator in ACCESS¹⁵⁸ werden alle Modellbestandteile in der von AMPL (vgl. Abschnitt 13.1) verlangten Form in Inputfiles geschrieben. Diese können ohne weitere Modifikationen direkt in AMPL eingelesen werden. Der Inputgenerator beruht auf dem Prinzip der relationalen Datenbank und erleichtert die Modellierung, indem Modelleinträge nur einmal gemacht werden müssen und dann überall, wo sie beim Modellbau weitere Verwendung finden, verfügbar und durch Strukturierung auch leicht auffindbar sind. Eine Darstellung des Inputgenerators erfolgt in Abschnitt 13.2.

Position 6:

Die Modellgenerierung erfolgt in AMPL¹⁵⁹ (Beschreibung vgl. Abschnitt 13.1), die Lösung des Optimierungsproblems mit dem Solver MINOS¹⁶⁰. Der AMPL Input besteht aus einer Steuerungsdatei, einer Modelldatei mit der formalen Modelldarstellung, einer Datendatei, einer Datei zur Outputgenerierung für simultan dynamische Optimierungen und einer zweiten Datei zur Outputgenerierung für die Folgejahre im rekursiven Ansatz.

Die Modellgenerierung und die Berechnungen erfolgen auf dem HP Unix Server Tornado¹⁶¹ der ETHZ. Aus dem Berechnungskonzept ergeben sich für Betrachtungen mit langfristigem Planungshorizont 252 nichtlineare Optimierungen und die entsprechende Anzahl Outputfiles. In der Betrachtung über zwei Generationen mit kurzfristigem Betrachtungshorizont ergeben sich $252 \cdot 66 = 16632$ nichtlineare Optimierungen. Je 66 Optimierungen, die in der rekursiven Optimierung zusammenhängen, sind in einem Outputfile zusammengefasst, so dass sich ebenfalls 252 Outputfiles ergeben. Jedes Outputfile besitzt eine Grösse von > 1 MB. Sämtliche Berechnungen werden mit dem quadratischen Modellansatz und demjenigen mit modifizierten Cobb-Douglas Funktionen durchgeführt. Im Total ergeben sich so 32982 durchzuführende Optimierungen. Die für einen Modellansatz notwendigen Berechnungen inkl. Generierung und Strukturierung der Outputfiles können mit einem einzigen Startbefehl aufgerufen werden. Die Berechnungen mit den unterschiedlichen Funktionstypen erfolgen zwecks Kontrolle der Lösung auf ihre globale Eigenschaft, bzw. zwecks Prüfung, ob das gefundene lokale Optimum tatsächlich ein globales Optimum darstellt. Die Lösungen beider Funktionstypen müs-

¹⁵⁵ Vgl. <http://www.microsoft.com/office/products.htmgl>.

¹⁵⁶ Vgl. Abschnitt 9.1.

¹⁵⁷ Vgl. <http://www.eviews.com/>.

¹⁵⁸ Vgl. Fussnote 155.

¹⁵⁹ Vgl. <http://www.ampl.com:80/cm/cs/what/ampl/>.

¹⁶⁰ Vgl. <http://www.sbsi-sol-optimize.com/>.

¹⁶¹ Vgl. <http://www.sd.id.ethz.ch/comp/tornado.html>. „HP V2500SCA, "tornado" is a multi-purpose parallel computer. It is used as the Application Server at the ETH.“.

sen bis auf Unterschiede, die auf die Funktionsschätzungen zurückzuführen sind, identisch sein.

Position 7:

Die 504 Outputdateien werden danach in EXCEL so aufbereitet und in Tabellenform dargestellt, dass die Darstellung den in Abschnitt 12.3 aufgeführten Darstellungsprinzipien genügt. Der gesamte Vorgang der Aufbereitung ist programmiert, so dass mit einem Startbefehl sämtliche 504 Dateien aufbereitet werden.

Position 8:

Die tabellarisch aufbereiteten Resultate aus Position 7 werden in WORD¹⁶² kopiert. Dort muss manuell die Unterteilung der Resultattabellen vorgenommen werden. Die einheitliche Formatierung sämtlicher Tabellen ist wiederum programmiert und kann mit einem einzigen Startbefehl aufgerufen werden.

13.1 AMPL

AMPL (A Modeling Language for Mathematical Programming) wird im folgenden kurz vorgestellt mit dem Ziel, den im folgenden Abschnitt beschriebenen Inputgenerator, der auf den Einsatz in Verbindung mit AMPL ausgerichtet ist, besser verständlich darstellen zu können¹⁶³.

AMPL ist eine algebraische Modellierungssprache für lineare und nichtlineare Optimierungsprobleme in kontinuierlichen und diskreten Variablen. Entwickelt wurde die Sprache in den Bell Laboratories¹⁶⁴. AMPL gewährleistet die Verbindung zu verschiedenen Solvern.

Wesentliche Eigenschaften der Modellierungssprache sind:

- Breite Unterstützung für Mengen (Sets¹⁶⁵) und Mengenoperatoren. In AMPL Modellen sind mehrfach indizierte Mengen, Zusammenfassungen von Mengen indiziert über Mengen, geordnete, ungeordnete und zirkuläre Mengen, wie auch Mengen von Zahlen möglich.
- Der Sprache liegt eine allgemeine und natürliche Syntax für arithmetische, logische und konditionale Ausdrücke zugrunde mit vertrauten Konventionen für Summation und andere iterierte Operationen.
- Unterstützung für Nichtlineare Programmierung durch Startwerte für primale und duale Variablenwerte, benutzerdefinierte Funktionen, rasche automatische Differenzierung und automatische Elimination von definierten¹⁶⁶ Variablen.
- AMPL umfasst gebräuchliche alternative Notationen für die Definition von Knoten und Kanten in Netzwerkproblemen, eine spezielle Syntax für abschnittsweise lineare Funktionen und für die spaltenweise Eingabe von linearen Koeffizienten.

AMPL offeriert daneben eine interaktive Programmierungsumgebung, Loops sowie if-then-else Befehle, die Trennung von Modell und Daten sowie zahlreiche Interfaces zu verschiedenen Solvern.

¹⁶² Vgl. Fussnote 155.

¹⁶³ Die Ausführungen stützen sich auf <http://www.ampl.com:80/cm/cs/what/ampl/key.html>.

¹⁶⁴ <http://www.bell-labs.com/>.

¹⁶⁵ Sets sind Indexmengen, die später für die Indizierung von Variablen, Parametern und Restriktionen etc. verwendet werden können.

¹⁶⁶ Vgl. Erläuterungen zu den Definitionsgleichungen im Abschnitt 4.2.6.4.

Durch die Trennung von Modell und Daten ist die Grundstruktur eines AMPL Modells gegeben. Sie wird in der folgenden Tabelle noch weiter detailliert (in Anlehnung an Müller und Richardet 2000).

Struktur eines AMPL Modellfiles

Deklaration der Aktivitätensets
Deklaration der Restriktionssets
Deklaration der Parameter
Deklaration der Variablen
Deklaration der Zielfunktion
Deklaration der Nebenbedingungen
Solve- und weitere Modellbefehle

Struktur eines AMPL Datenfiles

Liste der Elemente in Aktivitätensets
Liste der Elemente in Restriktionssets
Liste der Parameterwerte

Tabelle 12: Struktur der AMPL Inputfiles

Die in Tabelle 12 dargestellte Grundstruktur bildete einen Orientierungspunkt für den Bau des Inputgenerators in Access.

13.2 Inputgenerator in Access

13.2.1 Grundlagen für die Entwicklung eines Datenverwaltungssystems auf Datenbankbasis

Die Datenverwaltung und –aufbereitung für die Modellierung ist meist sehr zeitaufwendig und stellt aus Effizienzgründen gewisse Anforderungen (Britz 1999, S. 159):

- Benutzerfreundlichkeit: einfacher Datenzugang und Visualisierbarkeit für den Modellierer.
- Transparenz: Datenquelle, Zustand, Definition, Einheiten sind offensichtlich.
- Leistung: Der Modellierer muss sich auf methodologische Konzepte, Resultatanalyse und Simulation konzentrieren können und nicht durch das Datenbanksystem limitiert sein.
- Plattformunabhängigkeit: Lauffähigkeit auf verschiedenen Softwareplattformen.

Die Datenverwaltung im Spreadsheet besitzt die Vorteile des einfachen Datenzugriffs, der graphischen Routinen und Gruppierungsroutinen für die Visualisierung von Daten und Resultaten, der flexiblen Formatierungs- und Druckmöglichkeiten, der Verbreitung und der tiefen Kosten. Nachteile sind oft weniger offensichtlich, liegen aber in hohen Redundanzen, da Daten und Modell nicht sauber getrennt sind, in der Notwendigkeit von Wiederholungen bei ähnlichen Datenstrukturen, in selten direkten Verbindungen zu externen Datenstatistiken und in der Begrenzung auf zweidimensionale Datenstrukturen. Diese Lösung ist vor allem für kleine einmalige Modellierungsprojekte geeignet (Britz 1999, S. 160).

Datenverwaltungssysteme auf Basis einer Datenbanksoftware (Oracle, Access) werden bis jetzt noch wenig genutzt. Gründe liegen in der begrenzten Kenntnis der Möglichkeiten eines solchen Systems, der typischen Serverplattform und in den Investitions- und Unterhaltskosten. Diese Art des Datenmanagements erlaubt eine hohe Flexibilität, erfordert aber ein spezifisches Know-how (Britz 1999, S. 161). Indexstrukturen sind von fundamentaler Bedeutung bei Modellierungssprachen für die mathematische Programmierung, weil eine mathematische Abstraktion Prägnanz, Stabilität und Fehlerresistenz gewährleistet (Geoffrion 1992, S. 325).

Der Einsatz von Datenbanksoftware für die Datenverwaltung liefert von den Eigenschaften der Software her die Daten in einer Grundstruktur, wie sie von indexorientierten Modellierungssprachen verlangt werden.

13.2.2 Entwurfsprozess einer logischen Datenstruktur

Ziel: Aufstellen eines beispielhaften Datensystems für die Modellierung, das den Anforderungen einer relationalen Datenbank genügt. Es soll speziell darauf geachtet werden, dass jeder Datenwert nur an einem einzigen Ort abgespeichert ist, womit bei einer Aktualisierung von Daten Fehler möglichst ausgeschlossen werden. Im weiteren soll die Struktur so sein, dass externe Daten sehr leicht importiert werden können.

Als allgemeine Grundlage für ein Datensystem eignet sich das Relationenmodell nach Codd von 1969/70 als Ausgangspunkt (Zehnder 1985, S. 34). Dabei sind die in der folgenden Abbildung am Beispiel der Aktivitäten eines Ackerbaubetriebes dargestellten Begriffe für das Verständnis wichtig:

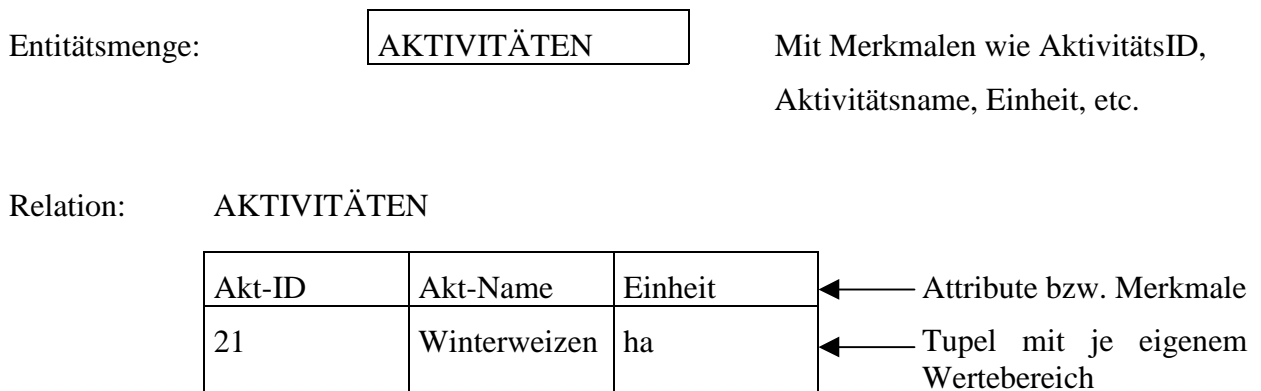


Abbildung 26: Begriffe im Zusammenhang des Datenmodells

„Ein Identifikationsschlüssel ist ein Attribut oder eine minimale Attributskombination,

- die jedes Tupel einer Relation identifiziert und
- deren Wert sich während der Existenz des Tupels nicht ändert“ (Zehnder 1985, S. 42).

Wird ein Attribut oder eine Attributskombination weggelassen, so muss die eindeutige Identifizierbarkeit verloren gehen.

13.2.2.1 Der Normalisierungsprozess

Redundanz ist in einem Datenbestand vorhanden, wenn Datenteile ohne Informationsverlust weggelassen werden können. Das Ziel der Normalisierung ist, Redundanzen innerhalb einer Relation zu vermeiden, indem die Attribute entsprechend zu Entitätsmengen zusammengefasst werden. Die Normalisierung wird schrittweise durchgeführt¹⁶⁷:

- „Eine Relation befindet sich in 1. Normalform, wenn ihre Attribute nur einfache Attributswerte aufweisen“. *Beispiel: Bei einer Personen-Relation dürfen unter dem Attribut Kinder nie mehrere Einträge pro Tupel auftreten.*
- „Eine Relation ist in 2. Normalform, wenn sie in 1. Normalform ist und jedes nicht zum Identifikationsschlüssel gehörige Attribut voll von diesem abhängig ist“. Die Attribute

¹⁶⁷ Vgl. Zehnder 1985, S. 44ff. Alle Zitate in diesem Abschnitt basieren auf der gleichen Quelle.

müssen in Relationen nach Sachgebieten gruppiert werden. Damit ist die Elimination von Redundanzen möglich. *Beispiel: Die Attribute Personalnummer und -name dürfen nur in einer Relation gemeinsam auftreten, in jeder weiteren Relation genügt es zu wissen, welches die Personalnummer ist, um dann aus der anderen Relation den Namen zu bestimmen.*

- „Eine Relation befindet sich in 3. Normalform, wenn sie in 2. Normalform ist und kein Attribut, das nicht zum Identifikationsschlüssel gehört, transitiv von diesem abhängt“. *Beispiel: Die Attribute Personalnummer, -name, Abteilungsnummer, -name (verschiedene Sachgebiete) dürfen nicht in einer Relation gemeinsam auftreten, da der Abteilungsname über die Abteilungsnummer von der Personalnummer abhängt.*

Relationen in der 3. Normalform heissen normalisiert.

Wichtig ist auch, bei Attributen zwischen globalen und lokalen zu unterscheiden:

„Ein Attribut heisst global, wenn es mindestens in einer Relation im Identifikationsschlüssel vorkommt“.

„Ein Attribut heisst lokal, wenn es nur in einer Relation und dort nicht im Identifikationsschlüssel vorkommt“. Eine Datenbasis sollte nur aus Relationen in 3. Normalform bestehen und diese sollten nur Global- und Lokal-Attribute enthalten. Dadurch wird Redundanzlosigkeit gewährleistet.

13.2.2.2 Das klassische Relationenmodell nach Codd

Zentral (Zehnder 1985, S. 50) sind in diesem Relationenmodell folgende in Tabelle 13 dargestellte Begriffe.

Wertebereich	$D = \{x_i\}$ für $i=1..n$ und x_i disjunkt	(Mögliche Werte eines Merkmals)
Relation	$R \subset D_1 \times D_2 \times \dots \times D_k$	(Relation als Teilmenge des kartesischen Produkts)
Tupel	$T \in R; T = (d_1, d_2, \dots, d_k)$ mit $d_1 \in D_1 \dots$	(Datensatz mit Attributen)
Attribut	A_i ; in R auftretende Werte aus D_i	(vorhandene Merkmalswerte)

Tabelle 13: Begriffe im Zusammenhang mit dem klassischen Relationenmodell

Da die Relationen bei dieser Definition bei den Attributen nur einfache Attributswerte aufweisen, sind sie in erster Normalform.

Gemäss Zehnder (1985, S. 63) ist der Entwurf eines Datensystems ein iterativer Prozess, der dem „stepwise refinement“ bei der Programmierung in einer höheren Sprache ähnelt. Zehnder unterscheidet (1985, S. 68) 8 Schritte, die zur Definition einer konsistenten Datenbasis hilfreich sind. Sie stellen Strukturregeln dar und geben damit auch Etappenziele vor.

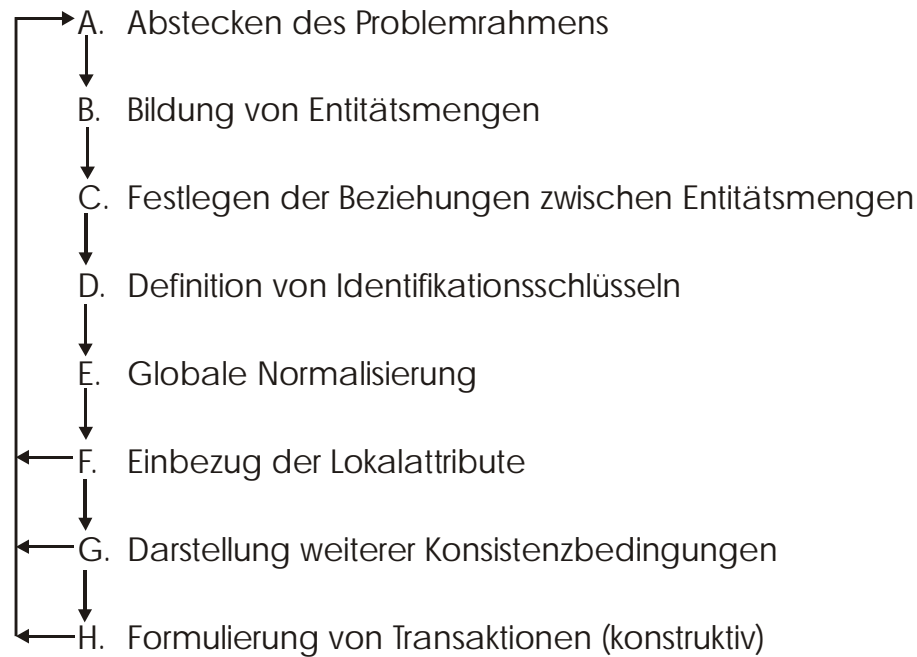


Abbildung 27: Logischer Entwurfsprozess (Quelle: Zehnder 1985, S. 68)

Diese 8 Schritte werden im folgenden am Beispiel des Inputgenerators für die Modellierung des Kontrolltheorieproblems aus dem Bereich Erosion und Phosphor exemplarisch angewandt.

A: Abstecken des Problemrahmens

Für die Modellierung eines Ackerbaubetriebes müssen die möglichen Anbauaktivitäten (Aktivitäten) formuliert werden. Jede Aktivität verursacht abhängig vom Ausmass des Anbaus und der gewählten Intensität direkte Kosten und liefert entsprechende Erträge. Das Verfahren der Bodenbearbeitung und Düngung ist frei wählbar. Zusätzlich entstehen externe Kosten in Form von Bodenerosion und Phosphorabschwemmung. Beim Anbau müssen Fruchtfolgebedingungen eingehalten werden.

Alle diese Daten müssen in die Datenbank eingegeben und in einer Form ausgegeben werden können, die der Software für die Modellformulierung genügt.

B: Bildung von Entitätsmengen

Für den im Schritt A dargestellten Modellrahmen ergeben sich folgende Entitätsmengen ohne die Angabe ihrer jeweiligen Attribute:

• HAUPTAKTIVITÄTEN
• BODENBARBEITUNGSVERFAHREN
• DÜNGUNGSVERFAHREN
• ERTRAGSFUNKTIONSKOEFFIZIENTEN
• PREISE UND KOSTEN
• KOEFFIZIENTEN DER EROSIONSFUNKTION

Tabelle 14: Entitätsmengen des Erosions- und Phosphormodells

Würden beispielsweise die Hauptaktivitäten noch unterteilt in die Entitätsmengen Pflanzliche Hauptaktivitäten und Tierische Hauptaktivitäten, so wären bei einer alle Hauptaktivitäten umfassenden Entitätsmenge Überlappungen vorhanden. In einem solchen Fall sind neben den beiden Entitätsmengen noch die umfassenden Entitätsmengen (vgl. Hauptaktivitäten in Tabelle 14) zu bilden.

C: Festlegen der Beziehungen zwischen Entitätsmengen

Zwischen einzelnen Entitätsmengen (EMx) bestehen in der Regel Beziehungen, bzw. gerichtete Assoziationen. Diese werden von Zehnder (1985, S. 37) wie folgt differenziert:

Assoziationstyp (EM1, EM2)	Entitäten aus EM2, die jeder Entität aus der Menge EM1 zugeordnet sind
1: (einfache Assoziation)	genau eine
c: (konditionelle Assoziation)	keine oder eine (c=0 1)
m: (multiple Assoziation)	mindestens eine (m ≥ 1)
mc: (multipel - konditionelle Assoziation)	keine, eine oder mehrere (mc ≥ 0)

Tabelle 15: Assoziationstypen (Quelle: (Zehnder 1985, S. 37)

Diese Beziehungen werden in der folgenden Abbildung für die im Schritt 3 aufgeführten Entitätsmengen dargestellt.

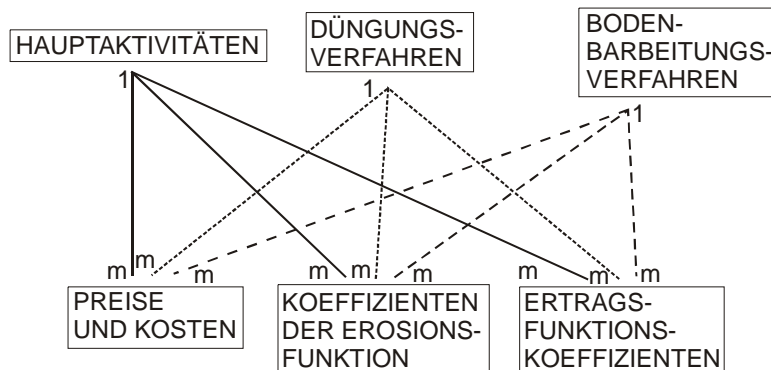


Abbildung 28: Entitätenblockdiagramm

In diesem Schritt werden im Prinzip alle Beziehungen und nicht nur hierarchische zugelassen. Das Datensystem ist in der Regel in diesem Schritt noch nicht normalisiert, das in Abbildung 28 dargestellte schon. Wären die Entitäten im oberen Teil in einer Entität zusammengefasst, so würde der dritte Normalisierungsschritt fehlen. Wären in der Entität Preise und Kosten zusätzlich zu den Identifikationsschlüsseln noch Nichtschlüsselattribute der Entitäten im oberen Teil vorhanden, wäre der zweite Normalisierungsschritt noch nicht ausgeführt. Sind bei einem Attribut in einem Tupel mehrere Einträge vorhanden, so fehlt auch der erste Normalisierungsschritt noch.

D: Definition von Identifikationsschlüsseln

Die Identifikationsschlüssel bestehen bei den Entitäten im oberen Bereich von Abbildung 28 nur aus je einem Attribut (ID). Zusätzlich sind lokale Attribute wie Name, Kommentar, Einheit vorhanden, die aber nicht als Identifikationsschlüssel gelten, sondern lokale Attribute darstellen.

Im unteren Bereich der Abbildung besteht der Identifikationsschlüssel aus den drei ID's der Entitäten im oberen Bereich. Der Schlüssel jedes Tupels beschreibt eine Hauptaktivität mit ihrer Düngungsvariante und dem Bodenbearbeitungsverfahren und entspricht im Sinne der Modellierung einer Modellaktivität.

E: Globale Normalisierung

In diesem Schritt müssen alle nichthierarchischen Beziehungen eliminiert werden. Dies kann durch das Einführen von zusätzlichen Hilfsrelationen geschehen. Das in Abbildung 28 dargestellte Entitätenblockdiagramm ist bereits global normalisiert. Die Stufen der globalen Normalisierung sind im Text zu Abschnitt 13.2.2.1 zu finden.

F: Einbezug der Lokalattribute

In diesem Schritt werden zu jeder Entität sinnvolle Lokalattribute festgelegt. Dies wird im folgenden exemplarisch für die in Abbildung 28 dargestellten Entitäten durchgeführt, wobei in Grossbuchstaben Identifikationsschlüssel und in Normalschrift Lokalattribute dargestellt sind.

Entität	Identifikationsschlüssel	Lokalattribute (Beispiele)
Hauptaktivität	ID-HA	Name, Beschreibung, Einheit
Düngungsverfahren	ID-DV	Name, Beschreibung
Bodenbearbeitungsverfahren	ID-BB	Name, Beschreibung
Preise und Kosten	ID-HA, ID-DV, ID-BB	Düngerkosten, Pflanzenschutz
Koeffizienten der Erosionsfunktion	ID-HA, ID-DV, ID-BB	Koeffizienten a,b,c einer quadratischen Funktion
Ertragsfunktionskoeffizienten	ID-HA, ID-DV, ID-BB	Koeffizienten a,b,c einer Cobb-Douglas Funktion

Tabelle 16: Einbezug von Identifikationsschlüsseln und Lokalattributen

In diesem Schritt kann es dazu kommen, dass noch einmal bei Schritt 2 begonnen werden muss.

G: Darstellung von weiteren Konsistenzbedingungen

Konsistenzbedingungen sind in diesem Schritt soweit nötig modellintern oder modellextern durch Programmierung zu bestimmen. Dieser Schritt gehört wie die vorhergehenden zur Datenbeschreibung und noch nicht zur Datenmanipulation. Beispiele für Konsistenzbedingungen sind Wertebereiche für Attributwerte bei wirtschaftlichen Koeffizienten, Vorzeichen bei technischen Koeffizienten etc..

H: Formulierung von Transaktionen (konstruktiv)

Das Resultat dieses Schrittes muss ein System von geeigneten und konsistenzerhaltenden Operationen (Transaktionen) zur Manipulation des Datenbestandes sein (Bsp. Dateneinleitungsprozeduren). Die Sicherstellung des Betriebes einer Datenbank und die Verhinderung inkonsistenter Zustände (Erfüllung modellinhärenter und modellexterner Konsistenzbedingungen) ist zentral und es sind vor allem die weiteren Auswirkungen von Datenmanipulationen (Fortpflanzung) zu beachten, wie das Löschen und das Hinzufügen von Tupeln in einzelnen Relationen.

13.2.3 Inputgenerator für AMPL in Access

Für ein besseres Verständnis wird im folgenden zuerst der Modellierungsprozess in AMPL für die Generierung und Lösung eines Modells kurz skizziert. Nach Aussage der Autoren des AMPL-Handbuches umfasst die praktische mathematische Programmierung in der Regel folgende Schritte (Fourer et al. 1993, S. xii f, abgeändert):

1. Formulierung eines Modells (ein abstraktes System von Variablen, Zielen, Restriktionen und Parametern), das die allgemeine Form des zu lösenden Problems darstellt (vgl. Inputgenerator: Definition von Sets und Elementen, Parameter-, Variablen- und Restriktionsnamen, wie sie für die Definition von Variablen und Restriktionen, Parametern und für die Datenspezifikation nötig sind). Erst danach werden sinnvollerweise in Datentabellen Daten bereitgestellt, wie der nächste Schritt angibt.
2. Sammlung von Daten, die einen Problemzustand oder mehrere davon definieren.
3. Generierung und Formulierung einer spezifischen Zielfunktion und von Restriktionen aus den bereits erstellten Modellbestandteilen und Daten. Dies bedeutet die algebraische Ausformulierung unter Benutzung der bereits definierten Elemente, Sets, Variablen, Restriktionen und Parameter.
4. Lösung des Problems/Modells – Laufenlassen eines Programms mit einem Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Werte der Variablen.
5. Resultatanalyse.
6. Verbesserung von Modell und Daten und Neubeginn.

Der Inputgenerator in Access erleichtert die Schritte 1-3. Die folgende Abbildung zeigt zur Illustration den Startbildschirm (Subset = Set¹⁶⁸).

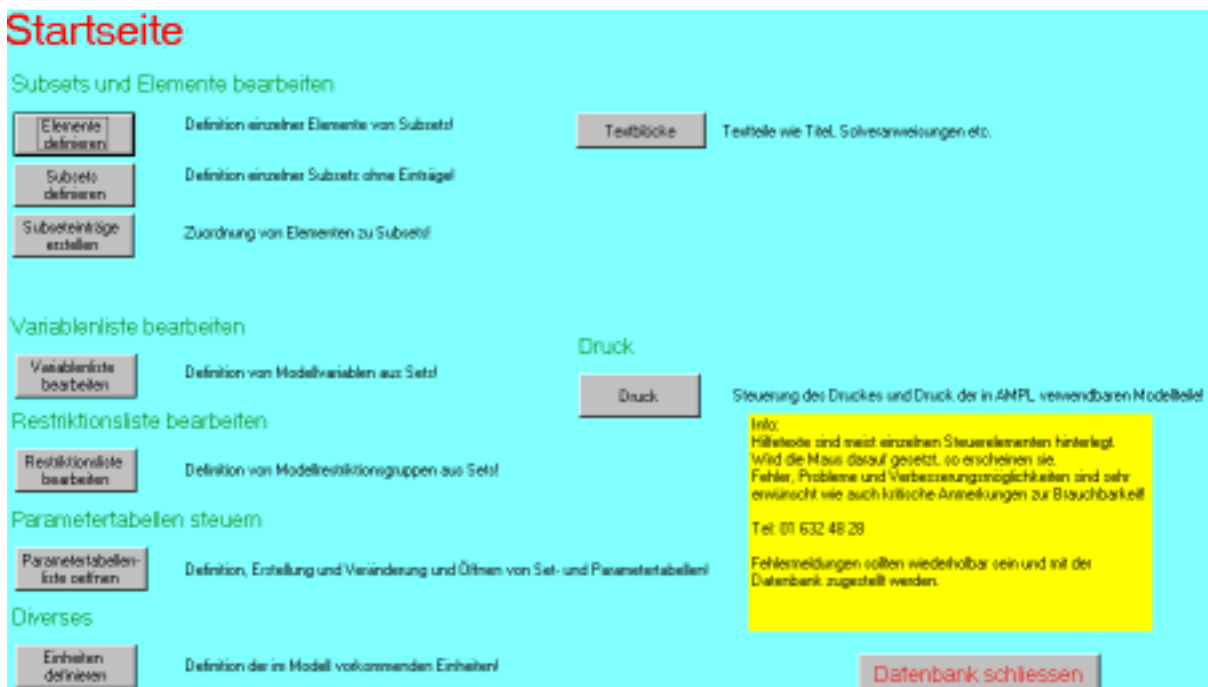


Abbildung 29: Startbildschirm des Inputgenerators

¹⁶⁸ Im Inputgenerator entspricht der Begriff Subset dem Setbegriff in AMPL. Bei der Eingabe von Setelementen wird automatisch ein Set mit allen Elementen generiert. In diesem Sinne umfassen die Elementeinträge in allen weiteren Sets Teilmengen davon.

Auf der Basis des Startbildschirms wird im folgenden Abschnitt die Funktionalität erläutert.

13.2.3.1 Funktionalität des Inputgenerators

Button Elemente definieren:

Bei der Definition der Elemente können diese nach vorhandenen Sets gefiltert oder solchen zugewiesen werden. In der Namensfestlegung wird Eindeutigkeit erzwungen. Die Hauptunterteilung der Elemente besteht in der Unterteilung in Elemente von Restriktions- und Variablenindizes. Die Festlegung von Einheiten und eine Beschreibung wird erzwungen.

Button Subsets definieren:

Bei der Definition der Subsets/Sets können diesen Elemente zugewiesen werden. Gleichzeitig ist es möglich, Sets aus Operationen anderer Sets zu definieren. Die Hauptunterteilung der Sets besteht in der Unterteilung in Restriktions- und Variablensets. Eingaben für Beschreibungen und die Festlegung der Einheiten werden erzwungen.

Button Subseteinträge erstellen:

In diesem Fenster können bestehenden Sets neue Elemente zugewiesen werden. Gleichzeitig ist es möglich, nach Subset und Elementnamen zu filtern. So kann bestimmt werden, welches Element in welchen Sets vorkommt und welche Elemente ein Set enthält. Eine Unterteilung in Aktivitäts- und Restriktionseinträge ist gewährleistet.

Button Variablenliste bearbeiten:

In diesem Fenster werden Variablen mit ihrer Indizierung und mit ihren Wertebereichen angegeben. Benötigte Einträge aus der Liste der Sets oder Elemente können beliebig gefiltert und übernommen werden. Eine Beschreibung und Festlegung der Einheit wird erzwungen.

Button Restriktionsliste bearbeiten:

Im Fenster für die Definition der Restriktionen wird der zugehörige Indexausdruck und die Restriktion selbst eingegeben. Es stehen alle anderen Modellbestandteile (Elemente, Sets, Variablen) mit zugehörigen Filtermöglichkeiten zur Verfügung. Die Festlegung der Einheiten und die Beschreibung werden erzwungen.

Button Parametertabellenliste öffnen:

Im Fenster werden Parameter- und Settabellen mit ihren Indexmengen und weiteren Steuerungsmöglichkeiten definiert. Bei der Erstellung werden die relationalen Beziehungen automatisch eingefügt. Bestehende Tabellen können kopiert und mit weiteren Spalten versehen werden. Dabei bleibt die Relationalität gewährleistet. Benötigte andere Modellbestandteile stehen für die Übernahme zur Verfügung.

Button Einheiten definieren:

Die in diesem Fenster festgelegten Einheiten stehen bei der Modellierung überall zur Verfügung.

Button Textblöcke:

In diesem Fenster können in der Modellstruktur zwischen die Modellkomponenten „Elemente“, „Sets“, „Variablen“, „Restriktionen“ sowie am Anfang und Ende beliebige Modellbefehle oder Texterläuterungen eingegeben werden.

Button Druck:

Im zugehörigen Fenster kann die Generierung der Inputdateien für AMPL gesteuert und überwacht werden. Der Ausdruck von Parametertabellen kann einzeln definiert werden. Zu-

sätzlich können die Teildateien (Dateien der Setdefinition, der Parameterdefinition, der Variablendefinition, der Restriktionsdefinition, der Setelemente und der Parametertabellen) dem Typ entsprechend in eine Modell- und eine Datendatei zusammengefasst werden. Die Inputdateien entsprechen in der Syntax den Anforderungen von AMPL.

Hilfsfunktion für Parametertabellen:

Parametertabellen sind über Sets indiziert. Eine Hilfsfunktion erlaubt, die bei der Tabellenerstellung definierten Indexspalten mit allen möglichen Kombinationen der Setelemente hierarchisch aufzufüllen.

Durch die erzwungene Eingabe von Einheiten und Beschreibung ist der wichtige Aspekt der Modelldokumentation berücksichtigt. Gemäss Lüthi (1999, S. 10) kommt der Modelldokumentation eine zentrale Bedeutung zu, v.a. wenn verschiedene Personen damit arbeiten und das Modell warten.

13.3 Bewertung des EDV Konzeptes

Das EDV Konzept erweist sich in der Anwendung als bestens geeignet. Wiederholungen sämtlicher Modellrechnungen sind bis zur druckfertigen Modelldarstellung mit minimalem Aufwand durchführbar, was bei Modellierungs- oder Datenfehlern sehr nützlich ist. Die Verwendung der algebraischen Modellierungssprache AMPL ist hilfreich, da die Anforderung der mathematischen Konsistenz mögliche Fehler verhindert. Zudem sind Modellanpassungen mit geringem Aufwand durchführbar und die Modelldarstellung ist durch die Trennung zwischen den Modelldaten und dem formalen Modell sowie durch die weiteren Möglichkeiten wie Indizierung etc. transparent und kompakt.

Der Inputgenerator in ACCESS erleichtert die Modellformulierung und Dateneingabe bedeutend, indem wiederholte Eingaben gleicher Bezeichnungen vermieden werden und Hilfsfunktionen verfügbar sind. Die Relationalität gewährleistet die Vermeidung von Datenleichen und die Weitergabe von Veränderungen. Letzteres garantiert Konsistenz bei der Namensfestlegung. Die Modell- und Datendateien werden in der von AMPL verlangten Form ausgegeben. Der Inputgenerator wird im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes PRIMALP¹⁶⁹ am Institut für Agrarwirtschaft der ETHZ für eine hochdetaillierte Sektormodellierung eingesetzt und erleichtert das Datenmanagement bedeutend.

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der Modellrechnungen zur Analyse des Erosions- / Phosphorproblems im Gebiet des Baldeggersees diskutiert.

¹⁶⁹ Vgl. <http://www.primalp.ethz.ch/>

14 Resultate

Dieses Kapitel diskutiert die Resultate der Modellrechnungen mit dem bioökonomischen Optimierungsmodell (Produktions- und Erosionsmodell) aus Kapitel 9. Die Diskussion orientiert sich am Konzept für die quantitative Analyse im Abschnitt 12.1. Die allgemeinen Grundlagen für das Verständnis der Resultatdiskussion, das Abkürzungsverzeichnis für die Kulturen, die Prinzipien der Resultatdarstellung sowie die Datengrundlagen (Ertrag und Erosion in Abhängigkeit von Düngung, Bodenbearbeitung, Bodenmächtigkeit und Kultur) sind im Abschnitt 12.2 aufgeführt.

In den Modellrechnungen wird das Erosions- / Phosphorproblem im Gebiet des Baldeggersees auf einem Ackerbaubetrieb von 20 ha quantitativ analysiert. Dabei interessieren die betrieblichen Kosten der Erosion und die Vermeidungskosten. Es werden zudem verschiedene Massnahmen und Instrumente der Umweltpolitik zur Bekämpfung des Erosions- / Phosphorproblems verglichen.

14.1 Vergleich des privaten Optimums mit dem sozialen Optimum

14.1.1 Einleitung

In den folgenden Ausführungen werden im wesentlichen die im Anhang A5 aufgeführten Resultate diskutiert. Wo hilfreich, werden numerische Resultate aufgelistet und graphisch dargestellt, ansonsten wird auf die im Anhang dargestellten Resultate verwiesen.

14.1.2 Erosionsentwicklung im Zeitablauf aus privater Sicht

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft die Erosionsentwicklung für eine Ausgangsbodenmächtigkeit von 1.05 m. Der Planungshorizont beträgt für die langfristige¹⁷⁰ Variante 66 Jahre, für die kurzfristige 1 Jahr, wobei bei der kurzfristigen Variante über den Planungshorizont der langfristigen Variante rekursiv iteriert wird.

¹⁷⁰ Nur die langfristige Sicht ist wirklich gewinnmaximierend, da in der langfristigen Betrachtung die Folgekosten der Entscheide berücksichtigt werden.

Jahr	Erosion t / ha	Erosion mm / ha	Erosion ofc / mm ¹⁷¹	BS- Punkte	P- Loss kg / ha	SP / ha LN	A- Hori- zont	ZF laufend	ZF diskontiert	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	KM- STA- MD	WW- STA- MD
Langfristig-Privat-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 0													
1	12.06	0.86	6.88	44.0	1.12	2'018	1.05	42'536	40'128	2.00	2.00	8.00	8.00
66	12.12	0.87	0.01	44.0	1.13	44	0.99	42'018	898	2.00	2.00	8.00	8.00
Ø / Einheit	12.09	0.86	1.80	44.0	1.12	523	1.02	2'115	524				
Ø / LN / J	241.77		36.06		22.48	10'455		42'291	10'485				
Σ 66	15'957	56.99	2'380		1'484	690'051		2'791'200	691'985				
Kurzfristig-Privat-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 0													
1	12.06	0.86	0.36	44.0	1.12	2'006	1.05	42'536	40'128	2.00	2.00	8.00	8.00
66	12.12	0.87	0.01	44.0	1.13	45	0.99	42'018	898	2.00	2.00	8.00	8.00
Ø / Einheit	12.09	0.86	0.10	44.0	1.12	524	1.02	2'115	524				
Ø / LN / J	241.77		2.08		22.48	10'485		42'291	10'485				
Σ 66	15'957	56.99	137.38		1'484	691'985		2'791'200	691'985				

Tabelle 17: Resultate aus privater Sicht bei Diskontfaktor 1.06 und Bodenmächtigkeit 1.05 m (monetäre Werte sind diskontiert)

¹⁷¹ In der kurzfristigen Betrachtung handelt es sich um den Schattenpreis für einen mm Boden, da keine Folgekosten berücksichtigt werden. Die on-farm-costs der Erosion entsprechen in der langfristigen Betrachtung dem Wert der Kozustandsvariablen (Lagrangemultiplikator) der Differenzgleichung, die die Veränderung der Bodenmächtigkeit abbildet. In der kurzfristigen Betrachtung gibt der Schattenpreis der die Bodenmächtigkeit festlegenden Restriktion die on-farm-costs der Erosion an (Lagrangemultiplikator).

Die Flächennutzung ist bei kurz- und langfristiger privater Betrachtung über den gesamten Betrachtungshorizont konstant. Dies führt trotz unterschiedlichem Planungshorizont zu einer kurz- und langfristig identischen Erosionsmenge pro Jahr, über den ganzen Zeitraum, wie auch für die erodierten mm Bodenmächtigkeit. Die Erosionsmenge und damit auch die erodierten mm Bodenmaterial steigen im Zeitablauf, was auf die biophysikalischen Eigenschaften der Erosionsfunktion zurückzuführen ist. Ein deutlicher Unterschied besteht in den on-farm-costs der Erosion zwischen kurz- und langfristiger Betrachtung. Bei der langfristigen privaten Betrachtung betragen die on-farm-costs, d.h. der über den gesamten künftigen Zeitraum bewertete betriebliche Schaden der Erosion (Schadenskosten eines mm Erosion pro ha und entgangene Gewinne in den Folgejahren), im ersten Jahr Fr. 6.88 pro mm Erosion für eine Hektare Betriebsfläche. Bei kurzfristiger privater Betrachtung beträgt der Schaden eines mm Erosion je Hektare lediglich Fr. 0.36 (Faktor 20 geringer). Ein kurzfristig denkender Akteur hat also im ersten Jahr Nutzungskosten von knapp Fr. 7.-, ein langfristig denkender solche von Fr. 138.- auf seine ganze Betriebsfläche. Der kurzfristig denkende Entscheider fällt daher seine Entscheide unter einer falschen Kostenannahme und nur der Entscheider mit einem langfristigen Betrachtungshorizont berücksichtigt auch die Folgekosten seiner Entscheide und maximiert im Falle der Gewinnmaximierung seine Gewinne auch tatsächlich.

Infolge der Diskontierung sinken die Gegenwartswerte der on-farm-costs der Erosion auf nahezu Fr. 0.- bei beiden Betrachtungen. In laufenden Werten (vgl. Tabelle 15 bis Tabelle 17 in den Resultattabellen im Anhang) sinken die on-farm-costs der Erosion in der langfristigen Betrachtung im Zeitablauf, in der kurzfristigen Betrachtung dagegen steigen sie. Die unterschiedliche Entwicklung hängt mit dem Verlauf der Produktionsfunktion in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit und den in der langfristigen Betrachtung berücksichtigten intertemporalen Kosten der Erosion zusammen. Kurzfristig entstehen Kosten durch sinkende Gewinne infolge abnehmender Bodenmächtigkeit. Durch den konkaven Verlauf der Produktionsfunktion steigen die Gewinnminderungen pro mm verringerte Bodenmächtigkeit. In der langfristigen Betrachtung müssen dagegen im Zeitablauf immer weniger intertemporale Kosten berücksichtigt werden. Da die Reduktion der zu berücksichtigenden intertemporalen Kosten der Erosion grösser ist als die Zunahme des marginalen Gewinnes bei sinkender Bodenmächtigkeit, sinken die on-farm-costs der Erosion in der langfristigen Betrachtung und in der kurzfristigen steigen sie.

Obwohl die Schadenskosten im ersten Jahr der langfristigen Betrachtung auf dem Gesamtbetrieb einen über den ganzen Zeitraum bewerteten Schaden von über Fr. 138.- verursachen, wird keine Fruchtfolge mit verminderter Erosion gewählt. Die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung (Erosion) sind geringer als die Opportunitätskosten Ressourcenbewahrung (erosionsmindernde Fruchtfolge)¹⁷². Dies gilt für den gesamten Betrachtungszeitraum, da keine Veränderungen in der Kulturenwahl zu beobachten sind. Die Konstanz in der Kulturenwahl ist zum einen auf die lineare Homogenität in den Variablen der Flächenallokation und zum anderen auf die diskret formulierten Alternativen der Kulturenwahl mit geringerer Erosivität zurückzuführen. So sind keine marginalen Veränderungen möglich, die bei Veränderungen der Opportunitätskosten zu erwarten wären.

Die Zahl der auf dem Betrieb erreichten Bodenschutzpunkte liegt konstant bei 44 pro ha. Die partikulären Phosphorverluste liegen über den gesamten Zeitraum über einem kg / ha. Der

¹⁷² Vgl. für eine ausführlichere Darstellung des Konzeptes der Opportunitätskosten der Ressourcennutzung: Hediger (2000) und für die theoretische Erläuterung Perman et al. (1996, S. 178). Der Wechsel von der erosiven Fruchtfolge zu einer weniger erosiven Fruchtfolge erfolgt am Punkt, wo die Opportunitätskosten der Nutzung der Ressource den Opportunitätskosten der Bewahrung entsprechen (vgl. Perman et al. 1996, S. 178 und Hediger 2000). Solange die Opportunitätskosten der Bewahrung grösser sind erfolgt kein Wechsel zu einer erosionsärmeren Fruchtfolge.

Wert des Bodens, der Schattenpreis der Fläche, sinkt im Zeitablauf von Fr. 2018.- / ha diskontierungsbedingt auf Fr. 44.- /ha. In laufenden Werten beträgt der Schattenpreis des Bodens im letzten Jahr der Betrachtung ca. Fr. 1950.-, der Bodenwert sinkt infolge der Erosion um weniger als 5 %. Die Bodenmächtigkeit nimmt im gesamten Zeitraum um 6 cm auf 0.99 m pro ha ab, was eine Reduktion des gesamtbetrieblichen Gewinnes in laufenden Werten um 2,2% auf Fr. 42'018.- zur Folge hat.

14.1.3 Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangsbodenmächtigkeiten

Der Vergleich der Tabellen 9 bis Tabelle 11 in den Resultattabellen im Anhang zeigt die Auswirkungen von drei unterschiedlichen Ausgangsbodenmächtigkeiten¹⁷³ (1.05m, 0.7m, 0.35m) bei einer Diskontrate von 6%. Die erodierte Bodenmenge steigt mit abnehmender Bodenmächtigkeit. Entsprechend nehmen auch die erodierten mm im Zeitablauf von 57 mm auf 71 mm pro ha zu. Die on-farm-costs der Erosion steigen mit sinkender Bodenmächtigkeit bei kurz- und langfristiger Betrachtung deutlich.

	Bodenmächtigkeit					
	1.05 m		0.7 m		0.35 m	
Jahr	kurzfristig	langfristig	kurzfristig	langfristig	kurzfristig	langfristig
1	0.39	7.29	1.32	23.60	1.62	29.09
66	0.54	0.54	1.48	1.48	1.75	1.75

Tabelle 18: Entwicklung der on-farm-costs der Erosion bei abnehmender Bodenmächtigkeit in Fr. pro mm je ha LN in laufenden Werten

Die Entwicklung der on-farm-costs ist auf die Zunahme der Erosion bei sinkender Bodenmächtigkeit und die damit einhergehenden höheren Kosten in den Folgejahren bei langfristiger Betrachtung zurückzuführen. Sie erhöhen sich bei einer Abnahme der Bodenmächtigkeit auf 0.35 m bei kurz- und langfristiger Betrachtung annähernd um einen Faktor 4.

Erosionsmindernde Fruchtfolgen werden mit sinkender Bodenmächtigkeit attraktiver, was sich in der langfristig privaten Rechnung bei 0.35 m Ausgangsbodenmächtigkeit in der Wahl der weniger erosiven Winterweizenkultur im ersten Jahr und der erosiveren Getreidekultur Wintergerste in den Folgejahren ausdrückt. Bei dieser Ausgangsbodenmächtigkeit sind die on-farm-costs der Erosion im ersten Jahr höher als die Opportunitätskosten der erosionsärmeren Fruchtfolge mit Winterweizen anstelle von Wintergerste. Bei höherer Bodenmächtigkeit ist zudem die Kultur Winterweizen gegenüber der anderen Getreidekultur konkurrenzkräftiger. Die Zahl der mit der optimalen Fruchtfolge erreichten Bodenschutzpunkte steigt bei der Bodenmächtigkeit von 0.35 m durch den Ersatz von Winterweizen durch Wintergerste von 44 auf 48 Punkte / ha. Die Phosphorverluste nehmen proportional der Erosion mit sinkender Bodenmächtigkeit zu, der Wert des Bodens sinkt entsprechend der verringerten Produktivität in Analogie zu den verringerten Zielfunktionswerten.

Bei einer Bodenmächtigkeit von 0.35 m wird nur noch einjährige Kunstwiese angebaut. Die Erträge der Kunstwiese sinken im zweiten Jahr um mehr als 50% im Gegensatz zu ca. 15% im ersten Jahr¹⁷⁴.

¹⁷³ Zur Begründung für die Wahl unterschiedlicher Ausgangsbodenmächtigkeiten, vgl. Fussnote 140.

¹⁷⁴ Dies ist auf einen Datenfehler aus den Simulationen mit dem EPIC Modell des Geographischen Instituts der Universität Basel zurückzuführen. Im Rahmen der Arbeit war es nicht möglich, diesen zu beheben.

14.1.4 Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten

Die Tabellen im Abschnitt „Ergebnisse aus privater Sicht“ (Anhang Abschnitt A5.1) erlauben einen Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten (6%,3%,0%)¹⁷⁵. Diese Diskontraten bewerten künftige Erträge und die späteren Auswirkungen von Aktionen bei langfristiger Betrachtung unterschiedlich und sind damit Ausdruck der Zeitpräferenz für Gewinne.

Die im Vergleich zu einer Diskontrate von 6% bei den tieferen Diskontraten höher bewerteten künftigen Gewinne führen nicht zur erwarteten Verringerung der Erosion in den Anfangsjahren der langfristigen Betrachtung (vgl. Tabellen 9, 12 und 15 im Anhang). Gegen Ende des Betrachtungszeitraumes, wo zunehmend weniger Folgewirkungen in die langfristige Bewertung zu einem Zeitpunkt einfließen, sind die beobachteten Fruchtfolgen und damit der Erosionsumfang identisch. Bei tieferen Ausgangsbodenmächtigkeiten führt eine Erhöhung der Bewertung künftiger Gewinne in der langfristigen Betrachtung zu einer Verschiebung des Zeitpunktes, wo die ursprüngliche erosionsintensive Fruchtfolge der kurzfristigen privaten Betrachtung gewählt wird, auf später. Bei einer Bodenmächtigkeit von 0.35 m und sinkender Diskontrate erfolgt der Wechsel von der erosiveren Winterweizenkultur zur weniger erosiven Wintergerste bei langfristiger Betrachtung bei einer Diskontrate von 6% im Jahr 1, bei 3 % im Jahr 4 und bei 0% im Jahr 10. Daraus wird ersichtlich, dass in der langfristigen Betrachtung die Erosion sehr wohl die optimalen Entscheide zu einem frühen Zeitpunkt des Betrachtungszeitraumes beeinflussen kann und der Einfluss umso grösser ist, je höher künftige Gewinne bewertet werden, wodurch die Opportunitätskosten im Sinne der Nutzungskosten der Erosion zu Beginn der Betrachtungsperiode steigen. Zu Beginn des Betrachtungszeitraumes besteht somit ein Anreiz, die Fruchtfolge erosionsmindernd auszugestalten. Testrechnungen zeigten, dass dieser Effekt bei tieferen Diskontraten, d.h. bei höherer Bewertung künftiger Gewinne bzw. entgangener künftiger Nutzen, immer stärker ausgeprägt ist. Die folgenden Beobachtungen geben einige wichtige Tendenzen an:

Zuerst erscheint Körnermais mit Zwischenkultur angebaut, die Zwischenkultur fällt später wieder weg. Die Hackfruchtlimite wird zu Beginn mit Körnermais zugunsten von Winterweizen nicht vollständig ausgeschöpft, im Zeitablauf aber zunehmend und die Fruchtfolge nähert sich dabei der erosionsmaximierenden an, die kurzfristig die höchsten Gewinne erzielen lässt.

Die Folgewirkungen der Erosion sind ohne Auswirkungen auf die Entscheide bezüglich Fruchtfolge zu einem bestimmten Zeitpunkt. Dies ist auf die im Vergleich zu den Schadenkosten der Erosion ebenfalls zunehmend höheren Opportunitätskosten erosionsmindernder Fruchtfolgen zurückzuführen. Die on-farm-costs der Erosion steigen mit sinkender Diskontrate und tieferer Ausgangsbodenmächtigkeit, was in der Kombination die Wahl einer weniger erosionsanfälligen Fruchtfolge und damit weniger Erosion pro ha und einen geringeren Abbau der Bodenmächtigkeit zur Folge hat. Der Wert des Bodens sinkt entsprechend dem Verlust an Produktivität durch tiefere Ausgangsbodenmächtigkeiten. Eine tiefere Ausgangsbodenmächtigkeit führt aber in Kombination mit der Höherbewertung künftiger Gewinne durch tiefere Diskontraten zu einer relativ zum Gewinnpotential der Fläche höheren Bewertung der durch die Erosion induzierten Schäden.

Bei kurzfristiger privater Betrachtung bewirkt eine unterschiedliche Bewertung künftiger Gewinne keine bedeutsamen Veränderungen in der Kulturenwahl in Bezug auf die Erosion. Da in der kurzfristigen Betrachtung generell keine Folgewirkungen in der Bewertung der Erosion (on-farm-costs pro mm) berücksichtigt sind, besitzen erosionsmindernde Fruchtfolgen keine Konkurrenzskraft und der entscheidende Akteur wählt daher ohne Berücksichtigung der Aus-

¹⁷⁵ Ein Vergleich der on-farm-costs in Abhängigkeit der Diskontrate und der Bodenmächtigkeit ist zudem in Tabelle 19 dargestellt.

wirkungen der Erosion die kurzfristig gewinnmaximierende Fruchtfolge, die zugleich das grösste Erosionspotential mit sich bringt. Bei der tiefsten untersuchten Ausgangsbodenmächtigkeit von 0.35 m zeigen sich jedoch durch unterschiedlich bewertete Folgekosten beeinflusste Entscheide in der Kulturenwahl zu Beginn der langfristigen Betrachtung, indem mit höherer Bewertung Wintergerste immer später erscheint.

14.1.5 Auswirkungen von Düngungsverfahren und Bodenbearbeitung

Ausser bei geringer Ausgangsbodenmächtigkeit ist kein Wechsel in der Art der Bodenbearbeitung oder der Düngung in Richtung Erosionsminderung festzustellen (vgl. Tabellen 9 bis 17 im Anhang). Diese Verfahrensänderungen bringen im Vergleich zu den Ertragseinbussen zuwenig Einsparungen bei der Erosion, so dass sie im Zeitablauf in Frage kämen. Damit sind die Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung durch Veränderung des Düngungsverfahrens oder des Verfahrens der Bodenbearbeitung grösser als die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung mit Erosionsfolge. Aus privater Sicht lohnt es sich somit weder bei kurz- noch bei langfristiger Perspektive, bodenschonendere Anbauverfahren, wie Minimalbodenbearbeitung oder Düngung mit Hofdünger (führt zu einer besseren Krümelstabilität) einzuführen.

14.1.6 Bewertung der Erosion

Aus dem Vergleich der on-farm-costs der Erosion bei privater kurz- und langfristiger Betrachtung lässt sich die Bedeutung der Berücksichtigung der Folgewirkungen und damit auch die Bedeutung des gewählten kontrolltheoretischen dynamischen Ansatzes ableiten. Die ressourcenökonomische Sicht betrachtet Zustandsgrössen (Poolgrössen) im Zeitablauf und bewertet sie entsprechend. Dieses Vorgehen ist für nicht oder nur sehr langsam erneuerbare Ressourcen von Vorteil und führt zu einer korrekteren Beurteilung der Knappheit der Ressource, die ja nicht nur zu einem Zeitpunkt knapp ist, sondern deren Nutzung zu einem Zeitpunkt auch künftige Knappheiten mitbestimmt.

Die folgende Tabelle liefert eine Übersicht über die statisch und dynamisch bewerteten Kosten der Erosion in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit und der Diskontrate für das Jahr 1:

Diskontfaktor	Bodenmächtigkeit	ofc Jahr1 statisch Fr./mm	ofc Jahr1 dynamisch Fr./mm	Umfang der Folgeeffekte im Jahr 1 Fr./mm	% Anteil der Folgeeffekte
1.06	1.05	0.39	7.29	6.90	0.95
1.06	0.7	1.32	23.60	22.28	0.94
1.06	0.35	1.62	29.09	27.47	0.94
1.03	1.05	0.40	13.29	12.89	0.97
1.03	0.7	1.36	41.98	40.62	0.97
1.03	0.35	1.66	52.12	50.45	0.97
1	1.05	0.41	32.34	31.93	0.99
1	0.7	1.40	98.84	97.44	0.99
1	0.35	1.71	123.31	121.59	0.99

Tabelle 19: Vergleich der statischen und dynamisch bewerteten Kosten der Erosion in laufenden Werten

Die statische Bewertung von 1 mm erodiertem Bodenmaterial variiert je ha zwischen Fr. 0.39 und Fr. 1.71 und auf die gesamte Betriebsfläche zwischen Fr. 7.- und Fr. 32.- pro mm im ersten Jahr der Betrachtung. Dies entspricht der Produktivität eines mm Bodenmächtigkeit, die von der Ausgangsbodenmächtigkeit abhängig ist. Die Entwicklung ist auf die zunehmende

Steigung der Produktionsfunktion bei sinkender Bodenmächtigkeit zurückzuführen (Gesetz des abnehmenden Grenzertrages der Bodenmächtigkeit, vgl. Diskussion der Produktionsfunktion in den Abschnitten 10.4 und 11.1). Je nach Ausgangsbodenmächtigkeit und Diskontrate betragen die dynamischen on-farm-costs der Erosion im ersten Jahr je ha zwischen Fr. 7.29 und Fr. 123.31 sowie hochgerechnet auf den Gesamtbetrieb zwischen ca. Fr. 146.- pro mm und Fr. 2466.- pro mm bei langfristiger Betrachtung und Berücksichtigung der künftigen Folgewirkungen der Erosion zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die im Vergleich zu den statischen deutlich höheren dynamischen on-farm-costs der Erosion sind auf die Berücksichtigung der intertemporalen Kosten der Erosion zurückzuführen.

Gemäss Tabelle 19 erreicht die Bewertung der Folgewirkungen bei einer Diskontierung mit der Diskontrate 6% einen Anteil von ca. 94% der gesamten dynamisch bewerteten Kosten eines mm Erosion im ersten Jahr. Der Anteil sinkt bei gleicher Diskontrate und sinkender Bodenmächtigkeit leicht, da das Wertgrenzprodukt eines mm Bodenmächtigkeit mit sinkender Bodenmächtigkeit zunimmt. Der prozentuale Anteil der Folgeeffekte der Erosion an der Bewertung eines mm erodierten Bodenmaterials und auch die absolute Grösse steigen mit sinkender Diskontrate und Bodenmächtigkeit und beschreiben den mit sinkender Bodenmächtigkeit und tieferer Diskontrate steigenden Anreiz zur Berücksichtigung der Erosion in den Anfangsjahren der Betrachtung durch eine Fruchtfolge mit geringerem Erosionspotential. Im Zeitablauf sinkt der Umfang der in der dynamischen Sicht berücksichtigten Folgeeffekte der Erosion zu einem bestimmten Zeitpunkt und erreicht im Jahr 66 den Wert 0. In der Analyse wird der Endwert der Ressource Boden nicht berücksichtigt. Die intertemporalen Kosten der Erosion sind im letzten Jahr der Betrachtung gleich 0. Daher sind im letzten Jahr die dynamischen und die statischen o.f.c. der Erosion identisch und widerspiegeln das mittlere Gewinnpotential eines mm Bodenmächtigkeit zum aktuellen Zeitpunkt (vgl. Tabellen im Anhang 5.1).

14.1.7 Erosionsentwicklung im Zeitablauf aus sozialer Sicht

Die soziale Sicht berücksichtigt, dass der partikuläre Abtrag von Phosphor im Durchschnitt pro ha 0.3 kg nicht übersteigen sollte. Dies entspricht einer erodierten Bodenmenge von 3.23 t/ha/Jahr oder 0.23 mm Boden/ha/Jahr.

Die folgende Tabelle zeigt die Resultate der Optimierung bei einer Diskontrate von 6 % für eine Ausgangsbodenmächtigkeit von 1.05 m unter sozialer Perspektive:

Jahr	Erosion t / ha	Erosion mm / ha	Erosion ofc / mm	BS- Punkte	P- Loss kg / ha	SP / kg Phosphor	SP / ha LN	A- Hori- zont	ZF laufend	ZF diskon- tiert	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	WW- MIN- MD	KA- STA- HD
Langfristig-Sozial-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.3-Bodenschutzlimite 0														
1	3.23	0.23	9.90	70.8	0.30	1'213.97	1'144	1.05	30'853	29'107	4.58	4.58	10.00	0.84
20	3.23	0.23	3.18	70.8	0.30	456.47	331	1.05	30'800	9'604	4.58	4.58	10.00	0.84
40	3.23	0.23	0.85	70.8	0.30	145.80	100	1.04	30'743	2'989	4.58	4.58	10.00	0.84
60	3.23	0.23	0.11	70.8	0.30	47.24	30	1.04	30'686	930	4.58	4.58	10.00	0.83
66	3.23	0.23	0.01	70.8	0.30	33.82	21	1.04	30'668	655	4.58	4.58	10.00	0.83
Ø / Einheit	3.23	0.23	2.46	70.8	0.30	344.77	277	1.04	1'538	381				
Ø / LN / J	64.52		49.24		6.00	6'895	5'535		30'761	7'614				
Σ 66	4'258	15.21	3'250		396.00		365'299		2'030'255	502'532				
Kurzfristig-Sozial-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.3-Bodenschutzlimite 0														
1	3.23	0.23	0.56	70.8	0.30	1'323.81	1'058	1.05	30'853	29'107	4.58	4.58	10.00	0.84
20	3.23	0.23	0.19	70.8	0.30	437.18	349	1.05	30'800	9'604	4.58	4.58	10.00	0.84
40	3.23	0.23	0.06	70.8	0.30	136.19	109	1.04	30'743	2'989	4.58	4.58	10.00	0.84
60	3.23	0.23	0.02	70.8	0.30	42.42	34	1.04	30'686	930	4.58	4.58	10.00	0.83
66	3.23	0.23	0.01	70.8	0.30	29.90	24	1.04	30'668	655	4.58	4.58	10.00	0.83
Ø / Einheit	3.23	0.23	0.15	70.8	0.30	346.55	277	1.04	1'538	381				
Ø / LN / J	64.52		3.00		6.00	6'931	5'535		30'761	7'614				
Σ 66	4'258	15.21	197.95		396.00		365'299		2'030'255	502'532				

Tabelle 20: Resultate aus sozialer Sicht bei Diskontfaktor 1.06, Bodenmächtigkeit 1.05, P-Abtragslimite 0.3

Die Landrente, der Schattenpreis der Flächenrestriktion, ist in der privaten Betrachtung (vgl. Tabelle 17: „SP / ha LN“) höher als in der sozialen Betrachtung (vgl. Tabelle 20). Dies ist mit dem durch die Phosphorrestriktion eingeschränkten Produktionspotential auf den einzelnen Flächen zu begründen. Durch die Limitierung des maximalen partikulären P-Abtrags auf 0.3 kg pro ha ist die damit direkt verbundene Erosion auf 3.23 t durchschnittlich pro ha beschränkt. Diese Limite wird im in Tabelle 20 dargestellten Fall nie unterschritten, da die private Optimierung zeigte, dass die Erosionsmenge bei privater Betrachtung über 3.23 t pro ha liegt. Die erodierte Bodenmenge beträgt 0.23 mm pro Jahr und beläuft sich im gesamten Betrachtungszeitraum auf 15 mm im Gegensatz zu den 57 mm bei privater Betrachtung. Die on-farm-costs der Erosion liegen in der kurz- und langfristigen sozialen Betrachtung höher als in der privaten Betrachtung.

Exkurs: Begründung für höhere on-farm-costs der Erosion in der sozialen Betrachtung

Die Herleitung erfolgt auf der Basis der analytischen Form des Kontrollproblems (vgl. Abschnitt 11.2 der qualitativen Analyse) ohne Berücksichtigung einer Kontrollvariablen. Gleichung 89 zeigt die zur Analyse verwendete Lagrangefunktion L , die sich aus der Hamiltonfunktion in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit, erweitert um die Phosphorrestriktion der sozialen Betrachtung, zusammensetzt:

Gleichung 89: $L = V(n) + \mu(\varphi - \theta(n)) - \lambda(\alpha_1\theta(n) - \omega)$

mit $\theta(n)$ als Bewegungsgleichung der Bodenmächtigkeit n , φ als Funktion der Boden-genese, μ als Kozustandsvariable der Bewegungsgleichung für die Entwicklung der Bodenmächtigkeit, α_1 als Umrechnungsfaktor von der Bodenerosion auf kg P-Abtrag, λ als Schattenpreis der Phosphorrestriktion und ω als Limite für den Phosphorabtrag.

Die Optimalitätsbedingung für die Veränderung der Kozustandsvariablen μ in laufenden Werten mit r als Diskontrate¹⁷⁶ lautet:

Gleichung 90: $\dot{\mu} = \mu * r - \frac{\partial H}{\partial n}$ bzw. umgesetzt auf das Problem mit Phosphorrestriktion

Gleichung 91: $\dot{\mu} = \mu * (r + \theta_n(n)) - V_n(n) + \lambda\alpha_1\theta_n(n)$

Durch Umformungen errechnet sich der Wert der Kozustandsvariablen μ wie folgt:

Gleichung 92: $\mu = \frac{V_n(n) - \lambda\alpha_1\theta_n}{r + \theta_n(n)} + \frac{\dot{\mu}}{r + \theta_n(n)}$

Die Frage ist nun, ob man Aussagen über die Grösse μ machen kann. Dazu ist es hilfreich, zu folgenden Ableitungen Überlegungen anzustellen (vgl. Abschnitt 11.1 der qualitativen Analyse):

Gleichung 93: Ableitungen einzelner Komponenten der Lagrangefunktion

$V_n(n) > 0, V_{nn}(n) < 0$, da die Produktionsfunktion konkav ist

$\theta_n(n) < 0, \theta_{nn}(n) > 0$, da die Erosionsfunktion konvex ist

$\lambda > 0$ gemäss Lagrangeansatz.

¹⁷⁶ Die Diskontrate entspricht in der Höhe im Falle der Gewinnmaximierung dem Kapitalmarktzins für risikofreies Kapital.

Daher ist der Zähler des ersten Summanden im Modell (vgl. Gleichung 92) mit Phosphorrestriktion (soziale Betrachtung) stets grösser als die Kozustandsvariable μ im Modell ohne Phosphorrestriktion (private Betrachtung), wie folgende Gleichung unter Berücksichtigung der Vorzeichen der Ableitungen zeigt:

Gleichung 94: Beurteilungskriterium für die Kozustandsvariable μ

$$|V_n(n) - \lambda \alpha_1 \theta_n(n)| > |V_n(n)| \text{ bzw.}$$

$$\mu_{\text{mit Phosphorrestriktion}} > \mu_{\text{ohne Phosphorrestriktion}}$$

Der Nenner des ersten Summanden entscheidet nur über das Vorzeichen des Summanden. Es gilt für den Summanden generell, dass der Absolutbetrag mit Phosphorrestriktion im Modell grösser ist als ohne Phosphorrestriktion, da $\theta_n(n) < 0$ ist.

Der zweite Summand ist unabhängig vom Modelltyp (mit oder ohne Phosphorrestriktion) und beeinflusst daher das Modell mit oder ohne Phosphorrestriktion in gleichem Masse.

Fazit: Mit Phosphorrestriktion im Modell ist der Wert der Kozustandsvariablen grösser als im Modell ohne Phosphorrestriktion.

Im Jahr 1 betragen die langfristigen Kosten pro mm Fr. 9.90.- je ha, in der kurzfristigen Perspektive Fr. 0.56.-. Die Tabelle 21 zeigt die on-farm-costs pro ha für das erste Jahr bei kurz- und langfristiger Betrachtung aus sozialer und privater Perspektive. Sie errechnen sich aus dem Produkt aus erodierten mm pro ha und on-farm-costs der Erosion pro mm pro ha:

	Bodenmächtigkeit		
	1.05 m	0.7 m	0.35 m
Sozial langfristig	2.15	5.14	6.18
Sozial kurzfristig	0.12	0.30	0.36
Privat langfristig	5.59	19.07	26.04
Privat kurzfristig	0.30	1.07	1.53

Tabelle 21: On-farm-costs der Erosion bei kurz- und langfristiger, sozialer und privater Betrachtung in Fr. / ha im Jahr 1

Die on-farm-costs der Erosion im ersten Jahr betragen privat und sozial langfristig betrachtet ca. Fr. 5.59 bzw. Fr. 2.15 je ha, privat und sozial kurzfristig betrachtet Fr. 0.30 bzw. Fr. 0.12 je ha bei einer Bodenmächtigkeit von 1.05 m. Sie steigen bei sinkender Bodenmächtigkeit unterproportional.

Die Flächennutzung ist bei lang- und kurzfristiger Betrachtung identisch. Im Zeitablauf wird infolge der sich durch die Erosion verringernden Bodenmächtigkeit und der sich dadurch erhöhenden Erosivität der Kulturen die Fläche der erosionsanfälligeren Hackfrucht Kartoffeln leicht reduziert, wie es zur Erfüllung der P-Abtragslimite notwendig ist. Im Umfang sind diese Verschiebungen aber unbedeutend. Der Schattenpreis der P-Abtragslimite liegt bei kurzfristiger Betrachtung im Jahr 1 bei Fr. 1324.- je kg und bei langfristiger Betrachtung bei Fr. 1214.- je kg. Durch die Berücksichtigung der Folgeeffekte der Erosion zu einem Zeitpunkt wirkt die vorgegebene Limite von 0.3 kg P-Abtrag pro ha in der langfristigen Betrachtung weniger einschneidend als in der kurzfristigen, bei der in der jährlichen Betrachtung der Gewinn statisch mit der Folge einer sehr hohen Erosion maximiert wird. Dieser Zusammenhang lässt sich durch eine qualitative Analyse stützen:

Exkurs:**Grösse des Schattenpreises der Phosphorrestriction in der kurz- und langfristigen Betrachtung**

Für diese Analyse wird das Kontrollproblem mit der Zustandsvariablen n der Bodenmächtigkeit und der Kontrollvariablen x (Bsp. Variable der Flächenallokation) formuliert:

$$L = V(n, x) + \mu(\varphi - \theta(n, x)) - \lambda(\theta(n, x) - \omega) + \omega^x x$$

Die Bezeichnungen sind dieselben wie im Exkurs Seite 203 mit Ausnahme der Kontrollvariablen x , die eine Variable der Flächenallokation darstellt und dem zugehörigen Schattenpreis ω^x der Nichtnegativitätsrestriktion.

Die first order condition der obigen Lagrangefunktion lautet bei linearer Kontrollvariable x :

$$V_x(n) - \mu\theta_x(n) - \lambda\theta_x(n) + \omega^x = 0$$

Umgeformt ergibt sich somit für den Schattenpreis der Phosphorrestriction:

$$\lambda = \frac{V_x(n) + \omega^x}{\theta_x(n)} - \mu$$

Die Kozustandsvariable μ ist nur in der langfristigen kontrolltheoretischen Betrachtung vorhanden und daher muss in der langfristigen Betrachtung der Schattenpreis der Phosphorrestriction λ kleiner sein als in der kurzfristigen Betrachtung ohne Bewegungsgleichung. Dieser Zusammenhang zeigt sich in der grossen Mehrzahl der gerechneten Varianten.

Die Flächennutzung ist lang- und kurzfristig annähernd konstant und besteht aus je 4.58 ha Kunstwiesen im ersten und zweiten Nutzungsjahr, 10 ha Winterweizen mit Minimalbodenbearbeitung und 0.84 ha Kartoffeln. Die soziale Vorgabe verringert den maximalen Gewinn um knapp 30%.

Im Zeitablauf werden konstant 70.8 Bodenschutzpunkte pro ha erreicht. Der Schattenpreis der Fläche verringert sich im Vergleich zu den Berechnungen ohne soziale Vorgabe deutlich, da die Produktivität der Fläche durch die soziale Vorgabe eingeschränkt ist. In der Fruchtfolge ist der Anteil der Kunstwiesen über der Minimalvorgabe von 20% und Körnermais erscheint überhaupt nicht. Daher liegt das mittlere Gewinnpotential deutlich tiefer als in der freien Optimierung.

14.1.8 Auswirkungen unterschiedlicher Ausgangsbodenmächtigkeiten

Die Diskussion dieser Auswirkungen basiert auf den Resultattabellen in den Abschnitten A5.2.1 bis A5.2.9 im Anhang.

Bei einer Ausgangsbodenmächtigkeit von 0.7 m gegenüber 1.05 m nimmt in der sozialen Betrachtung der Anteil der erosiven Hackfrucht Kartoffeln zugunsten der Kunstwiesenfläche ab. Dieselbe Tendenz ist auch im Zeitablauf zu beobachten. Wegen starker Ertragsdepression im zweiten Jahr bei 0.35 m Ausgangsbodenmächtigkeit wird in dieser Stufe ausschliesslich einjährige Kunstwiese angebaut. Der Anbau von Hackfrüchten wird ganz aufgegeben und der Winterweizen mit Minimalbodenbearbeitung durch Sommerhafer mit Zwischenkultur ersetzt. In Analogie zur privaten Betrachtung steigen die on-farm-costs der Erosion mit abnehmender Bodenmächtigkeit, da das Ertragspotential in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit progressiv abnimmt. Erosionsumfang und Phosphorverluste sind durch die Limite auf den Phosphorab-

trag über den gesamten Betrachtungszeitraum konstant. Der Schattenpreis der Phosphorrestriktion, die Kosten der Beschränkung des Phosphorabtrages pro kg, sinken bei einer Verringerung der Bodenmächtigkeit von 1.05 m auf 0.7 m. Wird die Ausgangsbodenmächtigkeit weiter gesenkt, so steigen diese Kosten wieder. Aus den numerischen Resultaten stellt sich die Frage, ob ein solcher Kostenverlauf überhaupt möglich ist. Der folgende Exkurs in Form einer qualitativen Analyse zeigt, unter welchen Bedingungen ein solcher Verlauf vorkommt:

Exkurs: steigende und fallende Kosten der Phosphorrestriktion

Die Herleitung stützt sich auf Gleichung 91 im Exkurs S. 203. Die Gleichung, aufgelöst nach λ^* lautet¹⁷⁷:

$$\text{Gleichung 95: } \lambda^* = \frac{\mu^* r}{\theta_n} - \frac{V_n}{\theta_n} + \mu^* - \frac{\dot{\mu}}{\theta_n} = \frac{\mu^* (r + \theta_n) - V_n - \dot{\mu}}{\theta_n}$$

Durch Ableitung der Gleichung 95 nach der Bodenmächtigkeit n kann deren Einfluss auf den Schattenpreis der Phosphorrestriktion diskutiert werden:

$$\text{Gleichung 96: } \frac{\partial \lambda^*}{\partial n^*} = -\frac{\mu^* r \theta_{nn}}{\theta_n^2} - \frac{V_{nn} \theta_n - V_n \theta_{nn}}{\theta_n^2} + \frac{\dot{\mu} \theta_{nn}}{\theta_n^2}$$

Nun stellt sich die Frage, ob die Veränderung des Schattenpreises in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit n das Vorzeichen wechseln kann. Dazu werden die Vorzeichen der einzelnen Summanden in Gleichung 96 unter Benutzung der Vorzeichen der Ableitungen der Erosions- und Produktionsfunktion untersucht:

$$\theta_n < 0, \quad \theta_{nn} > 0, \quad V_n > 0, \quad V_{nn} < 0$$

Da die on-farm-costs der Erosion immer positiv sind, ist der erste Summand in Gleichung 96 negativ. Beim zweiten Summanden stellt sich die Frage, ob der Ausdruck im Zähler positiv oder negativ ist (Auswertung am Optimalpunkt n^*):

$$\text{Gleichung 97: } V_{nn} \theta_n - V_n \theta_{nn} < 0 \iff \left| \frac{\theta_n}{\theta_{nn}} \right| > \left| \frac{V_n}{V_{nn}} \right|$$

Gemäss Gleichung 97 ist der Zähler des zweiten Summanden in Gleichung 96 negativ, wenn die Veränderung der Krümmung der Erosionsfunktion grösser als die Veränderung der Krümmung der Produktionsfunktion ist. Dies führt zu einem positiven zweiten Summanden in Gleichung 96, was den Vorzeichenwechsel beim Schattenpreis λ der Phosphorrestriktion bei einer Senkung der Bodenmächtigkeit erklärt. Der dritte Summand ist positiv oder negativ in Abhängigkeit des Vorzeichens von $\dot{\mu}$.

Der Schattenpreis der Fläche, die Bewertung des Produktionsfaktors Boden, sinkt mit der Abnahme der Bodenmächtigkeit wegen des durch die Erosion verringerten Produktionspotentials, das sich auch in sinkenden Zielfunktionswerten, den Gewinnen, ausdrückt. Mit sinkender Bodenmächtigkeit steigt die Zahl der erreichten Bodenschutzpunkte, vor allem, da der Anbau der erosiven Hackfrucht Kartoffeln bei tieferer Bodenmächtigkeit verringert und Winterweizen durch Sommerhafer mit Zwischenkultur ersetzt wird.

¹⁷⁷ Das Zeichen „*“ bezeichnet den Optimalwert. Sämtliche Ableitungen sind am Optimalpunkt auszuwerten.

14.1.9 Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten

Die Veränderung der Diskontrate führt in den untersuchten Variationen von 0%, 3% und 6% zu keiner Veränderung der Flächennutzung im Zeitablauf. In laufenden Werten sind die Zielfunktionswerte bei der kurz- und langfristigen Betrachtung im Zeitablauf identisch und entsprechend stimmen die übrigen Bewertungsgrößen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Diskontraten bei identischer Bodenmächtigkeit überein. Die Übereinstimmung ist auf die bereits erwähnte Tatsache zurückzuführen, dass die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung bzw. einer erosiven Fruchtfolge kleiner sind als die Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung bzw. einer erosionsmindernden Fruchtfolge. Dieses Verhältnis ist bei jeder der untersuchten Diskontraten gegeben. Die in der sozialen Betrachtung implementierte Restriktion auf den Phosphorabtrag schränkt die Reaktionsmöglichkeiten ein. Es ist bei keiner der drei untersuchten Diskontraten lohnend, die aus sozialer Perspektive vorgegebene Limite auf den P-Abtrag zu unterschreiten, da die dynamischen on-farm-costs der Erosion selbst bei tiefer Diskontrate in den Folgeperioden kleiner als die einzeljährlichen Gewinneinbussen in Form von Zielfunktionsdifferenzen erosionsärmerer Fruchtfolgen sind (Opportunitätskosten der Ressourcennutzung mit Erosionsfolge < Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung durch eine erosionsarme Fruchtfolge).

14.1.10 Fazit

Unterschiedliche positive Diskontraten beeinflussen die Kulturenwahl in der langfristigen Betrachtung, in der alle Folgeeffekte im Zeitpunkt des Entscheides berücksichtigt werden, erst bei hoher Erosivität der Kulturen. Diese ist bei der tiefsten Ausgangsbodenmächtigkeit gegeben. Die Erosionseffekte sind bei einer Betrachtung über zwei Generationen in ihren Auswirkungen zu geringfügig, als dass sie die Entscheide eines Akteurs mit langfristiger Betrachtung beeinflussen würden. Dies zeigt sich in der sehr tiefen Bewertung der kurzfristigen Kosten der Erosion, die zwischen Fr. 0.39 und Fr. 1.71 pro mm liegen (vgl. Tabelle 19). Die Opportunitätskosten einer erosionsärmeren Fruchtfolge liegen kurzfristig deutlich höher, weshalb es nicht optimal ist, den Boden zu schonen. Selbst in der langfristigen Betrachtung, in der die Folgekosten über den gesamten Betrachtungszeitraum in die Bewertung der Nutzungskosten einfließen, liegen die Kosten der Erosion zu tief, als dass sie zu einer deutlichen Anpassung in den Anfangsjahren der Betrachtung führen würden. Sie liegen zwischen Fr. 146.- und Fr. 2466.- für den Gesamtbetrieb für einen mm erodiertes Bodenmaterial bzw. zwischen Fr. 7.29 und Fr. 123.31 pro mm in Abhängigkeit von Diskontrate und Bodenmächtigkeit. Selbst geringfügige Anpassungen in der Kulturenwahl im Rahmen der Düngung und der Bodenbearbeitung sind bei diesen Kosten im Vergleich zu den Opportunitätskosten einer erosionsmindernden Fruchtfolge nicht attraktiv.

Die Höhe der on-farm-costs der Bodenerosion und des Phosphorabtrages rechtfertigt aus Akteursicht bei privater Optimierung, ausser bei der tiefsten Ausgangsbodenmächtigkeit, keine erosionsmindernden Massnahmen. Die tiefste Ausgangsbodenmächtigkeit stellt einen Zustand dar, in welchem der Boden bereits sehr stark erodiert ist. Aus gesellschaftlicher Sicht stellt sich daher die Frage, mit welchen Umweltschutzinstrumenten die Akteure am besten zur Implementation erosionsmindernder Massnahmen bewegt werden können (vgl. Analyse von Instrumenten und Massnahmen ab Abschnitt 14.3).

14.2 Vergleich der privaten mit der sozialen Optimierung

In der sozialen Betrachtung ist der partikuläre Phosphorabtrag auf durchschnittlich 0.3 kg/ha limitiert. Pro mm sind die on-farm-costs der Erosion in der sozialen Betrachtung um ca. 45 %

höher als in der privaten Betrachtung (Bsp. Fr. 9.90 / mm \Leftrightarrow Fr. 6.88 / mm, vgl. Tabelle 17 und Tabelle 20). Dies ist auf die zunehmende Erosion bei tieferer Bodenmächtigkeit und auf den konkaven Verlauf der Produktionsfunktion in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit (abnehmender Grenzertrag) zurückzuführen. Flächennutzung, Erosionsmenge, -umfang und Phosphorverluste unterscheiden sich infolge der implementierten P-Abtragslimite, wobei die in der sozialen Betrachtung gewählte Fruchtfolge weniger erosionsanfällig ist. Dies zeigt sich auch in den erreichten Bodenschutzpunkten, die pro ha in der sozialen Betrachtung höher liegen. Die im Betrachtungszeitraum erodierte Bodenmenge verringert sich bei sozialer Betrachtung um 74% und beträgt noch 15 mm im Gegensatz zu 57 mm bei privater Betrachtung. Entsprechend verringern sich die Erosionsmenge in t/ha und die P-Verluste. Der Wert einer ha Fläche liegt bei langfristiger Betrachtung im ersten Jahr um knapp 22% tiefer auf Fr. 1577.-. Dieser Wert wäre der aus sozialer Sicht richtige Wert des Bodens. Der tiefere Wert des Bodens ist auf das durch die P-Abtragslimite eingeschränkte Produktionspotential zurückzuführen.

14.2.1 Vermeidungskosten in Abhängigkeit des Diskontfaktors und der Bodenmächtigkeit

Die aus privater Sicht optimierenden Akteure sollten sich aus gesellschaftlicher Perspektive am sozialen Optimum orientieren. Wenn privates und soziales Optimum divergieren, stellt sich die Frage nach der Höhe der Vermeidungskosten. Die Vermeidungskosten zur Erreichung des sozialen Standards sind jene Kosten, die auf Stufe Betrieb entstehen, wenn ein den sozialen Standard übersteigender P-Abtrag vermieden wird. Die Referenzgrösse stellt das bezüglich P-Abtrag freie Optimum dar. Diese Vermeidungskosten können daher aus dem Vergleich der Zielfunktionswerte des privaten Optimums mit dem sozialen Optimum bestimmt werden und stellen die minimalen Kosten dar, die dem privaten Akteur durch die Übernahme des sozialen Optimums entstehen. Zugleich bilden die Vermeidungskosten die Referenzgrundlage für alle second-best Massnahmen, da letztere immer eine indirekte Massnahme darstellen und sich daher die Frage nach der Effizienz jeder einzelnen second-best Massnahme stellt. Aus dem Vergleich der Effizienz verschiedener second-best Massnahmen können dann politisch unter Berücksichtigung der Effektivität der verschiedenen second-best Massnahmen gezielt Massnahmen oder Massnahmenbündel bestimmt werden, um die Abweichung des privaten vom sozialen Optimum zu verringern und wenn möglich zu vermeiden. Die den folgenden Abbildungen zugrunde liegende Datenbasis stellt einen benchmark für second-best Massnahmen dar, die bei non-point-source-pollution Problemen mangels direkter Alternativen zur Anwendung kommen können.

14.2.1.1 Vermeidungskosten in laufenden Werten bei Variation des Diskontfaktors und der Bodenmächtigkeit

Die folgende Tabelle zeigt die Vermeidung von Erosion und Phosphorabtrag pro ha und die Vermeidungskosten pro t Erosion und pro kg P-Abtrag, die bei Erfüllung des sozialen Standards entstehen:

Bodenmächtigkeit	Planungshorizont	Jahr	Erosionsvermeidung	P-Abtragsvermeidung	Vermeidungskosten	
					t/ha	kg / ha
1.05 m	langfristig und kurzfristig	1	8.84	0.82	66.12	710.92
1.05 m		66	8.89	0.83	63.82	686.19

Bodenmächtigkeit	Planungshorizont	Jahr	Erosions- vermeidung	P-Abtrags- vermeidung	Vermeidungskosten	
					t/ha	kg / ha
0.7 m	langfristig und kurzfristig	1	9.48	0.88	68.04	731.61
0.7 m		66	9.66	0.90	60.42	649.73
0.35 m	langfristig	1	10.86	1.01	56.31	605.48
0.35 m		66	11.96	1.11	43.62	469.08
0.35 m	kurzfristig	1	11.64	1.08	52.65	566.15
0.35 m		66	11.96	1.11	43.62	468.98

Tabelle 22: Vermeidung von Erosion und P-Abtrag bei Erfüllung des sozialen Standards und Vermeidungskosten in laufenden Werten

Pro ha LN werden bei Erfüllung des sozialen Standards von maximal 0.3 kg P-Abtrag pro ha zwischen 9.48 und 11.96 t Bodenmaterial und zwischen 0.88 und 1.11 kg Phosphor weniger abgetragen. Bei 0.35 m Bodenmächtigkeit besteht im ersten Jahr der Betrachtung ein Unterschied im Abtrag, da die on-farm-costs der Erosion zu Beginn des Planungshorizontes in der langfristigen Betrachtung eine weniger erosive Fruchtfolge bewirken. Die Vermeidungskosten pro t Erosion belaufen sich auf einen Betrag von Fr. 43.62 bis Fr. 68.04 pro t. Pro kg Phosphor entstehen Vermeidungskosten in der Grössenordnung von Fr. 469.- bis Fr. 732.-. Der Verlauf der Kosten in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit ist auf die gleiche Ursache wie die Kostenentwicklung bei der Phosphorrestriktion zurückzuführen: auf den relativen Verlauf der Krümmungen bei den Erosions- und Produktionsfunktionen (vgl. Exkurs S. 206).

Die folgende Abbildung stellt den Verlauf der Vermeidungskosten zur Erreichung des sozialen Optimums bei einer Diskontrate von 6% für unterschiedliche Bodenmächtigkeiten in laufenden Werten pro ha LN dar. Dies sind die betrieblichen Kosten, die dem Landwirt bei Erfüllung des sozialen Standards entstehen.

Vermeidungskosten in laufenden Werten bei Diskontrate 6%

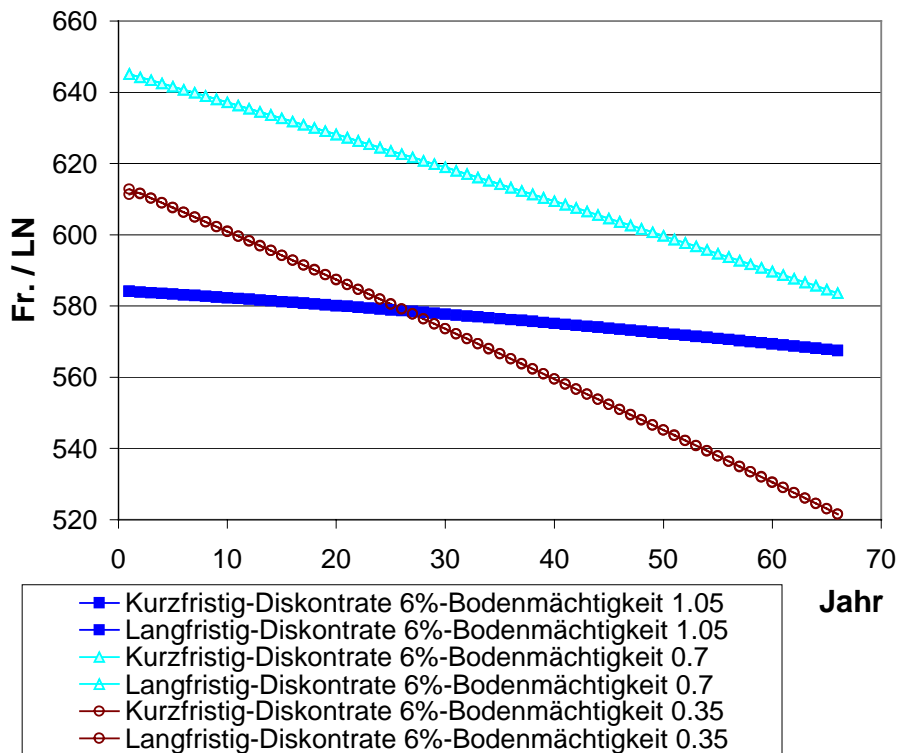


Abbildung 30: Vermeidungskosten bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit und bei einer Diskontrate von 6% in laufenden Werten pro Jahr

Auf die graphische Darstellung der Vermeidungskosten bei Diskonraten von 0% und 3% wird verzichtet, da sie in der Grössenordnung und Tendenz gleich verlaufen. In Gegenwartswerten, d.h. diskontiert, verlaufen die Vermeidungskosten bei einer positiven Diskontrate infolge der Diskontierung degressiv abnehmend.

Aus dem Vergleich der Resultate (Anhang Abschnitt A5.3, Tabelle 27) wird ersichtlich, dass die Vermeidungskosten von der Diskontrate unabhängig sind, solange eine Variation der Diskontrate keine dadurch induzierte unterschiedliche Flächennutzung im Zeitablauf zur Folge hat.

Im Zeitablauf weisen die Vermeidungskosten, unabhängig davon, ob die Betrachtung kurz- oder langfristig erfolgt, eine sinkende Tendenz auf, die umso ausgeprägter ist, je geringer die Bodenmächtigkeit im Ausgangszustand war. Dieser Effekt hängt mit der erhöhten Erosivität der Kulturen bei tieferer Bodenmächtigkeit und dem sinkenden Ertragspotential der Kulturen im Zeitablauf zusammen. Zwischen der kurz- und langfristigen Betrachtung ist bezüglich der Vermeidungskosten im Einzeljahr und auch über die Jahre kein relevanter Unterschied festzustellen.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Minima und Maxima der Vermeidungskosten pro ha LN bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit sowie bei kurz- und langfristiger Betrachtung in laufenden Werten. Unterscheiden sich die Vermeidungskosten bei kurz- und langfristiger Betrachtung nicht, so werden sie in einer Zeile ausgewiesen.

Fristigkeit	Diskontfaktor	Bodenmächtigkeit in m	Minimum in Fr./ha	Maximum in Fr./ha
Kurzfristig	1.06	1.05	567	584
Langfristig	1.06	1.05	568	584
Kurz- und langfristig	1.06	0.7	584	645
Kurzfristig	1.06	0.35	522	613
Langfristig	1.06	0.35	522	612
Kurz- und langfristig	1.06	1.05	567	584
Kurz- und langfristig	1.03	0.7	584	645
Kurzfristig	1.03	0.35	522	613
Langfristig	1.03	0.35	522	611
Kurz- und langfristig	1	1.05	567	584
Kurz- und langfristig	1	0.7	584	645
Kurzfristig	1	0.35	522	613
Langfristig	1	0.35	522	611

Tabelle 23: Minima und Maxima der Vermeidungskosten bei unterschiedlicher Bodenmächtigkeit und unterschiedlicher Diskontrate in laufenden Werten in Fr. / ha

Die Vermeidungskosten sind zu Beginn des Betrachtungszeitraumes maximal, an dessen Ende minimal. Bei einer Bodenmächtigkeit von 1.05 m und 0.7 m sind die Vermeidungskosten unabhängig von der Diskontrate und der Art der Betrachtung (lang- oder kurzfristig). Sie verringern sich im Zeitablauf von Fr. 584.- bzw. Fr. 645.- pro ha auf Fr. 567.- bzw. Fr. 584.- pro ha LN für den untersuchten Ackerbaubetrieb mit 20 ha. Das Maximum der Vermeidungskosten wird in laufenden Werten immer zu Beginn des Betrachtungszeitraumes erreicht. Dies ist auf die naturwissenschaftliche Datengrundlage für die Produktions- und Erosionsfunktionen zurückzuführen, indem der Ertrag mit sinkender Bodenmächtigkeit abnimmt, die Erosion dagegen zunimmt. Bei der tiefsten Ausgangsbodenmächtigkeit von 0.35 m zeigt es sich, dass bei langfristiger Betrachtung die Vermeidungskosten geringfügig tiefer sind als bei kurzfristiger Betrachtung. Dies ist auf die Wirkung der Berücksichtigung der Folgeeffekte von Entscheiden in künftigen Jahren der langfristigen Betrachtung bei der Kulturenwahl zu Beginn des Betrachtungszeitraumes zurückzuführen. Künftige Gewinne werden höher bewertet und machen eine weniger erosive Kulturenwahl in den Anfangsjahren attraktiver.

Die generell steigenden Vermeidungskosten bei sinkender Bodenmächtigkeit sind biophysikalisch durch den konkaven Verlauf der Produktionsfunktion (Gesetz des abnehmenden Grenzertrages bei zunehmender Bodenmächtigkeit) und den konvexen Verlauf der Erosionsfunktion (zunehmender Grenzschaden bei abnehmender Bodenmächtigkeit) bedingt.

Die allgemein sinkende Tendenz der Vermeidungskosten im Zeitablauf ist auf das durch die Erosion verminderte Ertragspotential der Kulturen und die Durchführung einer Aktivitätsanalyse zurückzuführen. Die höheren Vermeidungskosten bei tieferer Ausgangsbodenmächtigkeit erklären sich mit der zunehmenden Erosivität der Kulturen bei sinkender Bodenmächtigkeit und der dadurch notwendigen stärkeren Anpassung der Fruchtfolgen zur Erreichung der sozialen Zielvorgabe von 0.3 kg partikulärem P-Abtrag pro ha.

Die Vermeidungskosten sinken bei kurzfristiger Betrachtung im Zeitablauf, steigen aber bei einer Abnahme der Ausgangsbodenmächtigkeit auf 0.7 m, um danach bei einer weiteren Senkung auf 0.35 m wieder zu sinken. Der Verlauf der Vermeidungskosten hängt mit den relativen Verläufen der Produktions- und Erosionsfunktionen im Modell zusammen. Die analytische Herleitung zeigt der Exkurs S. 206. Der Effekt der unterschiedlichen Kurvenverläufe

führt dazu, dass die Vermeidungskosten bei 0.7 m Ausgangsbodenmächtigkeit relativ zu den anderen Bodenmächtigkeiten höher sind. Dies ist auf die bei dieser Bodenmächtigkeit konkurrenzfähigen Kulturen zurückzuführen, die stärkere strukturelle Anpassungen nötig machen als bei den anderen Bodenmächtigkeiten.

14.2.2 Fazit

Langfristige Betrachtungen führen ausser bei bereits stark erodierten Böden bei positiven Diskontraten privat zu keinem erosionsmindernden Verhalten zu Beginn des Betrachtungszeitraumes. Das Erosionsproblem beeinflusst bei einem Betrachtungszeitraum von zwei Generationen (66 Jahre) die jährlichen Entscheide in der Regel nicht, da die Folgekosten der Erosion kleiner als die Kosten erosionsmindernder Kulturenwahlen sind. Die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung sind geringer als die Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung. Die Vermeidungskosten liegen je nach Ausgangsbodenmächtigkeit in der Regel zwischen Fr. 522.- und Fr. 645.- / ha für den untersuchten Ackerbaubetrieb. Die Kosten erscheinen nicht sehr hoch, wenn man sie mit dem flächengebundenen Direktzahlungsumfang vergleicht. Um ein gesellschaftlich optimales privates Akteurverhalten zu bewirken, sind durch die Gesellschaft vorgegebene Massnahmen vonnöten, andernfalls verhalten sich die Einzelakteure nicht sozial optimal.

14.3 Least-cost Massnahmen

14.3.1 Grundlagen der Massnahmenbeurteilung

Massnahmen können bezüglich ihrer Effizienz und Effektivität beurteilt werden. Effektivität meint dabei den Grad der Zielerreichung. Effizienz setzt minimale Kosten aus sozialer bzw. volkswirtschaftlicher Sicht voraus. Effizienz ist gegeben, wenn die marginalen Vermeidungskosten den marginalen Schadenskosten der Verschmutzung entsprechen und diese auf allen Betrieben identisch sind. Ist es nicht möglich, die marginalen Schadenskosten zu bestimmen, so bilden minimale Vermeidungskosten ein Beurteilungskriterium für den Massnahmenvergleich (Kosteneffizienz). In diesem Fall kann aber nicht von volkswirtschaftlicher Effizienz gesprochen werden. Volkswirtschaftlich effiziente Massnahme werden in der Ökonomie als first-best Massnahmen bezeichnet. Sie beeinflussen das Verschmutzungsproblem von der Emissionsseite her. Second-best Massnahmen sind Massnahmen, die nicht zu identischen und den marginalen Schadenskosten entsprechenden marginalen Vermeidungskosten bei den Verursachern des Umweltproblems führen. Sie wirken meist indirekt, beispielsweise über Inputgrössen.

In der folgenden Analyse werden Massnahmen wegen fehlender Schadenskosten auf der Basis der Kosteneffizienz mit der Referenzgrösse der Massnahme mit minimalen Vermeidungskosten beurteilt. Standards für den partikulären P-Abtrag und die Besteuerung des P-Abtrags führen auf Stufe Einzelbetrieb zu minimalen Vermeidungskosten (least-cost Massnahmen).

14.3.2 Vermeidungskosten bei unterschiedlichen Niveaus der Limitierung des P-Abtrags (P-Standards)

In den folgenden Abschnitten wird die schrittweise Limitierung des P-Abtrags untersucht. Die Umsetzung im Modell erfolgt, indem der Parameter, der den zulässigen Phosphorabtrag pro ha angibt, in der Bilanzierungsrestriktion für den Phosphorabtrag in Schritten von 0.1 kg pro ha parametrisiert wird. Den Ausgangspunkt bildet eine nicht bindende P-Abtragslimite von 1.2 kg / ha (freies Optimum). Die folgende Tabelle zeigt die Resultate aus den Optimierungen.

Jahr	Ero- sion t / ha	Ero- sion mm / ha	Ero- sion ofc / mm	BS- Punkte	P- Loss kg / ha	SP / kg Phos- phor	SP / ha LN	A- Hori- zont	ZF lau- fend	ZF dis- kontiert	KMZW -STA- MD	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	SHZW -STA- HD	KM- STA- MD	WW- STA- MD	WW- MIN- MD	KA- STA- HD	KMZ W- STA- HD
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 1.2-Bodenschutlimite 0																			
1	12.06	0.86	0.36	44.0	1.12	0.00	2'006	1.05	42'536	40'128		2.00	2.00		8.00	8.00			
66	12.12	0.87	0.01	44.0	1.13	0.00	45	0.99	42'018	898		2.00	2.00		8.00	8.00			
Ø / Einheit	12.09	0.86	0.10	44.0	1.12	0.00	524	1.02	2'115	524									
Ø / LN / J	241.77		2.08		22.48	0.00	10'485		42'291	10'485									
Σ 66	15'957	56.99	137.38		1'484		691'985		2'791'200	691'985									
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 1.1-Bodenschutlimite 0																			
1	11.83	0.84	0.38	44.3	1.10	80.58	1'916	1.05	42'499	40'093		2.00	2.00		7.68	8.32			
20	11.83	0.84	0.14	44.3	1.10	29.11	628	1.03	42'362	13'209		2.00	2.00		7.66	8.34			
40	11.83	0.84	0.05	44.4	1.10	9.88	194	1.02	42'202	4'103		2.00	2.00		7.63	8.37			
60	11.83	0.84	0.02	44.4	1.10	3.33	60	1.00	42'026	1'274		2.00	2.00		7.61	8.39			
66	11.83	0.84	0.01	44.4	1.10	2.40	42	1.00	41'971	897		2.00	2.00		7.60	8.40			
Ø / Einheit	11.83	0.84	0.11	44.4	1.10	22.68	499	1.02	2'112	524									
Ø / LN / J	236.56		2.17		22.00	453.55	9'976		42'249	10'475									
Σ 66	15'613	55.76	143.45		1'452		658'412		2'788'404	691'340									
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 1-Bodenschutlimite 0																			
1	10.75	0.77	0.43	45.8	1.00	80.58	1'916	1.05	42'328	39'932		2.00	2.00		6.18	9.82			
20	10.75	0.77	0.15	45.8	1.00	28.88	629	1.04	42'190	13'155		2.00	2.00		6.16	9.84			
40	10.75	0.77	0.05	45.9	1.00	9.74	195	1.02	42'031	4'086		2.00	2.00		6.14	9.86			
60	10.75	0.77	0.02	45.9	1.00	3.26	60	1.00	41'860	1'269		2.00	2.00		6.12	9.88			
66	10.75	0.77	0.01	45.9	1.00	2.35	42	1.00	41'806	893		2.00	2.00		6.12	9.88			
Ø / Einheit	10.75	0.77	0.12	45.8	1.00	22.54	499	1.03	2'104	522									
Ø / LN / J	215.05		2.40		20.00	450.71	9'982		42'078	10'432									
Σ 66	14'194	50.69	158.49		1'320		658'797		2'777'163	688'544									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.9-Bodenschutlimite 0																			
1	9.68	0.69	0.47	62.6	0.90	302.61	1'697	1.05	41'743	39'381	4.16	2.00	2.00		1.84	10.00			

Jahr	Ero- sion t / ha	Ero- sion mm / ha	Ero- sion ofc / mm	BS- Punkte	P- Loss kg / ha	SP / kg Phos- phor	SP / ha LN	A- Horiz- ont	ZF lau- fend	ZF dis- kontiert	KMZW -STA- MD	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	SHZW -STA- HD	KM- STA- MD	WW- STA- MD	WW- MIN- MD	KA- STA- HD	KMZ W- STA- HD
20	9.68	0.69	0.17	62.8	0.90	101.09	558	1.04	41'607	12'973	4.20	2.00	2.00		1.80	10.00			
40	9.68	0.69	0.06	63.0	0.90	31.85	173	1.02	41'454	4'030	4.25	2.00	2.00		1.75	10.00			
60	9.68	0.69	0.02	63.2	0.90	10.03	54	1.01	41'289	1'252	4.30	2.00	2.00		1.70	10.00			
66	9.68	0.69	0.01	63.3	0.90	7.09	38	1.01	41'238	881	4.31	2.00	2.00		1.69	10.00			
Ø / Einheit	9.68	0.69	0.13	62.9	0.90	79.94	442	1.03	2'075	514									
Ø / LN / J	193.55		2.62		18.00	1'599	8'850		41'500	10'289									
Σ 66	12'774	45.62	172.66		1'188		584'073		2'738'994	679'045									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.8-Bodenschutzlimite 0																			
1	8.60	0.61	0.56	55.6	0.80	319.33	1'682	1.05	41'080	38'755	3.12	2.00	2.00			10.00		2.88	
20	8.60	0.61	0.20	55.4	0.80	110.24	550	1.04	40'938	12'765	3.08	2.00	2.00			10.00		2.92	
40	8.60	0.61	0.06	55.2	0.80	35.99	169	1.03	40'780	3'965	3.04	2.00	2.00			10.00		2.96	
60	8.60	0.61	0.02	55.0	0.80	11.75	52	1.01	40'612	1'231	3.00	2.00	2.00			10.00		3.00	
66	8.60	0.61	0.02	54.9	0.80	8.40	37	1.01	40'559	867	2.98	2.00	2.00			10.00		3.02	
Ø / Einheit	8.60	0.61	0.15	55.3	0.80	86.67	437	1.03	2'041	506									
Ø / LN / J	172.04		3.06		16.00	1'733	8'737		40'828	10'124									
Σ 66	11'355	40.55	201.76		1'056		576'636		2'694'650	668'158									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.7-Bodenschutzlimite 0																			
1	7.53	0.54	0.60	47.1	0.70	482.16	1'559	1.05	40'213	37'937	1.00	2.00	2.00			5.90	4.10	5.00	
20	7.53	0.54	0.21	47.1	0.70	158.11	514	1.04	40'080	12'497	1.00	2.00	2.00			5.85	4.15	5.00	
40	7.53	0.54	0.07	47.1	0.70	48.89	160	1.03	39'933	3'882	1.00	2.00	2.00			5.80	4.20	5.00	
60	7.53	0.54	0.02	47.1	0.70	15.11	50	1.02	39'778	1'206	1.00	2.00	2.00			5.75	4.25	5.00	
66	7.53	0.54	0.02	47.1	0.70	10.63	35	1.02	39'730	849	1.00	2.00	2.00			5.74	4.26	5.00	
Ø / Einheit	7.53	0.54	0.16	47.1	0.70	125.51	408	1.03	1'999	496									
Ø / LN / J	150.54		3.27		14.00	2'510	8'154		39'978	9'911									
Σ 66	9'935	35.48	215.74		924.00		538'164		2'638'545	654'134									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.6-Bodenschutzlimite 0																			
1	6.45	0.46	0.60	50.0	0.60	1'056.12	1'203	1.05	38'940	36'736		2.12	2.12				10.00	5.00	0.77

Jahr	Ero- sion t / ha	Ero- sion mm / ha	Ero- sion ofc / mm	BS- Punkte	P- Loss kg / ha	SP / kg Phos- phor	SP / ha LN	A- Hor- izont	ZF lau- fend	ZF dis- kontiert	KMZW -STA- MD	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	SHZW -STA- HD	KM- STA- MD	WW- STA- MD	WW- MIN- MD	KA- STA- HD	KMZ W- STA- HD
20	6.45	0.46	0.21	50.0	0.60	349.71	395	1.04	38'827	12'106		2.12	2.12				10.00	5.00	0.76
40	6.45	0.46	0.07	50.0	0.60	109.24	123	1.03	38'702	3'763		2.12	2.12				10.00	5.00	0.76
60	6.45	0.46	0.02	50.0	0.60	34.12	38	1.02	38'571	1'169		2.12	2.12				10.00	5.00	0.75
66	6.45	0.46	0.02	50.0	0.60	24.07	27	1.02	38'531	823		2.13	2.13				10.00	5.00	0.75
Ø / Einheit	6.45	0.46	0.16	50.0	0.60	277.07	314	1.04	1'937	480									
Ø / LN / J	129.03		3.25		12.00	5'541	6'276		38'740	9'601									
Σ 66	8'516	30.41	214.31		792.00		414'200		2'556'870	633'636									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.5-Bodenschutzlimite 0																			
1	5.38	0.38	0.61	53.6	0.50	1'323.81	1'058	1.05	36'466	34'402		2.86	2.86				10.00	4.28	
20	5.38	0.38	0.21	53.6	0.50	436.93	349	1.04	36'369	11'340		2.86	2.86				10.00	4.28	
40	5.38	0.38	0.07	53.6	0.50	136.02	108	1.04	36'264	3'526		2.86	2.86				10.00	4.27	
60	5.38	0.38	0.02	53.7	0.50	42.34	34	1.03	36'155	1'096		2.87	2.87				10.00	4.27	
66	5.38	0.38	0.02	53.7	0.50	29.83	24	1.03	36'122	772		2.87	2.87				10.00	4.27	
Ø / Einheit	5.38	0.38	0.17	53.6	0.50	346.38	276	1.04	1'815	450									
Ø / LN / J	107.53		3.30		10.00	6'928	5'529		36'297	8'992									
Σ 66	7'097	25.35	217.83		660.00		364'891		2'395'613	593'505									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.4-Bodenschutzlimite 0																			
1	4.30	0.31	0.59	62.2	0.40	1'323.81	1'058	1.05	33'659	31'754		3.72	3.72				10.00	2.56	
20	4.30	0.31	0.20	62.2	0.40	437.05	349	1.04	33'586	10'472		3.72	3.72				10.00	2.56	
40	4.30	0.31	0.06	62.2	0.40	136.10	108	1.04	33'506	3'258		3.72	3.72				10.00	2.56	
60	4.30	0.31	0.02	62.2	0.40	42.38	34	1.03	33'424	1'013		3.72	3.72				10.00	2.55	
66	4.30	0.31	0.01	62.2	0.40	29.86	24	1.03	33'399	714		3.72	3.72				10.00	2.55	
Ø / Einheit	4.30	0.31	0.16	62.2	0.40	346.47	277	1.04	1'677	415									
Ø / LN / J	86.02		3.15		8.00	6'929	5'532		33'531	8'303									
Σ 66	5'677	20.28	207.77		528.00		365'096		2'213'048	548'031									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.3-Bodenschutzlimite 0																			
1	3.23	0.23	0.56	70.8	0.30	1'323.81	1'058	1.05	30'853	29'107		4.58	4.58				10.00	0.84	

Jahr	Ero- sion t / ha	Ero- sion mm / ha	Ero- sion ofc / mm	BS- Punkte	P- Loss kg / ha	SP / kg Phos- phor	SP / ha LN	A- Horiz- ont	ZF lau- fend	ZF dis- kontiert	KMZW -STA- MD	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	SHZW -STA- HD	KM- STA- MD	WW- STA- MD	WW- MIN- MD	KA- STA- HD	KMZ W- STA- HD
20	3.23	0.23	0.19	70.8	0.30	437.18	349	1.05	30'800	9'604		4.58	4.58				10.00	0.84	
40	3.23	0.23	0.06	70.8	0.30	136.19	109	1.04	30'743	2'989		4.58	4.58				10.00	0.84	
60	3.23	0.23	0.02	70.8	0.30	42.42	34	1.04	30'686	930		4.58	4.58				10.00	0.83	
66	3.23	0.23	0.01	70.8	0.30	29.90	24	1.04	30'668	655		4.58	4.58				10.00	0.83	
Ø / Einheit	3.23	0.23	0.15	70.8	0.30	346.55	277	1.04	1'538	381									
Ø / LN / J	64.52		3.00		6.00	6'931	5'535		30'761	7'614									
Σ 66	4'258	15.21	197.95		396.00		365'299		2'030'255	502'532									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.2-Bodenschutzlimite 0																			
1	2.15	0.15	0.51	86.8	0.20	3'613.52	483	1.05	25'556	24'109		5.00	5.00	4.72				5.28	
20	2.15	0.15	0.17	86.8	0.20	1'192.86	159	1.05	25'524	7'959		5.00	5.00	4.72				5.28	
40	2.15	0.15	0.05	86.8	0.20	371.45	50	1.04	25'490	2'478		5.00	5.00	4.72				5.28	
60	2.15	0.15	0.02	86.8	0.20	115.67	15	1.04	25'456	772		5.00	5.00	4.72				5.28	
66	2.15	0.15	0.01	86.8	0.20	81.51	11	1.04	25'446	544		5.00	5.00	4.72				5.28	
Ø / Einheit	2.15	0.15	0.13	86.8	0.20	945.66	126	1.05	1'275	315									
Ø / LN / J	43.01		2.68		4.00	18'913	2'527		25'501	6'309									
Σ 66	2'839	10.14	177.17		264.00		166'759		1'683'083	416'413									
Kurzfristig-Phosphorlimite Lim0-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 0.1-Bodenschutzlimite 0																			
1	1.08	0.08	0.46	100.0	0.10	4'239.03	394	1.05	17'332	16'351		7.32	7.32	5.36					
20	1.08	0.08	0.15	100.0	0.10	1'401.51	130	1.05	17'317	5'400		7.32	7.32	5.36					
40	1.08	0.08	0.05	100.0	0.10	437.15	40	1.05	17'302	1'682		7.32	7.32	5.36					
60	1.08	0.08	0.02	100.0	0.10	136.35	13	1.05	17'287	524		7.32	7.32	5.36					
66	1.08	0.08	0.01	100.0	0.10	96.13	9	1.05	17'282	369		7.32	7.32	5.36					
Ø / Einheit	1.08	0.08	0.12	100.0	0.10	1'111	103	1.05	865	214									
Ø / LN / J	21.51		2.42		2.00	22'215	2'059		17'307	4'280									
Σ 66	1'419	5.07	159.68		132.00		135'884		1'142'271	282'501									

Tabelle 24: Limitierung des Phosphorabtrages bei einer Diskontrate von 6% und einer Ausgangsbodenmächtigkeit von 1.05 m - kurzfristig

Tabelle 24 zeigt die Auswirkungen einer stufenweisen Verschärfung der Restriktion auf den Phosphorabtrag in Schritten von 100 g pro ha ausgehend von 1.2 kg / ha bei kurzfristigem Planungshorizont. Das Ziel der Berechnungen ist es, die Vermeidungskosten der Beschränkung des Phosphorabtrages, die sich in einer entsprechenden Zielfunktionsdifferenz ausdrückt, für unterschiedliche Limiten zu berechnen (vgl. Tabelle 25 und Abbildung 32).

Gemäss Tabelle 24 ist die erste Stufe der Beschränkung des Phosphorabtrages nicht bindend. Der Schattenpreis der Restriktion auf den Phosphorabtrag ist 0 und die Kulturenwahl ist gewinnmaximierend ohne Beschränkung des Phosphorabtrages. Als Kulturen erscheinen Körnermais und Winterweizen sowie zweijährige Kunstwiese je in Standardbodenbearbeitung, wobei die Wiesen mit organischem Dünger gedüngt sind. Bereits eine Limite von 1.1 kg pro ha wirkt bindend und der Körnermais wird im Zeitablauf zunehmend durch Winterweizen ersetzt. Derselbe Effekt ist bei der Limitierung auf 1 kg / ha zu beobachten. Wird die Limite weiter auf 0.9 kg / ha verringert, so wird der grössten Teil des Körnermaises mit Zwischenkultur angebaut und Winterweizen bis an die Fruchtfolgelimite ausgedehnt. Bei 0.8 kg /ha erscheint nun neben Körnermais die Hackfrucht Kartoffeln im Kultureset und wird im Zeitablauf zulasten des Körnermaises ausgedehnt. Bei der Limite von 0.7 kg / ha bleibt die Aufteilung der Hackfrüchte mit einer ha Körnermais und 5 ha Kartoffeln stabil, dafür wird der Winterweizen mit Standardbodenbearbeitung sukzessive durch Winterweizen mit Minimalbodenbearbeitung ersetzt. Eine Limite von 0.6 kg /ha führt zu weiteren Verschiebungen, indem die gesamte Winterweizenfläche mit Minimalbodenbearbeitung bewirtschaftet wird und neben Kartoffeln nun organisch gedüngter Körnermais in Standardbodenbearbeitung mit Zwischenkultur angebaut wird. Die Kunstwiesenfläche ist über die Limite von 20% der Ackerfläche ausgedehnt und ersetzt immer mehr die Hackfrucht Körnermais. Maximal 0.5 kg P-Abtrag pro ha führen zum Verschwinden des Körnermaises, zur weiteren Ausdehnung der Kunstwiesen, die die andere Hackfrucht Kartoffeln ersetzen. Diese Tendenz ist bis zur Limite von 0.2 kg /ha zu beobachten. Ab diesem Niveau erscheinen keine Hackfrüchte mehr in der Kulturenwahl und der Winterweizen wird fast zur Hälfte durch Sommerhafer mit Zwischenkultur, organisch gedüngt in Standardbodenbearbeitung, ersetzt. Die Kunstwiesen bedecken 50% der Ackerfläche. Bei einer P-Abtragslimite von 0.1 kg /ha, der tiefsten untersuchten Limitierung des Abtrags, sind Kunstwiesen auf fast 75% der Fläche zu finden, der Rest der Fläche wird mit Sommerhafer mit Zwischenkultur bewirtschaftet.

In den Simulationen mit EPIC wird auf den pflanzlichen Entzug gedüngt. So bleibt der Phosphorgehalt im Boden annähernd konstant und die jährliche Erosion ist direkt proportional zur Phosphorlimite. Die erodierten t Bodenmaterial pro ha bleiben bei einschränkender Phosphorlimite über den Zeitraum konstant und senken sich stufenweise parallel zur P-Abtragslimite von 12 t pro ha auf knapp eine t pro ha. Die erodierten mm Bodenmächtigkeit sinken im Zeitraum von zwei Generationen von 57 mm auf 5 mm. Der totale P-Abtrag über den Zeitraum variiert entsprechend zwischen total 132 kg bzw. 2 kg /Jahr und total 1484 kg bzw. 22.48 kg / Jahr. Die Zahl der erreichten Bodenschutzpunkte steigt mit zunehmender Beschränkung des P-Abtrags, was die Bodenschutzpunkte als geeignete Massnahme zur Beschränkung des P-Abtrags und der Erosion erscheinen lässt (vgl. Abschnitt 14.4.1).

Die on-farm-costs der Bodenerosion (betriebliche Kosten) steigen von zunächst durchschnittlich Fr. 2.08 (Fr. 9.22)¹⁷⁸ je mm Bodenmächtigkeit pro Betrieb bei Verschärfung der P-Abtragslimite auf Fr. 3.30 (Fr. 13.77) pro Betrieb und Jahr bei einer Limite von 0.5 kg /ha und sinken dann wieder auf Fr. 2.42 (Fr. 9.84) pro LN bei der schärfsten P-Abtragslimite. Durch die durch die Limitierung des P-Abtrags erzwungene Ausdehnung der Kunstwiesenfläche, die

¹⁷⁸ Die Zahl in der Klammer bezeichnet in diesem Abschnitt je den durchschnittlichen laufenden Wert im Gegensatz zum diskontierten Wert ohne Klammern.

aus Gewinnsicht am wenigsten attraktiv sind, beginnen die on-farm-costs der Erosion ab einer Limite von 0.5 kg / ha wieder zu sinken. Die Ursache für diese Entwicklung liegt in den relativen Krümmungsverläufen der Produktions- und Erosionsfunktionen (vgl. Exkurs S. 206). Pro ha bewegen sich die on-farm-costs in laufenden Werten durchschnittlich zwischen Fr. 0.49 und Fr. 0.69 bei unterschiedlicher Limitierung des P-Abtrags, im einzelnen Jahr schwanken sie zwischen Fr. 0.49 und Fr. 0.73 pro ha in laufenden Werten. In diskontierten Werten bewegen sich die on-farm-costs der Erosion zwischen Fr. 0.01 und Fr. 0.61 pro ha für das einzelne Jahr. Die Grössenordnung der on-farm-costs der Erosion pro mm zeigt, dass für einen privaten Akteur wenig Anreiz besteht, bei kurzfristigem Planungshorizont freiwillig eine nicht erosionsmaximierende, da kurzfristig nicht gewinnmaximierende Fruchtfolge zu wählen. Die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung sind deutlich tiefer als die Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung.

Der Schattenpreis der Limitierung des P-Abtrags ist pro kg P-Abtrag pro ha ausgewiesen. Er bewegt sich von Fr. 0.- auf bis maximal Fr. 3613.- im ersten Jahr der Betrachtung bei Verschärfung der Limite für den P-Abtrag.

Bei einer Neueinführung von P-Abtragslimiten ergeben sich die Vermeidungskosten des Landwirts aus der Differenz der Zielfunktionswerte mit und ohne Einführung des Standards für den P-Abtrag. Die folgende Darstellung gibt eine Übersicht über die Vermeidungskosten des Landwirts im ersten Jahr, je im Vergleich zur Situation ohne Limitierung des Phosphorabtrages in Abhängigkeit der P-Abtragslimite:

Vermeidungskosten Jahr 1		
Limite	Total Fr. Betrieb	Total Fr. pro ha
1.2	0	0
1.1	37	2
1	208	10
0.9	792	40
0.8	1'455	73
0.7	2'323	116
0.6	3'595	180
0.5	6'070	303
0.4	8'876	444
0.3	11'683	584
0.2	16'980	849
0.1	25'204	1'260

Tabelle 25: Vermeidungskosten des Landwirts im ersten Jahr bei kurzfristigem Planungshorizont bei Einführung verschiedener spezifischer P-Abtragslimiten in laufenden Werten

Die Vermeidungskosten des Landwirts betragen je nach P-Abtragslimite bei deren Einführung zwischen Fr. 2.- pro ha und Fr. 1260.- pro ha bei der schärfsten Limitierung des P-Abtrags. Wird eine bestehende P-Abtragslimite verschärft, so entstehen für den Landwirt on-farm-costs in der doppelten Höhe des Schattenpreises der Phosphorrestriktion (vgl. Tabelle 24), da diese gerade die Kosten pro 50 g P-Abtrag pro ha ausweist. Die Schattenpreise der Phosphorrestriktion in Tabelle 24 sind die marginalen Vermeidungskosten pro 50 g P-Abtrag und für den Gesamtbetrieb sowie durchschnittlich pro kg ausgewiesen.

Der Schattenpreis der Fläche sinkt von Fr. 2006.- pro ha im Jahr 1 bei Verschärfung der Limite für den P-Abtrag auf Fr. 394.- pro ha bei der Limitierung des partikulären P-Abtrags auf 0.1 kg pro ha (vgl. Tabelle 24). Diese Veränderung des Wertes einer ha Fläche ist auf die Be-

schränkung der Produktions- und Gewinnmöglichkeiten des Betriebes durch die Limitierung des P-Abtrags zurückzuführen.

Eine Kosteneffizienz ist bei dieser Massnahme nicht zu berechnen, da durch den Ansatz über die Limitierung des P-Abtrags durch die Optimierung die effizienteste Struktur für einen Einzelbetrieb bei Berücksichtigung der vorgegebenen Limite bestimmt wird. Einzelbetrieblich betrachtet sind Standards effizient, bei gleichen Standards für heterogene¹⁷⁹ Betriebe treten dagegen Effizienzverluste auf, da die gleiche Verringerung des Umweltproblems mit gesamthaft tieferen Vermeidungskosten erreichbar wäre. Der Verlauf der Funktion der marginalen Vermeidungskosten ist auf heterogenen Betrieben unterschiedlich, daher würde eine Steuer zu unterschiedlich starken Reduktionen des Umweltproblems der Erosion bzw. des Phosphorabtrags auf heterogenen Betrieben führen. Die marginalen Vermeidungskosten der letzten Reduktionseinheit sind bei heterogenen Betrieben im Falle einer Steuer identisch, bei Vorgabe eines einheitlichen Standards dagegen unterschiedlich. Effizienz ist nur bei identischen marginalen Vermeidungskosten auf den einzelnen Betrieben gegeben. Der andere Fall ist aus ökonomischer Sicht ineffizient. Im folgenden Abschnitt werden nun die marginalen Vermeidungskosten für den untersuchten Betrieb bestimmt.

14.3.2.1 Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags

Aus den in Tabelle 25 ausgewiesenen Vermeidungskosten zur Erreichung unterschiedlicher P-Abtragslimiten lassen sich gemäss folgendem Ansatz die marginalen Vermeidungskosten bestimmen:

Gleichung 98

$$F(l_2) - F(l_1) = \int_{l_1}^{l_2} f(l) dl \qquad \frac{\partial F(P)}{\partial P} = f(P)$$

Legende:

F= Funktion der Vermeidungskosten

f= Funktion der marginalen Vermeidungskosten

P= vermiedener P-Verlust

l₁ = Niveau der P-Abtragslimite

Aus Tabelle 26 wird der Zusammenhang zwischen l, dem Niveau der P-Abtragslimite und P, dem vermiedenen partikulären P-Verlust in kg in Gleichung 98 ersichtlich. Gleichzeitig bildet die Tabelle¹⁸⁰ die Grundlage zur Schätzung der Funktion der Vermeidungskosten F(P) in Gleichung 98. Die letzte Spalte gibt die marginalen Vermeidungskosten für die letzte Einheit vermiedener P-Abtrag an. Die Vermeidungskosten steigen progressiv mit zunehmender Vermeidung von P-Abtrag. Die Berechnung der Grösse in der letzten Spalte basiert auf der im Anschluss an die folgende Tabelle hergeleiteten Funktion der marginalen Vermeidungskosten.

¹⁷⁹ Heterogenität bei Betrieben meint in diesem Zusammenhang unterschiedliche Produktionsstruktur und unterschiedliche Standortgegebenheiten.

¹⁸⁰ In Tabelle 26 entspricht der P-Abtrag bei einer Abtragslimite von 1.2 kg dem P-Abtrag im freien Optimum. Alle Angaben sind für den Gesamtbetrieb mit einer Fläche von 20 ha ausgewiesen.

P-Limite kg / ha	P-Abtrag total kg	P-Vermeidung kg	Vermeidungskosten total in Fr.	Marginale Vermeidungskosten in Fr./ letztes kg
1.2	22.43	0	0	102
1.1	22	0.43	37	111
1	20	2.43	208	163
0.9	18	4.43	792	241
0.8	16	6.43	1'455	356
0.7	14	8.43	2'323	525
0.6	12	10.43	3'595	774
0.5	10	12.43	6'070	1142
0.4	8	14.43	8'876	1685
0.3	6	16.43	11'683	2486
0.2	4	18.43	16'980	3667
0.1	2	20.43	25'204	5409

Tabelle 26: Datengrundlage zur Schätzung der Funktion der marginalen Vermeidungskosten und marginale Vermeidungskosten

Für die Schätzung der Funktion der Vermeidungskosten in Abhängigkeit des vermiedenen P-Abtrags wird eine e-Funktion verwendet:

Gleichung 99: Funktion der Vermeidungskosten für die Massnahme P-Standard

$$F(P) = -534.27 + e^{0.194 \cdot P + 6.26} \quad R^2 = 0.994$$

Gemäss Gleichung 98 ergeben sich die marginalen Vermeidungskosten pro kg P durch Ableitung der Funktion der Vermeidungskosten in Gleichung 99:

Gleichung 100: Funktion der marginalen Vermeidungskosten für die Massnahme P-Standard

$$f(P) = 0.194 * e^{0.194 \cdot P + 6.36}$$

Abbildung 31 veranschaulicht den Verlauf der marginalen Vermeidungskosten pro kg Phosphor.

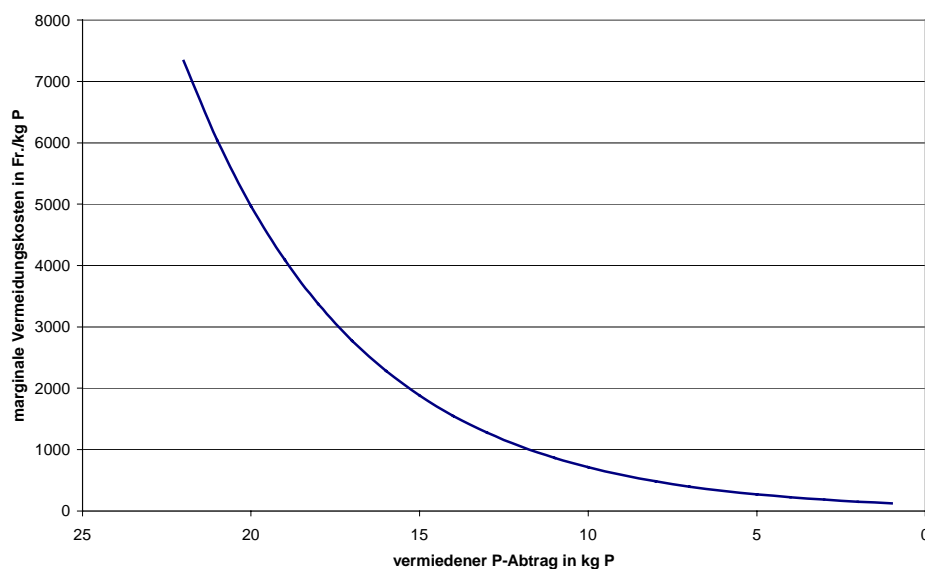


Abbildung 31: Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags für die Massnahme P-Standard

Gemäss Abbildung 31 steigen die marginalen Vermeidungskosten des P-Abtrags auf dem untersuchten Betrieb von unter Fr. 200.- auf über Fr. 5000.- pro kg P beim 21. kg P-Abtrag, das vermieden wird.

Da nur ein Standort in die Beurteilung einfließt und dieser als homogen angesehen wird, stellen die mittels P-Abtragslimiten berechneten marginalen Vermeidungskosten die minimalen marginalen Vermeidungskosten dar und dienen als Referenz zur Beurteilung der marginalen Vermeidungskosten alternativer Massnahmen auf demselben Standort. Auf heterogenen Standorten müssten die minimalen marginalen Vermeidungskosten mittels Steuern bestimmt werden.

Im folgenden werden Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten, Bodenmächtigkeiten und Planungshorizonte auf die Produktionsstruktur diskutiert.

14.3.2.2 Auswirkungen unterschiedlicher Diskontraten

Die Diskontrate übt keinen Einfluss auf die Wahl der Fruchtfolge bei unterschiedlichen P-Abtragslimiten (least cost Massnahme) aus. Die Sequenz der Kulturen ist im Zeitablauf bei gleicher Ausgangsbodenmächtigkeit für die untersuchten Diskontraten identisch. Daher ergeben sich auch keine durch Diskontfaktoren induzierte veränderte Fruchtfolgen mit der Folge von veränderten Opportunitätskosten in laufenden Werten.

14.3.2.3 Auswirkungen unterschiedlicher Bodenmächtigkeiten

Bei geringerer Bodenmächtigkeit erscheinen Zwischenkulturen früher und Kartoffeln verschwinden bei der geringsten Bodenmächtigkeit. Die Kulturenwechsel erfolgen bei unterschiedlichen Niveaus der Limitierung des P-Abtrags zu unterschiedlichen Zeitpunkten, was mit dem Verlauf der von der Bodenmächtigkeit abhängigen Produktionsfunktion im Zusammenhang steht. Unterschiedliche Funktionsverläufe führen zu einer mit der Bodenmächtigkeit variierenden Konkurrenzskraft der Kulturen.

Im folgenden wird der Effekt unterschiedlicher Bodenmächtigkeiten auf die Vermeidungskosten im ersten Jahr der Betrachtung diskutiert:

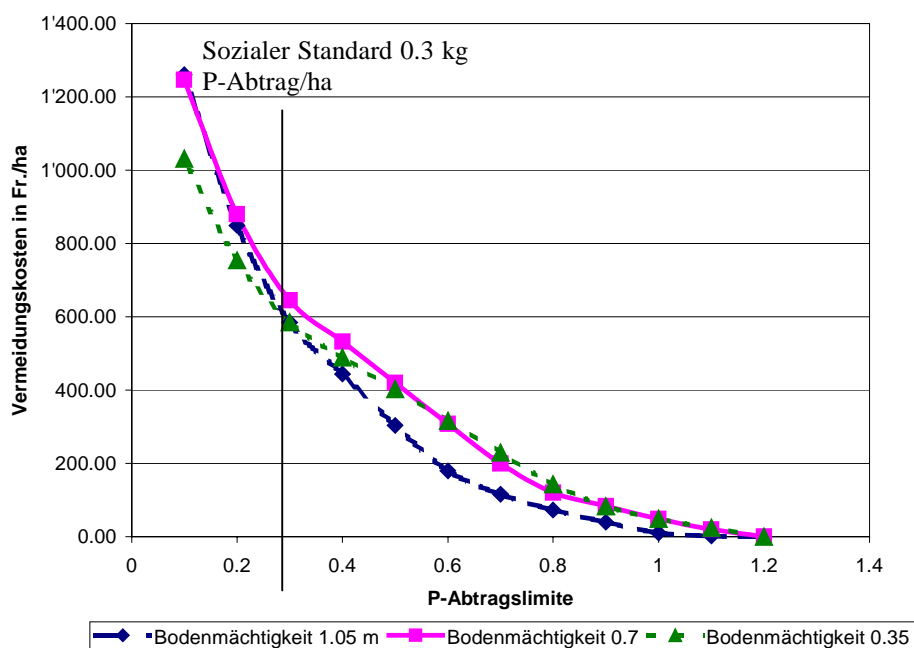


Abbildung 32: Vermeidungskosten unterschiedlicher P-Abtragslimiten in Abhängigkeit von der Bodenmächtigkeit im Jahr 1 der Betrachtung

Die Vermeidungskosten sind bei der höchsten Bodenmächtigkeit von 1.05 m bis zu einer Abtragslimite von 0.3 kg /ha am tiefsten und weisen generell einen progressiven Verlauf auf bei der Verschärfung der P-Abtragslimite. Bei den Bodenmächtigkeiten 0.7 m und 0.35 m verlaufen die Vermeidungskosten bis zu einer Abtragslimite von 0.5 kg pro ha parallel. Danach steigen die Vermeidungskosten bei der tiefsten Bodenmächtigkeit bei einer weiteren Verschärfung der Limite weniger stark an. Absolut erhöhen sich die Vermeidungskosten bei einer Verschärfung der P-Abtragslimite von Fr. 0.- / ha auf über Fr. 1200.- / ha für die schärfste P-Abtragslimite von 0.1 kg / ha. Der unterschiedliche Verlauf der Vermeidungskosten rührt von der unterschiedlichen Konkurrenzkraft der Kulturen bei den verschiedenen Bodenmächtigkeiten her.

14.3.2.4 Auswirkungen unterschiedlicher Längen des Planungshorizontes

Die Länge des Planungshorizontes hat auf die Vermeidungskosten der P-Abtragslimite keinen Einfluss, da sich in der Optimierung ohne P-Abtragslimite die Produktionsstruktur als von der Fristigkeit der Betrachtung unabhängig erweist. P-Abtragslimiten führen daher kurz- und langfristig zu identischen Vermeidungskosten. Eine Differenzierung der Vermeidungskosten in langfristige und kurzfristige erübrigt sich.

14.3.2.5 Fazit

Die Beurteilung der Zweckmässigkeit von Massnahmen zur Beschränkung des Phosphorabtrages aus volkswirtschaftlicher Sicht hängt neben den volkswirtschaftlichen Kosten vom volkswirtschaftlichen Nutzen ab. Dieser kann durch die Entschärfung eines Umweltproblems, im konkreten Fall der Reduktion des Phosphorabtrages, erzielt werden. Die gesamten Kosten einer Massnahme setzen sich aus den Durchführungskosten (Kontrollkosten und Transaktionskosten) und den Vermeidungskosten des Landwirtes zusammen. Letztere können mit dem gewählten Modellansatz für beliebige Massnahmenniveaus bestimmt werden. Die Verringerung der volkswirtschaftlichen Schäden der Erosion und des partikulären P-Abtrags sowie die Administrationskosten der Massnahmen werden in dieser Untersuchung nicht bestimmt. Die Art der Modellierung kann aber einen Input für eine umfassende Kosten - Nutzenanalyse von Massnahmen und Instrumenten liefern, indem die Höhe der Vermeidungskosten für beliebige Massnahmenniveaus bestimmt werden kann. Die Durchführbarkeit dieser Massnahme ist nicht gegeben, da es sich um ein non-point-source-pollution Problem handelt und die Emissionen bei den Akteuren nicht messbar sind. Daher sind indirekte Massnahmen und Instrumente angezeigt, wie sie im Abschnitt 14.4 diskutiert werden.

14.3.3 Least cost Solution durch P-Abtragssteuer

Im Modell wird die Zielfunktion erweitert, indem der Zielfunktionswert ohne P-Steuer um das Produkt aus P-Abtrag und Steuersatz pro kg P-Abtrag verringert wird:

$$ZF - (\text{Phosphoremission in kg} * \text{Steuersatz pro kg Phosphor})$$

Die Resultate in den Tabellen im Kapitel A6 im Anhang zeigen die Effekte einer P-Emissionssteuer auf. Die den Kalkulationen zugrunde gelegten Steuern entsprechen den Schattenpreisen der Phosphorrestriktion in den kurz- und langfristigen Berechnungen aus sozialer Sicht im Abschnitt 14.1.7.

P-Emissionssteuern gehören zu den preisbasierten Massnahmen. Gemäss Pezzey (1992, S. 983) ist Verschmutzungskontrolle unter idealen Bedingungen¹⁸¹ durch eine preisbasierte Massnahme aus kurz- und langfristiger Effizienz- und politischer Akzeptanz (Akzeptanz bei politischen Entscheidungsträgern) zu mengenbasierten Massnahmen wie handelbaren Umweltzertifikaten gleichwertig.

Die Resultate der Berechnungen mit einer P-Steuer zeigen, dass die Schattenpreise der Phosphorrestriktion in den Berechnungen mit einem sozialen Standard (vgl. Abschnitt 14.1.7) den korrekten Steuersatz ergeben. Der durchschnittliche Phosphorabtrag pro ha weicht bei allen Berechnungen manchmal geringfügig von den 0.3 kg Phosphorabtrag/ha ab. Einzig in der Variante mit langfristigen Betrachtungszeitraum, einer Diskontrate von 6% und einer Bodenmächtigkeit von 1.05 m weicht die durchschnittliche Erosion pro ha über den gesamten Zeitraum mit 0.31 kg/ha ca. 3% von der vorgegebenen Zielgrösse von 0.3 kg pro ha ab. Diese Abweichungen sind unbedeutend und auf numerische Ungenauigkeiten in Verbindung mit dem aktivitätsanalytischen Ansatz zurückzuführen.

Im Zeitablauf wechseln sich Jahre mit überdurchschnittlicher Erosion mit solchen mit unterdurchschnittlicher Erosion ab, teils auch nur periodenweise. Parallel verändern sich auch die erodierten mm Bodenmächtigkeit, die erreichte Zahl der Bodenschutzpunkte und der Phosphorverlust im Zeitablauf. Die on-farm-costs der Erosion pro mm sind bei der P-Abtragssteuer in der kurz- und der langfristigen Betrachtung identisch mit denjenigen der Berechnung der sozial optimalen Situation (vgl. Abschnitt 14.1.7). Dies ist auch zu erwarten, da mit der Steuer im Durchschnitt die gleiche Erosionssituation erreicht wird wie bei der Vorgabe des sozialen Standards. Deshalb sind die Kosten der Erosion, die der marginalen mittleren Änderung des Zielfunktionswertes bei einer marginalen mittleren Änderung der Bodenmächtigkeit entsprechen (abhängig vom mittleren Verlauf der Erosionsfunktion: Steigung), in der sozialen Betrachtung und in der Variante mit Besteuerung des Phosphors identisch. Steuern und sozialer Standard führen zur nahezu gleichen Betriebsstruktur. Bei Besteuerung erfolgt die Zielfunktionsänderung lediglich auf einem tieferen Niveau, absolut aber im gleichen Ausmass. Der Schattenpreis der Fläche verringert sich entsprechend der durch die Einführung der P-Steuer gesunkenen Rentabilität, die sich in den Zielfunktionswerten ausdrückt und in laufenden Werten gut ersichtlich ist. Die Veränderung des A-Horizontes liegt in derselben Grössenordnung wie bei der Einführung des sozialen Standards in Abschnitt 14.1.7. Unterschiede sind auf Rundungsdifferenzen zurückzuführen. In der Kulturenwahl zeigen sich die zu den jährlichen Wechseln im Erosionsgeschehen führenden Abfolgen mehr oder weniger erosiver Kulturenwahlen, teils durch Ausdehnung oder Verringerung der Anbaufläche bestimmter Kulturen, durch den Anbau anderer Kulturen und durch die Verwendung alternativer Anbauverfahren in der Bodenbearbeitung. Als Kulturen erscheinen bei einer Bodenmächtigkeit von 0.7 m und höher zweijährige Kunstwiesen, Winterweizen in Minimalbodenbearbeitung und Kartoffeln. In gewissen Jahre ersetzen Kartoffeln zum Teil die Kunstwiesenfläche, was zu den genannten erosiven und weniger erosiven Kulturenwahlen in den einzelnen Jahren führt. Bei einer Bodenmächtigkeit von 0.35 m erscheint die Hackfrucht Kartoffeln nicht mehr und der Winterweizen in Minimalbodenbearbeitung wechselt im Jahresablauf mit Sommerhafer mit Zwischenfrucht in Standardbodenbearbeitung.

Verglichen wird im folgenden die private Optimierung mit und ohne Steuern je bei kurz- und langfristiger Betrachtung. Daraus lässt sich eine Zielfunktionsdifferenz errechnen, die durch

¹⁸¹ Ideale Bedingungen meint: vollständige Konkurrenz zwischen Firmen ungleicher Faktorausstattung sowohl vor- und nachgelagert, Verschmutzung assimiliert in begrenzter Umwelt, Nichtberücksichtigung von Unsicherheit und technischer Innovation in der Verschmutzungskontrolle, vollständige Information ohne Transaktionskosten und staatliche Gewalt mit dem einzigen Ziel der Wohlstandsmaximierung (Pezzey 1992, S. 984).

die Besteuerung des P-Abtrags in partikulärer Form bewirkt ist. Die Zielfunktionsdifferenz (Abschnitt 14.3.3.2) lässt sich in zwei Effekte aufteilen:

- Eine direkt steuerbedingte Zielfunktionsreduktion (Abschnitt 14.3.3.3), die sich aus dem Produkt aus P-Abtrag und Steuersatz pro kg P (Abschnitt 14.3.3.1) errechnet: die Steuerlast
- Eine indirekt steuerbedingte Zielfunktionsreduktion durch die durch die Steuer induzierte Veränderung der Produktionsstruktur (Abschnitt 14.3.3.4): die Vermeidungskosten

Die Ausführungen in den folgenden Abschnitten quantifizieren die beiden Effekte.

14.3.3.1 Optimale Steuersätze zur Erreichung des sozialen Optimums

In der nachstehenden Tabelle werden die zur Erreichung eines sozial optimalen Verhaltens der privaten Akteure notwendigen Steuersätze auf den P-Abtrag im 10 Jahresintervall dargestellt:

Jahr	Kurzfristig								
	Diskontfaktor 1.06			Diskontfaktor 1.03			Diskontfaktor 1		
Boden	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35
1	1'324	1'063	1'592	1'362	1'093	1'638	1'403	1'126	1'687
10	783	627	938	1'044	836	1'249	1'403	1'124	1'679
20	437	349	521	776	620	925	1'402	1'121	1'670
30	244	195	289	577	460	684	1'401	1'118	1'661
40	136	108	161	429	342	506	1'401	1'115	1'652
50	76	60	89	319	254	375	1'400	1'112	1'643
60	42	34	50	238	188	277	1'399	1'108	1'634
66	30	24	35	199	157	231	1'399	1'107	1'628
Jahr	Langfristig								
1	1'214	1'008	1'571	1'176	1'021	1'601	1'194	997	1'600
10	811	620	926	1'164	819	1'223	1'505	1'084	1'604
20	456	345	514	860	609	906	1'470	1'085	1'608
30	258	193	286	636	453	672	1'447	1'089	1'613
40	146	107	159	471	337	499	1'432	1'093	1'617
50	83	60	88	349	252	371	1'423	1'099	1'621
60	47	34	49	259	188	276	1'418	1'106	1'626
66	34	25	35	221	163	231	1'498	1'145	1'628

Tabelle 27: Optimale Steuerbeträge pro kg P-Abtrag bei kurz- und langfristigem Planungshorizont

Die optimalen Steuerbeträge pro kg P-Abtrag liegen im ersten Jahr bei einer Diskontrate von 6% in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit zwischen Fr. 1063.- und Fr. 1592.-. Der mittlere zu bezahlende Steuerbetrag pro ha liegt bei 30% dieses Betrages, da der mittlere P-Abtrag 0.3 kg pro ha beträgt. Die letzten drei Spalten in Tabelle 27 zeigen die Entwicklung des Steuerbetrages pro kg P im Zeitablauf ohne Einfluss einer Diskontierung in laufenden Werten.

Die Entwicklung wird bei einer Diskontrate von 0% im folgenden diskutiert, da kein Einfluss der Diskontierung besteht (vgl. letzte Spalte mit Bodenmächtigkeit 0.35 m in Tabelle 27). Bei kurzfristigem Planungshorizont sinkt der Steuerbetrag pro kg P bei allen drei Bodenmächtigkeiten im Zeitablauf. Dies entspricht den Erwartungen, da durch die Erosion im Zeitablauf das Ertragspotential der Kulturen durch die Erosion abnimmt und bei tieferen Erträgen ein gerin-

ger Anreiz zur Wahl erosionsmindernder Kulturen genügt. Die durch die Erosion reduzierte Kulturenrentabilität führt zu tieferen Steuersätzen.

Bei langfristigem Planungshorizont liegen die notwendigen Steuersätze zur Erreichung des sozialen Standards leicht tiefer mit einer im Gegensatz zur kurzfristigen Betrachtung leicht steigenden Tendenz. Das leicht tiefere Niveau erklärt sich mit den in der Optimierung berücksichtigten negativen Folgeeffekten der Erosion, die zwar einen Anreiz für eine weniger erosive Fruchtfolge zu Beginn des Betrachtungszeitraumes darstellen, im Ausmass aber keine Veränderung der Fruchtfolge bewirken (vgl. Resultate und Erklärungen im Abschnitt 14.1.7). Dieser Anreiz wirkt sich im für ein sozial optimales Verhalten tieferen Steuersatz bei langfristigem Planungshorizont aus.

Die leicht steigende Tendenz der Steuerbeträge pro kg P in der langfristigen Betrachtung erklärt sich mit der geringeren Anzahl Jahre, deren Folgeeffekte im Zeitablauf zu berücksichtigen sind. Je grösser die zu berücksichtigenden Erosionseffekte sind, umso geringer sind die zur Erreichung des sozialen Standards notwendigen Steuern in einer bestimmten Situation. Relativ zu den Effekten des sinkenden Ertragspotentials auf den Steuersatz (vgl. obige kurzfristige Betrachtung) verringern sich die zu berücksichtigenden Folgeeffekte stärker, was zur leicht steigenden Tendenz der Steuerbeträge pro kg P in der langfristigen Betrachtung führt. Somit kann die Differenz im Steuerbetrag pro kg P zwischen kurz- und langfristiger Betrachtung als Anzeizeffekt für erosionsmindernde Massnahmen bei langfristiger Betrachtung interpretiert werden, bzw. als Differenz der Opportunitätskosten der Ressourcenkonservierung zur Ressourcennutzung bei kurz- und langfristiger Betrachtung. Aus der Differenz wird ersichtlich, dass die Folgewirkungen der Erosion nur einen geringen Anreiz für eine weniger erosive Fruchtfolge darstellen, was die Gewinneinbussen bei der Wahl einer weniger erosiven Fruchtfolge nicht auszugleichen vermag.

Im letzten Jahr der Betrachtung müssten die optimal zu wählenden Steuersätze bei gleichen Entwicklungspfaden der Zustandsvariablen identisch sein, da bei langfristiger Betrachtung keine zu berücksichtigenden Folgeeffekte der Erosion mehr vorliegen. Deshalb muss der notwendige Steuersatz in der langfristigen Betrachtung im Zeitablauf im Gegensatz zur kurzfristigen Betrachtung steigen. Die Daten in Tabelle 27 zeigen, dass dies nur bei der tiefsten Bodenmächtigkeit eindeutig der Fall ist. Unterschiede sind auf die numerische Rechengenauigkeit in Verbindung mit der Linearität in den Variablen der Flächenallokation zurückzuführen. Dies führt zu unterschiedlichen Entwicklungspfaden in der kurz- und langfristigen Betrachtung und damit zu unterschiedlichen Zuständen im Endzeitpunkt.

14.3.3.2 Zielfunktionsdifferenz bei privater Optimierung mit und ohne Steuern

Bei der Optimierung der Flächenallokation des untersuchten Ackerbaubetriebes entstehen durch die Fälle mit und ohne Steuern Zielfunktionsdifferenzen. Diese setzen sich aus dem Steueraufkommen und der durch die Steuer induzierten Veränderung der Kulturenwahl zusammen. In der folgenden Tabelle wird die absolute Grösse dieser Auswirkungen für jedes zehnte Jahr in laufenden Werten dargestellt:

	Diskontfaktor 1.06			Diskontfaktor 1.03			Diskontfaktor 1		
Boden	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35
Jahr	Kurzfristig								
1	20'102	19'660	22'382	20'102	19'660	22'382	20'102	19'660	22'382
10	20'064	19'485	22'093	20'064	19'485	22'093	20'064	19'485	22'093
20	20'017	19'286	21'767	20'017	19'286	21'767	20'017	19'286	21'767
30	19'963	19'089	21'436	19'963	19'089	21'436	19'963	19'089	21'436
40	19'908	18'880	21'100	19'908	18'880	21'100	19'908	18'880	21'100

Boden	Diskontfaktor 1.06			Diskontfaktor 1.03			Diskontfaktor 1		
	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35
50	19'850	18'667	20'758	19'850	18'667	20'758	19'850	18'667	20'758
60	19'784	18'449	20'411	19'784	18'449	20'411	19'784	18'449	20'411
66	19'745	18'311	20'198	19'745	18'311	20'198	19'745	18'311	20'198
Jahr	Langfristig								
1	19'517	19'350	22'273	19'138	19'261	22'215	19'050	18'972	21'807
10	20'310	19'417	21'960	20'701	19'370	21'872	22'706	19'268	21'640
20	19'816	20'181	21'639	22'607	18'569	21'561	20'774	19'085	21'387
30	18'240	19'422	21'315	20'441	18'993	21'258	19'325	18'908	21'136
40	18'281	19'764	20'992	20'588	18'813	20'951	19'736	18'735	20'887
50	18'351	19'554	20'711	22'307	18'624	20'658	19'357	18'562	20'633
60	18'448	18'451	20'371	20'411	18'440	20'371	19'881	18'764	20'374
66	22'806	18'537	20'200	20'511	18'531	20'204	20'243	18'749	20'216

Tabelle 28: Gewinndifferenzen durch die Besteuerung des P-Abtrags in laufenden Werten

Tabelle 28 zeigt die durch die Einführung einer sozial optimalen Steuer auf den P-Abtrag des Betriebes bewirkte Verringerung des Zielfunktionswertes im Zeitablauf bei unterschiedlichen Bodenmächtigkeiten und Diskontraten. Die Diskussion erfolgt an den Daten mit Diskontrate 0%, da in diesem Fall von der Diskontierung kein den Verlauf bestimmender Einfluss ausgeht. Im Zeitablauf sinken die Zielfunktionsdifferenzen in laufenden Werten bei allen Bodenmächtigkeiten in der kurz- sowie in der langfristigen Betrachtung. In der kurzfristigen Betrachtung sind die Diskontraten ohne Einfluss auf die Kulturenwahl im Zeitablauf. Deshalb sind die Zielfunktionsdifferenzen nur von der Bodenmächtigkeit, aber nicht von der Diskontrate abhängig. Bei einer Reduktion der Ausgangsbodenmächtigkeit von 1.05 m auf 0.35 m vergrössern sich die Zielfunktionsdifferenzen um ca. 10-15%. Die Vergrösserung ist darauf zurückzuführen, dass bei tieferer Bodenmächtigkeit bedeutendere Anpassungen in der Struktur der Flächennutzung notwendig sind, um die sozialen Vorgaben zu erreichen. Dies zeigt sich auch in den zur Erreichung des sozialen Standards notwendigen höheren Steuersätzen bei tieferer Ausgangsbodenmächtigkeit (vgl. Abschnitt 14.3.3.3). Bei einer Bodenmächtigkeit von 0.7 m sinkt die Zielfunktionsdifferenz dagegen leicht im Vergleich zur Bodenmächtigkeit von 1.05 m. Dies ist auf die sich unterschiedlich verändernde Krümmung der Produktions- und Erosionsfunktionen zurückzuführen (der Erklärungsansatz ist analog demjenigen für steigende und fallende Kosten der Phosphorrestriktion im Exkurs S. 206). Trotz unterschiedlicher Steuersätze (vgl. Abschnitt 14.3.3.1) sind die Fruchtfolgen im Zeitablauf in den Berechnungen mit Steuern gleich, wechseln aber über die einzelnen Jahre. Auf der Basis der Resultate (vgl. Anhang A6) lässt sich folgern, dass die Besteuerung im Vergleich zur privaten Optimierung zu einer sich im Zeitablauf ändernden Fruchtfolge führt, dass diese aber ebenfalls unabhängig von der Diskontrate ist.

In der langfristigen Betrachtung dagegen zeigen sich Abhängigkeiten von der Diskontrate, neben derjenigen von der Bodenmächtigkeit. Diese Abhängigkeiten sind auf unterschiedliche Steuersätze, die die Folgekosten der Erosion zu einem Zeitpunkt berücksichtigen, zurückzuführen. Die Steuersätze weichen infolge unterschiedlicher Diskontraten in der Betrachtung in diskontierten Werten voneinander ab und führen daher im Zeitablauf zu sich unterschiedlich entwickelnden Kulturabfolgen. Dies steht im Gegensatz zur kurzfristigen Betrachtung.

Die Zielfunktionsdifferenz ist bei langfristigem Planungshorizont geringer als bei kurzfristigem, da bei kurzfristigem Planungshorizont infolge der Nichtberücksichtigung der Folgekosten der Erosion stärkere betriebliche Anreizwirkungen (höhere Steuersätze) notwendig sind als bei langfristigem Planungshorizont in der Ausgangslage (höhere Opportunitätskosten der

Ressourcennutzung als in der kurzfristigen Betrachtung). Zudem ist die Fruchtfolge über die Jahre in den Berechnungen mit einer P-Steuer abhängig von der Diskontrate.

14.3.3.3 Steuerbetrag des untersuchten Ackerbaubetriebes

In Abhängigkeit des P-Abtrags und der in Abschnitt 14.3.3.1 in Tabelle 27 dargestellten optimalen Steuerbeträge pro kg P im Zeitablauf muss der Ackerbaubetrieb die in der folgenden Tabelle dargestellten Beträge in laufenden Werten als Steuern abliefern:

Jahr	Kurzfristig								
	Diskontfaktor 1.06			Diskontfaktor 1.03			Diskontfaktor 1		
Boden	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35
1	6'654	5'657	5'703	6'848	5'822	5'869	7'053	5'997	10'538
10	6'652	5'647	9'902	6'846	5'812	10'190	7'051	5'986	10'496
20	6'650	12'066	9'858	6'844	12'418	10'145	7'049	12'790	10'449
30	6'648	5'624	9'813	6'841	5'788	10'099	7'047	5'962	10'402
40	6'646	5'612	9'769	6'839	5'776	10'053	7'044	5'949	10'355
50	6'644	5'601	9'724	6'837	5'764	10'008	7'042	5'937	10'308
60	6'641	5'589	9'680	6'835	5'752	9'962	7'040	5'924	10'260
66	6'640	11'943	9'653	6'833	12'291	9'934	7'038	12'660	10'232
∅	7'927	6'397	9'354	8'158	6'583	9'627	8'402	6'781	9'915
Jahr	Langfristig								
1	6'102	5'365	5'629	5'911	5'435	5'736	6'001	5'310	9'993
10	6'884	5'577	9'775	7'606	5'693	9'971	7'880	5'775	10'026
20	12'701	5'791	9'735	7'852	12'073	9'942	7'452	5'785	10'061
30	6'727	12'025	9'697	16'088	5'695	9'921	7'152	5'806	10'097
40	6'819	5'787	9'665	7'499	5'705	9'907	7'738	5'835	10'135
50	6'937	5'795	5'532	16'247	5'722	9'905	7'071	5'869	10'172
60	7'088	5'597	9'641	7'441	5'749	9'917	7'133	5'998	10'209
66	7'823	5'789	9'653	7'577	5'951	9'934	7'536	13'102	10'232
∅	8'033	6'332	9'261	8'110	6'468	9'483	8'339	6'529	9'657

Tabelle 29: Steuervolumen des Ackerbaubetriebes bei Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg P-Verlust pro ha in laufenden Werten

Gemäss Tabelle 29 ist der zu bezahlende mittlere Steuerbetrag des Betriebes bei einer Bodenmächtigkeit von 0.7 m unabhängig von der Diskontrate am geringsten (Begründung analog zur Herleitung im Exkurs S. 206) und bei der tiefsten Bodenmächtigkeit am höchsten. Wo in der jährlichen Abfolge stark voneinander abweichende Steuerbeträge auftauchen, ist dies auf die Präzision der Zahlendarstellung (Steuer) in Kombination mit der Linearität der Allokationsvariablen (Extremallösung) in den Berechnungen zurückzuführen. Entsprechend sind in der Jahresabfolge z.T. stark unterschiedliche P-Abtragsvolumina und Kulturwahlen zu beobachten, wobei im Mittel der soziale Standard eingehalten wird. Es zeigt sich, dass bei langfristigem Planungshorizont der für die Erreichung der sozialen Vorgabe zu bezahlende Steuerbetrag durchschnittlich tiefer ist, was sich mit den in der langfristigen Optimierung berücksichtigten betrieblichen Folgekosten der Erosion (höhere Opportunitätskosten der Ressourcennutzung) erklären lässt (Ausnahme: Bodenmächtigkeit 1.05 m und Diskontrate 6%). Die Ausnahme ist auf Jahre mit stark von der sozialen Norm abweichenden P-Abträgen, die sich durch die Linearität in den Variablen der Flächenallokation bedeutend auswirkt, zu begründen. Mit sinkender Diskontrate steigt bei gleicher Bodenmächtigkeit der zu bezahlende durchschnittliche Steuerbetrag bei kurz- und langfristigen Planungshorizont. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei tieferer Diskontrate im Zeitablauf der Anreiz für eine höhere Erosion,

die gewinnbringender ist, länger erhalten bleibt. Bei hoher Diskontrate sinkt der Anreiz für eine erosionsintensive, da gewinnmaximierende Fruchtfolge im Zeitablauf, da künftige Gewinne schwächer gewichtet werden.

14.3.3.4 Einkommenseinbusse infolge Betriebsstrukturveränderung bei Besteuerung

Durch die Besteuerung des P-Abtrags wird die Konkurrenzkraft der Kulturen verändert und es ergeben sich in den Einzeljahren neue Flächenallokationen. Diese Verschiebungen weg von der gewinnmaximierenden Struktur ohne Besteuerung führen per se zu einer Einkommensminderung. Die folgende Tabelle liefert eine Übersicht über diese Einbussen, die Vermeidungskosten, differenziert nach Planungshorizont, Diskontrate und Bodenmächtigkeit für jedes zehnte Jahr:

Jahr	Kurzfristig								
	Diskontfaktor 1.06			Diskontfaktor 1.03			Diskontfaktor 1		
Boden	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35
1	13'448	14'002	16'679	13'255	13'837	16'513	13'049	13'663	11'844
10	13'412	13'838	12'191	13'218	13'674	11'903	13'013	13'499	11'597
20	13'367	7'220	11'910	13'173	6'868	11'623	12'968	6'496	11'318
30	13'315	13'465	11'623	13'122	13'301	11'337	12'916	13'127	11'034
40	13'263	13'268	11'331	13'069	13'105	11'047	12'864	12'931	10'745
50	13'206	13'066	11'034	13'013	12'903	10'751	12'808	12'730	10'450
60	13'143	12'860	10'731	12'950	12'697	10'449	12'745	12'525	10'150
66	13'105	6'368	10'545	12'911	6'020	10'264	12'706	5'652	9'966
∅	12'011	12'608	11'954	11'780	12'422	11'682	11'535	12'224	11'393
Jahr	Langfristig								
1	13'415	13'985	16'645	13'227	13'826	16'479	13'049	13'663	11'814
10	13'426	13'840	12'185	13'095	13'676	11'902	14'825	13'493	11'614
20	7'115	14'390	11'904	14'755	6'495	11'619	13'322	13'300	11'325
30	11'512	7'398	11'618	4'354	13'298	11'338	12'173	13'102	11'038
40	11'461	13'977	11'327	13'089	13'109	11'045	11'998	12'900	10'753
50	11'414	13'759	15'179	6'060	12'902	10'753	12'286	12'693	10'461
60	11'360	12'854	10'731	12'970	12'691	10'454	12'748	12'766	10'165
66	14'983	12'749	10'547	12'933	12'580	10'270	12'707	5'648	9'984
∅	11'877	12'604	11'950	11'791	12'420	11'681	11'504	12'254	11'398

Tabelle 30: Einkommenseinbussen des Ackerbaubetriebes durch Strukturveränderungen infolge Besteuerung in Fr. pro Betrieb

Tabelle 30 zeigt die durch die Veränderung der Betriebsstruktur bedingten durchschnittlichen Einkommenseinbussen und die Einkommenseinbussen in jedem zehnten Jahr als Folge einer P-Steuer auf den partikulären P-Abtrag. In Abhängigkeit der Diskontrate sind keine klaren Entwicklungstendenzen feststellbar und auch der Betrachtungszeitraum hat keinen erkennbaren Einfluss. Die betriebstrukturell bedingte Einkommenseinbusse ist bei einer Bodenmächtigkeit von 0.7 m am höchsten (vgl. Abbildung 30) und liegt bei allen anderen Bodenmächtigkeiten generell tiefer. Die nicht kontinuierlichen Veränderungen im Zeitablauf und die Unterschiede bei den verschiedenen Diskontraten sind durch die Linearität in den Flächenvariablen in Verbindung mit der Darstellungsgenauigkeit der Zahlen bedingt, wodurch die Anpassungen diskontinuierlich erfolgen. Im Total liegen die durchschnittlichen Einbussen zwischen Fr. 10'000.- bis Fr. 13'000.- für den Gesamtbetrieb bzw. Fr. 500.- bis Fr. 650.- /ha.

14.3.3.4.1 Relatives Verhältnis von Steuern und strukturbedingten Einbussen zum Total der Einkommenseinbusse

	Kurzfristig								
	Diskontfaktor 1.06			Diskontfaktor 1.03			Diskontfaktor 1		
Boden	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35	1.05	0.7	0.35
Ø	60%	66%	56%	59%	65%	55%	58%	64%	53%
	Langfristig								
Ø	60%	67%	56%	59%	66%	55%	58%	65%	54%

Tabelle 31: Prozentualer Anteil der strukturänderungsbedingten Einbusse an der gesamten Einbusse bei Besteuerung

Tabelle 31 zeigt den mittleren Anteil der Einkommenseinbusse des Ackerbaubetriebes an der gesamten Einkommenseinbusse, die durch eine Besteuerung des P-Abtrags bewirkt wird und auf die Anpassung der Betriebsstruktur zurückzuführen ist. In der Grössenordnung bewegt sich dieser Anteil zwischen 53 % und 67 %. Entsprechend beträgt der Anteil der P-Steuer 33-47%. Der relative Anteil der Steuer an der gesamten Einkommenseinbusse ist jeweils bei der Bodenmächtigkeit 0.7 m am geringsten. In der Tendenz sind die Anteile der strukturänderungsbedingten Einbussen in der langfristigen Betrachtung höher als in der kurzfristigen. Dieser Effekt ist auf die infolge der Berücksichtigung der intertemporalen Kosten der Erosion tieferen Steuervolumen bei der langfristigen Betrachtung zurückzuführen. Die Abhängigkeit von den Diskontraten hängt mit den infolge der Diskontierung unterschiedlich hohen intertemporalen Kosten der Erosion, der linearen Homogenität der Funktionen in der Variablen der Flächenallokation und mit der numerischen Präzision in der Zahlendarstellung zusammen.

14.3.3.4.2 Vergleich der Anpassungskosten der P-Steuer mit denjenigen der P-Abtragslimite

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über den Unterschied der Vermeidungskosten bei Besteuerung im Vergleich zur Situation bei der Vorgabe eines sozialen Standards:

Diskontrate	Bodenmächtigkeit	Kurzfristig	Langfristig
6%	1.05	481	348
6%	0.7	305	300
6%	0.35	591	585
3%	1.05	251	261
3%	0.7	118	116
3%	0.35	319	314
0%	1.05	6	-25
0%	0.7	-79	-50
0%	0.35	30	28

Tabelle 32: Unterschiede in den Vermeidungskosten bei Besteuerung und bei Vorgabe eines sozial bedingten Standards in Fr. total in laufenden Werten -> Effizienzverlust

In den meisten Varianten führt die Besteuerung zu höheren Vermeidungskosten¹⁸² (positive Werte in Tabelle 32) als die Optimierung mit Vorgabe eines sozialen Standards. Einzig bei einer Diskontrate von 0% tendiert die Differenz gegen 0 oder wird sogar leicht negativ. Negative Werte sind aus ökonomischer Sicht nicht zu erwarten, da mit der Vorgabe des sozialen Standards auf Stufe Einzelbetrieb die optimale Struktur zur Erreichung dieses Standards in der Optimierung bestimmt wird. Aus ökonomischer Sicht dürften keine Abweichungen auftreten, da durch eine Steuer, die aus der Bewertung der Phosphorrestriktion in den Rechnungen mit einem sozialen Standard resultiert, der Betrieb in seiner Struktur mit Besteuerung exakt auf den sozialen Standard kalibrieren müsste. Die Abweichungen sind in der Grössenordnung nicht bedeutend (Fr. -3.- bis max. Fr. 30.- / ha LN) und auf numerische Rechenungenauigkeiten (Anzahl Dezimalstellen) in Verbindung mit der Linearität des Modells in der Flächenallokation zurückzuführen. Über den Betrachtungszeitraum wird der soziale Standard bei Besteuerung im Durchschnitt in allen untersuchten Varianten sehr gut erreicht.

14.3.3.5 Marginale Vermeidungskosten der Massnahme P-Abtragssteuer

Emissionssteuern und Emissionsstandards führen auf homogenen Betrieben zu gleichen minimalen Anpassungskosten. Der Verlauf der Funktion der Vermeidungskosten und der marginalen Vermeidungskosten ist bei der P-Abtragssteuer identisch zu demjenigen bei den P-Standards. Der Übersicht wegen werden die Funktionen der Vermeidungskosten und der marginalen Vermeidungskosten zusammen mit der graphischen Darstellung des Verlaufs der marginalen Vermeidungskosten nachfolgend aufgeführt:

Gleichung 101: Funktion der Vermeidungskosten der P-Abtragssteuer

$$F(P) = -534.27 + e^{0.194 * P + 6.26}$$

Gemäss Gleichung 98 ergeben sich die marginalen Vermeidungskosten pro kg P durch Ableitung der Funktion der Vermeidungskosten in Gleichung 101:

Gleichung 102: Funktion der marginalen Vermeidungskosten der P-Abtragssteuer

$$f(P) = 0.194 * e^{0.194 * P + 6.36}$$

Abbildung 33 veranschaulicht den Verlauf der marginalen Vermeidungskosten pro kg Phosphor bei einer Besteuerung des P-Abtrages.

¹⁸² Die gesamten Kosten für den Betrieb setzen sich aus den Vermeidungskosten und dem zu zahlenden Steuerbetrag zusammen.

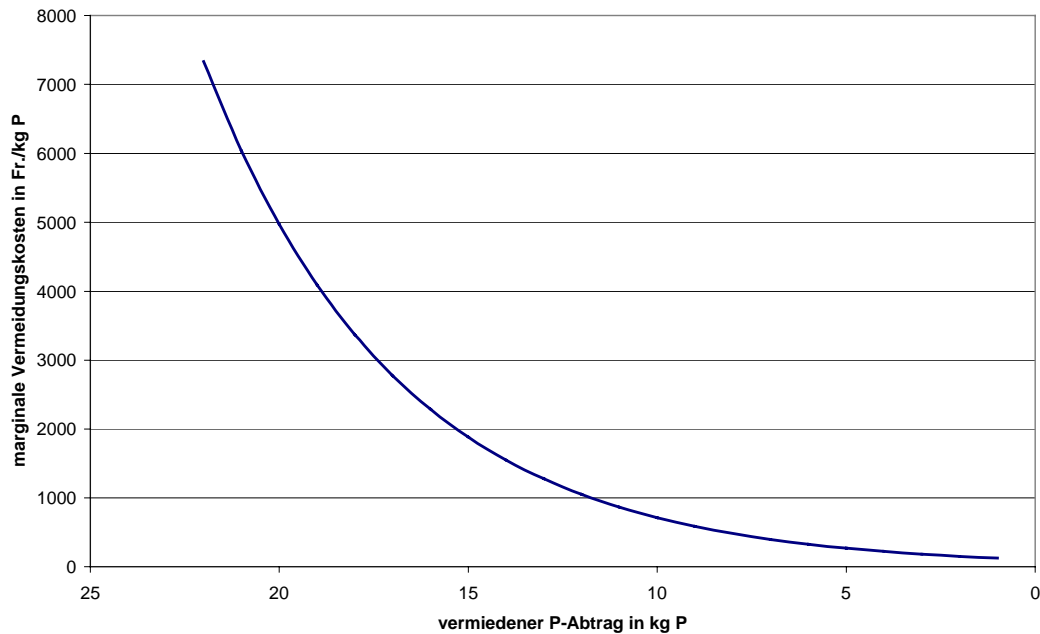


Abbildung 33: Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags bei einer P-Abtragssteuer

Der Verlauf der Funktion der marginalen Vermeidungskosten einer P-Abtragssteuer deckt sich mit demjenigen der P-Standards im Falle homogener Betriebe.

14.3.3.6 Fazit

Der zu bezahlende Steuerbetrag zur Erreichung des sozialen Standards beträgt 33 bis 47% der gesamten Gewinneinbusse bei Besteuerung. Die Besteuerung führt zu einer der Vorgabe eines sozialen Standards nahezu identischen Betriebsstruktur im Zeitablauf. Die Abweichungen betragen bei positiver Diskontrate zwischen Fr. 100.- und Fr. 600.- für den Gesamtbetrieb bzw. zwischen Fr. 5.- und Fr. 30.- pro ha. Ohne Diskontierung verschwinden die Unterschiede. Die Besteuerung führt aus ökonomischer Sicht zu einer effizienten Erreichung des sozialen Standards mit minimalen Kosten. Die P-Steuer als least-cost Massnahme führt damit zu einem effizienten Allokationsresultat. Auf Stufe Einzelbetrieb, bzw. wenn alle Betriebe gleich sind (Homogenität), ist die Vorgabe eines Standard aus Sicht der Kosteneffizienz der Emissionssteuer gleichwertig. Deshalb ist auch der Verlauf der marginalen Vermeidungskosten von P-Standards und P-Abtragsbesteuerung bei Homogenität zwischen den untersuchten Betrieben identisch. Bei Heterogenität zwischen den Betrieben führt nur die Besteuerung zu minimalen Anpassungskosten. Standards führen zu Effizienzverlusten.

Das gesamte Einkommen des Betriebes ändert sich im Umfang der zu bezahlenden Steuern und der Vermeidungskosten. Die Steuern tangieren aber die Allokationseffizienz der Massnahme nicht, da sie nur eine Verteilungswirkung haben. Dieser Aspekt ist aus Sicht der Akzeptanz der Massnahmen relevant.

Die Berechnungen zeigen, dass das Modell aus ökonomischer Sicht numerisch korrekte Resultate liefert. Die Berechnungen einer P-Steuer sind daher im wesentlichen als zusätzliche numerische Validierung des Modells zu betrachten. Da es sich um ein non-point-source-pollution Problem handelt, sind Steuern auf die Emissionen wie auch P-Standards nicht umsetzbar. Daher stellt sich die Frage nach indirekten Massnahmen.

14.4 Indirekte Massnahmen

14.4.1 Entwicklung der Erosion bei minimaler Vorschrift über Bodenschutzpunkte

Wie die Entwicklung der Bodenschutzpunkte bei der Variation der P-Abtragslimite (vgl. Abschnitt 14.3.2) zeigte, könnten die Bodenschutzpunkte nach IP-Verordnung¹⁸³ eine Massnahme darstellen, um das Problem der P-Abträge und der Erosion in Problemgebieten zu entschärfen. Mit der Untersuchung dieser Massnahme soll beispielhaft gezeigt werden, dass mit dem gewählten Modellierungsansatz die Effizienz von indirekten Massnahmen beurteilt werden kann.

Im Modell wird die Vorschrift über eine minimale Anzahl Bodenschutzpunkte durch eine zusätzliche Restriktion umgesetzt:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \text{Kulturfläche}_{ijk} \text{ in ha} * \text{Bodenschutzpunkte}_{ijk} \text{ pro ha} \geq$$

$$LN * \text{Minimale Bodenschutzpunkte pro ha}$$

mit $i = \text{Kultur}$, $j = \text{Verfahren der Bodenbearbeitung}$, $k = \text{Verfahren der Düngung}$

Die Zahl der auf dem Betrieb erreichten Bodenschutzpunkte muss grösser gleich dem Produkt aus durchschnittlich geforderter Zahl an Bodenschutzpunkten pro ha und der gesamten Betriebsfläche (LN) sein. Dabei sind die anzurechnenden Bodenschutzpunkte bezüglich Kultur und Art der Bodenbearbeitung differenziert.

Die folgende Tabelle zeigt die Auswirkungen einer Erhöhung der z.B. im Rahmen der IP-Richtlinien geforderten Anzahl Bodenschutzpunkte:

¹⁸³ Bundesamt für Landwirtschaft 1999: An einem Stichtag im Herbst (15. November) und im Frühjahr (15. Februar) wird über die Massnahme minimale Anzahl Bodenschutzpunkte eine bestimmte, den Winter überdauernde Bodenbedeckung verlangt. Jeder Kultur ist eine bestimmte Anzahl Bodenschutzpunkte in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung zugeordnet. Je Betrieb wird ausgehend von der Struktur der Flächennutzung am Stichtag die erreichte Anzahl Bodenschutzpunkte berechnet. Diese muss für die Betriebe im Durchschnitt 50 Punkte pro ha betragen (vgl. Richtlinien auf der Webseite <http://www.ipsuisse.ch/>).

Jahr	Erosion t / ha	Erosion mm / ha	Erosion ofc / mm	BS-Punkte	SP / BS-Punkt	P-Loss kg / ha	SP / ha LN	A-Horizont	ZF laufend	ZF diskontiert	KMZW-STA-MD	KW1-STA-HD	KW2-STA-HD	SHZW-STA-HD	KM-STA-MD	WW-STA-MD	WW-MIN-MD
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 40																	
1	12.06	0.86	0.36	44.0	0.00	1.12	2'006	1.05	42'536	40'128		2.00	2.00		8.00	8.00	
66	12.12	0.87	0.01	44.0	0.00	1.13	45	0.99	42'018	898		2.00	2.00		8.00	8.00	
Ø / Einheit	12.09	0.86	0.10	44.0	0.00	1.12	524	1.02	2'115	524							
Ø / LN / J	241.77		2.08		0.00	22.48	10'485		42'291	10'485							
Σ 66	15'957	56.99	137.38		0.00	1'484	691'985		2'791'200	691'985							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 45																	
1	12.00	0.86	0.37	45.0	1.60	1.12	2'077	1.05	42'502	40'096	0.25	2.00	2.00		7.75	8.00	
66	12.06	0.86	0.01	45.0	0.04	1.12	47	0.99	41'985	897	0.25	2.00	2.00		7.75	8.00	
Ø / Einheit	12.03	0.86	0.10	45.0	0.42	1.12	543	1.02	2'113	524							
Ø / LN / J	240.62		2.09		8.48	22.38	10'858		42'257	10'476							
Σ 66	15'881	56.72	137.84		559.50	1'477	716'612		2'788'992	691'435							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 50																	
1	11.72	0.84	0.37	50.0	1.60	1.09	2'077	1.05	42'332	39'936	1.50	2.00	2.00		6.50	8.00	
66	11.77	0.84	0.01	50.0	0.04	1.09	47	1.00	41'822	894	1.50	2.00	2.00		6.50	8.00	
Ø / Einheit	11.75	0.84	0.11	50.0	0.42	1.09	543	1.02	2'105	522							
Ø / LN / J	234.91		2.12		8.47	21.85	10'858		42'090	10'435							
Σ 66	15'504	55.37	140.11		559.35	1'442	716'651		2'777'958	688'684							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 55																	
1	11.44	0.82	0.38	55.0	1.60	1.06	2'077	1.05	42'163	39'776	2.75	2.00	2.00		5.25	8.00	
66	11.49	0.82	0.01	55.0	0.04	1.07	47	1.00	41'659	890	2.75	2.00	2.00		5.25	8.00	
Ø / Einheit	11.46	0.82	0.11	55.0	0.42	1.07	543	1.02	2'096	520							
Ø / LN / J	229.20		2.16		8.47	21.32	10'859		41'923	10'393							
Σ 66	15'127	54.02	142.38		559.20	1'407	716'690		2'766'934	685'934							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 60																	
1	11.15	0.80	0.39	60.0	1.60	1.04	2'077	1.05	41'993	39'616	4.00	2.00	2.00		4.00	8.00	
66	11.20	0.80	0.01	60.0	0.04	1.04	47	1.00	41'496	887	4.00	2.00	2.00		4.00	8.00	

Jahr	Erosion t / ha	Erosion mm / ha	Ero- sion ofc / mm	BS- Punkte	SP / BS- Punkt	P-Loss kg / ha	SP / ha LN	A-Hori- zont	ZF lau- fend	ZF dis- kontiert	KMZW -STA- MD	KW1- STA- HD	KW2- STA- HD	SHZW -STA- HD	KM- STA- MD	WW- STA- MD	WW- MIN- MD
Ø / Einheit	11.17	0.80	0.11	60.0	0.42	1.04	543	1.02	2'088	518							
Ø / LN / J	223.48		2.19		8.47	20.78	10'860		41'756	10'351							
Σ 66	14'750	52.68	144.67		559.05	1'372	716'728		2'755'921	683'186							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 65																	
1	10.87	0.78	0.40	65.0	1.60	1.01	2'077	1.05	41'824	39'456	5.25	2.00	2.00		2.75	8.00	
66	10.91	0.78	0.01	65.0	0.04	1.01	47	1.00	41'334	883	5.25	2.00	2.00		2.75	8.00	
Ø / Einheit	10.89	0.78	0.11	65.0	0.42	1.01	543	1.02	2'079	515							
Ø / LN / J	217.77		2.23		8.47	20.25	10'860		41'590	10'310							
Σ 66	14'373	51.33	146.96		558.90	1'337	716'767		2'744'917	680'439							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 70																	
1	10.58	0.76	0.40	70.0	1.60	0.98	2'077	1.05	41'654	39'297	6.50	2.00	2.00		1.50	8.00	
66	10.62	0.76	0.01	70.0	0.04	0.99	47	1.00	41'171	880	6.50	2.00	2.00		1.50	8.00	
Ø / Einheit	10.60	0.76	0.11	70.0	0.42	0.99	543	1.03	2'071	513							
Ø / LN / J	212.06		2.26		8.47	19.72	10'861		41'423	10'268							
Σ 66	13'996	49.99	149.25		558.74	1'302	716'805		2'733'925	677'693							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 75																	
1	10.30	0.74	0.41	75.0	1.60	0.96	2'077	1.05	41'485	39'137	7.75	2.00	2.00		0.25	8.00	
66	10.34	0.74	0.01	75.0	0.04	0.96	47	1.00	41'009	876	7.75	2.00	2.00		0.25	8.00	
Ø / Einheit	10.32	0.74	0.11	75.0	0.42	0.96	543	1.03	2'063	511							
Ø / LN / J	206.35		2.30		8.46	19.19	10'861		41'257	10'226							
Σ 66	13'619	48.64	151.56		558.59	1'267	716'843		2'722'942	674'948							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 80																	
1	9.09	0.65	0.38	80.0	15.73	0.85	3'162	1.05	40'352	38'068	8.00	2.00	2.00				8.00
66	9.11	0.65	0.01	80.0	0.35	0.85	71	1.01	39'967	854	8.00	2.00	2.00				8.00
Ø / Einheit	9.10	0.65	0.11	80.0	4.11	0.85	826	1.03	2'008	498							
Ø / LN / J	181.98		2.12		82.18	16.92	16'525		40'167	9'951							
Σ 66	12'011	42.90	139.60		5'424	1'117	1'090'676		2'651'025	656'792							

Jahr	Erosion t / ha	Erosion mm / ha	Erosion ofc / mm	BS-Punkte	SP / BS-Punkt	P-Loss kg / ha	SP / ha LN	A-Horizont	ZF laufend	ZF diskontiert	KMZW-STA-MD	KW1-STA-HD	KW2-STA-HD	SHZW-STA-HD	KM-STA-MD	WW-STA-MD	WW-MIN-MD
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 85																	
1	8.85	0.63	0.36	85.0	15.73	0.82	3'162	1.05	38'685	36'495	8.00	2.00	2.00	2.00			6.00
66	8.88	0.63	0.01	85.0	0.35	0.83	71	1.01	38'331	819	8.00	2.00	2.00	2.00			6.00
Ø / Einheit	8.86	0.63	0.10	85.0	4.11	0.82	826	1.03	1'926	477							
Ø / LN / J	177.28		1.99		82.18	16.49	16'526		38'515	9'541							
Σ 66	11'700	41.79	131.66		5'424	1'088	1'090'746		2'541'980	629'709							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 90																	
1	8.62	0.62	0.34	90.0	15.73	0.80	3'162	1.05	37'018	34'922	8.00	2.00	2.00	4.00			4.00
66	8.64	0.62	0.01	90.0	0.35	0.80	71	1.01	36'694	784	8.00	2.00	2.00	4.00			4.00
Ø / Einheit	8.63	0.62	0.09	90.0	4.11	0.80	826	1.03	1'843	457							
Ø / LN / J	172.58		1.87		82.19	16.05	16'528		36'862	9'131							
Σ 66	11'390	40.68	123.73		5'424	1'059	1'090'815		2'432'896	602'623							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 95																	
1	8.39	0.60	0.32	95.0	15.73	0.78	3'162	1.05	35'350	33'350	8.00	2.00	2.00	6.00			2.00
66	8.40	0.60	0.01	95.0	0.35	0.78	71	1.01	35'056	749	8.00	2.00	2.00	6.00			2.00
Ø / Einheit	8.39	0.60	0.09	95.0	4.11	0.78	826	1.03	1'760	436							
Ø / LN / J	167.88		1.75		82.19	15.61	16'529		35'209	8'720							
Σ 66	11'080	39.57	115.82		5'425	1'030	1'090'885		2'323'775	575'532							
Kurzfristig-Diskontrate 1.06-Bodenmächtigkeit 1.05-Phosphorlimite 8-Bodenschutzlimite 100																	
1	8.15	0.58	0.29	100.0	15.73	0.76	3'162	1.05	33'683	31'777	8.00	2.00	2.00	8.00			
66	8.17	0.58	0.01	100.0	0.35	0.76	71	1.01	33'416	714	8.00	2.00	2.00	8.00			
Ø / Einheit	8.16	0.58	0.08	100.0	4.11	0.76	826	1.03	1'678	415							
Ø / LN / J	163.18		1.64		82.20	15.18	16'530		33'555	8'310							
Σ 66	10'770	38.46	107.92		5'425	1'002	1'090'954		2'214'617	548'437							

Tabelle 33: Auswirkungen einer Erhöhung der geforderten Anzahl Bodenschutzpunkte

Die in Tabelle 33 dargestellten Resultate sind für einen kurzfristigen Planungshorizont bei einer Ausgangsbodenmächtigkeit von 1.05 m und einer Diskontrate von 6% ausgewiesen. Eine Limite von mindestens 40 Bodenschutzpunkten ist nicht bindend. Entsprechend ist der Schattenpreis 0 und die Kulturenwahl erreicht das Erosionsmaximum im Rahmen der Fruchtfolgerestriktionen wie bei der kurz- und langfristigen privaten Optimierung. Wird die Zahl der geforderten Bodenschutzpunkte auf 45 pro ha erhöht, so erscheint sofort ein der Anforderung für Bodenschutzpunkte entsprechender Anteil Körnermais mit Zwischenkultur in der Fruchtfolge. Der Anteil von Körnermais mit Zwischenkultur wird zulasten des Körnermaises ohne Zwischenkultur immer weiter ausgedehnt, bis mit der Forderung von 80 Bodenschutzpunkten die gesamte Körnermaisfläche mit Zwischenkultur angebaut wird. Zu diesem Zeitpunkt wird der Winterweizen anstatt mit Standardbodenbearbeitung in Minimalbodenbearbeitung kultiviert. Wird die geforderte Zahl der Bodenschutzpunkte weiter erhöht, so muss die Winterweizenfläche zugunsten von Sommerhafer mit Zwischenkultur reduziert werden. Mit der weiteren Erhöhung der geforderten Zahl der Bodenschutzpunkte wird die Winterweizenfläche zunehmend durch das Getreide mit Zwischenkultur, den Sommerhafer mit Zwischenkultur, ersetzt. Bei 100 Bodenschutzpunkten wird die Betriebsfläche mit den minimal geforderten 4 ha Kunstwiesen und der Rest mit Ackerkulturen mit Zwischenkultur, mit Körnermais und Sommerhafer, bewirtschaftet. Der Körnermais besitzt die höhere Konkurrenzkraft und verbleibt bis zur Limite des maximalen Anteils in der Fruchtfolge.

Die erodierten mm Bodenmächtigkeit verringern sich von 57 mm auf 38 mm über den Betrachtungszeitraum von 2 Generationen. Die erreichbare Verminderung der Erosion ist deutlich geringer als die aus sozialer Sicht angezeigte. Diese erlaubt über den Betrachtungszeitraum maximal eine um 15 mm verringerte Bodenmächtigkeit. Der Schattenpreis einer Verschärfung der Limite für die geforderte Anzahl Bodenschutzpunkte um einen Punkt pro ha beträgt im ersten Jahr Fr. 32.- für den Gesamtbetrieb (Fr. 1.60 pro Punkt). Der Schattenpreis bleibt bis zur Limite von 75 Bodenschutzpunkten pro ha konstant. Bei 80 oder mehr geforderten Bodenschutzpunkten beträgt der Schattenpreis einer Verschärfung der Limite um einen Punkt Fr. 315.- für den Gesamtbetrieb (Fr. 15.73 pro Punkt). Die Konstanz der Schattenpreise erklärt sich mit der linear formulierten Restriktion für die Einhaltung einer minimalen Anzahl Bodenschutzpunkte. Tabelle 33 zeigt, dass die Anpassung der Betriebsstruktur bei konstanten Schattenpreisen für die Bodenschutzpunkte erfolgt. Gleichzeitig erfolgt die Anpassung der Betriebsstruktur in regelmässigen Schritten, indem immer 1.25 ha mehr Körnermais mit Zwischenkultur anstelle der Variante ohne Zwischenkultur angebaut werden. Die Stabilität ist mit der Linearität der Restriktion für die Bodenschutzzlimite zu erklären und gründet in der Stabilität der dualen Lösung in der Linearen Programmierung, die gegeben ist, solange keine neue Restriktion bindend oder nicht bindend wird. Der letztere Fall ist bei 80 Bodenschutzpunkten gegeben, indem Sommerhafer mit Zwischenkultur in der Fruchtfolge erscheint und gleichzeitig die Fruchtfolgerestriktion für Körnermais mit Zwischenkultur bindend wird. Daher steigt der Schattenpreis der Restriktion für die Bodenschutzzlimite.

Die Abträge von partikulärem P verringern sich bei der Verschärfung der Limite für die geforderte Anzahl Bodenschutzpunkte in geringem Ausmass. Sie sinken von durchschnittlich 1.12 kg pro ha auf durchschnittlich 0.76 kg pro ha und erreichen damit den aus sozialer Sicht geforderten Standard von maximal 0.3 kg P-Abtrag pro ha selbst bei 100 verlangten Bodenschutzzpunkten nicht. Der Schattenpreis der Fläche beträgt ohne restriktive Bodenschutzzlimite im Jahr 1 Fr. 2006.- / ha. Von 45 bis 75 verlangten Bodenschutzzpunkten pro ha erhöht sich der Schattenpreis einer ha LN auf Fr. 2077.- / ha. Ab 80 und mehr Bodenschutzzpunkten steigt der Wert einer zusätzlichen ha LN deutlich auf Fr. 3162.- / ha. Die Begründung für die Stabilität der Schattenpreise ist dieselbe wie beim Schattenpreis der Bodenschutzzlimite. Die Zielfunktionswerte in laufenden Werten verringern sich bis zu 80 verlangten Bodenschutzzpunkten

nur gering und sinken erst bei einer weiteren Verschärfung auf unter Fr. 40'000.- für den Gesamtbetrieb mit einem Minimum von Fr. 33683.- bei 100 Bodenschutzpunkten.

14.4.1.1 Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“

Die Einhaltung einer Vorschrift über eine minimale Anzahl Bodenschutzpunkte führt zu Opportunitätskosten bzw. Vermeidungskosten, die sich als Gewinndifferenz zur Situation ohne jegliche Vorschrift quantifizieren lassen. Die folgende Tabelle listet die Vermeidungskosten verschiedener Levels einer Minimumbedingung über Bodenschutzpunkte bei kurzfristiger Betrachtung und einer Diskontrate von 6% für verschiedene Bodenmächtigkeiten auf:

Einheit	Vermeidungskosten					
	Bodenmächtigkeit 1.05 m		Bodenmächtigkeit 0.7 m		Bodenmächtigkeit 0.35 m	
	Fr. Total	Fr. / ha	Fr. Total	Fr. / ha	Fr. Total	Fr. / ha
40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
45	33.89	1.69	37.84	1.89	0.00	0.00
50	203.37	10.17	227.05	11.35	53.55	2.68
55	372.84	18.64	416.25	20.81	187.40	9.37
60	542.32	27.12	605.45	30.27	321.26	16.06
65	711.79	35.59	794.66	39.73	455.11	22.76
70	881.27	44.06	983.86	49.19	588.97	29.45
75	1'050.74	52.54	1'173.07	58.65	722.82	36.14
80	2'183.36	109.17	2'094.43	104.72	856.68	42.83
85	3'850.63	192.53	3'489.66	174.48	1'928.73	96.44
90	5'517.91	275.90	4'884.88	244.24	3'023.14	151.16
95	7'185.18	359.26	6'280.11	314.01	4'117.55	205.88
100	8'852.46	442.62	7'675.34	383.77	5'211.96	260.60

Tabelle 34: Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ bei kurzfristiger Betrachtung in laufenden Werten für das erste Jahr im Betrachtungszeitraum

Die Vermeidungskosten betragen im Maximum bei Einhaltung von 100 Bodenschutzpunkten und einer Bodenmächtigkeit von 1.05 m Fr. 442.- pro ha. Bei 0.35 m Bodenmächtigkeit liegen die Vermeidungskosten über den gesamten Betrachtungszeitraum deutlich tiefer als bei 1.05 m Bodenmächtigkeit. Bei 0.7 m Bodenmächtigkeit ist das Niveau der Vermeidungskosten bis zu einem Level von 75 Bodenschutzpunkten höher als bei 1.05 m Bodenmächtigkeit. Darüber liegen die Vermeidungskosten zwischen den Vermeidungskosten der maximalen und der minimalen Bodenmächtigkeit.

14.4.1.2 Marginale Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“

Tabelle 26 zeigt die Datengrundlage zur Schätzung der marginalen Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“:

Limite Bodenschutzpunkte / ha	P-Abtrag total kg	P-Vermeidung kg	Vermeidungskosten total in Fr.
40.00	22.43	0.00	0
45.00	22.33	0.11	34
50.00	21.80	0.63	203
55.00	21.27	1.16	373
60.00	20.74	1.69	542
65.00	20.21	2.22	712
70.00	19.69	2.75	881
75.00	19.16	3.28	1'051
80.00	16.90	5.53	2'183
85.00	16.47	5.97	3'851
90.00	16.03	6.40	5'518
95.00	15.60	6.84	7'185
100.00	15.16	7.27	8'852

Tabelle 35: Datengrundlage zur Schätzung der Funktion der Vermeidungskosten für die Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“

Die Bestimmung der marginalen Vermeidungskosten der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ basiert auf dem Ansatz gemäss Gleichung 98 und auf den dieser Gleichung folgenden Ausführungen auf S. 219f. Tabelle 35 liefert die Datengrundlage. Die Vermeidungskosten steigen progressiv mit zunehmender Vermeidung von P-Abtrag.

Für die Schätzung der Funktion der Vermeidungskosten in Abhängigkeit der Erosionspunkte bzw. des vermiedenen P-Abtrags wird ein Polynom dritten Grades verwendet:

Gleichung 103: Funktion der Vermeidungskosten¹⁸⁴

$$F(BS) = -6092.67 + 385.95 * BS - 8.12 * BS^2 + 0.058 * BS^3 \quad R^2 = 0.991$$

mit $BS = \text{Bodenschutzpunkt}$

$$F(P) = -313.253 + 1334.30 * P - 562.9 * P^2 + 76.47 * P^3 \quad R^2 = 0.991$$

mit $P = \text{partikulärer P - Abtrag in kg}$

Gemäss Gleichung 98 ergeben sich die marginalen Vermeidungskosten pro BS Punkt bzw. pro kg P durch Ableitung der jeweiligen Funktion der Vermeidungskosten in Gleichung 103:

Gleichung 104: Funktion der marginalen Vermeidungskosten¹⁸⁵

$$f(BS) = 385.95 - 16.23 * BS + 0.174 * BS^2 \quad \text{mit } BS = \text{Bodenschutzpunkt}$$

$$f(P) = 1334.30 - 1125.78 * P + 229.42 * P^2 \quad \text{mit } P = \text{partikulärer P - Abtrag in kg}$$

¹⁸⁴ Der Verlauf der Funktionen der Vermeidungskosten und der marginalen Vermeidungskosten ist nur im Bereich > 2 kg bis ca. 7.3 kg vermiedenen P-Abtrag gültig, da die annähernde Stabilität bei einer P-Vermeidung von < 2 kg nicht in einer stetig differenzierbaren Funktion darstellbar ist. Die exponentielle Funktionsform weist einen deutlich schlechteren Fit auf, weshalb die kubische Funktionsform verwendet wird, die flexibler ist.

¹⁸⁵ Vgl. Fussnote 184.

Abbildung 34 veranschaulicht den Verlauf der marginalen Vermeidungskosten pro Bodenschutzpunkt, Abbildung 35 denjenigen pro kg Phosphor bei der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“.

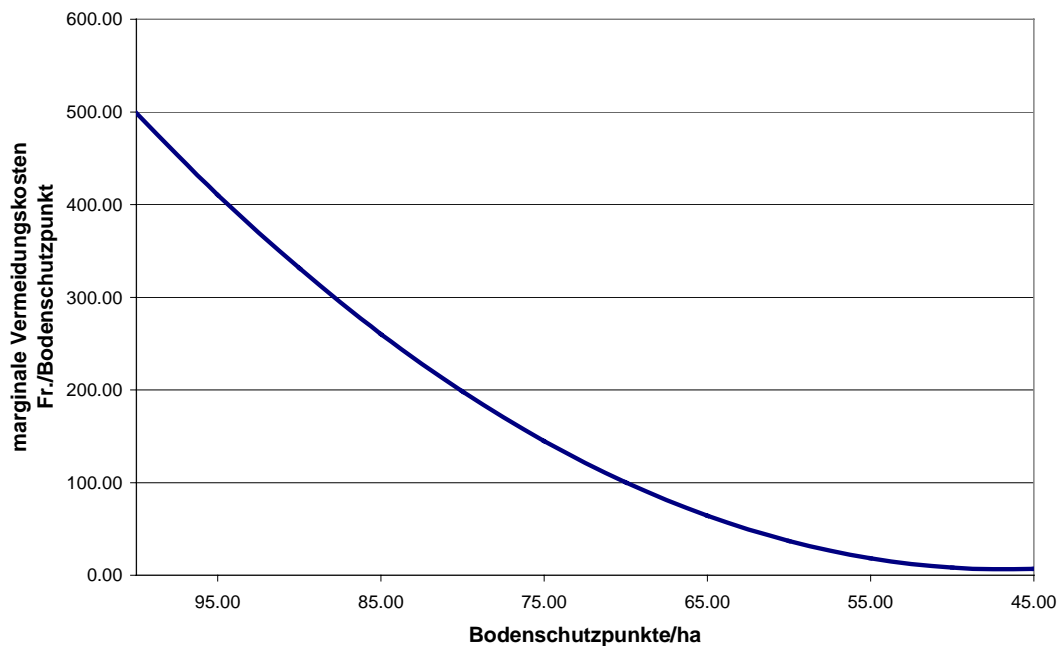


Abbildung 34: Marginale Vermeidungskosten pro Bodenschutzpunkt bei der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“

Gemäss Abbildung 34 steigen die marginalen Vermeidungskosten pro zusätzlichen Bodenschutzpunkt je ha auf dem untersuchten Betrieb von annähernd Fr. 0.- bei 40 Punkten rasch auf ca. Fr. 500.- bei 100 erreichten Bodenschutzpunkten. Der Verlauf ist progressiv zunehmend.

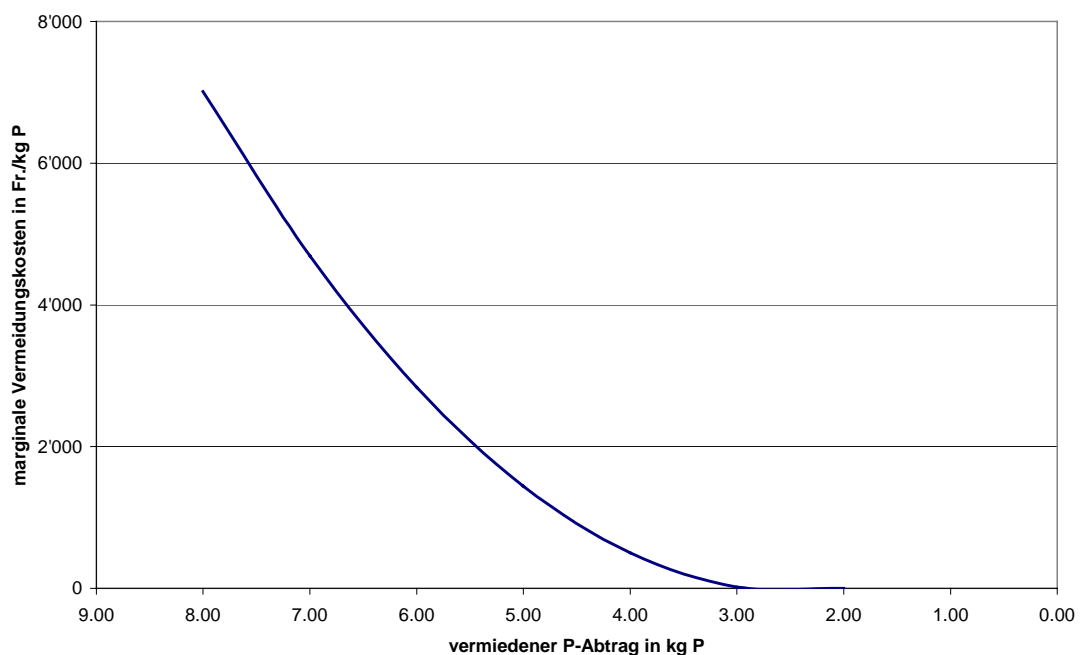


Abbildung 35: Marginale Vermeidungskosten des P-Abtrags bei der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ pro kg vermiedenem P-Abtrag

Gemäss Abbildung 35 steigen die marginalen Vermeidungskosten des P-Abtrags auf dem untersuchten Betrieb von annähernd Fr. 0.- für die ersten drei kg P-Abtrag, die vermieden werden, rasch auf ca. Fr. 5000.- für das siebte kg P-Abtrag. Die marginalen Vermeidungskosten steigen progressiver als bei der Massnahme mit P-Abtragsbesteuerung. Für das sechste kg P-Abtrag, das vermieden wird, betragen die marginalen Vermeidungskosten für die Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte Fr. 2839.- pro kg, für das achte kg P-Abtrag Fr. 7000.- / kg. Im Vergleich dazu liegen die marginalen Vermeidungskosten für den P-Abtrag bei der Massnahme P-Abtragsbesteuerung und bei P-Standards bei Fr. 327.- (sechstes kg) bzw. Fr. 482.- (achtes kg) pro kg P-Abtrag, das vermieden wird.

14.4.1.3 Effizienz der Massnahme Bodenschutzpunkte

Mit dem Konzept der Bodenschutzpunkte ist der soziale Standard von 0.3 kg P-Abtrag pro ha nicht erreichbar. Bei 100 Bodenschutzpunkten beträgt der P-Verlust im erodierten Material 0.76 kg pro ha. Die Zielerreichung ist damit nicht gewährleistet. Im Prinzip erübrigt sich daher eine Effizienzbetrachtung bzw. Analyse der Kosten - Wirksamkeit. Diese wird aber gleichwohl durchgeführt zwecks Illustration der Möglichkeiten der Analyse von Massnahmen mit dem gewählten Modellansatz.

Zwecks Bestimmung der Effizienz (Kosten - Wirksamkeit) der Massnahme zur Eindämmung der P-Verluste im erodierten Material werden die Vermeidungskosten des mit Bodenschutzpunkten erreichbaren Niveaus mit den Vermeidungskosten bei der Einführung eines Standards zur Erreichung dieses Niveaus verglichen. Die Tabelle 36 zeigt die Mittelwerte laufender Werte verschiedener Grössen, die zur Beurteilung der Massnahme Bodenschutzpunkte nötig sind. Zwecks Vergleichbarkeit wird bei den Vermeidungskosten für die Massnahme P-Standard der Mittelwert zwischen 0.7 und 0.8 kg P-Abtrag verwendet:

Zielfunktionswerte					
	kurzfristig freies Optimum	kurzfristig P-Limite 0.7 kg / ha	kurzfristig P-Limite 0.8 kg / ha	Ø beider P-Limiten	kurzfristig 100 BS Punkte
Ø	42'291	39'978	40'828	40'403	33'555
Beurteilungsgrössen					
	Vermeidungskosten beim Standard 0.75 kg P / ha	Vermeidungskosten bei 100 BS Punkten	Effizienzverlust	Effizienzfaktor	
Ø	1'888	8'736	6'848	4.63	

Tabelle 36: Beurteilungsgrössen und Effizienzverlust der Massnahme Bodenschutzpunkte bei Erreichung eines Standards von 0.75 kg P-Abtrag pro ha

Tabelle 36 zeigt, dass die Effizienzverluste der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ bei Erreichung eines P-Abtrags von 0.75 kg pro ha mit Fr. 6848.- sehr bedeutend sind und die Vermeidungskosten bei der Einführung eines Standards mit gleicher Wirkung um einen Faktor 4.63 übersteigen. Das Ergebnis belegt, dass die aktuelle Definition der Bodenschutzpunkte gemäss IP Verordnung (Bundesamt für Landwirtschaft 1999) wohl das Erosions- / Phosphorproblem abschwächt, aber ein bestimmtes Ziel nicht effizient erreichen kann. Zudem ist bei Erreichung der maximalen Anzahl Bodenschutzpunkte das Erosions- / Phosphorproblem am untersuchten Standort mit 0.76 kg / ha nur unwesentlich entschärft (Ausgangsniveau 1.12 kg / ha). Mit Blick auf den zu erreichenden sozialen Standard von 0.3 kg / ha wirkt die Massnahme ungenügend (Effektivität nicht gegeben).

14.4.2 Fazit

Die Massnahme Bodenschutzpunkte in der Ausgestaltung gemäss aktueller IP-Verordnung (Bundesamt für Landwirtschaft 1999) ist zur Entschärfung des Erosionsproblems und zur Verminderung des partikulären P-Abtrags nicht geeignet. Die marginalen Vermeidungskosten des P-Abtrags sind im mit der Massnahme erreichbaren Bereich der Reduktion bedeutend höher als bei der Referenzmassnahme, der P-Abtragssteuer. Die Massnahme Bodenschutzpunkte weist sehr hohe Effizienzverluste auf und garantiert selbst bei Erfüllung der maximal erreichbaren Anzahl Bodenschutzpunkte keine Erreichung des sozialen Standards für den partikulären P-Abtrag. Die Effektivität der Massnahme ist damit nicht gegeben. Dies bedeutet aber nicht, dass die aktuell implementierten Bodenschutzpunkte als Massnahme nicht effektiv sind. Die Massnahme besitzt vorwiegend ein anderes Ziel, nämlich das der Verringerung der Nitratauswaschung im Winter. Mit geeigneten Modellrechnungen wären die Effizienz und die Effektivität zu quantifizieren und zu verifizieren. Das Hauptproblem der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ liegt darin, dass bei heterogenen Betrieben Instrumente aus der Kategorie Gebote und Verbote im Prinzip nicht effizient sind. Wirtschaftliche Anreize sind bei heterogenen Betrieben effizienter, da sie zu tieferen totalen Vermeidungskosten führen. Auf den einzelnen Betrieben bewirken wirtschaftliche Anreize gleiche marginale Vermeidungskosten für die letzte Reduktionseinheit der Bezugsgrösse.

Im folgenden werden zwei weitere mögliche Massnahmen, Landnutzungssteuern und Erosionspunkte, diskutiert.

14.5 Weitere Massnahmen

14.5.1 Landnutzungssteuern zur Eindämmung des Erosionsproblems / P-Abtrags

Eine Besteuerung des P-Abtrags oder die Einführung eines P-Standards gemäss den Berechnungen im Abschnitt 14.3 ist nicht möglich, da es sich beim partikulären Phosphorabtrag um ein non-point-source-pollution Problem handelt, und P-Abträge in dieser Situation nicht messbar sind. Eine alternative Massnahme stellt die Einführung einer Landnutzungssteuer dar. Diese könnte differenziert nach Kulturen, entsprechend der Lage oder entsprechend örtlicher Gegebenheiten ausgestaltet sein. Die Differenzierung muss sehr leicht messbar und einfach kontrollierbar sein. Modellmässig erfolgt die Umsetzung durch eine Anpassung der Zielfunktion:

$$ZF - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \text{Kulturfläche}_{ijk} \text{ in ha} * \text{Landnutzungssteuer}_{ijk} \text{ pro ha}$$

mit $i = \text{Kultur}, j = \text{Verfahren der Bodenbearbeitung}, k = \text{Verfahren der Düngung}$

Die Festlegung der Steuerhöhe hängt von der Zielgrösse für den partikulären P-Abtrag bzw. die Erosion ab. Aus den Resultaten der biophysikalischen Simulation mit EPIC und der Metamodellierung (vgl. Abschnitt 12.2.2) lässt sich zusammen mit den Schattenpreisen der P-Restriktionen ein nach Kulturen differenziertes Steuerniveau bestimmen. In Tabelle 37 werden die für die Erreichung des sozialen Standards notwendigen Beträge einer Landnutzungssteuer aufgezeigt:

Kultur ¹⁸⁶	Bodenmächtigkeit			Kultur	Bodenmächtigkeit		
	1.05	0.70	0.35		1.05	0.70	0.35
KA-STA-HD	1'700	1'429	2'292	SH-MIN-HD	738	654	1'187
KA-STA-MD	1'941	1'615	2'542	SH-MIN-MD	733	645	1'147
KM-MIN-HD	2'771	2'320	3'773	SH-STA-HD	1'249	1'100	1'963
KM-MIN-MD	2'804	2'357	3'834	SH-STA-MD	1'264	1'114	1'988
KM-STA-HD	2'843	2'370	3'828	SHZW-STA-HD	328	275	468
KM-STA-MD	2'888	2'416	3'894	SHZW-STA-MD	331	287	482
KMZW-STA-HD	2'208	1'841	3'013	WG-MIN-HD	852	743	1'291
KMZW-STA-MD	2'295	1'925	3'149	WG-MIN-MD	793	684	1'196
KW1-STA-HD	101	84	137	WG-STA-HD	1'378	1'177	1'965
KW1-STA-MD	158	140	241	WG-STA-MD	1'302	1'111	1'870
KW2-STA-HD	42	36	62	WW-MIN-HD	627	545	958
KW2-STA-MD	63	54	97	WW-MIN-MD	634	540	917
				WW-STA-HD	1'013	880	1'529
				WW-STA-MD	1'011	881	1'562

Tabelle 37: Landnutzungssteuern zur Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg P-Abtrag / ha in Fr. / ha

Tabelle 37 zeigt optimale Niveaus für Landnutzungssteuern für die verschiedenen modellierten Kulturen differenziert nach Düngungsart und Bodenbearbeitung¹⁸⁷. Die Landnutzungssteuern differieren zwischen den einzelnen Kulturen sehr stark, direkt proportional zur Erosivität der Kultur. Im Zeitablauf verändert sich die Höhe der Landnutzungssteuer direkt proportional zur Veränderung der optimalen Steuersätze für die P-Emissionen in Tabelle 27, da der Steuerbetrag direkt proportional zum P-Abtrag und zur Erosionsmenge einer Kultur ist.

Das Steuerniveau garantiert die Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg P-Abtrag bzw. 3.22 t Erosion pro ha. Es ist abhängig von der Kultur, der Bodenmächtigkeit und der Art der Bodenbearbeitung. Bei Kartoffeln spielt selbst die Art der Düngung eine nicht vernachlässigbare Rolle. Da die Art der Bodenbearbeitung nicht sehr gut beobachtbar ist, könnte die Steuer einheitlich pro Kultur in Standardbodenbearbeitung, inkl. Differenzierung bei Zwischenkulturen erhoben werden. Die Differenzierung der Bodenbearbeitung könnte durch Pauschalbeiträge (auf Antrag) in der Höhe der Steuerdifferenz zwischen den Varianten der Bodenbearbeitung erreicht werden. Diese Pauschalbeiträge wären mit den Steuereinnahmen zu verrechnen, was die Steuerlast für Landwirte, die bodenschonende Anbauverfahren anwenden, mindert.

Die Massnahme Landnutzungssteuer weist analog zur P-Abtragssteuer keine Effizienzverluste auf (vgl. Tabelle 30). Auf homogenen Betrieben ist die Landnutzungssteuer aus Sicht der Anpassungskosten effizient. Aus theoretischer Sicht handelt es sich bei der Landnutzungssteuer um eine indirekte Massnahme, da die Heterogenität der Betriebe nicht berücksichtigt wird.

¹⁸⁶ Verzeichnis der Abkürzungen: vgl. Abschnitt 12.2.1 S. 169

¹⁸⁷ Für die Berechnung der Steuerbeträge wird folgendes Vorgehen gewählt: Aus Tabelle 27 sind die optimalen Steuerbeträge pro kg P in laufenden Werten bekannt (Bsp. Jahr 1 bei Diskontrate 0%). Aus der Metamodellierung sind die Funktionen zur Bestimmung der Erosion in Abhängigkeit der Bodenmächtigkeit bei unterschiedlichen Kulturen, Düngungsverfahren und Verfahren der Bodenbearbeitung gegeben. Der Umrechnungsfaktor von t Erosion auf kg P ist 0.093. Aus dem P-Verlust pro Kultur bei bestimmter Düngung und Bodenbearbeitung errechnet sich mit den optimalen Steuerbeträgen pro kg P die Landnutzungssteuer, die die Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg P Abtrag pro ha bewirkt.

14.5.1.1 Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer

Tabelle 37 zeigt die Höhe der Landnutzungssteuern, die nötig sind, damit der soziale Standard von 0.3 kg partikulärem P-Abtrag pro ha aus der Erosion nicht überschritten wird. Die folgende Tabelle zeigt die Vermeidungskosten im Jahr 1 bei proportionaler Variation der einzelnen Steuersätze in Tabelle 37. Die Proportionalitätsfaktoren werden in den Modellrechnungen im Bereich von 0 bis 3 variiert, d.h. alle Steuersätze in Tabelle 37 werden jeweils mit dem gleichen Faktor in Schritten von 0.05 Einheiten skaliert:

Steuerfaktor	Erosion t/ha	Ploss Kg/ha	ZF lau- fend	ZF dis- kontiert	mittl. Steuer Fr./ha	P-Vermeidung kg	Vermeidungskosten
0	12.06	1.12	42536	40128	0		
0.05	12.06	1.12	40962	38643	78.70	0	0.00
0.1-0.2	10.62	0.99	39535	37297	138.62	2.68	228.54
0.25-0.35	8.12	0.76	35478	33470	264.89	7.33	1759.49
0.4-0.75	6.67	0.62	32435	30599	348.41	10.02	3132.89
0.8-1	5.82	0.54	25473	24031	607.88	11.60	4905.20
1.05-2.7	2.70	0.25	22081	20831	370.28	17.41	13049.23
2.75-3	1.53	0.14	10153	9578	549.85	19.58	21385.62

Tabelle 38: Auswirkungen unterschiedlicher Niveaus der Landnutzungssteuer auf Erosion und P-Abträge bei kurzfristiger Betrachtung im Jahr 1 bei einer Diskontrate von 6% und einer Bodenmächtigkeit von 1.05 m

Gemäss Tabelle 38 bleiben Erosion, P-Abtrag, P-Vermeidung und die Vermeidungskosten über gewisse Bereiche der Variation des Steuerfaktors konstant (vgl. Bereichsangaben in Spalte 1). Der Verlauf der Vermeidungskosten in Abhängigkeit des Steuerfaktors ist treppenförmig. Die Zielfunktionswerte verändern sich in den Bereichen trotz gleichbleibender Vermeidungskosten infolge der proportional höheren Steuersätze. Die unterschiedliche Höhe der Steuerbelastung wirkt sich auf die Kulturenwahl aus. Entsprechend variieren die durchschnittlichen Steuersätze stark und ohne erkennbaren Trend. Der treppenförmige Verlauf ist auf den aktivitätsanalytischen Modellansatz zurückzuführen.

Die folgende Abbildung zeigt die totalen Vermeidungskosten bei der Massnahme Landnutzungssteuer im Vergleich zur Massnahme P-Abtragssteuer:

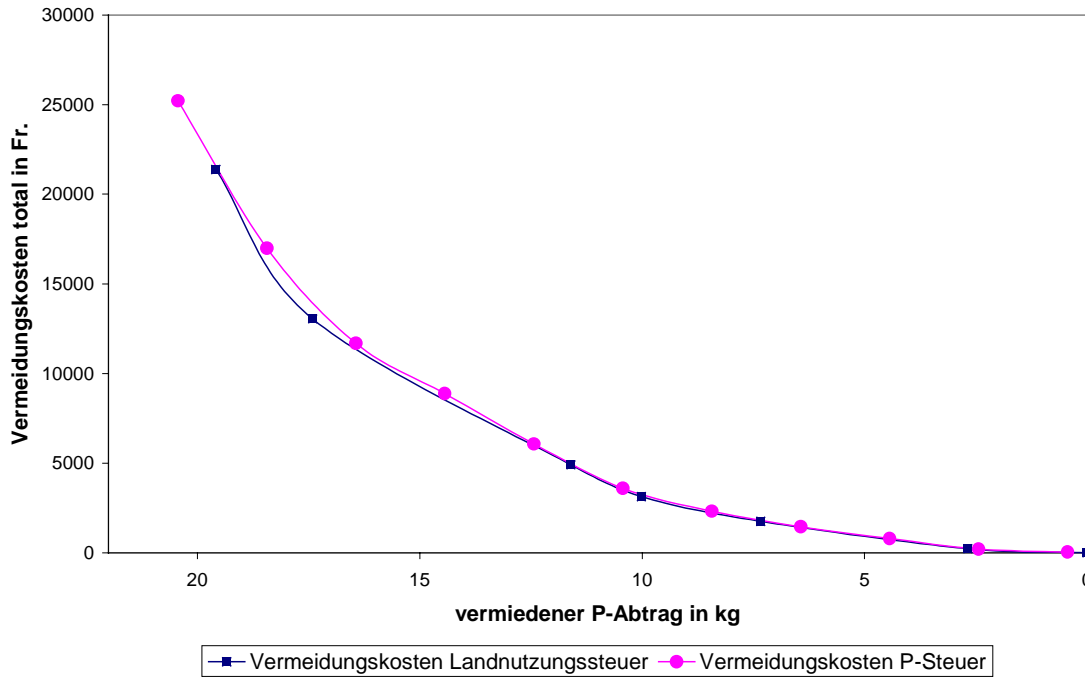


Abbildung 36: Vermeidungskosten von Landnutzungssteuern und P-Abtragssteuern im Vergleich

Abbildung 36 zeigt, dass der Verlauf der betrieblichen Kosten zur Vermeidung von partikulärem P-Abtrag durch Erosion bei der Massnahme Landnutzungssteuer und bei der Referenz P-Abtragssteuer identisch ist. Aus Sicht der einzelbetrieblichen Anpassungskosten ist die Massnahme Landnutzungssteuer damit effizient. Die geringfügige Abweichung der Vermeidungskosten des partikulären Phosphorabtrags bei einer Vermeidung von 17.41 kg ist auf die Präzision der numerischen Darstellung von Zahlen und auf den aktivitätsanalytischen Ansatz zurückzuführen.

14.5.1.2 Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer

Wegen des treppenförmigen Verlaufs der Vermeidungskosten in Bezug auf den Steuerfaktor für die Landnutzungssteuer erscheint eine Darstellung der Vermeidungskosten in Abhängigkeit des Steuerfaktors nicht sinnvoll. Dasselbe gilt für den mittleren Steuersatz pro ha, da dieser durch die Veränderung der jährlichen Fruchtfolgen stark variiert. Im folgenden werden die Vermeidungskosten in Abhängigkeit des vermiedenen partikulären P-Abtrags geschätzt und daraus werden die marginalen Vermeidungskosten mit derselben Bezugsgrösse abgeleitet.

Gleichung 105: Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer in Abhängigkeit des vermiedenen partikulären P-Abtrags

$$F(P) = -1064.12 + e^{0.164 \cdot P + 6.73} \qquad R^2 = 0.98$$

mit $P =$ vermiedener partikulärer P – Abtrag

Der Fit der Schätzgleichung an die realen Daten ist leicht schlechter als bei der Massnahme P-Steuer oder P-Standard (vgl. Gleichung 99). Die Datengrundlage für die Schätzung ist bei der Massnahme Landnutzungssteuer durch die geringere Anzahl der Beobachtungen ungenügend. Die geringe Zahl der Beobachtungen ist auf die aktivitätsanalytische Modellstruktur und den Massnahmentyp der Landnutzungssteuer zurückzuführen.

Gemäss Gleichung 98 ergeben sich die marginalen Vermeidungskosten pro kg P-Abtrag, der vermieden wird, durch Ableitung der Funktion der Vermeidungskosten in Gleichung 105:

Gleichung 106: Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer

$$f(P) = 0.164 * e^{0.164 * P + 6.72} \quad \text{mit } P = \text{vermiedener partikulärer P-Abtrag}$$

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der marginalen Vermeidungskosten pro kg vermiedenen P-Abtrag, der durch unterschiedliche Niveaus der Landnutzungssteuer bewirkt wird.

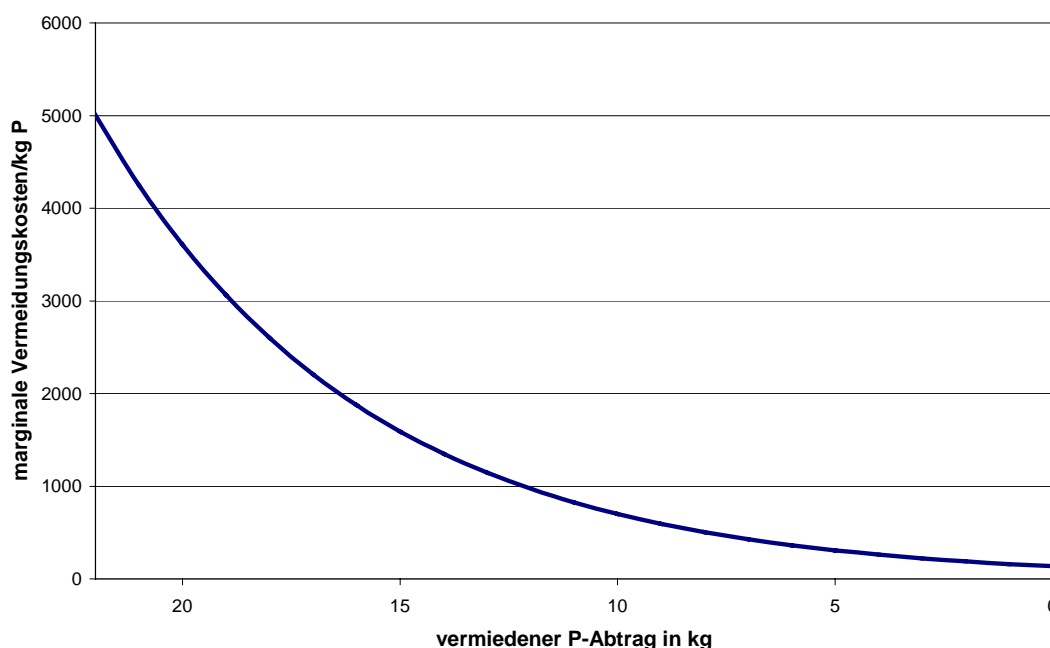


Abbildung 37: Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Landnutzungssteuer in Fr. pro kg vermiedenem P-Abtrag

Der Verlauf der marginalen Vermeidungskosten pro kg vermiedenem P-Abtrag ist ähnlich demjenigen der Referenzmassnahmen P-Abtragssteuer und P-Standard. Die Abweichungen sind auf die geringere Anzahl der Beobachtungen bei der Massnahme Landnutzungssteuer zurückzuführen. Die Ursache liegt im aktivitätsanalytischen Modellansatz, der bei der Massnahme Landnutzungssteuer zu einem treppenförmigen Verlauf der Vermeidungskosten führt (vgl. Tabelle 38).

14.5.1.3 Fazit

Landnutzungssteuern können eine effiziente Massnahme zur Erreichung umweltpolitischer Ziele im Bereich des P-Abtrags und der Erosion sein. Die Ausgestaltung müsste so erfolgen, dass gemäss leicht beobachtbaren Differenzierungskriterien besteuert wird, bezüglich schwierig beobachtbaren Kriterien dagegen durch Pauschalbeiträge auf Antrag differenziert wird.

Spezielle Modellkalkulationen mit der Landnutzungssteuer erübrigen sich im Prinzip, da die Resultate dieselben wie in den Berechnungen mit Besteuerung des P-Abtrags sind (vgl. Abschnitt 14.3). Dies ist in der direkten Proportionalität von Erosion und P-Abtrag und der Art der Berechnung der Landnutzungssteuer begründet. Die Landnutzungssteuer ist ebenfalls direkt proportional zum P-Abtrag. Die Höhe der Landnutzungssteuer pro Kultur stimmt mit der Höhe des Steuervolumens pro Kultur bei Besteuerung des P-Abtrags überein. Damit ist auch das Ausmass der Effizienzverluste bereits bekannt. Landnutzungssteuern sind aus diesem Grund auf Stufe Einzelbetrieb least-cost Massnahmen.

Um eine gute Entscheidungsgrundlage für eine Einführung von Landnutzungssteuern in einem Gebiet zu erhalten, wären die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen für alle in einem Gebiet möglichen Kulturen auf verschiedenen Standorten zu untersuchen. Aus solchen Berechnungen würde sich der zweckmässige Differenzierungsgrad und das Steuerniveau für einzelne Kulturen problemlos bestimmen lassen. Eine Modellerweiterung mit Intensitätsvariablen, die die Bewirtschaftungsintensität berücksichtigen, könnte den Handlungsspielraum des Landwirts adäquater abbilden und würde daher zu einer aussagekräftigeren Beurteilung führen.

14.5.2 Erosionspunkte

Analog zu den Bodenschutzpunkten mit dem Ziel der Eindämmung der Nitratauswaschung im Winter können kulturspezifisch Erosionspunkte direkt proportional zur Erosionsmenge der Kultur definiert werden. Ein Betrieb darf dann im Durchschnitt pro ha eine bestimmte Anzahl Erosionspunkte nicht überschreiten. Im Modell wird die Massnahme Erosionspunkte analog zur Massnahme minimale Anzahl Bodenschutzpunkte mit einer zusätzlichen Restriktion umgesetzt:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l \text{Kulturfläche}_{ijk} \text{ in ha} * \text{Erosionspunkte}_{ijk} \text{ pro ha} \leq$$

$$LN * \text{Maximale Zahl Erosionspunkte pro ha}$$

mit $i = \text{Kultur}, j = \text{Verfahren der Bodenbearbeitung}, k = \text{Verfahren der Düngung}$

Die auf einem Betrieb erreichte Zahl der Erosionspunkte darf nicht grösser sein als das Produkt aus maximal zulässiger Anzahl Erosionspunkte pro ha und Betriebsfläche.

Tabelle 39 liefert für die mit EPIC simulierten Kulturen abgestufte Erosionspunkte pro ha für den Standort im Gebiet des Baldeggersees:

Kultur ¹⁸⁸	Bodenmächtigkeit			Kultur	Bodenmächtigkeit		
	1.05	0.70	0.35		1.05	0.70	0.35
KA-STA-HD	130	136	146	SH-MIN-HD	57	62	76
KA-STA-MD	149	154	162	SH-MIN-MD	56	62	73
KM-MIN-HD	212	222	240	SH-STA-HD	96	105	125
KM-MIN-MD	215	225	244	SH-STA-MD	97	106	127
KM-STA-HD	218	226	244	SHZW-STA-HD	25	26	30
KM-STA-MD	221	231	248	SHZW-STA-MD	25	27	31
KMZW-STA-HD	169	176	192	WG-MIN-HD	65	71	82
KMZW-STA-MD	176	184	201	WG-MIN-MD	61	65	76
KW1-STA-HD	8	8	9	WG-STA-HD	106	112	125
KW1-STA-MD	12	13	15	WG-STA-MD	100	106	119
KW2-STA-HD	3	3	4	WW-MIN-HD	48	52	61
KW2-STA-MD	5	5	6	WW-MIN-MD	49	52	58
				WW-STA-HD	78	84	97
				WW-STA-MD	77	84	100

Tabelle 39: Mögliches Schema für Erosionspunkte für einzelne Kulturen

Tabelle 39 zeigt ein mögliches Schema für Erosionspunkte. Die Punktzahlen pro Kultur basieren auf der Erosionsmenge pro ha. Die Erosionsmenge wird mit dem Faktor 10 skaliert und

¹⁸⁸ Verzeichnis der Abkürzungen vgl. Abschnitt 12.2.1 S. 169.

auf ganze Zahlen gerundet. Damit entspricht 10% der Zahl der Erosionspunkte pro ha bis auf den Rundungseffekt der Erosionsmenge. 1% der Zahl der Erosionspunkte pro ha ergibt entsprechend annähernd den Phosphorabtrag pro ha in kg. Die Übereinstimmung der Erosionspunkte mit dem Phosphorabtrag ist abhängig vom Phosphorgehalt des Bodens.

Ist der soziale Standard für den Phosphorabtrag von 0.3 kg pro ha das umweltpolitische Ziel, so darf an diesem Standort bei einem P-Gehalt des Oberbodens von 0.093 kg / t Erde die durchschnittliche Zahl der Erosionspunkte 30 Punkte / ha nicht übersteigen. Die Umsetzung des Schemas könnte sich an den Bodenschutzpunkten (vgl. Abschnitt 14.4.1) orientieren.

Da in den Modellrechnungen der Phosphorabtrag direkt proportional zur erodierten Bodenmenge am Standort ist, erübrigt sich eine Berechnung des Effizienzverlustes¹⁸⁹ der Massnahme. Diese sind 0, da die Lösung exakt den Resultaten in Abschnitt 14.1.7 entspricht. Aus dem gleichen Grund sind auch die Vermeidungskosten des P-Abtrags bei dieser Massnahme gleich wie bei der P-Steuer und bei der Vorgabe von P-Standards. Variiert der P-Gehalt des Oberbodens, so verändert sich der P-Abtrag bei gleicher Erosionsmenge entsprechend. Das umweltpolitische Ziel für die Erosion ist aber unabhängig davon und müsste nur unterschritten werden, wenn der P-Gehalt des erodierten Bodens steigt, weil dann der umweltpolitische Standard für den P-Abtrag allein bindend wird.

Die Analogien zwischen der P-Steuer und der Massnahme Erosionspunkte sind darauf zurückzuführen, dass ein sozialer Standard und eine Steuer auf dem Einzelbetrieb die gleiche Effizienz aufweisen. Bei der Einführung der Massnahme Erosionspunkte in einer Region mit heterogenen Betrieben ist die Steuer auf P-Emissionen aus theoretischer Sicht effizienter als der uniforme Standard durch Erosionspunkte, da die Einzelbetriebe dann individuell so optimieren würden, dass ihre marginalen Vermeidungskosten gerade dem marginalen Steuerbetrag entsprechen. Da es sich um ein non-point-source-pollution Problem handelt, ist eine P-Emissionssteuer nicht umsetzbar, und es müssen indirekte Massnahmen wie zum Beispiel Erosionspunkte umgesetzt werden.

14.5.2.1 Marginale Vermeidungskosten der Massnahme Erosionspunkte

Die Vermeidungskosten und die marginalen Vermeidungskosten des P-Abtrags haben denselben Verlauf wie bei der Vorgabe von P-Standards oder bei P-Besteuerung, wobei ersteres nur im Falle homogener Betriebe gilt. Im folgenden werden die Kostengrössen der Vermeidungskosten mit der Bezugsgrösse Erosionspunkte und vermiedener P-Abtrag dargestellt.

Gleichung 107: Funktion der Vermeidungskosten der Massnahme Erosionspunkte in Abhängigkeit der vermiedenen Erosionspunkte und des vermiedenen P-Abtrags

$$F(EP) = -533.83 + e^{0.018*EP+6.28} \quad \text{mit } EP = \text{vermiedene Erosionspunkte}$$

$$F(P) = -534.27 + e^{0.194*P+6.26} \quad \text{mit } P = \text{vermiedener P-Abtrag in kg}$$

Gemäss Gleichung 98 ergeben sich die marginalen Vermeidungskosten pro vermiedenen Erosionspunkt bzw. pro kg P-Abtrag, der vermieden wird, durch die Ableitung der Funktion der Vermeidungskosten in Gleichung 107:

¹⁸⁹ Unterschied zwischen den Vermeidungskosten der Massnahme und denjenigen des sozialen Standards in Abschnitt 14.2.

Gleichung 108: Funktion der marginalen Vermeidungskosten der Massnahme Erosionspunkte in Abhängigkeit der vermiedenen Erosionspunkte und des vermiedenen P-Abtrags

$f(EP) = 0.018 * e^{0.018 * EP + 6.28}$ mit $EP =$ vermiedene Erosionspunkte

$f(P) = 0.194 * e^{0.194 * P + 6.36}$ mit $P =$ vermiedener P – Abtrag in kg

Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der marginalen Vermeidungskosten je Erosionspunkt, der vermieden wird.

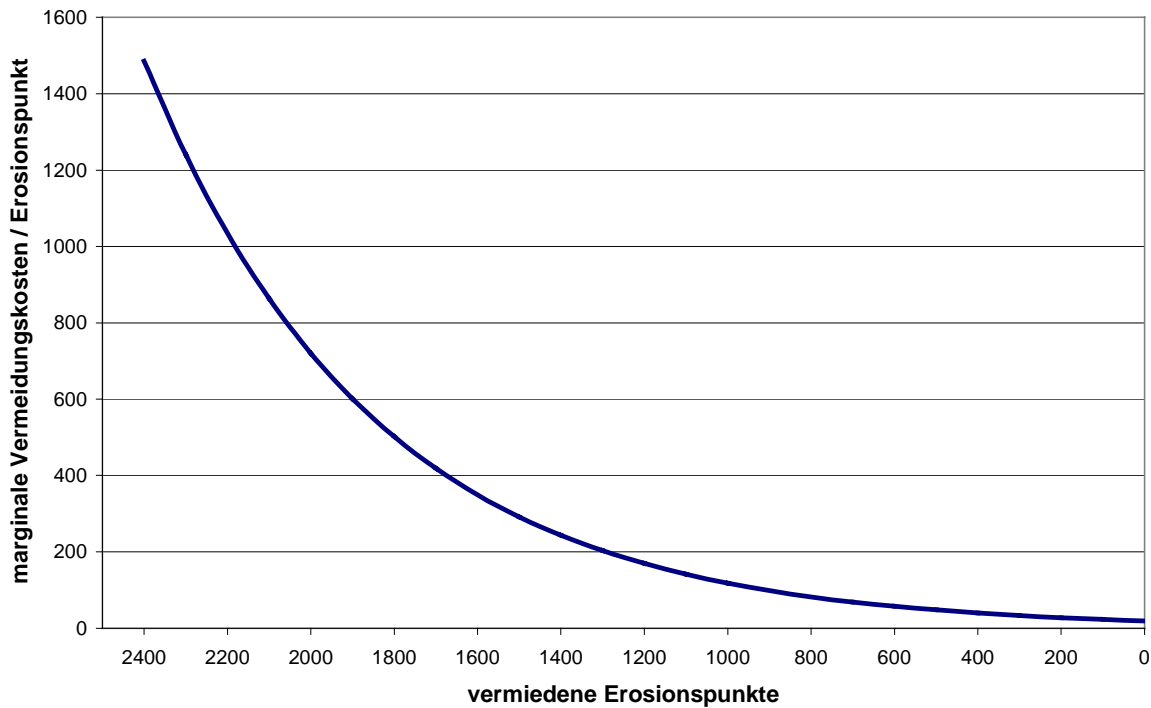


Abbildung 38: Marginale Vermeidungskosten je vermiedenem Erosionspunkt

Der relative Verlauf der Funktion der marginalen Vermeidungskosten pro Erosionspunkt deckt sich mit demjenigen der P-Abtragssteuer und des P-Standards im Falle homogener Betriebe, da z.B. die Massnahme P-Standard direkt proportional zur Massnahme Erosionspunkte ist (ca. Faktor 100). Die marginalen Vermeidungskosten pro kg P-Abtrag sind bei der Massnahme Erosionspunkte identisch mit den marginalen Vermeidungskosten der least-cost Massnahmen P-Abtragssteuer und P-Standard.

Das dargestellte Schema der Erosionspunkte ist auf Stufe Einzelbetrieb eine least-cost Massnahme. Bei mehreren heterogenen Betrieben ist die Kosteneffizienz über alle Betriebe nicht mehr gegeben. Effizienzverluste entstehen in Abhängigkeit der Heterogenität der Betriebe und der Präzision des Punkteschemas. Die Differenzierung bezüglich Standort bedingt entsprechende standortabhängige Simulation mit dem biophysikalischen Modell EPIC. Auf der Basis dieser Simulationen und nach einer Modellerweiterung zwecks Berücksichtigung der Intensität kann erst entschieden werden, wie differenziert das Punkteschema auszugestalten ist. Dadurch würde der Ansatz verbessert, zielgenauer und auf heterogenen Betrieben weniger Abweichungen von der least-cost Referenz verursachen.

14.5.3 Fazit

Die Einführung von Erosionspunkten könnte eine geeignete Massnahme zur Eindämmung der Erosion in Problemgebieten darstellen. Eine klare Aussage auf der Basis der Modellierung an einem Standort ist jedoch nicht machbar, da die Standortabhängigkeit der untersuchten Massnahme nicht beurteilbar ist. Es fehlen Einflüsse wie Hangneigung, Bodentyp und Tierhaltung. Zudem berücksichtigt der verwendete Modellansatz den Handlungsspielraum der Landwirte bei der Wahl der Intensität nicht, da die Datengrundlage aus EPIC dies nicht erlaubte.

14.6 Fazit aus den Resultaten der quantitativen Analyse

Die on-farm-costs der Erosion sind selbst bei einem Planungshorizont von 2 Generationen zu gering, als dass sie bei gegebenem Handlungsspielraum eine Anpassung der Fruchtfolge bzw. angepasste Entscheide der Akteure bewirken würden. Gleichwohl ist der Unterschied zwischen den on-farm-costs bei kurzfristigem und bei langfristigem Planungshorizont beträchtlich, was die Bedeutung der langfristigen Betrachtung hervorhebt. Das Verhältnis ist je nach Bodenmächtigkeit 1:20 bis 1:100. Mit sinkender Bodenmächtigkeit steigen die on-farm-costs der Erosion. Eine den Zielgrössen für den Eintrag an partikulärem Phosphor in den Baldeggersee genügende Betriebsstruktur führt zu minimalen Vermeidungskosten von > Fr. 500.- pro ha oder > Fr. 10000.- für den untersuchten Betrieb mit einer Fläche von 20 ha. Mit dem Ansatz einer Phosphorrestriktion lassen sich die marginalen Vermeidungskosten pro kg Phosphorverlust, der vermieden wird, bestimmen. Die marginalen Vermeidungskosten steigen von weniger als Fr. 300.- / kg P im Bereich der Reduktion von 1-5 kg auf dem Gesamtbetrieb progressiv auf über Fr. 4500.- pro kg P-Abtrag bei der Reduktion des 22. kg Phosphorabtrag. Die Vermeidungskosten pro ha steigen von 0 bei einer nicht bindenden Abtragslimite auf ca. Fr. 1200.- / ha bei einer Limitierung des P-Abtrags auf 0.1 kg pro ha. Der Verlauf ist auch hier progressiv. P-Steuern wären ein sehr kosteneffizientes Instrument zur Erreichung einer Verringerung des partikulären P-Abtrages und damit der erodierten Menge Bodenmaterial. Sie sind aber nicht umsetzbar, da es sich um ein non-point-source-pollution Problem handelt.

Die aktuellen Vorschriften über eine minimale Anzahl Bodenschutzpunkte sind zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems ungeeignet, da sie bedeutende Effizienzverluste aufweisen und aus Sicht der Effektivität ungenügend sind. Der soziale Standard ist mit dem aktuellen System der Bodenschutzpunkte nicht erreichbar (ineffektiv) und die Vermeidungskosten des maximal erreichbaren Standards sind um einen Faktor 4.63 höher als die minimalen Vermeidungskosten zur Erreichung dieses Standards. Auch die marginalen Vermeidungskosten des P-Abtrags sind bei der Massnahme „Minimale Anzahl Bodenschutzpunkte“ bei gleichen Niveaus der Vermeidung von P-Abtrag deutlich höher als bei den least-cost Massnahmen (ca. Fr. 7000.- im Vergleich zu Fr. 482.- pro kg für das achte kg P-Abtrag, das vermieden wird).

Die Instrumente Landnutzungssteuern und Erosionspunkte erscheinen bei gegebenem Handlungsspielraum auf Stufe Einzelbetrieb als effizient, es treten keine Effizienzverluste auf. Daher unterscheiden sich die Vermeidungskosten und die marginalen Vermeidungskosten nicht von denjenigen der least-cost Massnahmen P-Abtragssteuer und P-Standard. Der Steuerbetrag im Falle der Landnutzungssteuer ist aber beträchtlich und erreicht bei einzelnen Kulturen annähernd den realisierbaren Gewinn. Dies ist primär ein Effekt des geringen Handlungsspielraumes. Landnutzungssteuern und Erosionspunkte könnten effiziente und effektive Instrumente zur Bekämpfung des Erosions- / Phosphorproblems sein. Eine abschliessende Beurteilung ist aber erst mit einem erweiterten Modell mit grösserem Handlungsspielraum und auf einer aggregierten Ebene möglich. Generell ist für eine abschliessende Massnahmenbeurteilung eine repräsentative Heterogenisierung der Standorte unerlässlich.

15 Schlussfolgerungen

In der Arbeit werden Grundlagen für die Modellierung dynamischer Fragestellungen im Bereich der Ressourcenökonomie aufgearbeitet und für die Anwendung am Beispiel der Erosion und des Phosphorabtrages im Gebiet des Baldeggersees konkretisiert und erweitert. Ein bioökonomischer dynamischer Modellansatz aus der Kombination eines biophysikalischen Simulationsmodells mit einem ökonomischen Optimierungsmodell dient der Analyse der Probleme der Erosion und des partikulären Phosphorabtrages. Die für den Modellansatz verwendete Methode der Nichtlinearen Programmierung stellt spezielle Anforderungen an die Lösbarkeit von Optimierungsproblemen. Daraus resultiert eine für die Metamodellierung geeignete Funktionsform. Die Kontrolltheorie liefert die theoretischen Grundlagen für die dynamische Analyse. Wesentlich für die Modellierung sind die theoretische (durch qualitative Analyse) und numerische Validierung des verwendeten Modells und dessen Verifikation in Bezug auf die Realität. Der Modellansatz ist auf die Analyse des Erosions- und Phosphorproblems sowie von problemschärfenden Massnahmen ausgerichtet. Er eignet sich aber allgemein für Fragestellungen in den Bereichen der Ressourcenökonomik, der Nachhaltigkeit oder der Finanzökonomik. Neben dem Modellansatz wird ein auf diesen ausgerichtetes EDV-Konzept präsentiert, das im wesentlichen auf einem programmierten Inputgenerator auf Datenbankbasis in Kombination mit einer algebraischen Modellierungssoftware basiert. Der Modellansatz wird auf der Basis der zuvor dargelegten methodischen und konzeptionellen Grundlagen exemplarisch zur Analyse des Erosions- und Phosphorproblems und von Massnahmen und Instrumenten zu deren Entschärfung eingesetzt.

Die folgenden Abschnitte zeigen Schlussfolgerungen für die drei Teile der Arbeit, gefolgt von einer Synthese im Abschnitt 15.5. Dabei werden die wesentlichen Erkenntnisse aus dieser Arbeit nach Themenbereichen und in einer abschliessenden Synthese zusammengefasst und diskutiert.

15.1 Teil 1: „Grundlagen der Modellierung“

Der Teil Grundlagen der Modellierung hat die Modellbildung, die Methodenwahl, Modellierungsansätze im Bereich Ressourcenökonomie, mathematische Aspekte der Modellierung von Optimierungsproblemen und die Kontrolltheorie zum Inhalt.

Die Grundlagen dieses Abschnittes sind allgemeine Grundlagen für die Modellierung dynamischer nichtlinearer Optimierungsprobleme. Es ist das Ziel, den System- sowie den Modellbegriff zu klären und die mathematischen Methoden der Simulation, der Gleichgewichtsanalyse und der Optimierung zu erläutern. Die vorgestellten Modellierungsansätze im Bereich Ressourcenökonomik sind typisch für den Bereich, können aber auch in anderen Gebieten zur Anwendung kommen. Insbesondere ist der Aspekt der Aggregation für Modelle auf einer höheren Ebene als der des Einzelunternehmens von allgemeiner Bedeutung. Die Kontrolltheorie liefert die Grundlage für die Behandlung nichtlinearer dynamischer Optimierungsprobleme mit Differentialgleichungen. Die wichtigsten Punkte für diesen Teil lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Modellierung

- Modelliert wird ein reales System. Die Problemstellung mit den Zielen der quantitativen Analyse definiert den Systemrahmen mit den relevanten Elementen und Beziehungen.
- Die Abstraktion von der Realität bedingt eine gute Systemkenntnis zwecks Wahl geeigneter Kontroll- und Zustandsvariablen und korrekter Bestimmung der Systemzusammenhänge.

- Die Kriterien der Modellrelevanz und der Modellvalidität definieren die Modellqualität. Die Modellrelevanz ist aus Sicht des Entscheidungsträgers zu beurteilen und hängt von der Eignung des Analyseinstruments für die Prognoseerstellung, für das Experimentieren (Flexibilität) und für die Vertiefung des Systemverständnisses (Erfassung der Interdependenzen) ab. Die Modellvalidität lässt sich beispielsweise durch eine qualitative Modellanalyse überprüfen.
- Ein valides und richtiges Modell führt zu konsistenten Resultaten und zu voraussagbaren Resultaten bei Spezialfällen. Daneben müssen klare Ursache-Wirkungsbeziehungen existieren. Die Konsistenz muss aus theoretischer und numerischer Sicht mit Blick auf die Fragestellung und die reale Situation gewährleistet sein.

Methodenwahl

- Fragestellungen aus den Bereichen der Ressourcenökonomik, der Nachhaltigkeit, der Investitionsrechnung und der Finanzökonomik allgemein erfordern eine dynamische Analyse.
- Dynamische Programmierungsmodelle sind geeignet für ressourcenökonomische Fragestellungen, speziell auch für Problemstellungen im Bereich der Erosion. Der Problemcharakter verlangt oft eine Analyse auf einer aggregierten Ebene, was einen aggregierten Modellansatz (bottom-up) erfordert. Bei einer aggregierten Betrachtung sind Aggregationsverzerrungen zu beachten.
- Die simultane dynamische bzw. langfristige Optimierung maximiert im Falle der Gewinnmaximierung die Gewinne aus langfristiger Sicht, die kurzfristige (statisch, komparativ statisch) dagegen nicht.
- Zusammenhänge in der Natur bzw. Realität sind oft nichtlinear und lassen sich nicht immer durch lineare Funktionen für die Fragestellung ausreichend approximieren. Die Nichtlineare Programmierung offeriert Möglichkeiten für einen besseren Realitätsbezug als die Lineare Programmierung.
- Mit Simulationsmodellen lassen sich Prozesse eines realen Systems nachbilden und Experimente durchführen. Biophysikalische Simulationsmodelle sind für die Modellierung natürlicher Ressourcen und biophysikalischer Prozesse, bspw. der Bodenerosion oder der Entwicklung von Bodenpools, einsetzbar und ersparen aufwendige Datenerhebungen in der Realität.

Mathematische Aspekte der Modellierung: Lösbarkeit

- Die Konvexität eines mathematischen Programmierungsproblems ist zentral für die globale Lösbarkeit komplexer Modelle. Bei der Maximierung muss die Zielfunktion mindestens pseudokonkav und der zulässige Bereich konvex sein. Die Minimalanforderung, die die Konvexität des zulässigen Bereichs garantiert, bedingt im Standardansatz der Maximierung mindestens quasikonvexe Restriktionsfunktionen. Damit die Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen notwendig und hinreichend sind, muss zusätzlich eine Constraint Qualification erfüllt sein.
- Die Anforderungen aus Sicht der mathematischen Theorie und der numerischen Anwendung sind nicht deckungsgleich. Schwierigkeiten bei der Lösung von Optimierungsproblemen können durch die Verwendung unterschiedlicher Algorithmen entschärft werden.

Kontrolltheorie

- Die Kontrolltheorie liefert mit der Möglichkeit der Berücksichtigung von Differentialgleichungen die theoretische Basis zur Analyse dynamischer Fragestellungen und von Pro-

blemen mit Fluss- und Bestandesgrößen. Es resultieren intertemporal optimale Entwicklungspfade für die Kontroll- und Zustandsvariablen und intertemporale Bewertungen für die Veränderung der Zustandsvariablen.

- Intertemporale Kosten der Ressourcennutzung können bedeutend sein und müssen für eine langfristig maximale Zielerfüllung berücksichtigt werden. Nur so ist intertemporale Effizienz in der Ressourcenallokation gewährleistet.
- Bei konkaver Gewinnfunktion erfolgt die Ressourcennutzung bei der langfristigen Betrachtung extensiver als bei der kurzfristigen.

Die Modellierung ist durch die Notwendigkeit der Abstraktion von der Realität ein anspruchsvoller Prozess, der eine gute Systemkenntnis bedingt. Die Modellqualität setzt sich aus den Aspekten der Modellrelevanz und der Modellvalidität zusammen, die beide zu gewährleisten sind. Zusätzlich muss das Modell mit Blick auf die Realität verifiziert werden. Für Fragestellungen im Bereich der Ressourcenökonomik, der Nachhaltigkeit und der Finanzökonomik ist meist eine dynamische Analyse mit der Verwendung nichtlinearer Funktionen, evtl. auf aggregierter Ebene angezeigt. Die Kontrolltheorie liefert für dynamische Fragestellungen mit Differentialgleichungen die theoretische Grundlage. Dadurch fließen intertemporale Kosten, bspw. der Ressourcennutzung, in die Entscheidungsfindung mit ein. Die Kombination von Simulations- mit Optimierungsmodellen ist vielversprechend. Nichtlineare Modelle lassen nur bei konvexer Problemformulierung (pseudokonkave Zielfunktion und quasikonvexe Restriktionsfunktionen) eine globale Lösung wahrscheinlich werden.

15.2 Teil 2: „Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung“

Der Teil „Das Erosions- / Phosphorproblem und seine Modellierung“ umfasst die Beschreibung des Erosions- und Phosphorproblems, eine Literaturübersicht über Methoden zur Analyse des Erosionsproblems und möglicher Massnahmen sowie die Diskussion von Massnahmen zur Eindämmung des Erosions- und Phosphorproblems. Wichtig ist der Modellansatz der bioökonomischen Modellierung. Weiter wird eine für den Modellansatz spezifizierte Form der Produktionsfunktion präsentiert und die qualitative Analyse des verwendeten Erosionsmodells durchgeführt.

Der Focus dieses Teils der Arbeit liegt auf der Bereitstellung von Modellierungsgrundlagen, die auf die Fragestellung der Erosion- und der partikulären Phosphorabträge im Gebiet des Baldeggersees ausgerichtet sind. Erforderlich ist die Definition des Systemrahmens und die Diskussion von Massnahmen und Instrumenten zur Problembekämpfung. Der Problembezug macht einen speziellen Modellierungsansatz nötig, der aus der Kombination eines biophysikalischen Simulationsmodells mit einem ökonomischen Optimierungsmodell besteht. Aus dem Modellansatz ergeben sich spezielle Anforderungen an die verwendeten Funktionen. Deshalb wird die Cobb-Douglas Funktion modifiziert, bis sie die Anforderungen erfüllt. Die qualitative Analyse greift die Forderung der Modellvalidierung aus dem ersten Teil auf und erfüllt sie auf der analytischen Ebene. Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesem Teil der Arbeit finden sich in der folgenden Liste von Punkten:

Erosion und Analysemethoden

- Erosion ist ein dynamisches Problem mit langfristigen Auswirkungen und erfordert eine dynamische Analyse.
- Der Systemrahmen ist durch einen erosionsgefährdeten Ackerbaustandort im Gebiet des Baldeggersees gegeben.

- Erosion verursacht on-farm Kosten durch Beeinträchtigung der Qualität und Mächtigkeit des Produktionsfaktors Boden (Reduktion der Bodenfruchtbarkeit). Off-farm Kosten entstehen u.a. durch partikuläre Phosphoreinträge in die Gewässer.
- Beim Phosphorproblem handelt es sich um ein non-point-source-pollution Problem. Direkt auf die Verschmutzungsgrösse einwirkende Massnahmen sind nicht umsetzbar. Indirekte Massnahmen müssen ergriffen werden. Instrumente der Umweltpolitik, wie wirtschaftliche An- und Abreize sowie Standards können die Ergreifung von Massnahmen, bspw. die konservierende Bodenbearbeitung oder eine angepasste Fruchtfolge, fördern. Für eine gute Entscheidungsgrundlage ist die Analyse der Effizienz verschiedener Massnahmen und Instrumente des Umweltschutzes wichtig.
- Verwendbare Methoden zur Analyse von Problemen im Bereich der Erosion und der Phosphoreinträge in Gewässer sind die qualitative Analyse, die Kosten-Nutzen-Analyse, Programmierungsmethoden wie Lineare Programmierung, Nichtlineare Programmierung und stochastische Programmierung, die Gleichgewichtsanalyse, die Simulation oder statistische Methoden. Gut geeignet erscheinen aus der Sicht der Literatur Programmierungsmethoden gemäss bottom-up Ansatz.

Modellansatz: bioökonomische Modellierung

- Der Modellansatz der bioökonomischen Modellierung ist für ressourcenökonomische Fragestellungen adäquat. In diesem Ansatz wird ein biophysikalisches Simulationsmodell mit einem ökonomischen Optimierungsmodell durch Metamodellierung kombiniert. Die Metamodellierung verbessert den Bezug zur biophysikalischen Realität.
- Mit dem Modellansatz ist es möglich, Umweltprobleme mit komplexen Interaktionen zwischen sozialen Institutionen, zwischen Entscheiden ökonomischer Akteure innerhalb institutioneller, ökonomischer und natürlicher Rahmenbedingungen oder Prozesse zu analysieren.
- Neben der Bestimmung der Entwicklungspfade für die Kontroll- und Zustandsvariablen erlaubt der Modellansatz die Quantifizierung von on-farm-costs der Erosion, von Vermeidungskosten und marginalen Vermeidungskosten von Umweltproblemen sowie den Vergleich der Kosteneffizienz von Massnahmen und von umweltpolitischen Instrumenten.

Metamodellierung

- Die Probleme der Allokation und Intensitätswahl sind beim Vorhandensein intertemporaler Kosten nicht trennbar zwecks sequentieller und unabhängiger Optimierung. Bei Zustandsgrössen müssen bei langfristiger Betrachtung die intertemporalen Wirkungen ihrer Veränderungen berücksichtigt werden. Die Optimierung muss simultan erfolgen ausser bei fixem Endzeitpunkt mit im Endzeitpunkt bekannten Grössen für die Zustands- und Kozustandsvariablen.
- Die für die globale Lösbarkeit notwendige Konvexität eines Programmierungsproblems erfordert für den Modellansatz der bioökonomischen Modellierung im Rahmen der Metamodellierung mit einer Variablen skalierbare Produktionsfunktionen, die die Eigenschaft der Konkavität bei der Skalierung bewahren. Eine modifizierte Cobb-Douglas Produktionsfunktion erfüllt die Anforderungen für die Metamodellierung: Konkavität bei Skalierung mit einer Variablen, ökonomische Flexibilität, Realitätsbezug und Schätzbarkeit:

$$Q(\bar{X}^T) = A + b * \prod_{i=1}^n X_i^{c_i} * Y^{1-\sum_{i=1}^n c_i} + \sum_{i=1}^n d_i * X_i^{e_i} * Y^{1-e_i} - \sum_{i=1}^n f_i * X_i^{g_i} * Y^{1-g_i}$$

mit $i = 1..n$ Anzahl Variablen /Inputfaktoren, Q = Output, X = Inputfaktor, Y = Fläche

bzw.

$$\frac{Q(\bar{X}^T)}{Y} = \frac{A}{Y} + b * \prod_{i=1}^n \left(\frac{X_i}{Y} \right)^{c_i} + \sum_{i=1}^n d_i * \left(\frac{X_i}{Y} \right)^{e_i} - \sum_{i=1}^n f_i * \left(\frac{X_i}{Y} \right)^{g_i}$$

mit $i = 1..n$ Variablen / Inputfaktoren, $Q = \text{Output}$, $X = \text{Inputfaktor}$, $Y = \text{Fläche}$

mit den Parametern

$$A = \{A \mid A \in \mathfrak{R}\}$$

$$b = \{b \mid b \geq 0\}$$

$$c_i = \{c_i \mid 0 \leq c_i < 1\} \wedge \sum_{i=1}^n c_i \leq 1$$

$$d_i = \{d_i \mid d_i \geq 0\}$$

$$e_i = \{e_i \mid 0 \leq e_i < 1\}$$

$$f_i = \{f_i \mid f_i \geq 0\}$$

$$g_i = \{g_i \mid 1 \leq g_i\}$$

- Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Metamodellierung für die Produktionsfunktionen im Falle homogener Zustandsgrößen je Flächeneinheit und variabler Flächenallokation. Die Umrechnung von Größen je Flächeneinheit (X_i/Y) auf mit einer linearen Variablen skalierte Größen ($X_i/Y * Y = X_i$) für die entsprechende Variable in der modifizierten Cobb-Douglas Funktion muss den Konvexitätsanforderungen entsprechend erfolgen.
- Die Schätzung der Produktionsfunktionen im Rahmen der Metamodellierung muss logarithmiert erfolgen, damit nicht absolute, sondern relative Abweichungen minimiert werden. Der Verlauf der geschätzten Funktionen entspricht so besser der Realität und führt aus ökonomischer und naturwissenschaftlicher Sicht zu einem besseren Fit.

Modellvalidierung durch die qualitative Analyse

- Ein wesentlicher Aspekt der Modellierung ist die theoretische und numerische Validierung des Modells. Die theoretische Validierung kann durch die Prüfung der naturwissenschaftlichen und ökonomischen Konsistenz der verwendeten Funktionen und durch die Prüfung der Konsistenz der first-order-conditions in den gleichen Bereichen erfolgen. Die Prüfung der numerischen Konsistenz erfolgt in den Modellkalkulationen durch Parametrisierung des Modells und durch Überprüfung auf konsistente Resultate.
- Die theoretische Validierung des Modells beweist die Güte des gewählten Modells.
- Neben der theoretischen und numerischen Überprüfung des Modells ist die Verifikation des Modells und der erhaltenen Resultate in Bezug auf die Realität bedeutsam und unerlässlich.
- Nur die langfristige Optimierung unter Berücksichtigung der Folgekosten von Entscheidungen ist bei Optimierungsproblemen mit langfristigen Auswirkungen von Entscheidungen wirklich gewinnmaximierend und führt zu einer intertemporal effizienten Ressourcenallokation.

Bei den Grundlagen der Modellierung, die für die Analyse des Erosions- und Phosphorproblems spezifisch sind, ist der Systemrahmen durch einen erosionsgefährdeten Ackerbaustandort im Gebiet des Baldeggersees gegeben. Geeignete Massnahmen auf Betriebsebene sind die konservierende Bodenbearbeitung und eine Anpassung der Fruchtfolge. Wirksame Instrumente stammen aus den Bereichen der ökonomischen An- oder Abreize und der Standards. Aus methodischer Sicht ist die Programmierung für die Analyse gut geeignet. Der Modellierungsansatz besteht in der Kombination eines biophysikalischen Simulationsmodells mit einem ökonomischen Optimierungsmodell. Daher ist das Modell als bioökonomisches Modell zu bezeichnen. Der Schritt der Metamodellierung erlaubt die Kombination, stellt aber Anforder-

derungen an die verwendete Funktionsform. Diese erfüllt die entwickelte modifizierte Cobb-Douglas Funktionsform. Der Modellansatz erweist sich in den verwendeten Funktionsformen und in den Bedingungen erster Ordnung für Extremas (first order conditions) als aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht valid.

Mit den ersten zwei Teilen der Arbeit sind theoretische und methodische Grundlagen allgemeiner und problemspezifischer Art für die quantitative Analyse des Erosions- und Phosphorproblems im Gebiet des Baldeggersees bereitgestellt. Die qualitative Analyse erfolgt im dritten Teil der Arbeit.

15.3 Teil 3: „Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen“

Der Teil 3 „Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen“ präsentiert die Datengrundlagen der Modellrechnungen, ein EDV-Konzept für die Modellrechnungen und die Diskussion der Resultate.

Im dritten Teil werden die Modellierungsgrundlagen aus den zwei ersten Teilen angewandt. Dazu ist es nötig, die Datengrundlagen aus naturwissenschaftlicher und ökonomischer Sicht für den Modellansatz aufzuarbeiten. Die Datengrundlagen für die ökonomischen Parameter stammen aus Publikationen von Forschung und Beratung. Die naturwissenschaftlichen Koeffizienten der Funktionen für Produktion und Erosion werden bei der Schätzung der Funktionen auf der Datenbasis aus den Simulationen mit dem biophysikalischen Simulationsmodell EPIC bestimmt. Das EDV-Konzept muss eine effiziente Analyse der on-farm-costs der Erosion und möglicher Massnahmen und Instrumente zur Eindämmung des Erosions- bzw. Phosphorproblems erlauben. Deshalb wird die Verwendung eines in Access programmierten Inputgenerators in Verbindung mit der algebraischen Modellierungssoftware AMPL und weiteren Softwarepaketen vorgestellt. Die Beurteilung der Massnahmen und Instrumente soll auf der Basis ihrer Vermeidungskosten erfolgen.

Für den Teil Datengrundlagen, EDV-Konzept und Modellrechnungen sind folgende Erkenntnisse wichtig.

Datengrundlagen

- Die Schätzungen der naturwissenschaftlichen Funktionen für Produktion und Erosion fiten sehr gut an die Datengrundlage aus den Simulationen mit dem biophysikalischen Simulationsmodell EPIC. Damit sind die biophysikalischen Zusammenhänge aus naturwissenschaftlicher Sicht bestens ins Optimierungsmodell integriert.
- Die Differenzierung der wirtschaftlichen Parameter in fixe, ertrags- und intensitätsabhängige ist genügend für die Abbildung des Handlungsspielraums in der Realität im Problemzusammenhang.

EDV-Konzept

- Ein EDV-Konzept mit möglichst grossem Ausmass der Automatisierung empfiehlt sich, da Modellrechnungen oft wiederholt werden müssen und Fehler Neuberechnungen notwendig machen.
- Die Kombination von Tabellenkalkulations-, Datenbank- und Textverarbeitungssoftware mit einer algebraischen Modellierungssprache erleichtert die Fehlerbehebung und erspart ermüdende Arbeiten in den Phasen der Daten- und Resultataufbereitung.
- Die Verwendung der algebraischen Modellierungssprache AMPL für Optimierungsmodelle garantiert die mathematische Konsistenz und erhöht die Modelltransparenz durch die strikte Trennung von Modell und Daten.

- Die Möglichkeit der Indizierung bei der algebraischen Modellierungssprache legt die Verwendung eines Inputgenerators auf der Basis einer Datenbanksoftware nahe. Ein auf Basis von Microsoft Access programmierter Inputgenerator erleichtert die Eingabe und die Durchführung von Veränderungen, trägt zur Modellkonsistenz bei, erzwingt die Modelldokumentation und vermeidet Redundanzen oder Datenleichen in den Daten. Die Inputfiles für die algebraische Modellierungssoftware AMPL werden automatisch erstellt.
- Das verwendete EDV-Konzept erweist sich in der Anwendung als bestens geeignet.

Resultate der quantitativen Analyse

- Aus langfristiger Sicht sind die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung nur bei der tiefsten untersuchten Bodenmächtigkeit von 0.35 m höher als die Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung. Erosionsmindernde Entscheide erscheinen nur bei dieser tiefsten Bodenmächtigkeit, allerdings nur zu Beginn des Betrachtungszeitraumes.
- Aus kurzfristiger Sicht sind die Opportunitätskosten der Ressourcennutzung generell tiefer als die Opportunitätskosten der Ressourcenbewahrung. Es werden in keinem der untersuchten Fälle erosionsmindernde Entscheide in der Wahl der Kulturen, der Bodenbearbeitung oder der Düngung getroffen.
- Die on-farm-costs der Erosion betragen aus langfristiger Sicht im ersten Jahr der Betrachtung über 66 Jahre zwischen Fr. 138.- und Fr. 549.- pro mm erodiertes Bodenmaterial je nach Bodenmächtigkeit für den Gesamtbetrieb von 20 ha LN. Pro mm Bodenmaterial ergeben sich je ha Kosten zwischen Fr. 6.88 und Fr. 27.44.
- Aus kurzfristiger Sicht belaufen sich die on-farm-costs auf Fr. 7.- bis Fr. 31.- pro mm für die ganze Betriebsfläche. Auf einen mm Bodenmächtigkeit bezogen ergeben sich on-farm-costs zwischen Fr. 0.36 und Fr. 1.53.
- Die intertemporalen Kosten der Bodenerosion sind in der Grössenordnung um einen Faktor 20 höher als die einzeljährlichen Kosten. Diese Kostenverhältnisse zeigen die Bedeutung der Wahl eines dynamischen Modellansatzes für ressourcenökonomische Fragestellungen im Bereich der Erosion und der Phosphorabträge.
- Die Vermeidungskosten der Erosion zur Erreichung des sozialen Standards von 0.3 kg partikulärem P-Abtrag pro ha betragen durchschnittlich zwischen Fr. 522.- und Fr. 645.- pro ha in laufenden Werten. Auf homogenen Betrieben sind die Vermeidungskosten bei der Implementierung von Standards und Emissionssteuern identisch. Diese Vermeidungskosten können als Referenz zur Beurteilung der betrieblichen Kosteneffizienz von Massnahmen dienen.
- Die minimalen marginalen Vermeidungskosten auf dem untersuchten Ackerbaubetrieb steigen mit der Vermeidung von P-Abtrag progressiv und erreichen für das zwanzigste kg P-Abtrag, das vermieden wird, den Betrag von Fr. 3500.-. Eine überbetriebliche Kosteneffizienz ist nur gegeben bei identischen marginalen Vermeidungskosten auf den einzelnen heterogenen Betrieben.
- Bodenschutzpunkte gemäss aktueller IP-Verordnung sind zur Eindämmung des Erosions-/ Phosphorproblems ineffektiv und ineffizient. Die Vermeidungskosten und die marginalen Vermeidungskosten sind deutlich höher als bei den Referenzmassnahmen P-Abtragssteuer oder P-Standard.
- Landnutzungssteuern und Erosionspunkte sind auf homogenen Betrieben kosteneffizient und effektiv. Eine abschliessende Beurteilung der Kosteneffizienz der Massnahmen bedingt die Analyse auf heterogenen Betrieben und an heterogenen Standorten.

Die biophysikalischen Zusammenhänge aus den Simulationen mit EPIC lassen sich mit hoher Genauigkeit durch die geschätzten Funktionen ins bioökonomische Modell integrieren. Das EDV-Konzept, im wesentlichen aus Inputgenerator und algebraischer Modellierungssprache, erweist sich in der Analyse des Erosions- und Phosphorproblems und in der Analyse von Massnahmen und Instrumenten als effizient. Das Konzept trägt zur Vermeidung von Modellfehlern bei und vermeidet häufige Wiederholungen von Arbeiten. Die on-farm-costs der Erosion sind gering und machen Instrumente wie Erosionspunkte und Landnutzungssteuern nötig. Diese Instrumente sind aus betrieblicher Sicht kosteneffizient, da sie minimale Vermeidungskosten aufweisen.

15.4 Künftige Herausforderungen der bioökonomischen Analyse

Aus der Anwendung des Modellansatzes ergeben sich Erkenntnisse zur Verbesserung des Modells bzw. des Modellansatzes und der verwendeten Datengrundlage. Daher beschreibt dieser Abschnitt Herausforderungen für künftige ressourcenökonomische oder andere Analysen mit dem gewählten Modellansatz.

Daten

- Massnahmenanalysen bedingen eine Analyse auf heterogenen Standorten (räumliche Differenzierung) und auf einer aggregierten Ebene, beispielsweise für Probleme der Gewässerverschmutzung auf Stufe Wassereinzugsgebiet. Die räumliche Differenzierung stellt bedeutende Herausforderungen für die Verwendung biophysikalischer Simulationsmodelle. Falls marktmässige Interdependenzen zu erwarten sind, ist die geeignete Modellierungsebene die Sektorebene (Aggregation).
- Die Analyse des Phosphorproblems in Gewässern bedingt zusätzlich zum partikulären P-Abtrag die Berücksichtigung von löslichen P-Verlusten. Für die Analyse des Problems löslicher P-Verluste sind die Hofdünger entsprechend ihrer Herkunft für die Ausbringung zu differenzieren. Naturwiesen müssen entsprechend den standörtlichen Voraussetzungen für eine Analyse des Phosphorproblems im Modellansatz eingebaut werden.
- Zwecks erleichterter Bestimmung möglicher steady states ist die Nettoerosionsfunktion in eine Funktion der Bodengenese und der Erosion zu differenzieren. Erosion und Bodengenese sind dann nicht mehr als Saldogrösse ausgewiesen und die Wirkungen von Massnahmen und Instrumenten sind differenziert zuordbar.
- Eine Differenzierung der Datengrundlage in bezug auf Intensitäten der Nutzung würde den Einsatzbereich des Modells erweitern und den Akteuren mehr Handlungsspielraum gewähren. Die Bedeutung der Intensitätswahl könnte bestimmt werden.

Modell

- Der modulare Aufbau des Modellkonzepts ist zu verfeinern und zu erweitern und immer mit dem Inputgenerator abzustimmen.
- Für Problemstellungen im Bereich der Gewässer genügt die Modellierung auf Stufe Einzelbetrieb nicht. Die Modellierung auf einer aggregierten Ebene ist angezeigt. Meist ist die Ebene eines Wassereinzugsgebietes adäquat.
- Der Einsatz biophysikalischer Simulationsmodelle und des bioökonomischen Optimierungsmodells muss möglichst parallel erfolgen. Erkenntnisse aus der Anwendung des bioökonomischen Optimierungsmodells verlangen oft nach erneuten Simulationen mit dem biophysikalischen Simulationsmodell. Mit dem parallelen Einsatz der beiden Modelltypen sind Modellverbesserungen aus Sicht der Daten erleichtert und gegenseitige Abhängigkeiten können besser berücksichtigt werden.

- Endwerte von Ressourcen müssen in den Modellansatz eingebaut werden. Diese können die Entscheidung im analysierten Betrachtungszeitraum entscheidend beeinflussen. Sind Endwerte der Ressourcen berücksichtigt, so sind Rechnungen mit unendlichem Zeithorizont nicht zwingend notwendig.
- Im Modell ist die Tierhaltung, differenziert in Rindvieh- und Schweinehaltung, einzubauen. Die Aktivitäten der Flächennutzung sind zwingend um Naturwiesen und evtl. weitere Ackerbauaktivitäten zu erweitern.
- Der Handlungsspielraum im Modellansatz ist bspw. um die Intensitätswahl zu erhöhen. Dies bedingt eine angepasste biophysikalische Datengrundlage. Ist ein ungenügender Handlungsspielraum gegeben, so werden Kosten generell überschätzt.
- Effizienz auf gesellschaftlicher Ebene ist gegeben, wenn die marginalen Kosten der Schadensvermeidung den marginalen Schadenskosten entsprechen. Daher ist der Modellansatz für eine soziale Effizienzanalyse um die Schadenskosten zu erweitern.
- Mit dem Einbezug der Schadenskosten in den Modellansatz und mit einer Heterogenisierung der Standorte bzw. der Betriebe ist eine Massnahmenanalyse in Bezug auf first-best Kriterien möglich.

Wichtige künftige Herausforderungen liegen in der Differenzierung und Erweiterung der Datengrundlage bezüglich Tierhaltung, Düngung, Naturwiesen und weiterer Kulturen. Bodenerosion und Bodengenese sind zu trennen. Der Modellansatz muss um Endwerte für die Ressourcen und um Schadenskosten der Umweltverschmutzung erweitert werden. Für eine aussagekräftige Massnahmenanalyse ist der Modellansatz zudem auf einer aggregierten Ebene mit geeigneter Heterogenisierung der Standorte umzusetzen. Auch beim Modellierungsprozess gibt es Verbesserungsmöglichkeiten, indem biophysikalische Simulation und ökonomische Optimierung stärker verknüpft und möglichst parallel ausgeführt werden.

15.5 Synthese

Im Rahmen dieser Arbeit werden wesentliche methodische und konzeptionelle Aspekte der Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen diskutiert und am Beispiel der Erosion und der partikulären P-Abträge infolge landwirtschaftlicher Nutzung im Gebiet des Baldeggersees konkret angewandt. Die wichtigsten Erkenntnisse lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen.

1. Eine klare Systemdefinition ausgehend von der Problemstellung ist zentral für die biophysikalische und bioökonomische Modellierung.
2. Für die Modellierung ressourcenökonomischer Fragestellungen ist ein bioökonomischer Modellansatz mit der Kombination eines biophysikalischen Simulations- und eines ökonomischen Optimierungsmodells geeignet. Notwendig ist die Klärung der Frage der Lösbarkeit des Modells und die Modellvalidierung.
3. Eine modifizierte Cobb-Douglas Funktion ermöglicht die Metamodellierung aus mathematischer Sicht (Konvexität).
4. Die Bedeutung des Modellansatzes und der Wert der Aussagen hängt entscheidend von der Datenqualität ab.
5. Die Kontrolltheorie liefert für dynamischen Analysen mit Differentialgleichungen die theoretischen Grundlagen. Intertemporale Kosten der Ressourcennutzung können bedeutend sein und müssen daher berücksichtigt werden. Nur so ist intertemporale Effizienz in der Ressourcenallokation gewährleistet.

6. Die Möglichkeiten, die sich aus der Verwendung algebraischer Modellierungssprachen in Kombination mit anderen Softwarepaketen in den Bereichen Datenbank, Tabellenkalkulation, Statistik und Textverarbeitung ergeben, erleichtern die Analysen entscheidend.
7. Erosion bzw. partikuläre P-Abträge sind Probleme, die eine dynamische Analyse erfordern. Die on-farm-costs der Erosion sind bei einer Betrachtung über zwei Generationen sehr tief. Erosion ist ein Problem, dessen Auswirkungen sich erst sehr langfristig zeigen. Deswegen sind Massnahmen zur Eindämmung notwendig. Massnahmen und Instrumente können mit dem Modellansatz bezüglich ihrer Kosteneffizienz verglichen werden und ihre (marginalen) Vermeidungskosten sind bestimmbar.
8. Ein dynamischer, evtl. nichtlinearer Programmierungsansatz ist für Fragestellungen aus den Bereichen der Ressourcenökonomik, der Nachhaltigkeit oder der Finanzökonomik bestens geeignet.
9. Eine Erweiterung des Modellansatzes und eine Differenzierung der Datenbasis können den Anwendungsbereich der konzeptionellen und methodischen Grundlagen der Modellierung, insbesondere des vorgestellten und umgesetzten Modellansatzes, deutlich vergrössern.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der methodisch konzeptionellen Ebene für die Modellierung dynamischer Fragestellungen mit Blick auf die Anwendung im Bereich der landwirtschaftlichen Ressourcenökonomie. Die Arbeit zeigt, dass die aktuell vorhandenen Möglichkeiten der Modellierung die Analyse im Bereich der Ressourcenökonomie und dynamischer Fragestellungen ermöglichen und bedeutend erleichtern. Dies eröffnet vielversprechende Perspektiven für die Weiterentwicklung der Modellierung am Institut für Agrarwirtschaft.

Literaturverzeichnis

- Alfsen, K.H., M.A. De Franco, S. Glomsrod und T. Johnson. "The cost of soil erosion in Nicaragua." *Ecological Economics* 16, no. 2 (1996): pp. 129-145.
- Andreae, B. *Standortprobleme der Agrarproduktion*. 1 ed. Vol. XIV. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues. Edited by BLV Verlagsgesellschaft. München, 1977.
- Antle, J.M. und S.M. Capalbo (1993) Integrating Economic & Physical Models for Analyzing Environmental Effects of Agricultural Policy on Nonpoint-Source Pollution, ed. A. Dinar und D. Zilberman, vol. 1. Boston, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-36.
- Autorenkollektiv. *Operations Forschung Landwirtschaft Nahrungsgüterwirtschaft*. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 1969.
- Azadivar, F. und Y. Lee. "Optimization of discrete variable stochastic systems by computer simulation." *Mathematical Compendium of Simulation* 30 (1988): pp. 331-345.
- Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke, C. Schuchard-Ficher und R. Weiber. *Multivariate Analysemethoden-Eine anwendungsorientierte Einführung*. 4 ed. Berlin: Springer Verlag, 1986.
- Baffes, J. und U. Vasavada. "On the Choice of Functional Forms in Agricultural Production Analysis ." *Applied Economics* 21, no. 8 (1989): pp. 1053-61 .
- Baffoe, J.K., D.P. Stonehouse und B.D. Kay. "A Methodology for Farm-Level Economic Analysis of Soil Erosion Effects under Alternative Crop Rotational Systems in Ontario." *Canadian Journal of Agricultural Economics* 35, no. 1 (1986): pp. 55-73.
- Bairam, E.I. *Homogeneous and Nonhomogeneous Production Functions: Theory and applications*. Vermont, USA: Ashgate Publishing Company, 1994.
- Balmann, A., H. Lotze und S. Noleppa. "Agrarsektormodellierung auf der Basis "typischer Betriebe"(1)." *Agrarwirtschaft* 47, no. 5 (1998): pp. 222-230.
- Bamberg, G. und A.G. Coenenberg. *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. 7 ed. WiSo-Kurzlehrbücher: Reihe Betriebswirtschaft. München: Verlag Franz Vahlen GmbH, 1992.
- Barnett, W.A. "The Minflex-Laurent Translog Flexible Functional Form." *Journal of Econometrics* 30, no. 1-2 (1985): pp. 33-44.
- Barnett, W.A. und Y.W. Lee. "The Global Properties of the Minflex Laurent, Generalized Leontief, and Translog Flexible Functional Forms." *Econometrica* 53, no. 6 (1985): pp. 1421-37.
- Barnett, W.A., Y.W. Lee und M.D. Wolfe. "The Three-Dimensional Global Properties of the Minflex Laurent, Generalized Leontief, and Translog Flexible Functional Forms." *Journal of Econometrics* 30, no. 1-2 (1985): pp. 3-31.
- Bazaraa, M.S., H.D. Sherali und C.M. Shetty. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. 2 ed. Vol. 1. Wiley-Interscience series in discrete mathematics and optimization. Edited by Wiley. 1 vols. New York: Wiley, cop., 1993.

- Berg, E. und F. Kuhlmann. *Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen : Methoden und PASCAL-Programme zur Modellierung dynamischer Systeme*. 1 ed. Vol. 1. 1 vols. Stuttgart: Ulmer, cop., 1993.
- Bernegger, U. *Analyse und Prognose der Strukturentwicklung der Schweizer Landwirtschaft - Eine methodenkritische Auseinandersetzung mit Modellen zur sektoralen Struktur-analyse*. Zürich: IAW-intern, 1996.
- Böhm, G. *Konstruktion eines landwirtschaftlichen Unternehmensplanspiels als dynamisches Systemsimulationsmodell*. Vol. 11. Giessener Schriften zur Agrar- und Ernährungswirtschaft. Edited by Universität Giessen. Frankfurt (Main): **DLG-Verlag, cop.**, 1980.
- Bork, H.R. *Bodenerosion und Umwelt. Landschaftsgenese und Landschaftsökologie*. Vol. H13. Braunschweig, 1988.
- Boussemart, J.P., G. Flichman, F. Jacquet und H.B. Lefer. "Prévoir les effets de la réforme de la politique agricole commune sur deux régions agricoles françaises: application d'un modèle bio-économique." *Revue canadienne d'économie rurale* 44 (1996): pp. 121-138.
- Bouzaher, A., J. Shogren, P.W. Gassmann, D. Holtkamp und A. Manale (1995) Use of a linked biophysical and economic modeling system to evaluate risk-benefit tradeoffs of corn herbicide use in the Midwest, ed. M. Leng, E. M. K. Leovey und P. Zubkoff. Boca Raton, CRC Press, pp. 369-381.
- Braden, J.B. und K. Segerson (1993) Information Problems in the Design of Nonpoint-Source Pollution Policy, ed. A. Dinar und D. Zilberman, vol. 1. Boston, Kluwer Academic Publishers, pp. 1-36.
- Brandes, W. *Über die Grenzen der Schreibtisch-Ökonomie*. Vol. 40. Studien in den Grenzbe-reichen der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Edited by E. Boettcher. Tübingen: J.C.B.Mohr (Paul Siebeck), 1985.
- Braun, M., M. Frey, P. Hurni und U. Sieber. *Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffver-luste aus diffusen Quellen in die Gewässer im Rheineinzugsgebiet der Schweiz unter-halb der Seen (Stand 1986)*. Edited by Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft. Bern: Dokumentationsdienst BUWAL, 1991.
- Braun, M., P. Hurni und E. Spiess. *Phosphor- und Stickstoffüberschüsse in der Landwirt-schaft und Para-Landwirtschaft*. Schriftenreihe der FAC Nummer 18. Edited by Eid-genössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene. Liebefeld-Bern, 1994.
- Braun, M., D.K. Rolli und V. Prasuhn. *Verminderung des Nährstoffeintrags in Gewässer durch Massnahmen in der Landwirtschaft*. 1 ed. Vol. Nr. 293. Schriftenreihe Umwelt. Edited by Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL). Bern: BUWAL Dokumentationsdienst, 1997.
- Britz, W. "IT - An Unimportant Ingredient of Large Scale Models?" *Agrarwirtschaft* 48, no. 3/4 (1999): pp. 159-162.
- Bronstein, I.N. und K.A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. 25 ed. Vol. 1. Edited by G. Grosche, V. Ziegler und D. Ziegler. Stuttgart: Teubner Verlagsgesellschaft, 1991.
- Brooke, A., D. Kendrick und A. Meeraus. *GAMS- A Users's Guide Release 2.25*. 2.25 ed. Vol. 1. Danvers, Massachusetts: boyd & fraser publishing company, 1992.

- Bruno, M. "Estimation of Factor Contribution to Growth under Structural Disequilibrium." *International Economic Review* 9 (1968): pp. 49-62.
- Buckwell, A.E. und P.B.R. Hazell. "Implications of aggregation bias for the construction of static and dynamic linear programming supply models." *Journal of Agricultural Economics*, no. 23 (1972): pp. 119-134.
- Büeler, B.P. "Computing economic equilibria and its application to international trade of CO₂ permits : an agent-based approach." Diss. Math. Wiss. ETH Zürich, Nr. 12493, Eidgenössische Technische Hochschule ETHZ, 1997.
- Bührer, H. "Dynamische Simulation des Bodensee-Obersees und tolerierbare Phosphor - Fracht." . Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee, 1993.
- Bundesamt für Landwirtschaft (1999) Richtlinien für den ökologischen Leistungsnachweis (ÖLN), vol. 1999, 24. Juni 1999 Edition, Koordinationsgruppe Richtlinien Deutschschweiz (KIP) c/o Landwirtschaftliche Beratungszentrale, LBL Eschikon 28, CH-8315 Lindau. URL: <http://www.ipsuisse.ch/>
- Capaul, G.A. und B. Riedi. *Handbuch 2000*. Vol. 106. Wirzkalender für die Schweizer Landwirtschaft. Edited by Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau (LBL). 106 vols. Lindau: Wirz Verlag Basel, 1999.
- Casler, S.D. "Applied Production Theory: Explicit, Flexible, and General Functional Forms." *Applied Economics* 29, no. 11 (1997): pp. 1483-92.
- Chestnut, H. *Methoden der System-Entwicklung*. München: Hanser, 1973.
- Chiang, A.C. *Fundamental Methods of Mathematical Economics*. 3 ed. McGraw-Hill International Editions Economic Series. Hamburg: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- Chinneck, J.W. "Analyzing Mathematical Programs using MProbe." *Annals of Operations Research* Special issue on Modeling Languages, no. to appear (1999).
- Chinneck, J.W. "Discovering the Characteristics of Mathematical Programs via Sampling." . Systems and Computer Engineering, Carleton University. Carleton, 2000.
- Chow, G.C. *Dynamic economics : optimization by the Lagrange method*. New York: Oxford University Press, 1997.
- Colacicco, D., T. Osborn und K. Alt. "Economic Damage from Soil Erosion." *Journal of Soil and Water Conservation* 44 (1989): pp. 35-39.
- Conrad, J. und C. Clark. *Natural Resource Economics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- Coxhead, I. und S. Jayasuriya. "Trade and Tax Policy Reform and the Environment: The Economics of Soil Erosion in Developing Countries." *American Journal of Agricultural Economics* 77, no. 3 (1995): pp. 631-644.
- Day, R.H. "On aggregating linear programming models of production." *Journal of Farm Economics* 45, no. 4 (1963): pp. 797-813.
- Diewert, W.E. und L.A. Ostensoe. "Flexible Functional Forms for Profit Functions and Global Curvature Conditions." *University of British Columbia Department of Economics: Discussion Paper*, no. 87-06 (1987): pp. 19.
- Diewert, W.E. und T.J. Wales. "Flexible Functional Forms and Global Curvature Conditions." *Econometrica* 55, no. 1 (1987): pp. 43-68.

- Eiswerth, M.E. (1993) Regulatory/Economic Instruments for Agricultural Pollution: Accounting for Input Substitution, ed. A. Dinar und D. Zilberman, vol. 1. Boston, Kluwer Academic Publishers, pp. 69-90.
- Enters, T. *Methods for the economic assessment of the on- and off-site impacts of soil erosion*. Issues in Sustainable Land Management no. 2. Edited by SWMN The Soil Water and Nutrient Management Programme IBSRAM International Board for SOil Research and Management. Bangkok: IBSRAM International Board for Soil Research and Management, 1998.
- Epple, K. *Theorie und Praxis der Systemanalyse: eine empirische Studie zur Überprüfung der Relevanz und Praktikabilität des Systemansatzes*. Minerva-Fachserie Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Edited by Minerva Publikation. München: Minerva Publikation, 1979.
- Ervin, D.E. und J.W. Mill. "Agricultural Land Markets and Soil Erosion: Policy Relevance and Conceptual Issues." *American Journal of Agricultural Economics* 76 (1985): pp. 938-942.
- Fast, A.W. (1979). Artificial Aeration as a Lake Restoration Technique, ed. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Planning and Standards Washington D.C. Minnesota, Minneapolis, pp. 121-131.
- FAT. "Ergebnisse der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten: Hauptbericht 1998 über die Testbetriebe." . Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik. Tänikon, Januar 2000, 1998a.
- FAT. "Kostenstellenbericht der integriert bewirtschaftenden Betriebe 1998: Ergebnisse der Zentralen Auswertung von Buchhaltungsdaten." . Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik. Tänikon, September 1999, 1998b.
- Feichtinger, G. und R. Hartl. *Optimale Kontrolle ökonomischer Prozesse*. Berlin: Walter de Gruyter, 1986.
- Fleming, R.A. und R.M. Adams. "The Importance of Site Specific Information in the Design of Policies to Control Pollution." *Journal of Environmental Economics and Management* 33 (1997): pp. 347-358.
- Fletcher, J.J. (1985). Soil Erosion and Land Prices: Discussion, ed. American Agricultural Economics Association, pp. 954-956.
- Flörchinger, F. "Effects of Soil Erosion on Crop Productivity in the South West Colombian Andes." Dissertation, Universität Hohenheim, 1999.
- Fourer, R., D.M. Gay und B.W. Kernighan. *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*. The Scientific Press Series. Edited by Boyd & Fraser Publishing Company. Massachusetts: International Thomson Publishing, 1993.
- Frank, M.D., B.R. Beattie und M.E. Embleton. "A Comparison of Alternative Crop Response Models." *American Journal of Agricultural Economics* 72, no. 3 (1990): pp. 597-603.
- Frey, R.L., E. Staehelin-Witt und H. Blöchliger. *Mit Ökonomie zur Ökologie - Analyse und Lösungen des Umweltproblems aus ökonomischer Sicht*. 1 ed. Vol. 1. 2 vols. Basel und Frankfurt am Main: Helbing & Lichtenhahn, 1991.
- Fuchs, C. und K. Löthe. "Einfluss der Form von Produktionsfunktionen auf die Ermittlung der optimalen speziellen Intensität und die ökologischen Wirkungen in der Pflanzenproduktion." *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues* 32 (1996): pp. 493-502.

- Funk, W.H. (1979). *Lake Restoration by Nutrient Inactivation*, ed. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Planning and Standards Washington D.C. Minnesota, Minneapolis, pp. 141-151.
- Fuss, M. und D. McFadden. *Production Economics: A Dual Approach to Theory and Applications*. 2 ed. Vol. 1. Contributions to economic analysis. Edited by D. W. Jorgenson und J. Waelbroeck. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1979.
- Gabler. *Gabler Wirtschafts-Lexikon*. 13 ed. Gabler Wirtschaftslexikon. Edited by Gabler. 8 vols. Wiesbaden: Gabler, 1993.
- Gardner, K. und R. Barrows (1985). *The Impact of Soil Conservation Investments on Land Prices*, ed. American Agricultural Economics Association, pp. 943-947.
- Geoffrion, A.M. "Indexing in modeling languages for mathematical programming." *Management Science* 38, no. 3 (1992): pp. 325-344.
- Goetz, R.U. "Methoden und Anwendungen der dynamischen Optimierung in der Agrarökonomie." . Institut für Agrarwirtschaft der ETHZ. Zürich, 1996.
- Goetz, R.U. "Anwendungen der dynamischen Optimierung im Hinblick auf eine nachhaltige ökonomische Nutzung des Landes." Habilitation, Eidgenössische Technische Hochschule, 1997a.
- Goetz, R.U. "Diversification in Agricultural Production: A Dynamic Model of Optimal Cropping to Manage Soil Erosion." *American Journal of Agricultural Economics* 79, no. May (1997b): pp. 342-356.
- Goetz, R.U. und A. Keusch. "Methoden und Anwendungen der dynamischen Optimierung in der Umwelt - und Ressourcenökonomie." *Jahrbücher f. Nationalökonomie u. Statistik* 3+4, no. 219 (1999): pp. 14.
- Goetz, R.U., A. Keusch, D. Schaub, S. Meier-Zielinski, H. Schmid und B. Lehmann. "A comment on - The Intertemporal Impact of Soil Erosion on Non-Uniform Soil Profiles: A New Direction in Analyzing Erosion Impacts." *Agricultural Systems* 58, no. 4 (1998): pp. 571-574.
- Goetz, R.U. und D. Zilberman. "The Dynamics of Spatial Pollution: The Case of Phosphorus Runoff from Agricultural Land." *Journal of Economic Dynamics and Control* 24, no. 1 (2000): pp. 143-63.
- Grochla, E. *Handwörterbuch der Organisation*. 12 ed. Stuttgart: C.E. Poeschel Verlag, 1980.
- Häfliger, M., A. Keusch, B. Lehmann, H.-P. Thomi und H.P. Wolf. "Stickstoffhaushalt Schweiz: Anpassungsschritte landwirtschaftlicher Betriebe zwecks Abbau der N-Emissionen." Technischer Bericht. Institut für Agrarwirtschaft. Zürich, Dezember 1995, 1995.
- Hanf, C.H. *Agricultural Sector Analysis by Linear Programming Models*. Reports on Current Research in Agricultural Economics and Agribusiness Management. Edited by Wissenschaftsverlag Vauk. Kiel: Wissenschaftsverlag Vauk, 1989.
- Hannon, B. und M. Ruth. *Modeling dynamic economic systems*. New York: Springer, cop., 1997.
- Heathfield, D.F. und S. Wibe. *An introduction to Cost and Production Functions*. Edited by Inc. Atlantic Highlands und NJ Humanities Press International. Hong Kong, 1987.

- Hediger, W. *Opportunitätskosten der Umweltverschmutzung - Eine dynamische ökologisch-ökonomische Analyse*. Vol. 9. Rechts- und Wirtschaftsliteratur: Reihe Ökologie. Edited by Verlag Rüegger. Zürich: Verlag Rüegger, 1991.
- Hediger, W. (1998) Ecosystem management and sustainability: An ecological-economic model, ed. S. Dwyer, U. Ganslosser und M. O'Connor. Fürth, Filander Verlag, pp. 133-156.
- Hediger, W. (1999a) Elemente einer ökologischen Ökonomik nachhaltiger Entwicklung, ed. K. Rennings und O. Hohmeyer, vol. 8. Baden-Baden, Nomos, pp. 15-37.
- Hediger, W. (1999b) Ressourcen- und Umweltökonomie I : Wohlfahrtsökonomische Grundlagen III: Marktversagen und Staatseingriffe, Kollektivgüter, externe Effekte, vol. 2000. URL: <http://www.iaw.agrl.ethz.ch/~whediger/courses/previous/ws99-00/RUOek1.htm#Pgm>
- Hediger, W. (2000) Ressourcen- und Umweltökonomie II: Open-access vs. Privateigentum, Intertemporal optimale Nutzung biologischer Ressourcen, vol. 2000. URL: <http://www.iaw.agrl.ethz.ch/~whediger/>
- Henderson, J.M. und R.E. Quandt. *Microeconomic Theory: A Mathematical Approach*. 3 ed. Economics Handbook Series. Hamburg: McGraw-Hill International Book Company, 1980.
- Hesse, H. und R. Linde. *Gesamtwirtschaftliche Produktionstheorie. Teil II*. 1 ed. Wien: Physica Verlag, 1976.
- Hoag, D.L. "The Intertemporal Impact of Soil Erosion on Non-Uniform Soil profiles: A New Direction in Analyzing Erosion Impacts." *Agricultural Systems* 56, no. 4 (1998): pp. 415-429.
- Intriligator, M.D. *Mathematical Optimization and Economic Theory*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1970.
- Jacobs, J.J. und G.L. Casler. "Internalizing Externalities of Phosphorus Discharges from Crop Production to Surface Water: Effluent Taxes versus Uniform Reductions." *American Journal of Agricultural Economics* 61, no. 2 (1979): pp. 309-312.
- Jakeman, A.J., M.B. Beck und M.J. McAleer. *Modelling Change in Environmental Systems: Accounting for Environmental Resources: Land Degradation*. 1 ed. Principles and techniques in the environmental sciences: Wiley, 1993.
- Johnson, F.H. "Economic analyses of measures to control phosphorus run-off from non-point agricultural sources." *European review of agricultural economics* 20, no. 4 (1993): pp. 399-418.
- Johnson, L. und G.C. Rausser. *Systems Analysis and Simulation: A Survey of Applications in Agricultural and Resource Economics*. Vol. 2. A survey of agricultural economics literature. Edited by G. G. Judge, R. H. Day, S. R. Johnson, G. Rausser, C. und L. R. Martin. Minneapolis: University of Minneapolis, 1977.
- Kamien, M.I. und N.L. Schwartz. *Dynamic optimization : the Calculus of Variations and Optimal Control in Economics and Management*. 2 ed. Vol. 31. Advanced Textbooks in Economics. Edited by C. J. Bliss und M. D. Intriligator. Amsterdam: North-Holland, cop., 1991.
- Keusch, A. "LP-Anwendungen für AW." Vorlesungsunterlage. Institut für Agrarwirtschaft ETHZ. Zürich, Oktober 1999, 1999.

- Knepell, P.L. und D.C. Arangno. *Simulation validation: a confidence assessment methodology*. Vol. 1. IEEE Computer Society Press monograph. Edited by IEEE Computer Society Press cop. Los Alamitos, California: IEEE Computer Society Press, cop., 1993.
- Köhler, W., G. Schachtel und P. Voleske. *Biostatistik*. 2 ed. Berlin: Springer, 1995.
- LaFrance, J.T. "Do Increased Commodity Prices Lead to More or Less Soil Degradation?" *Australian Journal of Agricultural Economics* 36, no. 1 (1992): pp. 57-82.
- Lakshminarayan, P.G., P.W. Gassmann, A. Bouzaher und R.C. Izaurralde. "A Metamodeling Approach to Evaluate Agricultural Policy Impact on Soil Degradation in Western Canada." *Canadian Journal of agricultural economics* 44, no. 3 (1996): pp. 277-294.
- Lal, R., F. Pierce und R. Dowdy. "The threat of soil erosion to long term crop production." *Science* 219 (1983): pp. S. 458-465.
- Lal, R. und B.A. Stewart (1994) *Soil Processes and Water Quality*, ed. R. Lal und B. A. Stewart, vol. 1. Florida, Lewis Publishers, pp. 1-6.
- Langenscheidt. *Langenscheidts Taschenwörterbuch: Lateinisch/Deutsch / Deutsch/Lateinisch*. 35 ed. Zürich: Langenscheidt Verlag, 1983.
- LBL. "Deckungsbeiträge - Ausgabe 1999." . Landwirtschaftliche Beratungszentrale Lindau. Lindau, Oktober 1999, 1999.
- Lehmann, B., L. Bär und A. Keusch. "Lenkungsabgaben auf Dünger - Entscheidungselemente für die Einführung von Lenkungsabgaben auf Mineraldünger und Hofdüngerüberschüsse." . Institut für Agrarwirtschaft. Zürich, Dezember 1993, 1993.
- Liechti, P. *Der Zustand der Seen in der Schweiz*. 1 ed. Vol. Nr. 237. Schriftenreihe Umwelt. Edited by Wald und Landschaft (BUWAL) Bundesamt für Umwelt. Bern: BUWAL Dokumentationsdienst, 1994.
- Louhichi, K., G. Flichman und S. Zekri. "Un modèle bio-économique pour analyser l'impact de la politique de conservation des eaux et du sol Le cas d'une exploitation agricole tunisienne." *Économie Rurale* 252, no. Juillet-Août (1999): pp. 55-64.
- Lüthi, H.-J. "Skript zur Vorlesung OR I für Agronomen: Teil1 SS99." Skript zur Vorlesung. Institut für Operations Research ETHZ. Zürich, 1999, 1999.
- Maddala, G.S. *Introduction to Econometrics*. 2 ed. London: Prentice-Hall International, 1992.
- Mapp, H.P., D.J. Bernardo, G.J. Sabbagh, S. Geleta und K.B. Watkins. "Economic and Environmental Impacts of Limiting Nitrogen Use to Protect Water Quality: A Stochastic Regional Analysis." *American Journal of Agricultural Economics* 76 (1994): pp. 889-903.
- Mas-Colell, A., M.D. Whinston und J.R. Green. *Microeconomic Theory*. 1 ed. Vol. 1. 1 vols. New York: Oxford University Press, 1995.
- Mauch, S., R. Iten, E.U. Von Weizäcker und J. Jesinghaus. *Ökologische Steuerreform*. Chur: Rüegger, 1992.
- Maurer, B. "Modellierung des langjährigen Rückganges der Bodenfruchtbarkeit durch Bodenerosion." Oberlehrerarbeit, Oberlehrerarbeit am geographischen Institut der Universität Basel, 1995.
- McConnel, K.E. "An economic model of soil conservation." *American Journal of Agricultural Economics* 65, no. 1 (1983): pp. 83-89.

- Miller, J.G. *Systemtheorie und Systemtechnik*. Nymphenburger Texte zur Wissenschaft. Edited by F. Händle und S. Jensen. München: Nymphenburger Verlagshandlung, 1974.
- Mishan, E.J. *Introduction to Normative Economics*. New York, Oxford: Oxford University Press, 1981.
- Moder, J.J. und S.E. Elmaghraby. *Handbook of Operations Research - Foundations and Fundamentals*. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1978.
- Moore, W.B. und B.A. McCarl. "Off-Site Costs of Soil Erosion: A Case Study in the Willamette Valley." *Western Journal of Agricultural Economics* 12, no. 1 (1987): pp. 42-49.
- Mosimann, T., A. Crole-Rees, A. Gaillard, J.-A. Neyroud, M. Thöni, A. Musy und W. Rohr. *Bodenerosion im schweizerischen Mittelland*. Vol. 51. Nutzung des Bodens in der Schweiz. Edited by Nationales Forschungsprogramm. Liebefeld - Bern, 1990.
- Müller, C. und R. Richardet. "Modellierung eines landwirtschaftlichen Betriebes mittels einer algebraischen Modellierungssprache (AMPL)." Semesterarbeit. Institut für Agrarwirtschaft, Eidg. Technische Hochschule Zürich. Zürich, SS2000, 2000.
- National Soil Erosion - Soil Productivity Research Planning Committee. "Soil Erosion Effects on Soil Productivity: A research Perspective." *Journal of Soil and Water Conservation* 36 (1981): pp. 82-90.
- Ng, Y.-K. *Welfare Economics: Introduction and Development of Basic Concepts - Kapitel 4: The Magnitude of Welfare Change: Consumer Surplus*. 6 ed. London: Macmillan, 1990.
- Odening, M. und A. Balmann. "Probleme einer Politikooptimierung - Konsequenzen für die Konstruktion von Agrarsektormodellen." *Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues* 33 (1997): pp. 371-383.
- Önal, H. und B.A. McCarl. "Aggregation of heterogenous firms in mathematical programming models." *European review of agricultural economics* 16, no. 4 (1989): pp. 499-513.
- Oriade, C.A. und C.R. Dillon. "Developments in biophysical and bioeconomics simulation of agricultural systems: a review." *Agricultural Economics* 17, no. 1 (1997): pp. 45-58.
- Pagoulatos, A., D.L. Debertain und F. Sjakowi. "Soil Erosion, Intertemporal Profit, and the Soil Conservation Decision." *Southern Journal of Agricultural Economics* 21, no. 2 (1989): pp. 55-62.
- Park, W.M. und D.G. Sawyer. "Cost Effectiveness of Alternative Subsidy Strategies for Soil Erosion Control." *Southern Journal of Agricultural Economics* 19, no. 2 (1987): pp. 21-32.
- Pearce, D.W. *The MIT Dictionnary of Modern Economics*. 3 ed. Cambridge, 1989.
- Perman, R., Y. Ma und J. McGilvray. *Natural Resource & Environmental Economics*. 1 ed. Vol. 1: Longman, 1996.
- Peterson, S.A. (1979). *Dredging and Lake Restoration*, ed. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Planning and Standards Washington D.C. Minnesota, Minneapolis, pp. 105-114.
- Pezzey, J. "The Symmetry between Controlling Pollution by Price and Controlling It by Quantity." *Canadian Journal of Economics* 25, no. 4 (1992): pp. 983-91.

- Piebler, H. *Modellkonzept zur Gefährdungsabschätzung der Trinkwassergewinnung in Wasserschutzgebieten durch Nitrat, eine Fallstudie am Beispiel des Wasserwerks Holdorf*. Schriften zur Angewandten Systemforschung, Bd. 2. Münster: Lit Verlag, 1990.
- Pimentel, D. "Soil Erosion and Agricultural Productivity: The Global Population/Food Problem." *Gaia : ecological perspectives in sciences, humanities and economics* 6, no. 3 (1997): pp. 197-204.
- Plantinga, A.J. "The Effect of Agricultural Policies on Land Use and Environmental Quality." *American Journal of Agricultural Economics* 78, no. 4 (1996): pp. 1082-1091.
- Prasuhn, V. und M. Braun. *Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus diffusen Quellen in die Gewässer des Kantons Bern*. Schriftenreihe der FAC, Liebefeld, Nummer 17. Edited by Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarkulturchemie und Umwelthygiene CH-3097 Liebefeld-Bern. Liebefeld-Bern: FAC, 1994.
- Prasuhn, V., M. Braun und D. Kopse Rolli. *Massnahmen zur Verminderung der Phosphor- und Stickstoffverluste aus der Landwirtschaft in die Gewässer*. Edited by Amt für Gewässerschutz und Abfallwirtschaft des Kantons Bern (GSA). Bern, 1997.
- Projektgruppe Stickstoffhaushalt Schweiz - Roger Biedermann et al. "Strategie zur Reduktion von Stickstoffemissionen." . Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). Bern, 1996, 1996.
- Putman, J., J. Williams und D. Sawyer. "Using the Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Model to Estimate the Impact of Soil Erosion for the 1985 RCA Appraisal." *Journal of Soil and Water Conservation* 43 (1988): pp. 321-326.
- Quantitative Micro Software (1998a). *EViews*, 3.1 Edition. Irvine CA, Quantitative Micro Software,.
- Quantitative Micro Software. *EViews Command and Programming Reference*. 2 ed. Vol. 2. Edited by Quantitative Micro Software. 3 vols. Irvine, CA: Quantitative Micro Software, 1998b.
- Quantitative Micro Software. *EViews User's Guide*. 2 ed. Vol. 1. Edited by Quantitative Micro Software. 3 vols. Irvine, CA: Quantitative Micro Software, 1998c.
- Quantitative Micro Software. *EViews-EViews 3.1 Supplemental Documentation*. 2 ed. Vol. 2. Edited by Quantitative Micro Software. 3 vols. Irvine, CA: Quantitative Micro Software, 1998d.
- Rae, A.N. *Agricultural Management Economics - Activity Analysis and Decision Making*. 1 ed. Cambridge: CAB International, 1994.
- Ribaudo, M.O. "Consideration of Offsite Impacts in Targeting Soil Conservation Programs." *Land Economics* 62, no. 4 (1986): pp. 402-411.
- Ribaudo, M.O., C.T. Osborn und K. Konyar. "Land Retirement as a Tool for Reducing Agricultural Nonpoint Source Pollution." *Land Economics* 70, no. 1 (1994): pp. 77-87.
- Rieder, P. *Interregionales Strukturmodell für die schweizerische Landwirtschaft - Auswirkungen ausgewählter Markteingriffe auf die Produktions- und Einkommensstruktur*. 1 ed. Edited by Institut für Agrarwirtschaft ETHZ. Zürich, 1972.
- Rieder, P. und S. Anwander Phan-Huy. *Grundlagen der Agrarmarktpolitik*. 4 ed. Edited by Hochschulverlag AG ETH Zürich. Zürich: vdf, 1994.

- Rossi, P.E. "Comparison of Alternative Functional Forms in Production ." *Northwestern Center for Mathematical Studies in Economics and Management Sciences* 586 (1984): pp. 20.
- Ruckstuhl, A. "Einführung in die nichtlineare Regression." Kursunterlage. Seminar für Statistik ETHZ. Zürich, 1996.
- Ryoo, H.S. und V. Sahinidis. "A Branch-and-Reduce Approach to Global Optimization." *Journal of Global Optimization* 8 (1996): pp. 103-138.
- Saliba, B.C. "Soil Productivity and Farmers' Erosion Control Incentives--A Dynamic Modeling Approach." *Western Journal of Agricultural Economics* 10, no. 2 (1985): pp. 354-64.
- Schaub, D. und V. Prasuhn. *Bodenerosionsmodelle*. Modelle in der Geomorphologie - Beispiele aus der Schweiz. Edited by M. Monbaron und W. Häberli. Fribourg: Fachtagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, 22.-23. Juni, 1990.
- Schleiniger, R. "Methodikkonzept "Kosten-Wirksamkeit-Analyse von Massnahmen zur Reduktion der Stickstoffbelastung in der Schweiz"." . Institut für empirische Wirtschaftsforschung IEW, Universität Zürich. Zürich, Februar 1995, 1995.
- Schmid, H., A. Keusch, R. Goetz, D. Schaub und B. Lehmann. "Management der Verschmutzung aus diffusen Quellen - Eine empirische Analyse anhand von Phosphorabträgen von landwirtschaftlich genutzten Flächen in einen Binnensee." *Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues, 38. Jahrestagung vom 6. - 8. Oktober 1997 in Freising* (1997).
- Seierstad, A. und K. Sydsaeter. *Optimal Control Theory with Economic Applications*. Vol. 24. Advanced Textbooks in Economics. Edited by C. J. Bliss und M. D. Intriligator. Amsterdam: North-Holland, 1987.
- Sharpley, A. "RCA III: Fate and Transport of Nutrients - Phosphorus." *USDA, Agricultural Research Service, National Agricultural Water Quality Laboratory, Durant, Oklahoma* , no. Oktober (1995): pp. 1-32.
- Sharpley, A.N. und A.D. Halvorson (1994) Management of Soil Phosphorus, ed. R. Lal und B. A. Stewart, vol. 1. Florida, Lewis Publishers, pp. 7-90.
- Sharpley, A.N. und J.R. Williams. *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation*. Vol. 1768. Technical Bulletin. Edited by U.S Department of Agriculture, 1990a.
- Sharpley, A.N. und J.R. Williams. *EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User Manual*. Vol. 1768. Technical Bulletin. Edited by U.S Department of Agriculture, 1990b.
- Smith, E.G. und C.F. Shaykewich. "The Economics of Soil Erosion and Conservation on Six Soil Groupings in Manitoba." *Journal of Agricultural and Resource Economics* 38 (1990): pp. 215-231.
- Spreen, T.H. und T. Takayama. "A Theoretical Note on Aggregation of Linear Programming Models of Production." *American Journal of Agricultural Economics* 62, no. 1 (1980): pp. 146-151.
- Stadelmann, P., E. Butscher und H.-R. Bürgi. *Massnahmen zur Seesäuerung: Beispiel des Baldeggersees*. Vol. Sonderdruck Nr. 1385 aus gwa 1/97. Edited by Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW) Zürich. Zürich, 1997b.

- Stadelmann, P., E. Butscher und H.-R. Bürgi. "Massnahmen zur Seesanieung: Beispiel des Baldeggersees." . Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches (SVGW),. Zürich, 1997a.
- Stadelmann, P., P. Herzog, P. Arnold, J.-C. Bernegger, E. Butscher, F. Hirsiger und P. Koller. *Sanierung des Baldegger- und Hallwilersees und deren Einzugsgebiete: Situationsanalyse und Rechenschaftsbericht zuhanden des Gemeindeverbandes Baldegger- und Hallwilersee*. Vol. Dezember. Edited by Amt für Umweltschutz Kanton Luzern, 1993.
- Steffen, G. und D. Born. *Betriebs- und Unternehmensführung in der Landwirtschaft*. Vol. 1423. Uni Taschenbücher. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer, 1987.
- Szpiro, G. "'Bottom up" ist in, "Top down" ist out - Modelle der Komplexität finden Eingang in die Wirtschaft." *Neue Zürcher Zeitung NZZ* , no. 149 (1998).
- Takayama, A. *Mathematical Economics*. 2 ed. London: Cambridge University Press, 1991.
- Takayama, A. *Analytical Methods in Mathematical Economics*. 1 ed. London: Harvester Wheatsheaf, 1994.
- Taylor, R.C. und R. Howitt. *Aggregate Evaluation Concepts and Models*. Agricultural and Environmental Resource Economics. Edited by G. A. Carlson, D. Zilberman und J. A. Miranowski. New York: Oxford University Press, 1993.
- Terrell, D. "Incorporating Monotonicity and Concavity Conditions in Flexible Functional Forms." *Journal of Applied Econometrics* 11, no. 2 (1996): pp. 179-94.
- Theis, T.L. (1979). Physical and Chemical Treatment of Lake Sediments, ed. W. D. C. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Planning and Standards. Minnesota, Minneapolis, pp. 115-120.
- Thomi, H.-P.F. "Ein dynamisches Simulationsmodell als interaktives landwirtschaftliches Unternehmensspiel." Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, Nr. 10777, Eidgenössische Technische Hochschule ETHZ, 1994.
- Tietenberg, T. *Environmental and Natural Resource Economics*.: Harper Collins Publisher, 1988.
- Toussaint, S. (1984) Natürliche Ressourcen im Modell der überlappenden Generationen, ed. H. Siebert. Bern, Lang, pp. 395-423.
- Van Vuuren, W. "Soil Erosion: The Case for Market Intervention." *Canadian Journal of agricultural economics* 33, no. 0 (1986): pp. 41-62.
- van Vuuren, W., J.C. Giraldez und D.P. Stonehouse. "The Social Returns of Agricultural Practices for Promoting Water Quality Improvement." *Canadian Journal of Agricultural Economics* 45, no. 3 (1997): pp. 219-234.
- Varian, J.R. *Microeconomic Analysis*. 3 ed. London: W.W. Norton and Company, 1992.
- Vatn, A., L. Bakken, M.A. Bleken, P. Botterweg, H. Lundeby, E. Romstad, P. Rørstad und A. Vold. "Policies for Reduced Nutrient Losses and Erosion from Norwegian Agriculture." *Norwegian Journal of Agricultural Sciences* , no. 23 (Supplement) (1996).
- Walter, F., S. Suter und R. van Nieuwkoop. *Umweltabgaben in Europa*. 1 ed. Vol. 1. Schriftenreihe Umwelt. Edited by Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL). 1 vols. Bern: Dokumentationsdienst: Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft,, 1993.
- Walter, W. *Analysis I*. 3 ed. Vol. 1. Grundwissen Mathematik. 2 vols. Berlin: Springer Verlag, 1992.

- Wehrli, B. und A. Wüest. *Zehn Jahre Seenbelüftung: Erfahrungen und Optionen*. Vol. 9. EAWAG Schriftenreihe. Dübendorf-Zürich: EAWAG, 1996.
- Weisensel, W.P. und G.C. Van Kooten. "Estimation of Soil Erosion Time Paths: The Value of Soil Moisture and Topsoil Depth Information." *Western Journal of Agricultural Economics* 15, no. 1 (1990): pp. 63-72.
- Welch, E.B. (1979). Lake Restoration by Dilution, ed. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Planning and Standards Washington D.C. Minnesota, Minneapolis, pp. 133-139.
- Williams, J.R., D.L. Tanaka und K.L. Herbel. "Farm Value of Topsoil in Spring Wheat Production." *Journal of Agricultural and Resource Economics* 18, no. 1 (1993): pp. 117-30.
- Wolf, H.-P. und C. Eggenschwiler (2000). Betriebsmodell C5, 2000 Edition. Zürich.
- Wolfram, S. *The Mathematica book*. 3 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. New York: Oxford University Press, 1987.
- Wossink, G.A.A. *Analysis of future agricultural change*. Vol. 27. Wageningen Economic Studies. Edited by W. A. University, 1993.
- Wu, J.J., M.L. Teague, H.P. Mapp und D.J. Bernardo. "An Empirical Analysis of the Relative Efficiency of Policy Instruments to Reduce Nitrate Water Pollution in the U.S. Southern High Plains." *Canadian Journal of agricultural economics* 43 (1995): pp. 403-420.
- Xu, F. und T. Prato. "Onsite Erosion Damages in Missouri Corn Production." *Journal of Soil and Water Conservation* 3, no. 50 (1995): pp. 312-316.
- Zehnder, C.A. *Informationssysteme und Datenbanken*. 3 ed. 1 vols. Zürich: vdf - Verlag der Fachvereine ETHZ, 1985.

Anhang

Der gesamte Anhang ist unter folgender WWW-Adresse im PDF-Format abrufbar:

<http://www.iaw.aqr1.ethz.ch/~keusch/Diss-ETH-13871-Anhang.pdf>

Eine Legende zu den Resultattabellen ist im Hauptteil der Dissertation in Form eines Faltblattes als letzte Seite eingefügt.

Abkürzungen bei Kulturen:

Kultur		Bodenbearbeitung	
KA	Kartoffeln	MIN	minimale Bodenbearbeitung (ohne Pflug)
KM	Körnermais	STA	Bodenbearbeitung mit Pflug
KMZW	Körnermais mit Zwischenfutter	Düngungsverfahren	
KW1	Kunstwiese erstes Jahr	HD	Hofeigene Düngemittel
KW2	Kunstwiese zweites Jahr	MD	Mineralische Düngung
SH	Sommerhafer		
SHZW	Sommerhafer mit Zwischenfutter		
WG	Wintergerste		
WW	Winterweizen		
ZW	Zwischenfutter nach Kulturen		
ZWKM	Zwischenfutter vor Körnermais		
ZWSH	Zwischenfutter vor Hafer		

Resultatgrößen:

Resultatgrösse	Erläuterung
Erosion t/ha	Durchschnittliche Erosion in t pro ha und Jahr.
Erosion mm	Erodierte Bodenmächtigkeit in mm pro Jahr.
Erosion ofc / mm	On-farm-costs der Erosion (Kozustandsvariable) pro mm pro Jahr für eine Hektare. In der langfristigen Betrachtung (dynamisch über 66 Jahre) berücksichtigt der Wert alle induzierten künftigen Auswirkungen, bei kurzfristiger Betrachtung handelt es sich dagegen um den Schattenpreis des Bodens im Einzeljahr ohne Berücksichtigung irgendwelcher Folgekosten.
BS-Punkte	Erreichte Anzahl Bodenschutzpunkte gemäss IP Verordnung pro ha.
SP / BS-Punkt	Bewertung eines Bodenschutzpunktes (Schattenpreis). Diese Grösse berücksichtigt bei dynamischer Betrachtung ebenfalls alle künftigen Auswirkungen einer Veränderung der betrieblichen Anzahl Bodenschutzpunkte um einen Punkt zu einem Zeitpunkt, bei kurzfristiger Betrachtung dagegen nur die wertmässigen Auswirkungen zum gegebenen Zeitpunkt. Bei langfristiger Betrachtung ist daher ein tieferer Schattenpreis zu erwarten.
P-Loss kg / ha	Phosphorverluste in kg pro ha.
SP / kg Phosphor	Wert der Veränderung des partikulären Phosphorabtrages um ein kg. Bei langfristiger Betrachtung (Laufzeit 66 Jahre) sind alle künftigen Effekte der Veränderung der Veränderung des Abtrages um ein kg berücksichtigt, bei kurzfristiger Betrachtung nur jene zum Betrachtungszeitpunkt.
SP / ha LN	Schattenpreis einer ha landwirtschaftliche Nutzfläche. Auch hier bewertet der Schattenpreis bei dynamischer Betrachtung alle künftigen Auswirkungen mit, im Gegensatz zur einzeljährlichen Betrachtung (rekursive Optimierung).
A-Horizont	Mächtigkeit des A-Horizontes in m in einem spezifischen Jahr.
ZF laufend	Zielfunktionswert eines spezifischen Jahres in laufenden Werten ohne Diskontierung.
ZF diskontiert	Mit der Diskontrate diskontierter Zielfunktionswert eines spezifischen Jahres. Die Summe davon über den Gesamtzeitraum wird maximiert.
Kulturen	Flächennutzung im Einzeljahr in ha.

In den Tabellen wird generell das erste und das letzte Jahr des Betrachtungszeitraumes dargestellt. Weitere Jahre erscheinen nur, wenn Veränderungen in der Flächennutzung stattfinden. Erfolgen die Veränderungen kontinuierlich, so wird die Situation in jedem zwanzigsten Jahr dargestellt, bei diskreter Veränderung der Flächennutzung wird das erste Jahr mit der geänderten Flächennutzung dargestellt.

Für jede Berechnungsart (vgl. Abschnitt 12.1) werden in drei zusätzlichen Zeilen zusammenfassende Informationen für einzelne Grössen angegeben: Durchschnitt über den gesamten Betrachtungszeitraum pro ha und Jahr, dasselbe bezogen auf die gesamte Betriebsfläche sowie das Total über den ganzen Betrieb und den ganzen Betrachtungszeitraum.

Lebenslauf

Personalien

Name: Keusch
Vorname: Alois
Geboren: 21. April 1967 in Muri, AG
Heimatort: Boswil, AG

Ausbildung

1974-1979 Primarschule in Boswil, AG
1979-1982 Bezirksschule Muri, AG
1982-1987 Gymnasium in Immensee, SZ
1987-1992 Studium an der Abteilung für Agrar- und Lebensmittelwissenschaften an der ETH Zürich; Dipl. Ingenieur-Agronom ETH, Fachrichtung Agrarwirtschaft

Berufliche Tätigkeit

1992-1993 Assistent und Dozent bei Prof. Bernard Lehmann am Institut für Agrarwirtschaft der ETH Zürich
1993-1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Dozent bei Prof. Bernard Lehmann am Institut für Agrarwirtschaft der ETH Zürich
1998-2000 Doktorand, Dozent und wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Bernard Lehmann am Institut für Agrarwirtschaft der ETH Zürich

