

**Wirtschaftliche Optimierung der Steinbuttmast
in geschlossenen Kreislaufanlagen**

Entwicklung eines Planungs- und Entscheidungsmodells

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von
Dipl. agr. oec. Henning Tometten
aus Ibbenbüren

Kiel, im September 2009

Dekan:	Professor Dr. U. Latacz-Lohmann
1. Berichterstatter:	Privatdozent Dr. habil. H.-H. Sundermeier
2. Berichterstatter:	Professor Dr. U. Latacz-Lohmann
Tag der mündlichen Prüfung:	03. 11. 2009

Gedruckt mit Genehmigung der
Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.

Danksagung

Während meiner Promotion hat mich eine Reihe von Menschen begleitet, unterstützt und zum Erfolg dieser Arbeit maßgeblich beigetragen, denen ich ausdrücklich danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Privatdozent Dr. habil. H.-H. Sundermeier, für die Überlassung des aktuellen und praxisnahen Forschungsthemas, die fachlichen und organisatorischen Ratschläge sowie die Bereitschaft, bei Fragen und Problemen jederzeit zu helfen. Seine freundliche und präzise Art sowie systematische, fordernde und zielstrebige Betreuung hatten einen „hohen Wirkungsgrad“ zur Folge und dies behalte ich in positiver Erinnerung.

Dank Herrn Prof. Dr. R.A.E. Müller konnte ich die „Infrastruktur“ des Instituts für Agrarökonomie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU) nutzen und einen Einblick in den Wissenschaftsbetrieb gewinnen. Für seine fachlichen Ratschläge und fachübergreifenden Anregungen sowie die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission möchte ich mich bedanken.

Herrn Prof. Dr. U. Latacz-Lohmann danke ich für die Übernahme des Korreferats und Herrn Professor Dr. Dr. C. Henning für die Bereitschaft, in der Prüfungskommission mitzuwirken.

Die vorliegende Dissertation ist eingebettet in das FIAF-Gemeinschaftsprojekt „Management-Information-System für marine Aquakulturanlagen – Entwicklung eines Prototyps“, in dem sich insbesondere das Institut für Tierzucht und Tierhaltung und das Institut für Agrarökonomie der CAU engagiert haben. Für die lehrreiche und nutzbringende Projektzusammenarbeit, den interdisziplinären Gedankenaustausch und das Sammeln praktischer Erfahrung in einem Aquakulturbetrieb bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. J. Krieter, Herrn Prof. Dr. C. Schulz, Herrn A. Baer und Herrn M. Griese.

Für die zuverlässige technische und kompetente administrative Unterstützung bedanke ich mich ausdrücklich bei Frau G. Bergner, Frau S. Schütze und den Mitarbeitern des MultiMediaLabors der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der CAU.

Weiterhin möchte ich mich für die zahlreichen Hilfestellungen, die gute Zusammenarbeit und den regen Gedanken- und Erfahrungsaustausch bei meinen Kollegen vom Institut für Agrarökonomie der CAU bedanken - stellvertretend seien hier Franziska Tiemann, Christiane Ness, Doreen Bürgelt und Stefan Güttler genannt.

Außerdem bedanke ich mich ausdrücklich bei meiner Familie und meinen Freunden für ihr Interesse und ihre Kritik an meiner Arbeit. Ein besonderer Dank möchte ich meinen Eltern

aussprechen, die mich während meiner Schul- und Studienzeit immer und im richtigen Maße unterstützt haben. Diese vielseitige und umfassende Unterstützung hat das Gelingen dieser Arbeit erst ermöglicht.

Inhalt

Abbildungen	IV
Tabellen	VII
Abkürzungen in mathematischen Formeln	IX
1 Einführung und Problemendarstellung	1
1.1 Thematische Einordnung	1
1.2 Arbeitsaufbau und Forschungsmethode	2
1.3 Forschungsgegenstand	4
1.3.1 Erzeugung von Steinbutt in Aquakultur	4
1.3.2 Geschlossene Kreislaufanlagen	5
1.3.3 Betriebliche Prozesse in der Fischmast	8
1.4 Zielsetzung und Sachproblem	11
2 Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Mastprozessen in der	
 Aquakultur	14
2.1 Lineare Programmierung	16
2.2 Graphentheoretische Verfahren	20
2.3 Entscheidungsbaumverfahren	21
2.4 Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung	22
2.5 Dynamische Programmierung	26
2.6 Dynamisch-lineare Programmierung	31
2.7 Nicht-lineare Optimierung	32
2.8 Simulation	34
2.9 Wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren	36
2.10 Prüfung ausgewählter Methoden auf Eignung für das Sachproblem	38
2.10.1 Ergebnisse einer Fallstudie mit dynamischer Programmierung	38
2.10.2 Erprobung der Simulationssoftware AquaFarm	39
2.10.3 Entwicklung und Erprobung eines dynamisch-linearen Testmodells	41
2.10.4 Entwicklung und Erprobung eines gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells	44
2.11 Kapitelzusammenfassung und Methodenwahl	48

3	Wirtschaftliche Modellierung der Fischmast in geschlossenen Kreislaufanlagen....	51
3.1	Bestandteile der Zielfunktion.....	53
3.1.1	Schlachtung und Verkauf.....	53
3.1.2	Zukauf und Besatz	54
3.1.3	Weitermast	55
3.1.4	Weitermast und anschließender Verkauf	56
3.1.5	Fischkohorten-Becken-Allokation.....	57
3.1.6	Weitermast am Ende der Planungszeitspanne auf Basis bewerteter Endzustände	57
3.2	Restriktionen	59
3.2.1	Anfangsbesatz	60
3.2.2	Filterkapazität	60
3.2.3	Mastplatzkapazität und Restriktionen der Fischkohorten-Becken- Allokation	61
3.2.1	Transferrestriktionen – Modellierung von Wachstum und Selektion.....	63
3.3	Modellierung von Kontraktproduktion.....	68
3.4	Implizite Modellannahmen und -vorentscheidungen.....	70
4	Realisation und Anwendung des Modells in der Steinbuttmast.....	73
4.1	Einsatz von Standardsoftware zur Matrixkonstruktion und Modelllösung	73
4.2	Bestimmung der Planungsdauer und der Entscheidungsintervalle	75
4.3	Berücksichtigung der biologischen Eigenschaften des Steinbutts.....	76
4.4	Berücksichtigung der technischen Eigenschaften der Steinbuttmastanlage	82
4.5	Berücksichtigung der Managementpraxis und der Marktbedingungen der Steinbuttmast.....	84
5	Ergebnisse der wirtschaftlichen Optimierung des Steinbuttmastmodells.....	87
5.1	Ergebnisaufbereitung	87
5.1.1	Monatliche Managementempfehlung	88
5.1.2	Halbjahresüberblick	90
5.1.3	Vollständiger Finanzplan	92
5.1.4	Schattenpreise	94
5.2	Ergebnisse numerischer Variationen	96
5.2.1	Parametrisierung des Selektionsanteils.....	98
5.2.2	Parametrisierung der Schlachtpreise.....	103

5.2.3	Parametrisierung der Futterpreise	108
5.2.4	Parametrisierung des Setzlingspreises	111
5.2.5	Parametrisierung von Kontraktsspezifikationen.....	112
6	Überblick und Ergebnisdiskussion.....	118
6.1	Rechenergebnisse im Überblick	118
6.2	Diskussion der Ergebnisse	118
7	Zusammenfassung.....	123
	Summary	125
	Literaturverzeichnis.....	127
	Anhang	135
	Anhang A: Zusatzmaterial zum dynamisch-linearen Testmodell.....	136
	Anhang B: Zusatzmaterial zum gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell.....	141
	Anhang C: Zusatzmaterial zur Modellrealisierung	144
	Anhang D: Zusätzliche Ergebnisse	160

Abbildungen

Abb. 1:	Marktumfeld der Aquakultur	2
Abb. 2:	Vorgehensweise und Arbeitsaufbau	3
Abb. 3:	Technischer Aufbau der betrachteten Steinbuttmastanlage.....	6
Abb. 4:	Bedeutung und Stellung des Kernprozesses (Erzeugung von Zuwachs) innerhalb des Prozessmanagements	9
Abb. 5:	Exemplarische Strategy Map von Aquakulturbetrieben	10
Abb. 6:	Häufigkeit der Methoden des Operations Research für die Optimierung von Aquakulturanlagen.....	15
Abb. 7:	Netzwerk des dynamisch-linearen Testmodells	42
Abb. 8:	Reaktion des dynamisch-linearen Testmodells auf steigende Sterblichkeit.....	43
Abb. 9:	Schematische Modellstruktur des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells....	44
Abb. 10:	Ergebnisdarstellung in Anlehnung an das Modellschema des gemischt- ganzzahligen linearen Testmodells unter Referenzannahmen.....	46
Abb. 11:	Beckenbelegungsplan für die ersten beiden Stufen der gemischt-ganzzahligen linearen Testergebnisse unter Referenzannahmen.....	47
Abb. 12:	Reaktion des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells auf steigende Sterblichkeit	47
Abb. 13:	Systembeschreibende Parameter der Fischmast	51
Abb. 14:	Unterbrechung laufender Prozesse durch den Planungshorizont	58
Abb. 15:	Restriktionen der Fischkohorten-Becken-Allokation (Zahlenbeispiel).....	63
Abb. 16:	Schrittweise Modellierung des Fischwachstums	64
Abb. 17:	Modellierung heterogenen Wachstums	65
Abb. 18:	Modellierung der Selektion und deren Konsequenzen.....	67
Abb. 19:	Schematischer Aufbau der Matrix	74
Abb. 20:	Durchschnittliche Gewichtsentwicklung des Steinbutts.....	79
Abb. 21:	Schematischer Aufbau der Steinbuttmastanlage.....	83
Abb. 22:	Ausschnitte aus zwei aufeinanderfolgenden monatlichen Managementempfehlungen.....	89
Abb. 23:	Exemplarischer Halbjahresüberblick.....	91
Abb. 24:	Exemplarischer Verlauf von Schattenpreisen für Filter- und Mastplatzkapazität...	95
Abb. 25:	Abfolge der Szenarienerstellung und –analyse.....	96
Abb. 26:	Boxplot-Diagramme zur Darstellung der Rechenzeiten.....	97

Abb. 27: Jahresproduktion in Abhängigkeit der Selektion.....	99
Abb. 28: Verkaufsgewicht in Abhängigkeit der Selektion.....	100
Abb. 29: Setzling-Schlachtfisch-Verhältnis in Abhängigkeit der Selektion	101
Abb. 30: Veränderung des Zielfunktionswerts in Abhängigkeit der Selektion.....	102
Abb. 31: Veränderung der Produktionsmenge unter verschiedenen Schlachtpreisannahmen	105
Abb. 32: Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts unter verschiedenen Schlachtpreisannahmen	106
Abb. 33: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Schlachtpreisannahmen	107
Abb. 34: Veränderung der Produktionsmenge unter verschiedenen Futterpreisannahmen.....	109
Abb. 35: Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichtst unter verschiedenen Futterpreisannahmen.....	110
Abb. 36: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Futterpreisannahmen.....	110
Abb. 37: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Setzlingspreisannahmen.....	112
Abb. 38: Jahresproduktion unter verschiedenen Kontraktannahmen	114
Abb. 39: Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts unter verschiedenen Kontraktannahmen.....	115
Abb. 40: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Kontraktannahmen	116
 Abbildungen im Anhang:	
Abb. 41: Reaktion des dynamisch-linearen Testmodells auf steigende Futterpreise	137
Abb. 42: Reaktion des dynamisch-linearen Testmodells auf veränderte Steinbuttpreise.....	137
Abb. 43: Aufbereiteter Ergebnisbericht des dynamisch-linearen Testmodells	140
Abb. 44: Anlagenaufbau im gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell.....	141
Abb. 45: Reaktion des gemisch-ganzzahligen linearen Testmodells auf steigende Futterpreise	143
Abb. 46: Reaktion des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells auf veränderte Schlachtpreise	143
Abb. 47: Rohergebnisse in Form des Standard-Antwortberichts – exemplarischer Ausschnitt	160
Abb. 48: Exemplarische monatliche Managementempfehlung für „Februar“	161

Abb. 49: Exemplarische monatliche Managementempfehlung für „März“	162
Abb. 50: Zielfunktionswert – Selektionsanteil 0 %	163
Abb. 51: Durchschnittliche jährliche Produktionsmenge – Schlachtpreisszenario 0	163
Abb. 52: Durchschnittliches Verkaufsgewicht – Schlachtpreisszenario 0	163
Abb. 53: Zielfunktionswert – Schlachtpreisszenario 0	164
Abb. 54: Durchschnittliche jährliche Produktionsmenge – Futterpreis-, Setzlingspreis- und Kontraktszenario 0	164
Abb. 55: Durchschnittliches Verkaufsgewicht – Futterpreis-, Setzlingspreis- und Kontraktszenario 0	164
Abb. 56: Zielfunktionswert – Futterpreis-, Setzlingspreis- und Kontraktszenario 0	165

Tabellen

Tab. 1:	Ausgewählte Veröffentlichungen zur wirtschaftlichen Optimierung von Aquakultur-prozessen mittels linearer Programmierung.....	18
Tab. 2:	Ausgewählte Veröffentlichungen zur wirtschaftlichen Optimierung von Aquakultur-prozessen mittels gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung....	23
Tab. 3:	Zustände des dynamisch-linearen Testmodells	41
Tab. 4:	Handlungsalternativen des dynamisch-linearen Testmodells.....	42
Tab. 5:	Zustände des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells	45
Tab. 6:	Modellierungspotential ausgewählter Optimierungsmethoden	49
Tab. 7:	Bestandteile des mathematischen Modells	52
Tab. 8:	Bestandteile des mathematischen Modells unter Berücksichtigung von Kontraktproduktion.....	68
Tab. 9:	Dokumentations-, Regelungs- und betriebliche Entscheidungsintervalle der Steinbuttmast	76
Tab. 10:	Zuwachsraten des Steinbutts für die erste Mastphase für $t < 600$	77
Tab. 11:	Angenommene Wachstumsverteilungen	80
Tab. 12:	Mastplatz- und Futteranspruch von Steinbutt.....	81
Tab. 13:	Stickstoffeintrag von Steinbutt im Mastverlauf.....	82
Tab. 14:	Beckeneigenschaften der Steinbuttmastanlage	83
Tab. 15:	Wert von Steinbutt am Ende des Planungszeitraums	85
Tab. 16:	Spezifikation der Handelsklassen für Steinbutt.....	86
Tab. 17:	Exemplarischer Ausschnitt eines Vollständigen Finanzplans für die Steinbuttmast	93
Tab. 18:	Vorgenommene Parametrisierungen.....	96
Tab. 19:	Zugrunde gelegtes Selektionsregime für die Parametrisierung der Schlacht-, Futter- und Setzlingspreise sowie der Kontraktspezifikationen	104
Tab. 20:	Ausprägungen der Kontraktsszenarien.....	113
Tab. 21:	Kurzgefasster Überblick über einige Rechenergebnisse	120

Tabellen im Anhang

Tab. 22:	Beckentypen und deren Beanspruchung im dynamisch-linearen Testmodells	136
Tab. 23:	Bewertungsansätze des dynamisch-linearen Testmodells	136
Tab. 24:	Dynamisch-lineares Testmodell in DLPMFI – exemplarische Input-Datei.....	138

Tab. 25: Ergebnisbericht des dynamisch-linearen Testmodells in DLPMI – exemplarische Ergebnisdatei	139
Tab. 26: Beckeneigenschaften im gemischt-ganzzahligen Testmodell	141
Tab. 27: Kostenansätze im gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell	142
Tab. 28: Modellierung der ganzzahligen Inbetriebnahme des Beckens des Beckentyps 2 mittels Binärvariablen im gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell.....	142
Tab. 29: Modellierung der Zielfunktion – Matrixausschnitt.....	144
Tab. 30: Modellierung der Zukaufaktivität – Matrixausschnitt.....	146
Tab. 31: Modellierung der Weitermastaktivität – Matrixausschnitt	148
Tab. 32: Modellierung der Verkaufsaktivität – Matrixausschnitt.....	150
Tab. 33: Modellierung der Filterrestriktion – Matrixausschnitt.....	152
Tab. 34: Modellierung der Beckenrestriktion – Matrixausschnitt	154
Tab. 35: Modellierung der Fischkohorten-Becken-Allokation – Matrixausschnitt.....	156
Tab. 36: Modellierung der Transfer- bzw. Wachstumsrestriktion – Matrixausschnitt.....	158

Abkürzungen in mathematischen Formeln

A	Zustand, ab dem Fische ein marktfähiges, auf dem Absatzmarkt nachgefragtes Gewicht erreicht haben
AB	Anfangsbestand
$b = 1, 2, \dots, B$	Index für Beckentypen
BFK_s	Biofilterkapazität: maximale Stickstoffmenge, die vom biologischen Filter auf der Stufe s bis zum Erreichen der Stufe $s+1$ abgebaut werden kann
BK_b	in der Aquakulturanlage vorhandene Beckenanzahl vom Beckentyp b
$c = 1, 2, \dots, C$	Index für Wachstumsklassen
d_{sz}	Anzahl der Fische auf der Stufe s vom Zustand z , über die eine doppelte Entscheidung getroffen wird: Sie sollen weitergemästet und auf der Folgestufe verkauft werden, wobei $d_{sz} \in \mathbb{R}_+$
e_{sz}	Anzahl zu kaufender Besatzfische auf der Stufe s vom Zustand z , die in die Anlage eingesetzt und weitergemästet werden, wobei $e_{sz} \in \mathbb{R}_+$
EAW	exponentieller Parameter für das anabolische Wachstum
EB	Endbestand
EKW	exponentieller Parameter für das katabolische Wachstum
EZW_{S_z}	Wert von Fischen des Zustands z zum letzten Entscheidungszeitpunkt der Planung S , die weitergemästet werden (Endzustandswert)
$f = 1, 2, \dots, F$	Index für Futtertypen, die sich in ihren Inhaltsstoffen und ihrer Pelletgröße unterscheiden
FAR_s	Flächenabbaurate: Stickstoffabbauleistung des Biofilters hinsichtlich der Biocarrieroberfläche im Zeitraum s bis $s+1$

FPA_f	Rohproteinanteil des Futters vom Typ f
FVQ_z	Futtermittlungsquotient von Fischen des Zustands z
$g_s(y_{s-1}, x_s)$	stufenbezogene Zielfunktion
$h = 1, 2, \dots, H$	Index für Handelsklassen, in denen Fische über Kontrakte gehandelt werden
$i = 0, 1, \dots, I$	Index für Faktoren
$j = 0, 1, \dots, J$	Index für Produkte
k_{sz}	Anzahl der Fische, die per Kontrakt zu verkaufen sind, auf der Stufe s vom Zustand z , wobei $k_{sz} \in \mathbb{R}_+$
KA_{sz}	variable Kosten für Arbeit auf der Stufe s für die Betreuung von Fischen des Zustands z
KAW	Koeffizient für anabolisches Wachstum
KB_{sb}	variable Kosten, die auf Stufe s bei der Belegung eines Beckens vom Beckentyp b anfallen
KE_{sz}	variable Energiekosten, die auf der Stufe s bei der Haltung von Fischen des Zustands z anfallen
KKW	Koeffizient für katabolisches Wachstum
KO_{sz}	variable sonstige Betriebskosten, die auf der Stufe s die Haltung von Fischen des Zustands z verursachen
KS_{sz}	variable Kosten auf der Stufe s für die Schlachtung von Fischen des Zustands z
KV_{sz}	variable Kosten auf der Stufe s für die Vermarktung von Fischen des Zustands z
$LM_{z \text{ bzw. } t}$	Lebendmasse von Fischen des Zustands z bzw. am Masttag t

m_{sf}	Anzahl der Mastbecken auf Stufe s , die mit Fischen zu belegen sind, die den Futtertyp f beanspruchen, wobei $m_{sf} \in \mathbb{N}$
MLM	Asymptote für maximale Lebendmasse bei $t \rightarrow \infty$
MPA_b	Mastplatzangebot pro Becken, maximale Fläche bzw. maximales Volumen eines Beckens vom Beckentyp b
MPB_{bz}	Mastplatzbedarf an Fläche bzw. Volumen der Becken vom Typ b von Fischen des Zustands z
MPK_b	Mastplatzkapazität des Beckentyps b
OBC	spezifische Oberfläche der Biocarrier
PB_{sz}	Preise für Besatzfische auf der Stufe s des Zustands z
PF_{sf}	Preise für Futter auf der Stufe s für den Futtertyp f
PK_{sh}	Schlachtpreise, die im Kontrakt vereinbart wurden, auf der Stufe s für Fische der Handelsklasse h
PNK	Konstante für den Anteil des aufgenommenen Futterrohproteins, der als Stickstoff in das Anlagenwasser übergeht
PS_{sz}	Schlachtpreise, die auf der Stufe s für Fische des Zustands z zu erzielen sind
Q	Kalkulationszinssatz pro Monat
QF_z	Futtermenge, die von Fischen des Zustands z zum Erreichen des Zustands $z+1$ verbraucht wird
QN_z	in das Anlagensystem eingetragene Menge an Stickstoff von Fischen des Zustands z
QP_z	Menge an Rohprotein, die Fische des Zustands z zum Erreichen des Zustands $z+1$ über das Futter aufnehmen
$r_s(y_{s-1}, x_s)$	Transformationsfunktion

RK_{ij}	Restriktionskoeffizienten des Faktors i und des Produktes j
RW_i	Restriktionswerte des Faktors i
$s = 0, 1, \dots, S$	Index der Stufen
SA_{zc}	Selektionsanteil der Fische vom Zustand z der Wachstumsklasse c
SE_{zc}	Selektionserfolg (Erhöhung des Anteils schnellwüchsiger Tiere) der Fische vom Zustand z der Wachstumsklasse c
$t = 0, 1, \dots, T$	Index für die Masttage
TP_{zc}	Transferwahrscheinlichkeit von Fischen des Zustands z der Wachstumsklasse c
v_{sz}	Anzahl zu verkaufender Fische auf Stufe s vom Zustand z , wobei $v_{sz} \in \mathbb{R}_+$
VA_{zc}	Verlustanteil (natürliche Sterblichkeit) der Fische vom Zustand z der Wachstumsklasse c
VBF	Volumen des Biofilters der Aquakulturanlage
w_{sz}	Anzahl weiterzumästender Fische auf der Stufe s vom Zustand z , wobei $w_{sz} \in \mathbb{R}_+$
WP_{zc}	Wachstumswahrscheinlichkeit von Fischen des Zustands z der Wachstumsklasse c ; entspricht der Transferwahrscheinlichkeit vor Berücksichtigung von Sterblichkeit und betrieblichen Eingriffen, wobei $\sum_{c=1}^C WP_{zc} = 1$
x_j	Entscheidungsvariable des Produktes j , wobei $x_j \in \mathbb{R}_+$
y_s	Zustandsvariable der Stufe s
$z = 0, 1, \dots, Z$	Index für Zustände

ZFB	Zielfunktionsbeitrag
ZFW	Zielfunktionswert
ZK_j	Zielfunktionskoeffizient des Produktes j
ZR_t	durchschnittliche tägliche Zuwachsrate pro Masttag t

1 Einführung und Problemdarstellung

1.1 Thematische Einordnung

Die Aquakultur ist als kontrollierte Aufzucht von aquatischen Organismen, wie Fischen, Krebstieren, Muscheln und Wasserpflanzen, eine im Vergleich zu Formen klassischer Nutztierhaltung junge Branche. Die Aquakulturproduktion nahm ihre Anfänge zwar bereits vor etwa 4.000 Jahren in Südostasien, jedoch ist erst seit der Mitte des 20. Jahrhunderts ein merkliches Produktionswachstum zu verzeichnen. Der technische Fortschritt und die Verbesserung von Anlagentechnik, Zuchtprogrammen, Wasseraufbereitungssystemen etc. haben die Produktivität der Aquakultur deutlich gesteigert. Dabei ist zu beobachten, dass ein Schwerpunkt der Aquakulturforschung auf technischen und biologischen Fragestellungen liegt – weniger auf betriebswirtschaftlichen oder operationalen.

Der Anstieg der Weltbevölkerung und des Wohlstands vieler Menschen führte zu einer erhöhten Nachfrage nach Fisch als Lieferant von hochwertigem Eiweiß. Gleichzeitig wird eine Vielzahl von Fischbeständen überfischt, sodass die angelandeten Fangmengen stagnieren oder sogar zurückgehen. Produkte aus Aquakultur gleichen zu einem größer werdenden Anteil diesen Nachfrageüberhang aus. Seit etwa 30 Jahren nimmt daher die Bedeutung der Aquakultur zur Erzeugung von Speisefisch zu (Abb. 1 a) und mit einer Fortsetzung des Trends wird gerechnet: Modellberechnungen prognostizieren für das Jahr 2030 eine mengenmäßige Verdoppelung der Aquakulturproduktion. Dabei steigt insbesondere in Hocheinkommensländern die Nachfrage nach hochwertigem Fisch, zu dem auch der Steinbutt zählt (FAO 2009, Richards 2001, Schulz et al. 2005, Subasinghe et al. 2001).

Parallel dazu steigen auch die Preise für Speisefisch und Fischmehl (Abb. 1 b). Dabei bildet Fischmehl die wichtigste Basis der meisten Fischfuttermittel, insbesondere des Futters für fleischfressende Fischarten wie den Steinbutt. Steigende Input- und Outputpreise sowie zunehmend ökologische, soziale und sonstige Anforderungen an die Aquakulturproduktion erfordern sowohl eine Produktionsintensivierung als auch die Berücksichtigung nicht-ökonomischer Effekte. Konventionelle Verfahren, wie z. B. Teichanlagen, Durchflusssysteme oder Netzgehege, werden dieser Entwicklung nicht gerecht, sodass geschlossenen Kreislaufsystemen eine bedeutende Rolle zukommt.

Geschlossene Kreislaufanlagen – auch Rezirkulationsanlagen genannt – bieten den Vorteil, wenige Emissionen zu verursachen und dabei den gehaltenen Tieren eine weitestgehend kon-

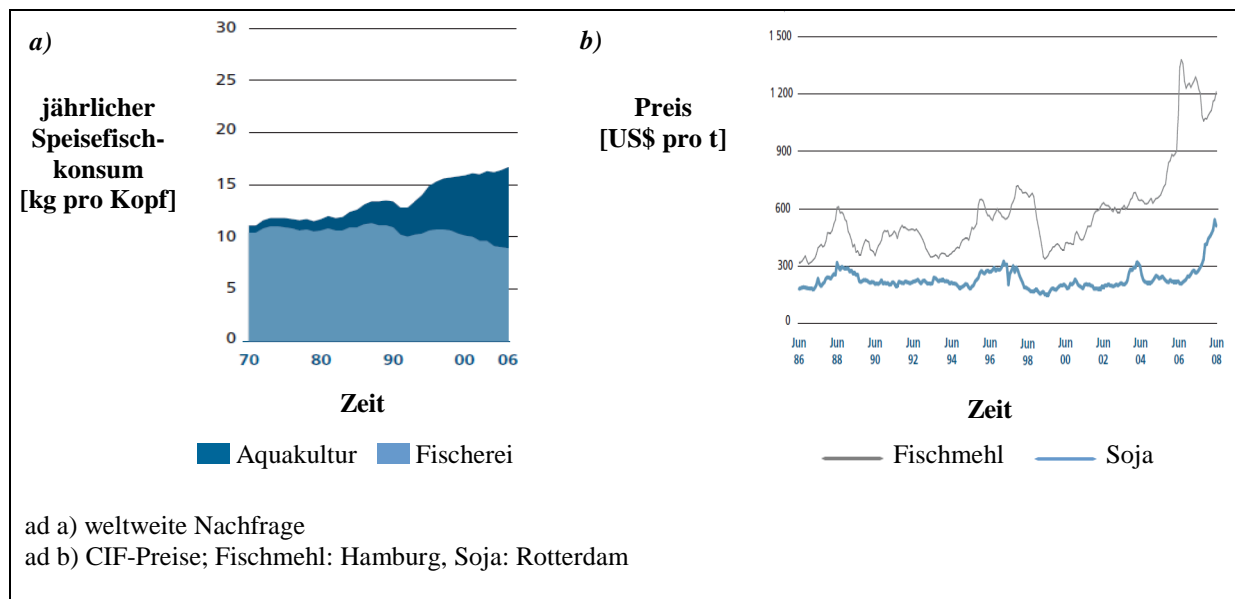


Abb. 1: Marktumfeld der Aquakultur (FAO 2009, angepasste Darstellung)

trollierbare Umgebung zu bieten. Insbesondere der Betrieb von marinen Aquakulturanlagen ist komplex. Die Anlagentechnik ist noch nicht ausgereift, viele Spezies – so auch der Steinbutt – sind kaum züchterisch bearbeitet und das betriebliche Prozessmanagement scheint vernachlässigt (FAO 2008, Timmons et al. 2002).

Vor diesem Hintergrund sollen in der vorliegenden Arbeit die Planungs- und Entscheidungsprozesse von Fischmastbetrieben analysiert werden. Am Beispiel eines Aquakulturbetriebs, der Steinbutte in einer geschlossenen Kreislaufanlage an der schleswig-holsteinischen Nordseeküste mäset, sollen die betrieblichen Prozesse unter Berücksichtigung relevanter begrenzender Faktoren modelliert und optimiert werden. Das Modell selbst, die Optimierungsrechnungen wie auch die aufbereiteten Planungsergebnisse sollen dabei so angelegt sein, dass sie eine spätere Überführung in die Praxis und somit einen praktischen Einsatz erlauben.

1.2 Arbeitsaufbau und Forschungsmethode

Eine strukturierte und zielorientierte Problembearbeitung erfordert einen klaren Arbeitsaufbau. Dazu zeigt Abb. 2 schematisch den Aufbau der vorliegenden Arbeit.

Die gesamte Arbeit ist grob in sechs Teile gegliedert – entsprechend den Pfeilbeschriftungen der o. g. Abb., die die Abstraktionsschritte und Kapitelinhalte benennen. Die mit durchgezogenen Linien umrandeten Kästen symbolisieren angestrebte Arbeitsergebnisse. Ausgehend vom zu untersuchenden Steinbuttmastbetrieb, dessen Strukturen und betriebliche Pro-

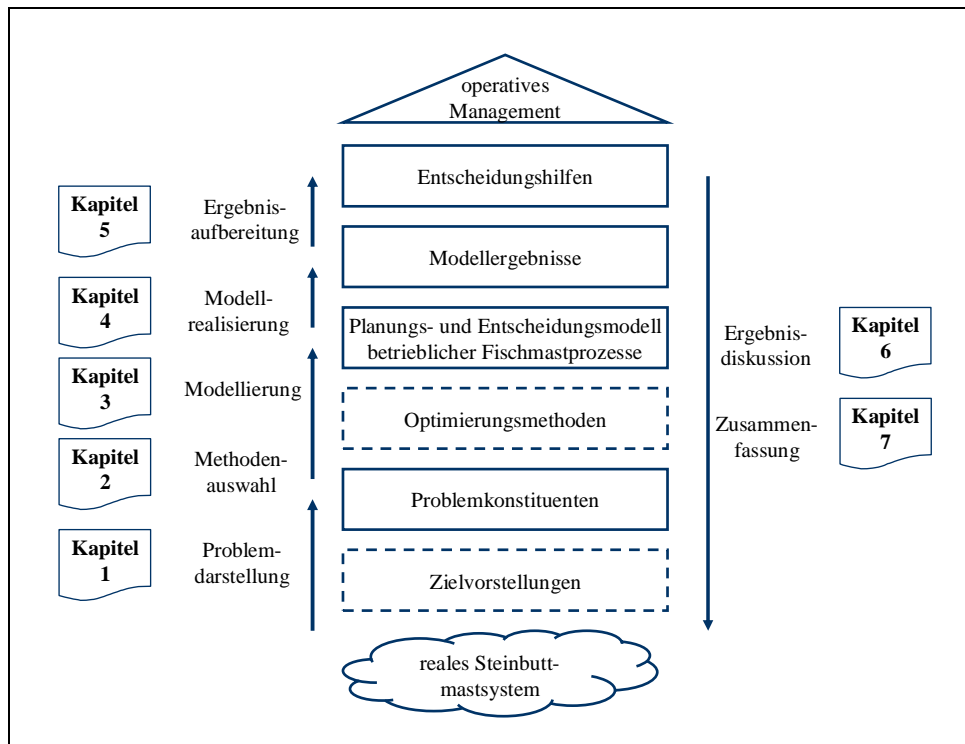


Abb. 2: Vorgehensweise und Arbeitsaufbau (eigene Darstellung)

zesse als Modellierungsgrundlage fungieren, werden in Kapitel 1 das Sachproblem und seine Bestandteile dargestellt.

Kapitel 2 erörtert auf Basis einer Literaturrecherche Optimierungsmethoden des Operations Research und deren bisherige Anwendung auf produktionswirtschaftliche Probleme in der Aquakultur. Dabei werden auch Methoden prototypisch zur Optimierung der Steinbuttmastprozesse getestet, um eine geeignete Methode auszuwählen.

In Kapitel 3 wird ein entwickeltes Modell der Prozesse der Fischmast und der betrieblichen Entscheidungen in geschlossenen Kreislaufanlagen vorgestellt.

Die Voraussetzungen für die spezifische Anwendung des Modells auf die Probleme der Steinbuttmast erläutert Kapitel 4.

Kapitel 5 beschreibt die Ergebnisse einer Vielzahl von Testrechnungen, die einerseits die Robustheit des Modellansatzes prüfen und andererseits wirtschaftlich optimale Verhaltensweisen in unterschiedlichen Szenarien ermitteln sollen.

In Kapitel 6 wird ein Überblick über die zentralen Rechenergebnisse gegeben und alle Arbeitsergebnisse werden kritisch gewürdigt.

Kapitel 7 fasst abschließend die gesamte Arbeit zusammen.

1.3 Forschungsgegenstand

Gegenstand der Untersuchung ist das operationale Prozessmanagement der Fischmast in geschlossenen Kreislaufanlagen. An einer existenten Rezirkulationsanlage zur Mast von Steinbutt in Büsum an der schleswig-holsteinischen Westküste orientierten sich viele Modellierungsüberlegungen. In ihrem Aufbau und ihrer Einrichtung ist die Anlage auf kommerzielle Produktion ausgelegt, zurzeit ist sie wegen wirtschaftlicher Probleme des Eigentümers nicht in Betrieb.

Im Folgenden soll daher auf die Besonderheiten des Steinbutts, die Funktionsweise von geschlossenen Kreislaufanlagen sowie die spezifischen produktionswirtschaftlichen Prozesse der Fischmast eingegangen werden – im Allgemeinen und in Bezug auf den betrachteten Steinbuttmastbetrieb.

1.3.1 Erzeugung von Steinbutt in Aquakultur

Der Steinbutt (*Psetta maxima*) gehört zur Familie der Plattfische und kann – wie Wildfänge belegen – eine Länge von bis zu einem Meter erreichen, 20 Kilogramm schwer und 25 Jahre alt werden. Steinbutte sind entlang der europäischen Küsten des Atlantiks, des Mittelmeeres sowie der Nord- und Ostsee anzutreffen, sie leben auf Sand und Geröll in Tiefen von 20 bis 70 Metern. Hier erbeuten sie vorwiegend am Boden lebende kleine Fische, aber auch Krebse und Weichtiere (Kändler 1949). Aufgrund seines weißen, festen und nahezu grätenfreien Fleisches ist der fast kreisrunde und schuppenlose Fisch ein geschätzter Speisefisch. Steinbutt zählt zu den Edelfischen und erzielt im Lebensmitteleinzelhandel Preise (für ganze, ausgekommene Tiere) von 20 bis 30 € pro Kilogramm (Fishbase 2009).

Steinbutte werden nicht gezielt gefischt, da sie kein Schwarmverhalten zeigen, sondern zumeist als Beifang angelandet. In den letzten Jahren weisen die Fangmengen eine eindeutig rückläufige Tendenz auf: Im Jahr 1992 betrug die Fangmenge in Europa etwa 9.000 Tonnen. Seither ist eine stetige Abnahme zu verzeichnen und im Jahr 2007 konnten nur noch 5.000 Tonnen gefangen werden (FAO 2009, Fishbase 2009).

Die Steinbuttaquakultur nahm in den 1970er Jahren in Schottland ihren Anfang und wird heute im Wesentlichen an der Atlantikküste von Frankreich und Spanien betrieben. Größtenteils werden die Fische in Durchflusssystemen produziert, die sich in unmittelbarer Nähe des Meeres befinden. So wurden im Jahr 2007 in Spanien circa 4.000 Tonnen Steinbutt produziert – das entspricht etwa 75 % der weltweit in Aquakultur erzeugten Menge an Steinbutt. Gleichzeitig ist ein stetiger Preisanstieg für Zuchtsteinbutt zu verzeichnen – über die letzten 20 Jahre hinweg sind die Großhandelspreise um etwa 40 % gestiegen. Dabei sind kaum Qualitätsunter-

schiede (bezüglich Beigeschmack, Fleischkonsistenz etc.) zwischen Aquakultur- und Wildsteinbutt festzustellen (Danancher und Garcia-Vazquez 2009, FAO 2008). Seit dem Jahr 2001 wurde Steinbutt auch in Deutschland von dem zu untersuchenden Aquakulturbetrieb kommerziell produziert. Die Mastanlage ist die erste und bisher einzige ihrer Art in Europa und auf eine jährliche Produktionsmenge von 100 Tonnen ausgelegt.

Steinbutt gilt als nicht domestiziert und wird von wenigen Fischzuchtbetrieben in Europa vermehrt. Die Elterntiere selbst bzw. die Tiere weniger Generationen zuvor sind auf Wildfänge zurückzuführen, sodass die Spezies kaum züchterisch bearbeitet ist. Die gehandelten Steinbuttsetzlinge weisen daher eine große genetische Variabilität auf. Insbesondere die Zuwachslleistung ist sehr heterogen. Dementsprechend lässt sich während der Mast beobachten, dass ein gewisser Anteil der Fische zeitweise sehr langsam oder gar nicht wächst. Entscheidend auf die Wachstumsleistung wirken sowohl die Haltungsumgebung, die eine Aquakulturanlage bietet, als auch die betrieblichen Eingriffe in den Mastprozess (Andersen und Alsted 1991, Griese 2007, Lavens und Remmerswaal 1994, Sæther 2001).

1.3.2 Geschlossene Kreislaufanlagen

Geschlossene Kreislaufanlagen schaffen eine Haltungsumgebung, die weder das Wachstum oder die Gesundheit der gehaltenen Fische noch die Qualität des erzeugten Lebensmittels beeinträchtigen soll. Die Funktionsweise und der Betrieb von geschlossenen Kreislaufanlagen sind komplex und technisch anspruchsvoll. Das Produktionswasser der Mastbecken wird teilweise oder vollständig wiederverwendet. Dabei beträgt die Wasseraustauschrate pro Tag weniger als 10 % des gesamten Wasservolumens der Anlage. Ursachen für die Wasserverluste sind im Wesentlichen Verdunstung und der Filtrationsprozess.

Das Wasserdefizit kann in marinen Aquakultursystemen mit Süßwasser ausgeglichen werden. Im Gegensatz zu Durchlaufanlagen oder offenen Aquakulturanlagen, in denen die Wasserqualität durch permanenten Wasseraustausch gewährleistet wird, durchläuft das Produktionswasser von Kreislaufanlagen mehrere Reinigungsstufen (Timmons et al. 2002, Waller 2000).

Zur Erläuterung der Funktionsweise der Wasserreinigung in Kreislaufanlagen soll das Filtrationssystem der betrachteten geschlossenen Kreislaufanlage (Abb. 3) exemplarisch vorgestellt werden, da die Filtertechnik anderer geschlossener Kreislaufanlagen grundsätzlich ähnlich funktioniert.

Jedes Becken verfügt über einen Zu- und Ablauf, einen Wasserstandsmesser sowie eine Sauerstoffsonde. Das verschmutzte Wasser aus den Haltebecken wird zunächst in Sedi-

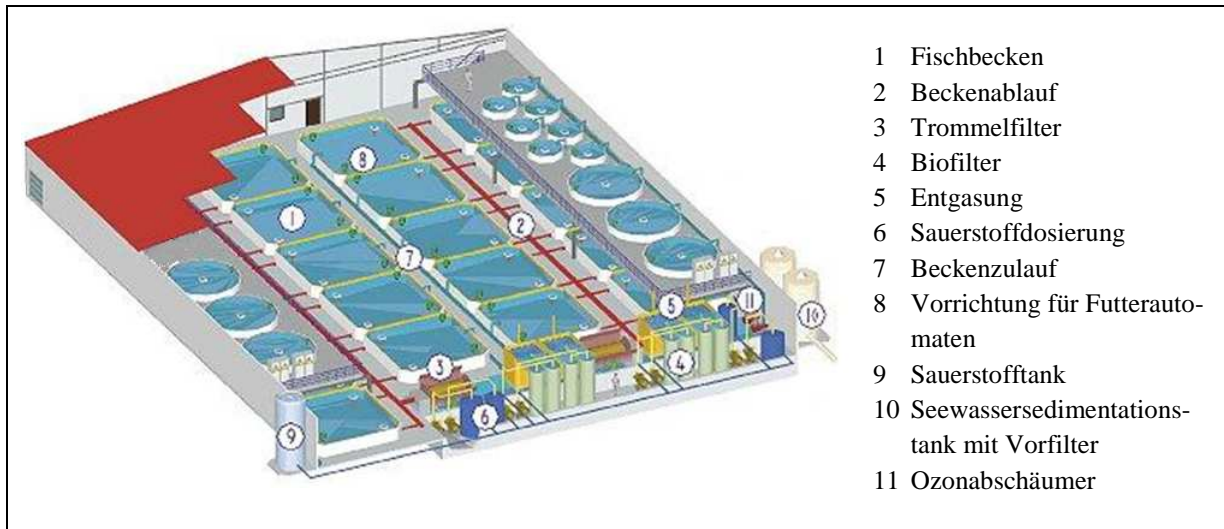


Abb. 3: Technischer Aufbau der betrachteten Steinbuttmastanlage (Kuhlmann et al. 2005)

mentationsbecken geleitet, in denen die Wasserbewegung reduziert wird und sich grobe Schwebstoffe ablagern können. Danach reinigt ein Trommelsiebfilter das Wasser mechanisch. Dabei werden feinere Schwebstoffe und Mikropartikel bis zu einem Durchmesser von 60 Mikrometer mithilfe einer feinmaschigen Gaze zurückgehalten. Die verschmutzte Gaze wird rückgespült und das Schmutzwasser dem Kreislauf entnommen.

Das mechanisch gereinigte Wasser fließt anschließend in einen Pumpensumpf, in dem es mit ultraviolettem Licht behandelt wird, um Bakterien abzutöten. Weiter gelangt das Wasser in einen biologischen Filter – ein mit Plastikgranulat gefüllter Behälter. Das Granulat hat eine große Oberfläche (zwischen 600 und 900 m² pro m³) und dient als Trägermaterial, auf dem sich Bakterien ansiedeln, die die stickstoffhaltigen Stoffwechselprodukte der Fische abbauen. Die dazu benötigte Sauerstoffversorgung wird durch eine Bodenbelüftung gesichert, wodurch sich auch das Filtermaterial kontinuierlich gleichmäßig durchmischt.

Nachdem das Wasser gefiltert wurde, wird es mit technischem Sauerstoff angereichert und danach den Fischbecken wieder zugeführt. Falls die Qualität des Austauschwassers, das den Wasserverlust ausgleicht, es erfordert, wird es mit Ozon behandelt, um enthaltene schädliche Keime abzutöten (Kuhlmann et al. 2005).

Damit bieten geschlossene Kreislaufanlagen eine nahezu vollkommen kontrollierbare und steuerbare Umgebung für die Fischmast. Die Wasserqualität kann gezielt an die Bedürfnisse der Fische angepasst und das Risiko des Eintragens von Krankheiten gemindert werden. Gegenüber anderen Aquakultursystemen, z. B. Durchflussanlagen oder küstennahe Netzgehege, sind in Kreislaufanlagen die Exkremate der Fische über die Filteranlage abzusondern und

stehen zur weiteren wirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung (beispielsweise zur Pflanzendüngung in „integrativen Aquakultursystemen“).

Der Wasserbedarf von Kreislaufanlagen ist im Vergleich zu Durchfluss- oder offenen Aquakulturanlagen gering. Dementsprechend sind auch die Kosten für den Wasserverbrauch geringer und die Standortwahl von Rezirkulationsanlagen ist weitestgehend unabhängig von dem Vorhandensein natürlicher Gewässer. Geschlossene Kreislaufanlagen können somit in räumlicher Nähe des Absatzmarktes errichtet werden, sodass die Kosten für den Transport der Produkte zum Abnehmer geringer sind.

Aufgrund des geringen Wasserbedarfs, der wenigen Emissionen und der Schonung natürlicher Fischvorkommen gelten geschlossene Kreislaufanlagen als umweltschonend, und ihren Produkten werden Attribute wie „ökologisch“, „biologisch“, „nachhaltig“ oder „regional“ zugeschrieben. Diese Produkteigenschaften erzeugen bei einer Gruppe von Verbrauchern einen Zusatznutzen, der sich in einer höheren Zahlungsbereitschaft niederschlägt. Ebenso sind diese Produkteigenschaften politisch erwünscht; so werden Bau und Betrieb von Kreislaufanlagen in Deutschland sowohl direkt als auch indirekt gefördert.

Die komplexe kostenintensive Anlagentechnik birgt neben einer Vielzahl von Vorteilen auch Risiken. Die meisten Kreislaufanlagen sind Prototypen und erfordern hohe Investitionssummen. Die eingesetzte Technik ist kaum erprobt und dementsprechend anfällig für Störungen und Ausfälle. Allein die Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs benötigt viel Energie (Pumpenbetrieb, Kühlung, Heizung, Wasseraufbereitung etc.) sowie ein hohes Maß an technischem und biologischem Spezialwissen – und damit auch qualifiziertes Personal.

Trotz des hohen Technisierungsgrads lassen sich viele Prozesse nicht automatisieren (Abfischen, Umsetzen, Sortieren), sodass gleichzeitig eine Reihe von Arbeitsgängen körperlich schwere Arbeiten erfordert. Im Gegensatz zu extensiv wirtschaftenden Aquakulturbetrieben (beispielsweise die Erzeugung von Karpfen in Teichanlagen) wird in Kreislaufanlagen ausschließlich zugekauftes Fischfutter eingesetzt. Hauptbestandteil von Futtermitteln für – insbesondere fleischfressende – Fische ist Fischmehl, das die notwendigen hochwertigen Eiweiße enthält und zu hohen, tendenziell steigenden Preise gehandelt wird – wie oben in Abb. 1 veranschaulicht (Schulz et al. 2005, Timmons et al. 2002).

Die betrachtete Steinbuttmananlage ist in einer isolierten, teilweise zweigeschossigen Produktionshalle untergebracht, die eine Grundfläche von etwa 2.400 m² umfasst. Die Anlage verfügt über zwei identische Module (Wasserkreisläufe). Die Module versorgen insgesamt 33 Becken mit Produktionswasser, die sich Beckentypen zuordnen lassen. Die Beckentypen sind

sehr unterschiedlich bezüglich ihrer Größe, Form und Ausstattung, sodass nur Fische einer Gewichtsklasse in einem Becken eines gewissen Typs gehalten werden können.

Das Produktionswasser wird der Nordsee über das benachbarte Hafenbecken entnommen. Das Wasservolumen der Anlage beträgt insgesamt 600 m³. Das Filtersystem kann 1.200 m³ Wasser pro Stunde filtern. Durchschnittlich wird ein Wasserverlust von 60 m³ pro Tag durch entkeimtes Meereswasser ausgeglichen. Der technische Anlagenbetrieb wird von moderner Kontroll-, Mess- und Regelungstechnik unterstützt. Das Investitionsvolumen für die Anlage betrug laut eines Kostenvoranschlags 3,9 Mio. €. Sowohl die Fütterung als auch das regelmäßige Sortieren der Fische erfolgen manuell, da eine Automatisierung technisch noch nicht zu vertretbaren Kosten realisierbar ist. Der Anlagenbetrieb erforderte daher 4,5 Arbeitskräfte, sodass 1 Anlagenleiter, 1 dauerhafter Mitarbeiter, 2 Auszubildende und 1 Teilzeitaushilfe in dem Betrieb beschäftigt waren (Deutsche Umwelt AG 1998, Griese 2007, Kuhlmann et al. 2005).

1.3.3 Betriebliche Prozesse in der Fischmast

Das betriebliche Prozessmanagement ist im Wesentlichen für die Überwachung, Steuerung und das Management der produktionswirtschaftlichen Prozesse verantwortlich. Der Produktionsprozess selbst – der Kernprozess – besteht aus dem Wachstum der gehaltenen Fische und ist als biologischer Prozess nicht direkt vom Mäster beeinflussbar. Die Zuwachsleistung – und damit das erzeugte Produkt – ist das Ergebnis von Stoffwechselprozessen, die nur indirekt von der gezielten Fütterung und den geschaffenen Haltungsbedingungen abhängen. Direkter Kontakt mit dem Produktionsgegenstand ist während operativer Eingriffe in den Produktionsprozess gegeben und zwar beim

- a) Einkauf und Einsetzen der Setzlinge,
- b) Sortieren nach Gewicht bzw. Größe und Umsetzen der Masttiere (Zuordnen von Fischkohorten auf freie Becken),
- c) Selektieren der schwachwüchsigen Fische sowie beim
- d) Abfischen, beim anschließenden Schlachten und Verkaufen von marktfähigen Tieren.

Abbildung 4 zeigt die Arten und Funktionen der betrieblichen Aquakulturprozesse. Alle operativen Maßnahmen sowie alle unterstützenden Prozesse begleiten und fördern den Kernprozess – das Fischwachstum, den Fleischansatz (Becker et al. 2008, Helbig 2003).

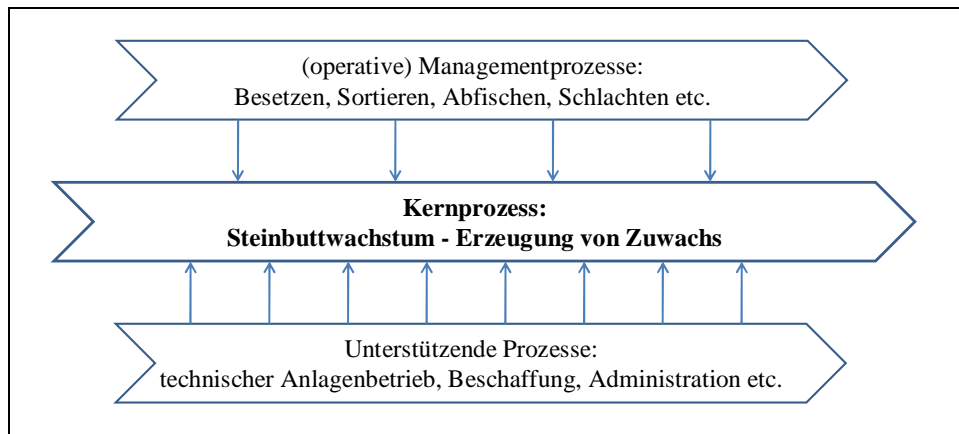


Abb. 4: Bedeutung und Stellung des Kernprozesses (Erzeugung von Zuwachs) innerhalb des Prozessmanagements (eigene Darstellung)

Das operative Prozessmanagement verfolgt eine Vielzahl von Zielen: Erreichen einer möglichst hohen Zuwachsleistung pro Zeiteinheit, Erzielen einer konstant hohen Produktqualität, bestmögliche Abstimmung von Setzlingeinkauf und Schlachtfischverkauf auf schwankende Marktbedingungen etc. Die Prozessziele sind eingebettet in eine Reihe von betrieblichen bzw. unternehmerischen Zielen, die in Verbindung zueinander stehen. Abbildung 5 stellt die potentiellen Ziele eines Aquakulturbetriebes in Form einer Strategy Map dar.

Um marktorientiert zu agieren und Wettbewerbsvorteile zu realisieren, reicht es nicht aus, dass sich Unternehmen ausschließlich an vergangenheitsbasierten Größen orientieren. Daher sind die treibenden Faktoren des betrieblichen Leistungspotentials zu berücksichtigen. Diese sind nicht allein finanzieller Art, sondern betreffen auch die Kunden, die internen (betrieblichen) Prozesse sowie die Mitarbeiter und die Entwicklung von Innovationen. Die jeweiligen Ziele stehen in einer Ursache-Wirkung-Beziehung zueinander, wobei alle Größen der nicht-finanziellen Perspektiven mit mindestens einer finanziellen Maßgabe direkt oder indirekt verbunden sein müssen.

Die nicht-monetären Ziele stellen damit Hilfsmittel dar, um finanzielle Ziele zu erreichen. In einem Strategiefindungsprozess eines Unternehmens kann mithilfe einer Strategy Map die Unternehmensstrategie geklärt und visualisiert werden. Auf dieser Basis wird ein komplexes Strategiebündel beispielweise durch Balanced Scorecards operationalisierbar. So sind wenige aussagekräftige Kennzahlen ausfindig zu machen, um messen zu können, ob und inwieweit die angestrebten Ziele erreicht wurden (Kaplan und Norton 2004).

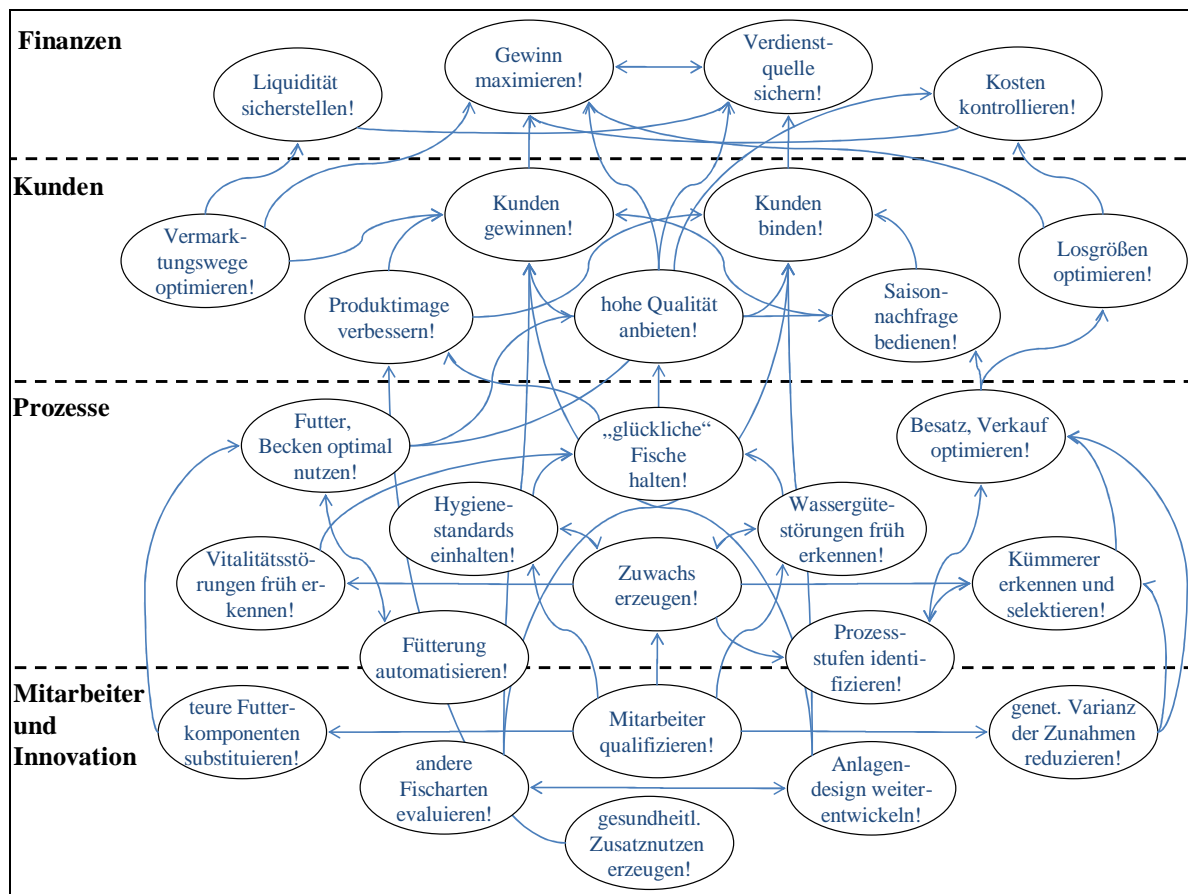


Abb. 5: Exemplarische Strategy Map von Aquakulturbetrieben (eigene Darstellung)

Im laufenden Betrieb der betrachteten Steinbuttmastanlage wurde ein Schwerpunkt auf technische und biologische Aspekte gelegt. So erfolgten regelmäßige und umfangreiche Kontrollen und Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Tiergesundheit, der Anlagentechnik und der Wasserqualität. Neben regelmäßigen Hygienemaßnahmen, Wartungsarbeiten und Messungen wurden die Fische zweimal täglich manuell gefüttert (ad libitum). Eine Automatisierung der Fütterung von Steinbutt war technisch noch nicht zu vertretbaren Kosten realisierbar. Außerdem sind die Tiere im Mittel alle acht Wochen manuell abgefischt, sortiert und der Größe entsprechend in andere Becken umgesetzt worden.

Die Nachfrage nach Steinbutt ist saisonal sehr unterschiedlich, ebenso schwanken die Verkaufspreise stark. Wegen fehlender zeitlicher Abstimmung der Produktion an Marktbedingungen ist der größte Teil der Schlachtfische nicht an Gastronomen und Fischeinzelhändler, die saisonal hohe Preise zahlen, verkauft worden, sondern zu niedrigeren an Großhändler.

Das zentrale betriebliche Ziel bestand darin, die durchschnittliche Sterblichkeitsrate möglichst gering zu halten. Zum einen war die Konzentration auf die biologisch-technischen Prozesse eine Reaktion auf alltägliche betrieblichen Probleme: So sind beispielsweise durch infizierte Setzlinge Krankheiten in das Anlagensystem eingetragen worden, die hohe Tierverluste

verursachten; technische Störungen verminderten die Wasserqualität und damit die Produkteigenschaften, sodass Fische nicht mehr vermarktet werden konnten. Zum anderen waren die betrieblichen Ziele nicht direkt mit anderen unternehmerischen Zielen verbunden. Beispielsweise lag der finanzielle Unternehmenserfolg nicht im Verantwortungsbereich der Anlagenleitung (dem betrieblichen Prozessmanagement); Unternehmensleitung und Betriebsleitung waren personell und räumlich voneinander getrennt. Ziele des Anlagen- und betrieblichen Prozessmanagements waren somit ebenso wie das Messen und die Maßnahmen zum Erreichen dieser Ziele kaum in einer Zielhierarchie bzw. einem Unternehmenszielsystem eingebunden oder aufeinander abgestimmt, wie es etwa Strategy Maps anstreben.

1.4 Zielsetzung und Sachproblem

Aufgrund der in der Praxis vorgefundenen mangelnden Wirtschaftlichkeit des betrachteten Steinbutt-Aquakulturbetriebs ist das bisher angewandte Managementkonzept grundlegend zu überprüfen und alle Maßnahmen zur Kostensenkung sowie zur Ertragssteigerung sind auszuschöpfen. Die übrigen Maßnahmen wie etwa diejenigen zum Umweltschutz, zur tiergerechten Haltung, zur Beachtung von Hygienevorschriften, zu Qualitätsmaßstäben sowie zur Schaffung und Erhaltung von Arbeitsplätzen sind als Nebenbedingungen bzw. sekundäre Ziele des Wirtschaftens zu betrachten. Hauptziele bleiben eine möglichst hohe Gewinnerzielung und die Amortisation des investierten Kapitals.

Die vorliegende Arbeit möchte dazu beitragen, diese Hauptziele zu erreichen. Dazu wird ein Planungs- und Entscheidungsmodell vom Forschungsgegenstand entwickelt, mit dessen Hilfe die betrieblichen Mastprozesse wirtschaftlich optimiert werden können.

Die Problemauffassung ist eng mit der Zielsetzung verknüpft und lässt sich in die folgenden sieben Komponenten untergliedern:

- 1) *Das Wachstum als Erfolgsquelle identifizieren und im betrieblichen Prozessmanagement berücksichtigen:* Stehen biologische (das Vermeiden von Tierverlusten) und technische Aspekte (Aufrechterhaltung des Anlagenbetriebs) im Mittelpunkt aller betrieblichen Überlegungen, so werden die „Kostentreiber“, aber nicht die „Leistungstreiber“ betrachtet. Die eigentliche Erfolgsquelle, der Gewichtszuwachs der gehaltenen Fische, ist als Triebkraft für die wirtschaftliche Leistung eines Fischmastbetriebs zu identifizieren und im betrieblichen Prozessmanagement zu berücksichtigen. Auf diese Weise können Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Inputs und Outputs bzw. Kosten und Leistungen hergestellt werden. Damit können auch Ursachen für mangelnde Wirtschaftlichkeit und Möglichkeiten zum Gegenwirken

bei Fehlentwicklungen erkannt werden. Um die Wachstumsprozesse der gehaltenen Fische managementfähig und operationalisierbar zu machen, sind die einzelnen Tiere bzw. Tiergruppen (Fischkohorten) eindeutig zu identifizieren.

- 2) *Auf heterogenes Fischwachstum betrieblich reagieren:* Wirtschaftliche Prozesse der Tierproduktion sind nur dann profitabel, wenn ihre Leistungen die Kosten übersteigen. Der Betrieb von marinen Aquakulturanlagen ist arbeits-, kapital- und know-how- und somit kostenintensiv. Dabei machen Fixkosten (Abschreibungen, Personal, Energie) einen großen Anteil der Gesamtkosten aus. Während die Wachstumsprozesse der eingesetzten Tiere nicht hinreichend bekannt sind, ist zu beobachten, dass die Wachstumsgeschwindigkeit der Fische sehr unterschiedlich ist. So ist zu vermuten, dass eine erhebliche genetische Variabilität der Einzeltiere in Bezug auf ihre Zuwachsleistung besteht. Für eine kostendeckende Produktion muss ein Mindestzuwachs pro Zeiteinheit erreicht werden. Alle Tiere, die diesen Mindestzuwachs nicht erreichen, verursachen nur Kosten ohne nutzbare bzw. verwertbare Leistung: Nicht wachsende oder schwachwüchsige Tiere beanspruchen Futter, Beckenplatz, Filterkapazität, Frischwasser, Entsorgungskosten, Personal etc. Neben den ausgabewirksamen Aufwendungen entstehen auch Nutzungskosten. Inferiore Prozesse belegen Beckenkapazität, sodass profitable Produktionsprozesse (der Fische mit höheren Zuwachsraten) nicht durchgeführt werden können. Es kommt zu einer „Vergreisung“ der Fischbestände, die – werden Gegenmaßnahmen unterlassen – zwangsläufig mit der Zeit zunimmt. Durch Selektion schlechtwüchsiger Tiere können frei werdende Anlagenkapazitäten durch neue Fischkohorten genutzt und der Durchsatz erhöht werden. So können die Umsatzerlöse gesteigert und gleichzeitig die Kostenanteile für Personal und Anlagenutzung pro Zeiteinheit gemindert werden.
- 3) *Bisher veröffentlichte Lösungsansätze untersuchen:* Eine Reihe von Autoren hat sich mit der Optimierung von betrieblichen Prozessen in der Aquakultur beschäftigt. Sie lassen sich nach der eingesetzten Optimierungsmethode und dem Anwendungsobjekt unterscheiden. Die relevanten Publikationen werden systematisch analysiert, um Parallelen zum vorliegenden Problem ausfindig zu machen und mögliche Lösungsstrategien weiterzuentwickeln.
- 4) *Das Fischwachstum und die zentralen betrieblichen Prozesse modellieren:* Der Wachstumsprozess als Erfolgsquelle der Fischmast steht im Zentrum der Modellierungsüberlegungen. Dabei sind die Gewichtszunahme in zeitliche sowie sachliche Teilabschnitte zu zerlegen und die heterogene Wachstumsgeschwindigkeit der Fische

abzubilden. Gleichzeitig sind die betrieblichen Prozesse (das Einsetzen von Setzlingen, das Selektieren von Schlechtwüchsigen, das Abfischen von Schlachttieren etc.) und deren wirtschaftliche Auswirkungen zu modellieren, zu quantifizieren und in einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang zu bringen. Um auf Basis des Modells möglichst praxistaugliche Ergebnisse zu erzeugen und eine spätere Überführung in die Praxis zu ermöglichen (beispielsweise als Softwarebestandteil in einem Management-Informationen-System), ist ein Kompromiss zwischen Modellgenauigkeit und Modellgröße einzugehen. Das Modell soll so konzipiert werden, dass es jederzeit mit angemessenem Aufwand angepasst und damit auf ähnliche Probleme (der Fischmast) übertragen werden kann.

- 5) *Eine geeignete Optimierungsmethode auswählen und einsetzen:* Aus einer Vielzahl von Optimierungsmethoden des Operations Research wird eine geeignete ausgewählt. Dazu ist zunächst auf Basis einer Literaturrecherche eine Vorauswahl zu treffen. Die Methoden der Vorauswahl sollen testweise auf das vorliegende Problem angewendet werden. Die Methode, die am ehesten geeignet erscheint, die Besonderheiten des Sachproblems berücksichtigen zu können, ist zur Optimierung der operativen Prozesse der Steinbuttmast einzusetzen.
- 6) *Die Brauchbarkeit des Modells (numerisch) nachweisen und wirtschaftliche Potentiale quantifizieren:* Mangels realer Daten aus einem laufenden Betrieb soll das Optimierungsmodell numerisch verprobt werden. Dazu werden Szenarien bezüglich der wirtschaftlichen Umwelt und des Fischwachstums aufgestellt und die Reaktionen des Modells auf veränderte Parameter untersucht. Somit kann auch das wirtschaftliche Potential der Steinbuttmast unter verschiedenen Marktbedingungen ausgelotet werden, das durch gezielte Eingriffe in den betrieblichen Produktionsprozess realisierbar wäre.
- 7) *Erfolgversprechende Managementstrategien definieren und Entscheidungshilfen entwickeln:* Managementstrategien dienen als Orientierungsrahmen für rationales wirtschaftliches Handeln. Ein vorhandenes und vom Mäster nicht beeinflussbares Wachstumspotential der gehaltenen Fische erfordert eine „routinemäßige“ betriebliche Reaktion. So sind je nach angenommener Wachstumsgeschwindigkeit wirtschaftlich rationale Selektionsregime zu entwickeln. Die Ergebnisse der Optimierungsrechnungen sollen so aufbereitet werden, dass sie ein fachkundiger Dritter verstehen kann. Dazu sollen Management- bzw. Entscheidungshilfen für den Praxiseinsatz entwickelt werden, die die zentralen Ergebnisse in Berichtsform darstellen – angepasst an den (potentiellen) Informationsbedarf eines Anlagenbetreibers.

2 Methoden zur wirtschaftlichen Optimierung von Mastprozessen in der Aquakultur

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse einer Literaturrecherche zum Stand der Forschung im Hinblick auf eine Vorauswahl von geeignet erscheinenden mathematischen Optimierungsverfahren kategorisiert. Eine testweise Anwendung dieser Algorithmen auf prototypische Formulierungen des Sachproblems lotet Handhabbarkeit und Abbildbarkeit des vorliegenden produktionswirtschaftlichen Optimierungsproblems aus und liefert schließlich die Beweggründe für die Methodenwahl.

Dazu sind zunächst relevante Verfahren des Operations Research vorzustellen und deren bisheriger Einsatz für die Optimierung von operativen Prozessen in der Aquakultur zu analysieren. Dabei soll im Wesentlichen auf die Anwendung dieser Methoden bei Problemen der Aquakultur eingegangen werden, auch wenn eine Reihe von Parallelen zur Optimierung von industriellen (Haley 1967, Kallrath 2002a, Williams 1985) und landwirtschaftlichen Prozessen (Hazell und Norton 1986, Kennedy 1986, Sundermeier et al. 1987) erkennbar sind.

Bjørndal et al. (2004) und Hatch und Tai (1997) geben bereits eine Übersicht über Veröffentlichungen, die sich mit betriebswirtschaftlichen Fragestellungen in der Aquakultur beschäftigen. Sie unterscheiden empirische und theoretische Studien, die sich auf prinzipielle wirtschaftliche und unternehmerische Themen der Aquakultur konzentrieren. Bjørndal et al. (2004) stellen sowohl biologische als auch wirtschaftliche Modelle vor und unterscheiden diese jeweils nach ihrer Anwendung auf Fischerei oder Aquakultur. Dabei kommen in den wirtschaftlichen Modellansätzen der Aquakultur lineare Programmierung, statistische Verfahren, dynamische Programmierung und stochastische Verfahren zum Einsatz. Somit ermöglichen Bjørndal et al. (2004) sowie Hatch und Tai (1997) einen ersten Literaturüberblick, jedoch ist die Zusammenstellung der Veröffentlichungen nicht aktuell, nicht umfassend und nicht ausschließlich auf wirtschaftliche Prozessoptimierung ausgerichtet.

Eine weitere Literaturrecherche ergab insgesamt 55 relevante Veröffentlichungen, die nach der jeweils eingesetzten Optimierungsmethode geordnet und nachfolgend vorgestellt werden.¹ Die Auswahl der Beiträge erfolgte unabhängig vom Zeitschriftentyp, Veröffentlichungsdatum oder von der Publikationsart. Die Erläuterungstiefe orientiert sich grob an der Einsatzhäufigkeit und der Bedeutung des Verfahrens für die Aquakultur. Alle eingesetzten Methoden haben

¹ Die Reihenfolge, in der die Methoden vorgestellt werden, orientiert sich an Müller-Merbach (1973).

das gemeinsame Ziel, betriebliche Entscheidungen so zu unterstützen, dass unter den gegebenen Rahmenbedingungen das bestmögliche wirtschaftliche Ergebnis erzielt wird. Betriebliche Entscheidungen in der Aquakultur betreffen den Besatz der Anlage mit Setzlingen, die Fütterung, die Beckenbelegung, das Sortieren, den Verkauf von Schlachtfisch etc.

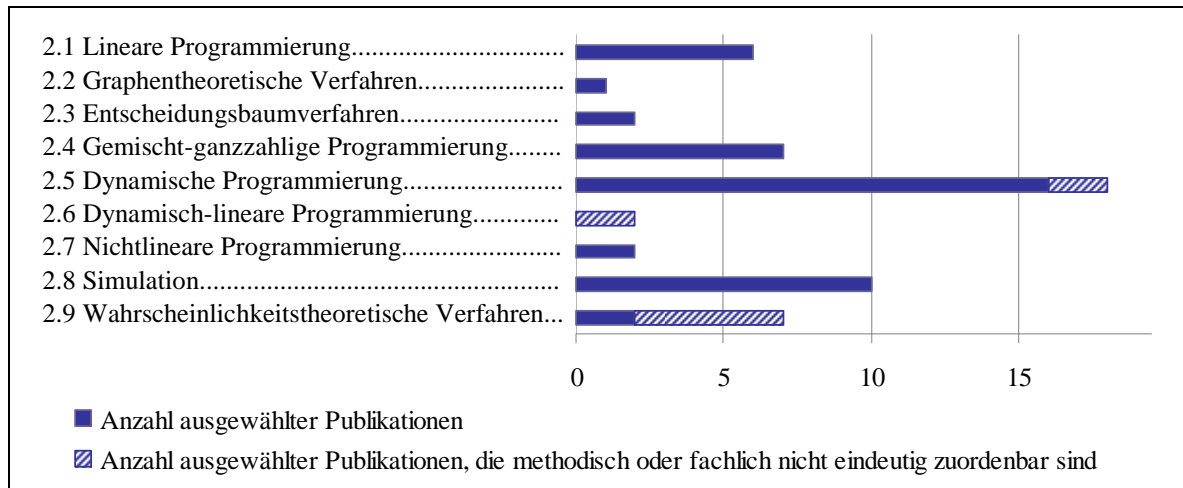


Abb. 6: Häufigkeit der Methoden des Operations Research für die Optimierung von Aquakulturanlagen (eigene Darstellung)

Abbildung 6 führt neun Optimierungsverfahren mit den jeweiligen Nummern der Abschnitte in der vorliegenden Arbeit auf, in denen sie näher erläutert werden. Dargestellt ist die absolute Häufigkeit, mit der die Methoden innerhalb der Literatursammlung anzutreffen sind. Besonders häufig werden die lineare Programmierung, die gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung, die dynamische Programmierung sowie Simulationsverfahren verwendet.

Auf Grundlage der Literatursammlung und des Methodenstudiums wurden die Verfahren, die vorläufig am geeignetsten zur Lösung des vorliegenden Betriebsführungsproblems erscheinen, einer näheren Prüfung unterzogen. Dazu werden ein bereits entwickelter Entscheidungshilfen-Prototyp (auf Basis der dynamischen Programmierung) näher untersucht, eine verfügbare Simulationssoftware getestet und lineare Modellformulierungen (dynamisch-linear sowie gemischt-ganzzahlig) entwickelt und erprobt.

Die abschließende Bewertung des testweisen Methodeneinsatzes soll letztendlich diejenige Methode identifizieren, mit der man das betriebswirtschaftliche Sachproblem adäquat abbilden und mit vertretbarem Aufwand praxistaugliche Entscheidungshilfen geben kann.

2.1 Lineare Programmierung

Die lineare Programmierung² stellt ein zentrales, nach Ansicht von Wöhe und Döring (2008, S. 165) das „wohl bedeutendste Teilgebiet“ des Operations Research dar.

Das Wesen wirtschaftlicher Entscheidungen besteht darin, aus einer Reihe möglicher Alternativen die „beste“ auszuwählen und zu realisieren. Die beste Alternative ist diejenige, die unter Berücksichtigung von knappen Ressourcen den größten bzw. kleinsten Wert einer Zielgröße verspricht. Mithilfe linearer Programmierung wird die beste Entscheidungsalternative identifiziert, indem eine lineare Zielfunktion optimiert wird, deren zulässige Lösungsmenge von linearen Gleichungen und Ungleichungen (Restriktionen) eingeschränkt ist (Kistner 2003). Ein lineares Programm besteht dementsprechend allgemein aus einer Zielfunktion

$$(1) \quad ZFW = \sum_{j=1}^J ZK_j \cdot x_j = \max!(\min!) \quad \text{mit } j = 0, 1, \dots, J,$$

die unter den Nebenbedingungen

$$(2) \quad \sum_{j=1}^J RK_{ij} \cdot x_j = RW_i \quad \text{mit } i = 0, 1, \dots, I$$

und unter der Nicht-Negativitätsbedingung

$$(3) \quad x_j \geq 0$$

zu maximieren oder zu minimieren ist. Dabei symbolisieren:

ZFW den Zielfunktionswert,

$j = 0, 1, \dots, J$ den Index für Produkte,

ZK_j die Zielfunktionskoeffizienten der Produkte j ,

x_j die Entscheidungsvariablen der Produkte j , wobei $x_j \in \mathbb{R}_+$,

RK_{ij} die Restriktionskoeffizienten des Faktors i und des Produktes j ,

² In Anlehnung an den anglo-amerikanischen Begriff „Programming“ wird im Folgenden der Ausdruck der Programmierung verwendet. Entsprechende Modelle werden als Programme bezeichnet. In der deutschsprachigen Literatur lassen sich weitere Übersetzungen wie Planungsrechnung, Programmieren, Programmplanung oder Optimierung finden, die als Synonyme zu verstehen sind.

$i = 0, 1, \dots, I$ den Index für Faktoren und

RW_i die Restriktionswerte des Faktors i .

Die Entwicklung der linearen Programmierung wird zumeist auf den russischen Mathematiker und Wirtschaftsnobelpreisträger Leonid W. Kantorowitsch zurückgeführt, der schon 1939 die Grundlagen des Konzeptes erarbeitet hat. 1947 entwickelte George B. Dantzig den Simplex-Algorithmus, der die Lösung komplexer linearer Optimierungsprobleme ermöglicht. Bis heute ist die Simplex-Methode weiterentwickelt worden; sie ist neben dem Innere-Punkte-Verfahren die bedeutendste Lösungsmethode für lineare Optimierungsmodelle (Domschke und Drexl 1990, Müller-Merbach 1973).

Da sich komplexe Probleme mithilfe der linearen Programmierung einfach darstellen und lösen lassen, insbesondere in Form von Matrizen, gehört die Methode zu den meistverwendeten des Operations Research und ihre Lösungsalgorithmen zu den höchstentwickelten (Ellinger et al. 2003). Mit dem stetigen Fortschritt der Computertechnik verkürzten sich die Rechenzeiten und die Kosten für Datenverarbeitung sanken, sodass vermehrt praktische Planungsprobleme der Fertigung und des Absatzes, wie etwa Mischungs-, Transport-, Netzwerkfluss-, Umlade- oder Zuordnungsprobleme größerer Unternehmen verschiedener Branchen gelöst werden konnten (Dantzig und Thapa 1997, Martin 1999).

In den 1970er und 1980er Jahren fand lineare Programmierung vermehrt auch auf landwirtschaftliche Fragestellungen Anwendung. So konnten beispielsweise Futterrationierungs- und Lagerhaltungsprobleme gelöst, Betriebs- und Anbauorganisation oder Mast- und Ernteprozesse optimiert werden. Mit geringer zeitlicher Verzögerung wird zur Optimierung wirtschaftlicher Prozesse in der Aquakulturproduktion die lineare Programmierung ebenfalls verwendet, wie Tab. 1 in einer Übersicht ausgewählter Publikationen veranschaulicht.

So nehmen Varvarigos und Horne (1986) zunächst eine Systemanalyse der Produktionsprozesse und Marktgegebenheiten einer existierenden geschlossenen Kreislaufanlage zur Erzeugung von Forellensetzlingen vor. Das darauf basierende lineare Gleichungssystem soll als praktisches Werkzeug zur Unterstützung von Managemententscheidungen eingesetzt werden. Ziel der Untersuchung ist, für einen Planungshorizont von einem Jahr die optimalen Erntemengen, -zeitpunkte und -gewichte der erzeugten Forellensetzlinge zu ermitteln. Dabei stehen verschiedene Lieferanten von Fischlaich und Brutfishsetzlingen zur Auswahl. Das Wachstum der Fische wird durch drei Gewichtsklassen und eine deterministische Transformationsfunktion modelliert. Die Restriktionen berücksichtigen Beckenkapazität, Losgrößen der Laichbeschaffung, Arbeits- sowie Futterbeschränkungen. Insbesondere wird auf die Relevanz

der Datenerhebung und auf die Bedeutung der Rechenergebnisse als Führungshilfe (*guidelines*) hingewiesen.

Tab. 1: Ausgewählte Veröffentlichungen zur wirtschaftlichen Optimierung von Aquakulturprozessen mittels linearer Programmierung (eigene Darstellung)

Autor	Optimierungsobjekt	Aktivitäten (Anzahl)	Restriktionen (Anzahl)	Planungszeitraum (Entscheidungspunkte)	Anwendungsbeispiel
Varvarigos und Horne (1986)	Terminierung, Quantifizierung und Qualifizierung von Besatz und Verkauf	Kauf, Verkauf (29)	Becken, Laichkauf, Arbeit, Futter (10)	1 Jahr (12)	Produktion von Forellensetzlingen
Bala und Satter (1989)	Terminierung und Quantifizierung des Abfischens	Verkauf (-)	Vermarktungsmengen, Teichkapazität (-)	2 Jahre (720)	Garnelelmast
Engle und Pounds (1994)	Terminierung, Quantifizierung und Qualifizierung des Besatzes, Managementregime	Kauf, Verkauf, Teichbelegung, Managementregime (461)	Land, Kapital, Arbeit, Teiche (97)	2 Jahre (-)	Welsmast
Forsberg (1996)	Quantifizierung des Besatzes, Terminierung, Quantifizierung und Qualifizierung des Abfischens	Kauf, Verkauf (-)	Populationsbalance, Biomassekapazität, Futteranspruch (-)	-	-
Pelot und Cyrus (1999)	Terminierung und Quantifizierung der Ernte	Verkauf (-)	Besatzdichte, Kapazität, Arbeit, Verkaufsmengen (-)	8 Jahre (152)	Produktion von Jakobsmuscheln
Valderrama und Engle (2000)	Terminierung und Quantifizierung des Besatzes, Terminierung der Ernte und des Wasseraustausches	Kauf, Verkauf, Wasseraustausch (216)	Transfers (36) Land (10) Ernte (24) Liquidität (14) Verschuldung (13)	1 Jahr (12)	Garnelelmast

In einer späteren Studie wenden Bala und Satter (1989) lineare Programmierung auf das betriebliche Management von Garnelenmastanlagen in Bangladesch an. Die vorgefundene Managementpraxis beruhte im Wesentlichen auf Intuition bzw. Erfahrung und versprach Ver-

besserungspotenzial. Das hier eingesetzte Optimierungsmodell hat einen Planungshorizont von etwa zwei Jahren und berücksichtigt sowohl maximale Vermarktungsmengen als auch die Kapazität der Teichanlage. So werden optimale Erntezeitpunkte und -mengen unter der Bedingung ermittelt, dass unterschiedliche Partien nicht vermischt werden dürfen. Ein Schwerpunkt der numerischen Untersuchung liegt auf der biologischen Abbildung der Besatzentwicklung und erfolgt mittels dynamischer Simulationsverfahren, die Rückkopplungsprozesse enthalten.

Forsberg (1996) ermittelt auf Basis eines mehrperiodigen linearen Programmierungsmodells optimale Besatz- und Abfischstrategien. Beschränkend wirken die Besatzbalance ("which states that no fish can be recruited or removed from a size-class without having a proportional impact on the remaining number of fish", Forsberg (1996) S. 302), die Biomassekapazität der Anlage insgesamt und der Futteranspruch der gehaltenen Tiere. Forsberg konzentriert sich in dieser Studie auf die Modellierung des Wachstums, das als schrittweises Durchlaufen von Gewichtsklassen definiert wird. Wahrscheinlichkeiten beschreiben den Verbleib in einer bisherigen oder den Wechsel in eine andere Gewichtsklasse. Damit bildet der Wachstumsprozess eine Markow-Kette³.

Pelot und Cyrus (1999) verwenden lineare Programmierung, um die produktionswirtschaftlichen Prozesse der Erzeugung von Jakobsmuscheln zu optimieren. Sie ermitteln für einen Planungshorizont von acht Jahren optimale Erntezeitpunkte und -gewichte, wobei die Kapazitäten der Körbe, in denen die Muscheln ins Meer gesetzt werden, und die zur Verfügung stehende Arbeitskraft begrenzend wirken. Das Modell berücksichtigt Zusammenhänge zwischen Sterblichkeit, Wachstum, Einsatzzeitpunkt und -dauer. Im zweiten Schritt werden Verkaufsmengen als Nebenbedingungen modelliert und parametrisiert, um für einen repräsentativen Jakobsmuschelbetrieb die Einkünfte zu glätten und die Arbeitsspitzen zu brechen.

Die Produktionsplanung von Aquakulturbetrieben ist mit Unsicherheit behaftet, die aus den Markt-, Produktions- und Umgebungsbedingungen resultiert. Engle und Pounds (1994) sowie Valderrama und Engle (2000) konzipieren lineare Programme, die Unsicherheit über das Target-MOTAD-Konzept berücksichtigen. MOTAD (Minimisation Of Total Absolute Deviations) wurde 1971 von Peter B. R. Hazell entwickelt. Als Risikomaß dient die mittlere absolute Abweichung, die als robuster Schätzer für die Standardabweichung herangezogen wird. Dabei wird unterstellt, dass Zielfunktionskoeffizienten nicht mit Sicherheit bekannt sind, sondern ihre Werte einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen. Das Target-

³ Das Konzept und die Modellierung des Fischwachstums mithilfe von Markow-Ketten wird in Abschnitt 2.9 ausführlicher erläutert.

MOTAD-Konzept geht auf Loren W. Tauer zurück und formuliert Zielwerte (*targets*) für die Zielfunktionskoeffizienten und für maximale durchschnittliche Fehlbeträge zu Planungsbeginn. Engle und Pounds (1994) ermitteln so am Beispiel einer Welsmastanlage in Arkansas die bestmöglichen Besatzzeitpunkte, -mengen und -gewichte unter Berücksichtigung des Risikos, dass Fische einen Beigeschmack (*off-flavour*) haben und an Wert verlieren. Des Weiteren wird die Vorteilhaftigkeit zweier Managementsysteme analysiert: Das Single-Batch-Verfahren beschreibt ein Rein-Raus-Mastsystem, in dem die Welssetzlinge in einen Teich eingesetzt, während der Mast nicht mit anderen Partien vermischt und zum Mastende komplett abgefischt werden. Hingegen werden im Multiple-Batch-Verfahren schnellwüchsige Tiere frühzeitig abgefischt und die frei gewordene Teichkapazität wird mit Setzlingen parallel neu besetzt (*topping, understocking*). Die Planung umfasst einen Zeitraum von zwei Jahren und wird von Land-, Kapital-, Arbeits- und Teichrestriktionen beschränkt.

Unter Verwendung der gleichen Methode ermitteln Valderrama und Engle (2000) optimale Mengen und Zeitpunkte zum Besetzen und Abfischen von Garnelen. Vor dem Hintergrund des Risikos eines Krankheitsbefalls wird zudem eine optimale tägliche Wasseraustauschrate berechnet. Neben den Hilfsrestriktionen zur Abbildung des Fischwachstums wirken das zur Verfügung stehende Land, die Erntemengen, Liquiditäts- und Verschuldungsrestriktionen begrenzend. Die verwendeten Daten stammen aus einer zweijährigen statistischen Erhebung über etwa 1.000 Garnelenteiche in Honduras.

2.2 Graphentheoretische Verfahren

Die Graphentheorie ist eine Teildisziplin der mathematischen Topologie. Graphen stellen Netzwerke dar, bestehend aus einer Menge von Knoten, die durch Kanten miteinander verbunden sein können. Den Knoten und Kanten können Eigenschaften zugeordnet werden, sodass sich mithilfe von Graphen komplexe Entscheidungsprobleme modellieren, visualisieren und mit speziellen Algorithmen lösen lassen. Die Graphentheorie ist auf den ungarischen Mathematiker Dénes König zurückzuführen, der sich 1935 mit den Strukturen und Eigenschaften von Graphen befasste. Ein häufig verwendetes graphentheoretisches Verfahren zur Planung betrieblicher Abläufe ist die Netzplantechnik, deren erste Grundzüge Leonhard Euler bereits 1736 entwickelt hat. Verfahren der Netzplantechnik ermitteln die optimale Abfolge von sich bedingenden Aktivitäten eines Projektes und identifizieren mögliche Engpässe (Eiselt und Sandblom 2000, Ellinger et al. 2003, Harris et al. 2000, Müller-Merbach 1973).

Nur wenige Veröffentlichungen beschäftigen sich mit der Optimierung operativer Aquakulturprozesse mittels graphentheoretischer Instrumente. Yu und Leung (2005) formulieren

ein Netzwerkmodell zur Optimierung operativer Prozesse eines Garnelenmastbetriebes auf Hawaii, der über mehrere voneinander getrennte Kreisläufe und Becken verfügt. Untersuchungsziel ist die Ermittlung optimaler Besatz- und Erntezeitpunkte unter Berücksichtigung von biologischen (Wachstum, Sterblichkeit, Gewichtsverteilung zum Mastende) und wirtschaftlichen Bedingungen (Futterkosten, Setzlingskosten, Absatzpreise, Arbeits-, Mastplatz- und Nachfragebegrenzungen). Der verwendete Lösungsalgorithmus ermittelt für einen Planungszeitraum von einem Jahr zulässige Durchlaufmengen an Garnelen für das aus Teichen und operativen Entscheidungen bestehende Netzwerk unter der Vorgabe, die Produktionsmenge zu maximieren.

Yu et al. (2006) entwickeln das Modell von Yu und Leung (2005) weiter. Ein Schwerpunkt dieser Studie liegt jedoch auf der Modellierung des Wachstums. Statt Wachstumstabellen (*constant growth charts*) zu verwenden, wird ein künstliches neuronales Netzwerkmodell (*neural growth network model*) konzipiert. Um den Einfluss der Sterblichkeitsrate, des Wachstums, der saisonalen Preisschwankungen und der zur Verfügung stehenden Arbeitskraft zu analysieren, werden Szenarien entwickelt und ihr Einfluss auf die gewinnmaximale Produktionsplanung wird diskutiert.

2.3 Entscheidungsbaumverfahren

Entscheidungsbäume stellen Entscheidungsprozesse und -regeln auf eine spezielle, normierte Weise dar und veranschaulichen aufeinanderfolgende, hierarchische Entscheidungen. Auf diese Weise können auch betriebliche Entscheidungsprobleme abgebildet werden. Entscheidungsbaumverfahren dienen neben Schrittaben- und heuristischen Verfahren zur Lösung von Problemen mit Ganzzahligkeitsbedingungen. Das Wesen von Entscheidungsbaumverfahren ist die Aufzählung und Berechnung aller möglichen Lösungen sowie die Auswahl der besten, die sogenannte Enumeration. Grundsätzlich lassen sich gemäß ihrem Enumerationsverlauf drei Verfahrensgruppen unterscheiden:

- 1) Die vollständige Enumeration berechnet sämtliche möglichen Lösungen und wählt aus ihnen die beste aus.
- 2) Bei der begrenzten Enumeration wird die Berechnung einer neuen Lösung abgebrochen, wenn der vorläufige Zielfunktionswert schlechter ist als der der besten bisher bekannten Lösung.
- 3) Das Branch-and-Bound-Verfahren zerlegt zunächst die Menge aller möglichen Lösungen in Teilmengen (*branching*). Anschließend wird für jede Teilmenge eine Grenze bestimmt, über bzw. unter der der jeweilige Zielfunktionswert liegen soll

(*bounding*). Dieses Verfahren wird wiederum für jede Teilmenge durchgeführt, wobei diejenigen Lösungszweige nicht weiter betrachtet werden, die die Anforderungen an den Zielfunktionswert nicht erfüllen (Ellinger et al. 2003, Jensen 2001).

Die bereits vorgestellte Studie von Yu und Leung (2005) stellt das entwickelte Netzwerkmodell zur Optimierung von Garnelenmastprozessen in Form eines Entscheidungsbaums dar und verwendet zur Lösung das Branch-and-Bound-Verfahren.

Forsberg und Guttormsen (2006) illustrieren, welchen Einfluss Preisinformationen auf die Produktionsplanung und den Betriebserfolg haben. Dazu werden am Beispiel eines Lachsproduktionsbetriebes zunächst Preisszenarien entwickelt, die Entscheidungsmöglichkeiten in Entscheidungsbäumen abgebildet und so die optimale Abfolge von Entscheidungen ermittelt.

2.4 Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung

Unter gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung sind lineare Optimierungsverfahren zu verstehen, in denen einige Variablen ganzzahlige Werte annehmen müssen. Viele betriebliche Planungsprobleme, wie etwa die Planung von Produktionsprogrammen oder die Belegung von Maschinen, erfordern ganzzahlige Lösungen. Ein zentrales Verfahren zur Lösung von Problemen mit Ganzzahligkeitsbedingungen ist das Schnittebenenverfahren, das 1957 von Ralph E. Gomory publiziert wurde. Dabei werden zunächst nicht-ganzzahlige Optimallösungen berechnet (Relaxierung des ganzzahligen Problems), dann zusätzliche Schnittebenen eingefügt. Eine Schnittebene ist eine zusätzliche Restriktion, die von allen zulässigen Punkten erfüllt wird, aber nicht von der aktuellen Lösung. Wird die Restriktion hinzugefügt, wird deshalb beim erneuten Lösen eine andere Lösung gefunden. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis eine ganzzahlige Lösung gefunden wird, die dann automatisch auch optimal für das ganzzahlige Problem ist, oder bis keine begrenzenden Schnittebenen mehr gefunden werden. Als alleiniges Lösungsverfahren ist es meist nicht ausreichend, liefert aber gute duale Schranken für die zu lösenden Optimierungsprobleme. Daher wird es oft mit Branch-and-Bound-Verfahren zum sogenannten Branch-and-Cut-Verfahren kombiniert, insbesondere zur Lösung ganzzahlig linearer Optimierungsprobleme (Eiselt und Sandblom 2000, Ellinger et al. 2003, Martin 1999).

Einige Entscheidungsvariablen in der Aquakulturproduktion haben Ganzzahligkeitscharakter. So können beispielsweise Becken nur komplett oder gar nicht in Betrieb genommen werden und vorgegebene Chargengrößen nur insgesamt oder überhaupt nicht genutzt werden. Daher lassen sich eine Reihe von Veröffentlichungen finden, die zur wirtschaftlichen

Tab. 2: Ausgewählte Veröffentlichungen zur wirtschaftlichen Optimierung von Aquakulturprozessen mittels gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung (eigene Darstellung)

Autor	Optimierungsobjekt	Aktivitäten (Anzahl)	Restriktionen (Anzahl)	Planungszeitraum (Entscheidungspunkte)	Anwendungsbeispiel
Hatch und Atwood (1988)	Qualifizierung, Quantifizierung und Terminierung von Besatz und Ernte	Kauf, Verkauf (-)	Cashflow, Teichkapazität, Laichmenge (-)	-	Welsproduktion
Hatch et al. (1989)	Quantifizierung und Terminierung von Besatz und Ernte, vertikaler Integrationsgrad	kontinuierlich: Fischbrutproduktion; ganzzahlig: Eier-, Setzlings- und Speisefischproduktion (-)	Teichkapazität (-)	-	Welsproduktion
Shaftel und Wilson (1990)	Quantifizierung und Terminierung von Besatz und Ernte	kontinuierlich: Verkauf (1430); ganzzahlig: Setzlingskauf (51)	Besatzdichte, Erntemenge, Beckenkapazität (2858)	1 Jahr (52)	Garnelenmast
Wilson et al. (1991)	Quantifizierung und Terminierung von Besatz und Verkauf, Technologieevaluation	Kauf, Verkauf (kontinuierlich: 54; ganzzahlig: 8)	Besatzdichte, Erntemenge, Besatzmenge (106)	¾ Jahr (9)	Garnelenmast
Clayton (1995)	Terminierung und Quantifizierung des Besatzes, statische Beckenallokation	Kauf, Belegung von Becken und Produktionslinien (-)	Besatzdichte, Becken (-)	-	Welsmast
Forsberg (1999)	Terminierung, Quantifizierung von Besatz und Verkauf, Untersuchung zweier Erntestrategien	kontinuierlich: Kauf; ganzzahlig: Verkauf (-)	Erntemenge, Futtermenge, Biomasse (-)	2 Jahre (24)	Lachsmast
Jensson und Gunn (2001)	Terminierung, Quantifizierung und Qualifizierung der Ernte	Teil 1: Verkauf (936, kontinuierlich), Verkaufsmenge (432, ganzzahlig); Teil 2: Verkauf (1656, kontinuierlich)	Teil 1 (1470): Erntemengen, Zahl der Ernten; Teil 2 (1320): Nachfrage, Käfigkapazität, Erntemengen	2 ¼ Jahre (27)	Lachsmast

Optimierung von Aquakulturprozessen gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung verwenden, wie Tab. 2 aufführt.

So entwickeln Hatch und Atwood (1988) ein gemischt-ganzzahliges lineares Programm und modellieren mittels Target-MOTAD Ertragsunsicherheit. Auf Basis einer Datenerhebung in Alabama und einer statistischen Auswertung wird eine durchschnittliche, repräsentative Aquakulturanlage zur Welsproduktion konzipiert, auf die das Optimierungsmodell angewendet wird. Der Wachstumsprozess der Welse gliedert sich grob in vier Stadien: 1) Laich, 2) Fischbrut, 3) Fingerlinge und 4) Speisefisch. Unter Berücksichtigung der Liquidität, der Teichkapazität und der maximal zu beschaffenden Laichmengen werden für den Besatz wie das Abfischen optimale Mengen, Wachstumsstadien und Zeitpunkte ermittelt. Ganzzahlige Entscheidungsvariablen bilden dabei die Struktur der Aquakulturanlage ab (bestehend aus einer bestimmten Anzahl von Teichen).

Der Ansatz wird von Hatch et al. (1989) aufgenommen und zusätzlich zur Einkommensunsicherheit mithilfe sogenannter Chance Constraints abgebildet. Chance Constraints sind Nebenbedingungen, die nicht absolut bindend sind, sondern nur mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit erfüllt werden müssen. Zur Lösung des Problems ist das stochastische Optimierungsmodell zunächst in ein deterministisches Ersatzmodell umzuwandeln. Dieses enthält in der Regel quadratische Restriktionen und kann daher mit Lösungsmethoden der linearen Programmierung nur nach entsprechender Linearisierung (Zerlegung in lineare Teilmodelle) gelöst werden (Blohm und Lüder 1985). Die so erhaltene Lösung hängt stark von der Wahl der Eintrittswahrscheinlichkeit der Nebenbedingungen ab. Diese wesentliche Information liefert nicht der Ansatz selbst, sondern wird vom Anwender extern bestimmt. Laut Maßmann (2006, S. 104) umgibt die Lösung daher immer „der Hauch der Willkür und ist zumindest angreifbar“. Unter Verwendung der Daten der Vorgängerstudie wird somit der optimale Diversifikationsgrad ermittelt, d. h. es wird der optimale Anteil der Laich-, Fischbrut-, Setzlings- und Speisefischproduktion an der Gesamtproduktion berechnet.

Shaftel und Wilson (1990) untersuchen mittels gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung die Mastprozesse von Garnelen, die in einer Versuchsanlage in Arizona gehalten werden. Über einen Planungszeitraum von einem Jahr werden die optimalen Zeitpunkte und Mengen für Besatz und Ernte errechnet. Dabei wirken die maximale Besatzdichte, die Beckenkapazität sowie die maximal pro Periode vermarktbar erntemenge beschränkend. Aufgrund von Kannibalismus ist der Wiederbesatz erst nach kompletter Räumung eines Beckens möglich. Dieser Zusammenhang wird mittels ganzzahliger Variablen abgebildet. Die

ganzahligen Entscheidungsvariablen des linearen Modells erhöhen die Rechenzeit und machen eine Zerlegung des Gesamtproblems in vier Teilprobleme notwendig.

In einer späteren Studie nehmen Wilson et al. (1991) Bezug auf Shaftel und Wilson (1990) und entwickeln ein gemischt-ganzzahliges Modell, das den Besatz und die Ernte einer Garnelenmastanlage optimal terminiert und quantifiziert. Zudem werden Szenarien bezüglich möglicher technologischer Veränderungen und deren Konsequenzen aufgestellt und analysiert, wie etwa die Erhöhung der maximalen Besatzdichte durch Leistungsverbesserung der Filteranlage.

Clayton (1995) bezieht sich wiederum auf die Untersuchungen von Shaftel und Wilson (1990) sowie Wilson et al. (1991) und wendet das Modell in abgewandelter Form für die Mast von Welsen an. Der Wachstumsprozess wird durch die Zerlegung in diskrete Alters- bzw. Gewichtsklassen modelliert. Statt von unterschiedlichen möglichen Verkaufsgewichten auszugehen, wird ein fixes Mastendgewicht bzw. eine fixe Mastdauer unterstellt; so sind ausschließlich die Menge und der Zeitpunkt des Besatzes zu optimieren. Darüber hinaus ermittelt Clayton für eine repräsentative Periode die optimale Belegung der Becken, wobei er eine Vorentscheidung über den zeitlichen Abstand der Ernten und die Einteilung der Becken in Produktionslinien trifft.

Forsberg (1999) entwickelt seine Vorläuferstudie (Forsberg 1996) fort und wendet das neue Modell auf Lachsmastprozesse in küstennahen Netzgehegen in Norwegen an. Ganzahligkeitsbedingungen modellieren die Erntemengen in Abhängigkeit von den Bootskapazitäten. Ergebnis sind Besatz- und Erntepläne für einen Zeitraum von zwei Jahren. Außerdem werden zwei unterschiedliche Ernteverfahren untersucht: Zum einen besteht die Möglichkeit, im Rein-Raus-Verfahren nach einer vorbestimmten Mastdauer ein Netzgehege komplett zu räumen (*batch harvesting*). Zum andern können vorzeitig die größten Tiere ab-sortiert und die verbleibenden Fische weitergemästet werden (*graded harvesting*). Bei beiden Verfahren wird davon ausgegangen, dass Fische während ihrer Mast das Gehege nicht wechseln und unterschiedliche Partien nicht vermischt werden. Die Vorteilhaftigkeit dieser Erntestrategien wird mithilfe von Szenarien analysiert.

Jensson und Gunn (2001) befassen sich mit den Prozessen eines Aquakulturbetriebs, der Lachse vor der Küste Islands mästet. Im Mittelpunkt der Studie stehen die Optimierung des Abfischens mittels gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung und die Modellierung des Fischwachstums. Unter Berücksichtigung von Nachfrageschwankungen, der Netzgehegekapazität, maximaler Erntemengen sowie einer maximalen Anzahl von Ernteaktivitäten pro

Netzgehege werden optimale Erntezeitpunkte und -mengen berechnet. Die gehaltenen Lachse lassen sich acht Gewichtsklassen eindeutig zuordnen, wobei Fische der fünf höchsten Gewichtsklassen vermarktungsfähig sind. Der Gewichtsklassenwechsel wird in Anlehnung an Forsberg (1999) modelliert. Zur Vereinfachung der Berechnung wird das Modell in ein aggregiertes Planungsmodell (Teilmodell 1) und ein Modell zur Planung der Ernteprozesse (Teilmodell 2) zerlegt, wobei das Teilmodell 1 die Ergebnisse des Teilmodells 2 aufgreift.

2.5 Dynamische Programmierung

Die dynamische Programmierung stellt ein häufig verwendetes Verfahren des Operations Research dar. Um Entscheidungsprobleme mithilfe der dynamischen Programmierung zu lösen, ist die Gesamtentscheidung in eine Folge von sich bedingenden Teilentscheidungen zu zerlegen. Wird ein Problem diskret modelliert, ist es in sogenannte Stufen und Zustände zu abstrahieren. Stufen sind Entscheidungspunkte innerhalb des Entscheidungsprozesses. Bezogen auf Prozesse der Aquakultur können Stufen beispielsweise Zeitpunkte innerhalb des Mastprozesses abbilden, zu denen über das Fortsetzen oder Beenden der Mast entschieden wird. Die stufenweise Zergliederung muss nicht zwingend eine zeitliche Abfolge modellieren. Zustände bilden die Eigenschaften ab, die ein System nach den getroffenen Entscheidungen annehmen kann – in der Aquakultur beispielsweise die Anzahl oder das Lebendgewicht der gemästeten Fische zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die optimale Lösung des Gesamtproblems erfolgt sequentiell, indem Lösungen für die Teilprobleme auf den jeweiligen Stufen und unter den jeweiligen Entscheidungsalternativen ermittelt werden. Damit ein Entscheidungsproblem mittels dynamischer Programmierung modelliert und gelöst werden kann, muss es folgende Eigenschaften haben:

- a) Das Gesamtmodell ist in Teilmodelle zerlegbar und jedes Teilmodell ist einer Stufe zuzuordnen.
- b) Jedes Teilmodell ist durch Entscheidungsvariablen abzubilden, die von Restriktionen begrenzt sein können.
- c) Auf jeder Stufe kann aus einer Menge an Entscheidungsalternativen gewählt werden.
- d) Mit jeder Entscheidung ist eine Transformation der Zustandsvariablen von der betrachteten Stufe zur nachfolgenden Stufe verbunden.
- e) Die Entscheidung auf einer Stufe kann ausschließlich auf Basis des Informationsstands der Vorstufe erfolgen (Markow-Bedingung).
- f) Die Zielfunktion lässt sich zerlegen.
- g) Die Zielfunktion verläuft streng monoton.

h) Entweder der Anfangs- oder der Endzustand des Gesamtprozesses ist zu Planungsbeginn bekannt.

Allgemein lässt sich die zu maximierende oder zu minimierende Zielfunktion der dynamischen Programmierung wie folgt darstellen:

$$(4) \quad ZFW = \sum_{s=1}^S g_s(y_{s-1}, x_s) = \max!(\min!) \quad \text{mit } s = 0, 1, \dots, S$$

Dabei steht:

$s = 0, 1, \dots, S$ für den Index der Stufen,

$g_s(y_{s-1}, x_s)$ für die stufenbezogene Zielfunktion,

y_s für die Zustandsvariable der Stufe, wobei $y_s \in Y_s$ ist, und

x_s für die Entscheidungsvariable der Stufe, wobei $x_s \in X_s(y_{s-1})$ ist.

Neben der hier aufgeführten additiven Verknüpfung der stufenbezogenen Zielfunktion lassen sich mit dynamischer Programmierung auch multiplikativ verknüpfte Zielfunktionen lösen. Die Zielfunktion hat die Nebenbedingungen

$$(5) \quad y_s = r_s(y_{s-1}, x_s),$$

$$(6a) \quad y_s = AB \text{ oder}$$

$$(6b) \quad y_s = EB,$$

mit:

$r_s(y_{s-1}, x_s)$ für die Transformationsfunktion,

AB für den Anfangsbestand und

EB für den Endbestand.

zu erfüllen. Dabei gibt die Transformationsfunktion (5) an, in welchen Zustand ein System übergeht, wenn eine bestimmte Entscheidung auf einer vorherigen Stufe getroffen wird. Das Grundkonzept der dynamischen Programmierung ist auf Richard Bellman zurückzuführen, der 1957 den nach ihm benannten Lösungsalgorithmus entwickelte. Inzwischen ermöglicht eine Vielzahl von weiter- und neuentwickelten Algorithmen die zuverlässige und schnelle Lösung komplexer dynamischer Optimierungsprobleme (Ellinger et al. 2003, Hazell und Norton 1986, Kennedy 1986, Kirk 1970, Lew und Mauch 2007, Müller-Merbach 1973).

Mit der Weiterentwicklung von Computertechnik und Lösungsverfahren fand die dynamische Programmierung ab den 1960er Jahren vermehrt Anwendung auf praktische industrielle Entscheidungsprobleme. Da sich viele landwirtschaftliche Entscheidungen ebenfalls als

eine Folge von Teilentscheidungen auffassen lassen, wurden in den 1970er und 1980er Jahren mithilfe dynamischer Programmierung für eine Vielzahl betrieblicher Prozesse Optimierungsansätze entwickelt, wie etwa für die Schweine- und Rindermast, die Legehennenhaltung oder die Getreideernte. Produktionsprozesse klassischer Nutztierhaltung und Aquakulturprozesse weisen zahlreiche Parallelen auf. So findet sich auch eine Reihe von Veröffentlichungen, die sich mit der wirtschaftlichen Optimierung von Aquakulturprozessen mittels dynamischer Programmierung beschäftigen.

Rauch et al. (1975) entwickeln ein dynamisches Optimierungsmodell und wenden es auf das Produktionsmanagement von Hummern an. Die Zustandsvariablen beschreiben die Anzahl der Tiere pro Partie, ihr Durchschnittsgewicht und die anfallenden Produktionskosten. Entscheidungen werden über die Wassertemperatur, den Wasseraustausch, die Wasseraufbereitung, die Besatzdichte, die Futtermenge und den Futtertyp getroffen.

Die Studie von Mendelssohn (1978) beschreibt ein dynamisches Programmierungsmodell zur Ermittlung der optimalen Erntestrategie, wobei die mathematische Herleitung und Darstellung des Modells sowie die theoretische Diskussion im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen. Zur Abbildung des Fischwachstums wird das Konzept von Beverton und Holt (1957) verwendet, das ursprünglich die Entwicklung von frei im Meer lebenden Fischen modelliert. Dazu ist der Betrachtungszeitraum in diskrete Zeitabschnitte zu zerlegen. Das Modell berücksichtigt Annahmen bezüglich Fruchtbarkeit sowie Tragfähigkeit des Lebensraums und prognostiziert die erwartete Anzahl von Tieren einer künftigen Generation.

Talpaz und Tsur (1982) befassen sich mit der Prozessoptimierung eines extensiv wirtschaftenden Karpfenmastbetriebs, der in eine Baumwollplantage integriert ist, und verwenden dabei ebenfalls das Wachstumsmodell von Beverton und Holt (1957). Die mittels dynamischer Programmierung ermittelten optimalen Mastpläne enthalten den Anfangsbesatz, die Mastdauer sowie den Wasseraustausch und berücksichtigen dabei variierende Markt- und Umweltbedingungen. Auf Basis der Ergebnisse wird zudem eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Die Autoren weisen auf den praktischen Nutzen des Planungsmodells hin, der jedoch stark von Umfang und Qualität der zuvor erfassten betrieblichen Daten abhängt.

Das dynamische Programm von Lillestøl (1986) bildet die wirtschaftlichen Prozesse eines typischen Lachsmastbetriebs in Norwegen ab. Dazu werden unterschiedliche Teilmodelle entwickelt, die das Sammeln von Informationen, die Fütterung sowie die Terminierung des Abfischens optimieren.

Karp et al. (1986) setzen die dynamische Programmierung zur Ermittlung optimaler Zeitpunkte und Entwicklungsstadien zur Ernte und zum Besatz von Garnelen ein. Dazu werden

sowohl ein deterministisches Modell angefertigt, in dem die Umgebungsparameter kontrollierbar sind, als auch ein stochastisches, in dem die Umgebungsparameter nicht kontrollierbar sind. Der Vergleich beider Modellergebnisse ermöglicht Aussagen über den Wert der Steuerbarkeit des Systems und den Wert von Informationen über die stochastische Umwelt.

Die Untersuchung von Bjørndal (1988) konzentriert sich auf die Optimierung von Ernteprozessen in der Aquakulturproduktion unter Verwendung dynamischer Programmierung. Um die Nutzbarkeit des Modells für Fischarten zu demonstrieren, wird es empirisch für Abläufe der Lachs- und Steinbuttmast angewandt. Das biologische Modell bildet in Anlehnung an Beverton und Holt (1957) das Wachstum und die unterschiedlich verteilten Wachstumspotentiale von Fischen einer Altersklasse⁴ ab. Wirtschaftlich kann auf die Gewichtsverteilung innerhalb einer Altersklasse mit selektivem Abfischen reagiert werden. Verkaufserlöse, Ernte- und Futterkosten bilden die Grundlage für die Bewertung der Handlungsalternativen. So werden für verschiedene Kalkulationszinssätze optimale Mastrhythmen errechnet.

Das Modell von Bjørndal (1988) wird von vielen Autoren aufgegriffen und weiterentwickelt. So untersucht Arnason (1992) den Zusammenhang zwischen optimaler Fütterungsplanung und optimalem Erntezeitpunkt. Die Ergebnisse werden anhand eines numerischen Beispiels veranschaulicht und anschließend verallgemeinert. Hean (1994) hingegen betrachtet neben den Ernteterminen auch die Besatzmengen und wendet sein Modell auf die Mastoptimierung von Lachsen an. Dabei werden insbesondere die Kosten des Einsetzens der Setzlinge variiert und die Auswirkungen auf die optimale Besatz- und Erntestrategie untersucht.

Heaps (1995) wiederum bezieht sich auf die Konzepte von Arnason (1992) und Hean (1994) und erweitert sie um ein Wachstumsmodell, das den Einfluss der Besatzdichte berücksichtigt. Neben Besatz und Ernte wird auch das Selektieren (*culling*)⁵ als Handlungsalternative modelliert.

Pascoe et al. (2002) konzentrieren sich in ihrer Untersuchung auf die Berücksichtigung von Unsicherheit. Dabei dient der Kalkulationszinssatz zur Darstellung des Produktionsrisikos unter der Annahme, dass die Kalkulationszinsen nicht allein Opportunitätskosten, sondern das unternehmerische Risiko der Investition abbilden. Für die Mast von Garnelen, einer Art mit relativ kurzer Mastdauer (ca. 150 Tage) und hohen saisonalen Preisschwankungen, sowie

⁴ Bjørndal (1988, S. 268) verwendet den Begriff „yearclass“ und definiert diesen wie folgt: “When fish are released in an enclosure such as a fish farm or a cordoned-off fjord, the fish are all the same age and are called a yearclass.”

⁵ In Abschnitt 3.2.1 wird näher auf die Bedeutung des Selektierens als betriebliche Handlungsalternative eingegangen.

Seebrassen, einer Art mit relativ langer Mastdauer (ca. 550 Tage) und stabileren Marktpreisen, werden optimale Erntestrategien entwickelt. Zur Abbildung des Wachstums der Tiere wird das Modell von Beverton und Holt (1957) verwendet. Das Gesamtmodell ist zudem um einen Modellteil zur Fütterungsoptimierung erweitert. Die Modellergebnisse werden mit der bisherigen Managementpraxis verglichen und die Unterschiede sowie der Einfluss des Risikos analysiert.

Das dynamische Programm von Leung und Shang (1989) zur Untersuchung der Garnelenmast ist in 26 Stufen mit einem zeitlichen Abstand der Stufen von jeweils zwei Wochen untergliedert. Die Zustandsvariablen geben die Länge der gemästeten Garnelen an. Auf jeder Stufe können Mastprozesse gestoppt oder weitergeführt werden. Optimierungsergebnisse sind optimale Besatz- und Erntepläne.

Cacho und Kinnucan (1991) verwenden dynamische Programmierung zur Optimierung von Welsmastprozessen. Insbesondere wird der Zusammenhang zwischen Fütterungsstrategie und Mastendgewicht betrachtet. Da die Fütterung nicht ad libitum erfolgen kann, ist nicht allein die optimale Futterzusammensetzung (Proteinanteil), sondern auch Zeitpunkt und Menge der Futtergabe auf die Bedingungen einer Aquakulturanlage (Wassertemperatur, Wasserqualität etc.) abzustimmen. Das Modell soll einen praktischen Nutzen auch für die Produktionssysteme liefern, die andere Fischarten in anderen geographischen Regionen erzeugen.

Kazmierczak (Junior) und Caffey (1995) befassen sich unter Verwendung dynamischer Programmierung mit der Mastoptimierung von Buntbarschen. Das eigentliche ökonomische Modell enthält biotechnische Teilmodelle, die das Wachstum, den Stickstoffeintrag und den Sauerstoffbedarf der Fische abbilden. Bezüglich der Futterzusammensetzung, der Abbauleistungen des biologischen und mechanischen Filters werden Annahmen getroffen, Szenarien gebildet und jeweils die optimale Mastdauer ermittelt.

Die Untersuchung von Mistiaen und Strand (1999) nimmt auf Bjørndal (1988) sowie Arnason (1992) Bezug. Da Fische in Gewichtsklassen gehandelt werden und für besonders schwere Fische Preisaufläge gezahlt werden, verlaufen Schlachtpreiskurven nicht stetig sondern sind treppenförmig. Dies beeinflusst die Ermittlung optimaler Ernte-, Fütterungs- sowie Selektionspläne entscheidend. Das Modell wird auf die Mast von Seebrassen in Griechenland angewandt.

Perkins und Fleming (2000) untersuchen mithilfe dynamischer Programmierung, ob das Halten von Stören eine Einkommensalternative für Tabakproduzenten in Kentucky darstellt.

Über einen Planungszeitraum von 20 Jahren analysieren sie verschiedene Szenarien, unter anderem auch mit anderen Fischarten kombinierte Produktionssysteme.

Rupasinghe und Kennedy (2006) beschäftigen sich mit der wirtschaftlichen Mastoptimierung von Barramundi in Australien. Mögliche Entscheidungen innerhalb des dynamischen Modells betreffen den Besatz, die Fütterung, die Temperaturregelung sowie die Mastdauer. Die Studie berücksichtigt Schwankungen von Systemparametern während des Planungszeitraums. Die Parameterschwankungen beeinflussen die optimale Mastdauer maßgeblich. So wird eine optimale Folge von Mastprozessen mit variabler Mastdauer unter der Annahme eines unendlichen Planungshorizonts ermittelt.

Leung und Hochman (1990) sowie Hochman et al. (1990) wenden dynamische Programmierung auf die betrieblichen Prozesse einer fiktiven Garnelenmastanlage an. Sie fassen das Fischwachstum als ein Problem von wachsenden Beständen (*growing inventory*) auf und berechnen optimale Erntemengen und Zeitpunkte unter Beachtung von zufallsverteilten Lebendgewichten und Marktpreisen.

2.6 Dynamisch-lineare Programmierung

Das Konzept der dynamisch-linearen Programmierung versucht die Vorteile klassischer linearer Programmierung mit denen dynamischer Programmierung zu koppeln. Der Ansatz unterstützt die Planung und Entscheidung über Nutzungsalternativen von natürlichen Ressourcen. Ein Entscheidungsproblem wird dabei in Planungsintervalle und Zustände zerlegt. Planungsintervalle gliedern den gesamten Planungszeitraum in unterschiedlich oder auch gleich lange Zeitabschnitte. Zustände geben – in Anlehnung an das Konzept der dynamischen Programmierung – Aufschluss über die physischen Eigenschaften des Systems zu Beginn und am Ende eines Planungsintervalls. Aus einer Menge zulässiger Handlungen kann zu Beginn eines Planungsintervalls eine Handlung gewählt werden, die das System so beeinflusst, dass es am Ende des Planungsintervalls in einen bestimmten neuen Zustand versetzt wird. Den Handlungen, die einen Zustand in einen bestimmten anderen transformieren, sind Kosten und Leistungen zugeordnet. Die Handlungen betreffen immer eine Ressourcenklasse. Dabei gliedert sich die Gesamtressource (z. B. eine Aquakulturanlage) in Ressourcenklassen (z. B. Wasserkreisläufe, deren Filter eine bestimmte Abbauleistung aufweisen), die über ähnliche Produktivität verfügen und auf mögliche betriebliche Handlungen ähnlich reagieren.

Unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen kann somit eine Zielfunktion optimiert und eine bestmögliche Abfolge von Handlungen ermittelt werden, die eine Ressource über

eine bestimmte Zeit nutzen. Modelle der dynamisch-linearen Programmierung werden in der Programmiersprache (*interface language*) DLPI formuliert. Zusammenfassend lassen sich folgende Vorteile des Konzeptes nennen:

- a) Im Vergleich zu anderen Sprachen ist DLPI flexibler und einfacher zu erlernen.
- b) Modellierung und Optimierung sind streng voneinander getrennt.
- c) Modellierungshilfen, vergleichbar mit Matrixgeneratoren zur Erstellung großer linearer Programme, erleichtern die Problemformulierung.
- d) Viele Erweiterungsmöglichkeiten, insbesondere die Berücksichtigung von Unsicherheit, lassen die Abbildung komplexer praktischer Entscheidungsprobleme zu.

Das Konzept und seine Anwendungsmöglichkeiten werden umfassend von Nazareth (2001) beschrieben, wobei die Grundzüge zur Formulierung und Lösung von dynamisch-linearen Programmen bereits in den 1980er Jahren von John L. Nazareth entwickelt wurden.

Die dynamisch-lineare Programmierung hat Anwendung auf verschiedene praktische Entscheidungsprobleme gefunden, wie etwa auf Prozesse der extensiven Rindermast, der Forstwirtschaft, der Unterhaltung von Infrastruktur (Straßennetze), der Energieerzeugung etc. Ludwig und Walters (1982) sowie Walters (1981) ermitteln zwar mittels dynamisch-linearer Programmierung optimale Erntestrategien für die Fischerei und Besatzmengen zur Unterstützung des natürlichen Fischbestandes, doch lassen sich keine Studien finden, die auf diese Weise wirtschaftliche Aquakulturprozesse optimieren.

2.7 Nicht-lineare Optimierung

Für viele praktische Entscheidungsprobleme stellen lineare Modelle nur eine sehr grobe Näherung dar oder werden den realen Gegebenheiten nicht gerecht. Entscheidungsmodelle der nicht-linearen Optimierung verfügen über eine nicht-lineare Zielfunktion und/oder mindestens eine nicht-lineare Nebenbedingung und versuchen so die Abbildungsqualität zu erhöhen. Damit sind nicht-lineare Optimierungsmodelle hinsichtlich ihrer Struktur eine Verallgemeinerung linearer Modelle. Die Formulierung wie auch Lösung sind komplexer und rechenzeitintensiver als die linearer Modelle. Doch insbesondere für Optimierungsprobleme mit einer linearen Zielfunktion und nicht-linearen Restriktionen, die die Realitätsnähe vieler Modelle erheblich verbessern, sind eine Reihe leistungsfähiger Lösungsverfahren entwickelt worden (Ellinger et al. 2003, Müller-Merbach 1973, Neumann 1975).

Zur Lösung von nicht-linearen Optimierungsproblemen stehen zahlreiche Lösungsverfahren zur Verfügung, die sich danach einteilen lassen, ob und inwieweit Funktionen abgeleitet werden müssen:

- a) Zu ableitungsfreien Methoden zählt das Intervallhalbierungsverfahren, das den Zielfunktionswert schrittweise der optimalen Lösung annähert.
- b) Das Gradientenverfahren ist ein Lösungsverfahren, das die erste Ableitung zur Lösung nicht-linearer Optimierungsprobleme verwendet. Ausgehend von einem Näherungswert geben der Gradient und die Art des Entscheidungsproblems (Maximierung oder Minimierung) die Richtung vor, in der nach einem verbesserten Lösungswert gesucht wird. Das Verfahren wird wiederholt, bis sich der Zielfunktionswert nicht mehr erhöhen bzw. vermindern lässt.
- c) Für das Newton-Verfahren wird die zweite Ableitung benötigt. Dabei werden nicht-lineare Funktionen linearisiert, indem die Tangente eines bestimmten Ausgangspunktes und die Nullstelle der Tangente bestimmt werden. Die Nullstelle der Tangente dient als Näherung für die Nullstelle der nicht-linearen Funktion und als Ausgangspunkt für weitere Iterationen (Deuffhard und Hohmann 2002, Kistner 2003).

Der Einsatz nicht-linearer Optimierung auf praktische Entscheidungsprobleme erfolgt spärlich. Beim Vorliegen von nicht-linearen Zusammenhängen in der Realität werden oft lineare Modellansätze eingesetzt, da zum einen die Modellierungsverluste vernachlässigbar sind und zum andern die Modellierung und Lösung von linearen Modellen auch mit einer Vielzahl von Variablen und Nebenbedingungen von leistungsfähiger und benutzerfreundlicher Software unterstützt werden (Ellinger et al. 2003, Neumann 1975). Dementsprechend lassen sich nur wenige Untersuchungen finden, die sich mit der Optimierung von wirtschaftlichen Prozessen in der Aquakulturproduktion mittels nicht-linearer Optimierung beschäftigen.

In der Studie von Corey und English (1985) wird ein nicht-lineares Modell entwickelt, um die Futterkosten eines Lachsaufzuchtbetriebs zu minimieren. Dabei ist die Bedingung zu erfüllen, dass die gemästeten Fische innerhalb einer bestimmten Zeitspanne ein Zielgewicht erreichen. Die Untersuchung berücksichtigt unterschiedliche Umgebungsbedingungen und den möglichen Einsatz von beheizbaren und nicht beheizbaren Brutbecken. Die Lösung erfolgt in Anlehnung an das Newton-Verfahren. Anschließend werden die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse unterzogen.

Yu und Leung (2006) entwickeln ein nicht-lineares Modell, das das Wachstum und die Ernteprozesse in der Garnelenmast abbildet. Dabei ist das Garnelenwachstum von der gewählten Besatzdichte abhängig. So werden die optimale Besatzdichte, Erntemenge und der optimale Erntezeitpunkte ermittelt und die wirtschaftlichen Vorteile von drei Erntestrategien untersucht: Das vorzeitigen Abfischen eines Teils der Tiere (*partial harvesting*), das kom-

plette Abfischen aller Tiere eines Beckens (*single batch harvesting*) und das stufenweise Abfischen marktfähiger Tiere (*gradual thinning*).

2.8 Simulation

Simulation findet oft für diejenigen Entscheidungsprobleme Anwendung, die zu komplex sind, um sie in einem geschlossenen, formalen Modell abbilden zu können. Damit gehören Simulationsverfahren neben der Netzplantechnik und der linearen Programmierung zu einer der wichtigsten Methoden des Operations Research für die Praxis (Domschke und Drexl 1990). Simulationsergebnisse liefern neue Erkenntnisse und Erfahrungen über ein reales System, die einer optimalen Lösung nahekommen können und der Entscheidungsunterstützung dienen. Insbesondere die Entscheidungsalternativen komplexer stochastischer Systeme werden auf diese Weise untersucht, sodass sich Vorhersagen über die Zustände einzelner Systemkomponenten sowie über das System insgesamt treffen lassen. Simulation ersetzt damit aufwendige, technische Experimente und lässt sich damit zu den Verfahren der experimentellen Mathematik zählen.

Die Anwendung von Simulationsverfahren ist besonders geeignet, wenn die Entscheidungsprobleme die folgenden Eigenschaften haben:

- a) Ein vollständiges mathematisches Modell ist nicht verfügbar oder nicht zu vertretbaren Kosten zu entwickeln.
- b) Verfügbare analytische Methoden sind zu kompliziert oder ihr Einsatz ist so aufwendig, dass er nicht praktikabel ist.
- c) Der Einsatz analytischer Methoden macht Vereinfachungen erforderlich, die den Kern des vorliegenden Problems verfälschen.
- d) Die Durchführung von realen Experimenten ist zu komplex und zu kostspielig.
- e) Die Beobachtung des realen Systems ist zu teuer, zu zeitaufwendig oder mit irreversiblen Folgen (z. B. Konkurs des Unternehmens) verbunden.

Simulationsverfahren bilden nicht allein die Struktur, sondern auch das Verhalten, die Aktionen und Reaktionen von Systemen ab und beschreiben so den Wirkungsmechanismus eines Systems durch Abbildung einzelner Komponenten und Erfassung der wechselseitigen Abhängigkeiten. Formulierung und Lösung von Simulationsproblemen werden von einer Vielzahl spezieller Programmiersprachen und Softwareangebote unterstützt. Das Anwendungsgebiet von Simulationen zur Verbesserung von wirtschaftlichen Entscheidungen ist breit, beispielsweise bezüglich der Planung von Losgrößen und Bestellmengen oder der Aus-

wertung stochastischer Netzpläne (Berg und Kuhlmann 1993, Domschke und Drexl 1990, Müller-Merbach 1973).

Ebenso lässt sich eine Reihe von Studien finden, die das betriebliche Management und die Entscheidungsfindung in der Aquakulturproduktion mittels Simulationsverfahren unterstützen.

In der Untersuchung von Diana et al. (1988) wird ein Modell entwickelt, das die Produktion von Welsen in Thailand abbildet. Zum einen soll mit dem Modell das Wissen über die Fischphysiologie wie auch über die Managementpraxis konsolidiert und dokumentiert werden. Zum anderen können Vorhersagen über den zu erwartenden Ertrag einer Aquakulturanlage getroffen werden. Dabei wirken verschiedene Besatzdichten, Setzlingsgewichte und Beckentypen auf die Simulationsergebnisse ein. Die Ergebnisse durchlaufen zudem eine Sensitivitätsanalyse.

Rizzo und Spagnolo (1996) untersuchen mithilfe eines Simulationsmodells die betrieblichen Prozesse eines Aquakulturbetriebs zur Wolfsbarschproduktion. Dazu wird zunächst ein biologisches Modell zur Wachstumsabbildung aufgestellt. Die Wachstumsleistung wird von der Wassertemperatur, der Fütterung, dem Sauerstoffgehalt des Wassers sowie dem Wasseraustausch beeinflusst. Wirtschaftlichen Aktivitäten, wie dem Verkauf von Schlachtfisch, dem Kauf von Setzlingen und Futter sowie der Wasseraufbereitung, werden Kosten und Erlöse zugeordnet. So werden über einen Planungszeitraum von zwei Jahren die wirtschaftlichen Auswirkungen von Veränderungen der Systemparameter analysiert und für verschiedene Szenarien Managementstrategien bezüglich Besatz und Ernte entwickelt.

Cyrus und Pelot (1998) entwickeln ein Modell, das dem betrieblichen Management einer Aquakulturanlage per Simulation zusätzliche Informationen liefert. Für einen Beispielbetrieb, der Jakobsmuscheln produziert, wird ein Softwareprototyp angefertigt, wobei die relationale Datenbank, das zugehörige Entity-Relationship-Modell, der Berichtsgenerator und die Benutzeroberflächen des Prototypen näher vorgestellt werden. Anhand von Beispielrechnungen werden über einen Planungszeitraum von sechs Jahren die Mengen und Zeitpunkte von Ernte und Besatz und die damit verbundenen Kosten und Erlöse simuliert.

Bolte et al. (2000) entwickeln die Simulationssoftware POND und Ernst et al. (2000) AquaFarm zur Entscheidungsunterstützung in Aquakulturbetrieben. POND und AquaFarm ähneln sich. Viele Komponenten sind gemeinsam entwickelt worden und daher identisch. Im Zentrum der Betrachtungen steht ein Simulationsmodul, das neben physikalischen, chemischen und biologischen Prozessen auch wirtschaftliche Prozesse des Anlagen- und

Tiermanagements einbezieht. Auf diese Weise können Prozesse unterschiedlicher Anlagentypen und Fischarten simuliert und mögliche wirtschaftliche Ergebnisse ermittelt werden. Die Auswertungen auf Basis der wirtschaftlichen und technisch-biologischen Simulationsergebnisse sind graphisch und tabellarisch aufbereitet.

Tian et al. (2000) demonstrieren anhand eines Simulationsmodells die wirtschaftlichen Folgen unterschiedlicher Ernte- und Besatzstrategien für einen exemplarischen Garnelenmastbetrieb. Dazu werden Szenarien bezüglich des Besatz- und Ernterhythmus wie auch der Betriebsgröße entwickelt, simuliert und deren Auswirkungen diskutiert.

Halachmi et al. (2005) simulieren die operativen Prozesse einer Aquakulturanlage und ziehen Rückschlüsse für den Anlagenaufbau. Über einen Planungshorizont von zwei Jahren werden die Mastprozesse einer existierenden Aquakulturanlage untersucht, die in Israel Buntbarsche produziert. Die Simulation erzeugt Informationen über Besatz- und Erntezeitpunkte sowie die Auslastung von Produktionslinien, in die sich eine Aquakulturanlage gedanklich und/oder physikalisch gliedert. Damit können Aussagen über die Qualität des Anlagendesigns getroffen werden.

Das Simulationsmodell von Halachmi et al. (2005) wird von Halachmi (2006) sowie Seginer und Halachmi (2008) weiterentwickelt. Halachmi (2006) wendet es auf die Produktion von Zierfischen an. Seginer und Halachmi (2008) bilden die Schwankungen von Preisen, Nachfragemengen und der Temperatur und in Form von Sinuskurven ab und stellen für die Parameterschwankungen Szenarien auf. Für einen Planungszeitraum eines repräsentativen Jahres werden für die Szenarien Besatzstrategien entwickelt.

Wang et al. (2008) entwickeln ein Modell zur Simulation der Produktionsprozesse von Forellen in Durchflussanlagen. Neben einer Reihe biologischer (Fischwachstum, Sterblichkeit etc.) und technischer Prozesse (Wasseraufbereitung, Einsatz von technischem Sauerstoff etc.) werden auch operative Prozesse modelliert, insbesondere das Umsetzen von Fischen von einem Becken in ein anderes.

2.9 Wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren

In vielen Fällen genügen deterministische Modelle nicht, um ein reales System hinreichend zu beschreiben. Aufgrund fehlender oder unvollkommener Informationen über praktische Entscheidungsprobleme kommen stochastische Modelle zum Einsatz, die mithilfe von Wahrscheinlichkeitstheoretischen Verfahren formuliert und gelöst werden können. Stochastische Modelle enthalten Zufallsvariablen, die Vorgänge als Zufallsexperiment abbilden. Die Ereignisse – Ergebnisse dieser Experimente – hängen von den unterstellten Wahrscheinlichkeits-

verteilungen und deren Eigenschaften ab. Stochastische Sachverhalte können auf unterschiedliche Weise in Modellen des Operations Research berücksichtigt und gelöst werden. Zum einen werden stochastische Bestandteile in deterministische, klassische Verfahren integriert, wie etwa bei der linearen Programmierung in Form von Chance Constraints. Zum anderen stehen spezielle wahrscheinlichkeitstheoretische Verfahren zur Unterstützung operativer Entscheidungsfindung zur Verfügung. Zu diesen Verfahren, die auch zur Optimierung von wirtschaftlichen Aquakulturprozessen eingesetzt werden, zählen

- a) das Warteschlangenkonzept und
- b) das Konzept der Markow-Prozesse bzw. Markow-Ketten (Heller et al. 1978, Müller-Merbach 1973).

Die Warteschlangentheorie ist Anfang des 20. Jahrhunderts vom dänischen Mathematiker Agner K. Erlang entwickelt worden und ist eine im Rahmen des Operations Research häufig angewandte Teildisziplin der Wahrscheinlichkeitstheorie. Warteschlangen bilden sich vor Schaltern oder Abfertigungsstationen aller Art. Allgemein lassen sich Warteschlangensysteme durch Ankunfts- und Abfertigungsraten charakterisieren; dabei unterliegen Abfertigungsdauer und Ankunftsintervalle einer Exponentialverteilung. So können zu erwartende Wartezeiten und Längen der Warteschlangen ermittelt werden. Das Verfahren findet vielfache praktische Anwendung, wie etwa zur Untersuchung von Warteschlangen vor Informationsschaltern, Schleusen, Verkehrskreuzungen oder Maschinen einer Produktionslinie. Mit dem Warteschlangenkonzept können beispielsweise zur Kostenminimierung die optimale Anzahl eines Maschinentyps einer Produktionslinie und die optimale Kapazität eines Zwischenlagers ermittelt werden (Heller et al. 1978, Waldmann und Stocker 2004).

Halachmi (2007) entwickelt ein Warteschlangenmodell zur Optimierung des Anlagenaufbaus und der operativen Prozesse einer Aquakulturanlage zur Doradenmast. Die gehaltenen Fische durchlaufen drei Mastphasen und werden in jeder Phase in einem bestimmten Beckentyp gehalten. Das Durchlaufen der Beckentypen wird als Warteschlangensystem modelliert, wobei Wartezeiten zwischen den Mastphasen (Fisch ohne Becken) und Beckenleerstand (Becken ohne Fisch) annahmegemäß nicht zulässig sind. Teil der Rechenergebnisse sind neben der Anzahl der Becken eines Typs auch Besatzfrequenzen, Besatzmengen, Mastdauer und Sortierraten.

Markow-Prozesse, zurückzuführen auf den russischen Mathematiker Andrei A. Markow, sind spezielle stochastische Prozesse, die die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten künftiger Ereignisse berücksichtigen. Stochastische Prozesse, bestehend aus einer zeitlichen Abfolge von Zufallsvariablen, werden als Markow-Prozesse bezeichnet, wenn sie die sogenannte

Markow-Eigenschaft erfüllen. Diese besagt, dass künftige Ereignisse nur vom gegenwärtigen Zustand beeinflusst werden, nicht aber von der Vergangenheit. Wird der Betrachtungszeitraum nicht kontinuierlich, sondern als eine diskrete Folge von einzelnen Zeitpunkten aufgefasst, spricht man von Markow-Ketten. Da Markow-Ketten analytisch leicht lösbar sind und die vereinfachenden Annahmen für eine Vielzahl realer Probleme unterstellt werden, wird das Verfahren häufig verwendet (Heller et al. 1978, Hazell und Norton 1986).

In der Studie von Sparre (1977) werden Markow-Prozesse zur Entscheidungsunterstützung in der Haltung von Regenbogenforellen eingesetzt und optimale Besatz- und Erntezeitpunkte ermittelt. Darüber hinaus kommt zur Abbildung des Fischwachstums das Konzept der Markow-Ketten als Teilmodell mehrfach zum Einsatz. So wird in den Studien von Leung und Shang (1989), Rizzo und Spagnolo (1996), Forsberg (1996) und (1999) sowie Jenson und Gunn (2001) das Wachstum als Markow-Kette modelliert, während zur Optimierung der wirtschaftlichen Prozesse andere Verfahren Verwendung finden.

2.10 Prüfung ausgewählter Methoden auf Eignung für das Sachproblem

Nach Sichtung etablierter Optimierungsverfahren und deren Anwendung auf Aquakulturprozesse kann eine Vorentscheidung getroffen werden, welche Verfahren geeignet erscheinen, das vorliegende Sachproblem im Kern abzubilden und praxisnahe Ergebnisse zu erzeugen. Dazu zählen die dynamische Programmierung, die dynamisch-lineare Programmierung und die gemischt-ganzzahlige Programmierung. Diese Verfahren werden testweise auf das vorliegende Problem angewandt bzw. eine bereits vorgenommene Testanwendung wird näher untersucht. Außerdem wird eine bereits existierende Simulationssoftware erprobt. Die Prüfung der ausgewählten Methode wird in chronologischer Reihenfolge vorgestellt.

2.10.1 Ergebnisse einer Fallstudie mit dynamischer Programmierung

Winkelmann (2007) beschäftigt sich in ihrer Masterarbeit mit der Optimierung operativer Prozesse in mariner Aquakultur und entwickelt dazu exemplarisch ein dynamisches Programm für die Steinbuttmastanlage, die auch der vorliegenden Arbeit als Forschungsgegenstand dient. Da sich der Wachstums- und operative Entscheidungsprozess einfach und nachvollziehbar in voneinander abhängige Teilprozesse zerlegen lässt, scheint der Einsatz von dynamischer Programmierung zweckmäßig. So wird angenommen, dass sich der Mastprozess in Stufen mit einem einheitlichen Abstand von einem Monat und in 19 systembeschreibende Zustände unterteilt. Die Zustandsvariablen geben das durchschnittliche Lebendgewicht pro Becken an, beeinflusst von betrieblichen Entscheidungen über Verkauf, Weitermast, Sortierung, Beckenleerstand und Besatz. Die Transformationsfunktion verändert die Zustände von

Stufe zu Stufe systematisch und bildet damit das Fischwachstum als diskrete, deterministische Wachstumsfunktion ab. Unter der Vorgabe, die Zielfunktion zu maximieren, werden über einen Zeitraum von 48 Monaten Art und Ausmaß der zur Auswahl stehenden Entscheidungen optimiert und Preisszenarien analysiert. Eine Reihe von Annahmen und Vorentscheidungen vereinfachen einerseits das Modell und seine Lösbarkeit, andererseits vermindern sie deutlich die Abbildungsqualität:

- a) Der Neubesatz von Setzlingen findet nicht kontinuierlich statt, sondern erst wenn der komplette Beckenplatz geräumt ist. Während der Mast erfolgt kein Wechsel der Becken. Folglich können zu Mastbeginn Becken nur mit der maximalen Anzahl von Tieren besetzt werden, die am Ende der Mast unter Berücksichtigung maximaler Besatzdichten vom Becken aufgenommen werden können. Der Mastplatz wird daher nur am Ende der Mast vollständig genutzt.
- b) Entweder wird der Fischbesatz eines Beckens komplett verkauft oder es findet ein einmaliger vorzeitiger Verkauf der Hälfte des Beckenbesatzes statt.
- c) Ein Teilmodell bildet mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen das heterogene Wachstum und das Sortieren der Fische ab. Die Lebendmasse sei normalverteilt, wobei der jeweilige Wert der Zustandsvariablen den Erwartungswert jedes Zustandes darstellt. Der Typ des verabreichten Futters hängt von der Lebendmasse der Tiere ab. So werden alle Fische eines Beckens mit dem Futtertyp gefüttert, der für diejenigen Fische geeignet ist, deren Lebendmasse dem Erwartungswert entspricht. Die Tiere, die zu leicht bzw. zu klein sind, diesen Futtertyp aufzunehmen, werden absortiert und zu fiktiven Marktpreisen verkauft.

Neben diesen stark abstrahierenden Annahmen sind auch die Methodeneigenschaften zu nennen, die die praktische Entscheidungsunterstützung in der Steinbuttmast mittels dynamischer Programmierung erschweren: Das Sachproblem erfüllt nur bedingt die Markow-Eigenschaft als eine Bedingung der dynamischen Programmierung. Außerdem können Nebenbedingungen, insbesondere stufenübergreifende Restriktionen, nur indirekt dargestellt werden.

2.10.2 Erprobung der Simulationssoftware AquaFarm

Um herauszufinden, ob das Softwareprodukt AquaFarm, das in der Veröffentlichung von Ernst et al. (2000) vorgestellt wird, zur Lösung des vorliegenden Sachproblems genutzt oder als Bestandteil in ein Lösungskonzept integriert werden kann, wurde es exemplarisch auf das Sachproblem angewandt und untersucht. AquaFarm ist eine Simulationssoftware zur Planungs- und Entscheidungsunterstützung von Aquakulturbetrieben. Die Simulation umfasst

neben operativen Prozessen auch die Planung des Anlagenaufbaus. Dabei werden die Simulationsmodelle für unterschiedliche Produkte (Fische, Krustentiere, Muscheln, Algen) und Anlagentypen (Teich-, Durchfluss-, Kreislaufanlagen, küstennahe Netzgehege) entwickelt, um folgende Systemkomponenten abbilden zu können:

- a) *Anlagenumgebung*: Klima, Klimatisierung, Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität und Abwasserbelastung;
- b) *Wasser- und Haltungssystem*: alle physikalischen Anlagenkomponenten, deren Verbindungen zueinander, deren Ausstattung und Aufbau;
- c) *Wasserchemie*: Wassereigenschaften, -bestandteile, ungelöste Gase und das Säure-Base-Gleichgewicht;
- d) *physikalische Prozesse*: Wasserleitungen und -pumpen, Wärme- und Gastransfer sowie der Abbau von Schwebstoffen;
- e) *biologische Prozesse*: biologische Eigenschaften von Fischen, Krustentieren, Algen und Bakterien;
- f) *betriebliches Management*: Methoden, Kriterien, Abläufe und Strategien des Anlagen- und Fischmanagements;
- g) *Unternehmensmanagement*: Faktorbeanspruchung, -verbrauch, Budgetierung etc.

So können Szenarien entwickelt und getestet werden. Tabellen und Graphiken veranschaulichen die Simulationsergebnisse. Der Ablauf einer AquaFarm-Simulation lässt sich in drei Schritte zerlegen. Zunächst sind das Untersuchungsziel, der Anlagenaufbau und die Managementprozesse zu formulieren. Anschließend wird eine Simulation durchgeführt und überprüft. Abschließend gibt die Software die Simulationsergebnisse in aufbereiteter Form aus. Eine ausführliche Beschreibung der Methoden, Modelle und Funktionsweise von AquaFarm geben Ernst et al. (2000). Der Einsatz für das vorliegende Sachproblem erfolgte anhand einer zeitlich beschränkten Testversion, die ohne funktionelle Einschränkungen kostenfrei erhältlich ist (Ernst 2009).

Die Modellierung des Anlagenaufbaus ist sehr aufwendig und wenig benutzerfreundlich. Aus einer Vielzahl möglicher Anlagenbestandteile sind die relevanten auszuwählen und in ihrer Art und Leistungsfähigkeit zu charakterisieren. Trotz zahlreicher biologisch-technischer Modellierungsmöglichkeiten gestaltet sich hingegen die Berücksichtigung von betrieblichen Einflussfaktoren problematisch. So lässt sich etwa eine gewisse Verteilung innerhalb des Wachstums im Modell nachbilden, jedoch keine Selektion als operative Folgehandlung. Ebenso kann das Umsetzen bzw. der Beckenwechsel von Fischen während der Mast in diesem System nicht dargestellt werden. Import- und Exportschnittstellen zu Standard-

softwareprodukten fehlen. So lassen sich mit AquaFarm die betrieblichen Prozesse des Sachproblems nur unzureichend oder gar nicht abbilden.

2.10.3 Entwicklung und Erprobung eines dynamisch-linearen Testmodells

Zur Untersuchung einer möglichen Nutzung dynamisch-linearer Programmierung wurde ein stark vereinfachtes Testmodell entwickelt. Der Planungshorizont umfasst drei Jahre und gliedert sich in sechs Planungsintervalle von jeweils einem halben Jahr. Die gesamte Anlage stellt eine homogene Ressource dar, sodass auf die Bildung von Ressourcenklassen verzichtet werden kann. Entscheidungseinheit, auf die sich alle Entscheidungen beziehen, ist die Anzahl der gehaltenen Fische. Als wesentliche Restriktion wirkt die Kapazität der Anlagenbecken beschränkend. Wie Tab. 3 darstellt, ist dazu der Wachstumsprozess des Steinbutts in fünf Zustände (Z0, Z1, ..., Z4) zerlegt und den Zuständen sind zu Beginn und am Ende des Betrachtungszeitraums feste Werte zugeordnet worden – so wie es die Methode vorschreibt. Annahmegemäß sind Fische des Zustands Z3 verkaufsfähig und Fische des Zustands Z4 haben ihre wirtschaftlich maximale Lebendmasse erreicht, werden nicht weitergemästet und müssen daher verkauft werden.

Tab. 3: Zustände des dynamisch-linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Zustand	Lebendmasse [g]	Anfangsbesatz [Stk]	Endbesatz [Stk]	Marktfähigkeit
Z0	5	0	0	nein
Z1	75	5.000	0	nein
Z2	348	0	0	nein
Z3	1.493	20.000	0	ja
Z4	1.981	0	0	ja (Pflicht)

Auf jeder Stufe kann aus einer Menge von Handlungsalternativen gewählt werden, die die wichtigsten betrieblichen Aktivitäten abbilden. Dazu zählen der Kauf von Setzlingen und Besatz von freiem Mastplatz (BM), der Verkauf unterschiedlich schwerer Tiere (VK, VG), das Fortsetzen der Mast (WK, WM, WG) sowie der Leerstand von Becken (BL). Tabelle 4 führt die zur Auswahl stehenden operativen Handlungen, denen jeweils Verkaufserlöse und variable Kosten (Setzlingskosten, Futterkosten, sonstige Betriebskosten) zuzuordnen sind.

Aus den Handlungsalternativen, den Stufen, in die sich der Planungszeitraum untergliedert (S0, S1, ..., S6) und den durch die Handlungen beeinflussten Zuständen (Z0, Z1, ..., Z4) ergibt sich ein formales Netzwerk, das Abb. 7 zeigt. Durch getroffene Vorentscheidungen bezüglich des Anfangs- und Endbesatzes scheiden eine Reihe möglicher Zustände und Ent-

Tab. 4: Handlungsalternativen des dynamisch-linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Aktivität	Ausprägung	Transformation
VK	Verkauf der kleinen Fische mit ~ 1,5 kg	Z3 → Z0
BM	Besatz und Beginn der Mast	Z0 → Z1
WK	Weitermast der kleinen Fische mit ~ 0,1 kg	Z1 → Z2
WM	Weitermast der mittleren Fische mit ~ 0,3 kg	Z2 → Z3
WG	Weitermast der großen Fische mit ~ 1,5 kg	Z3 → Z4
VG	Verkauf der großen Fische mit ~ 2 kg	Z4 → Z0
BL	Becken leer stehen lassen	Z0 → Z0

scheidungsalternativen für jede Stufe aus; dadurch reduziert sich das Netzwerk, das von Nazareth (2001) als Decision Maker's Network bezeichnet wird (in Abb. 7 hervorgehoben dargestellt).

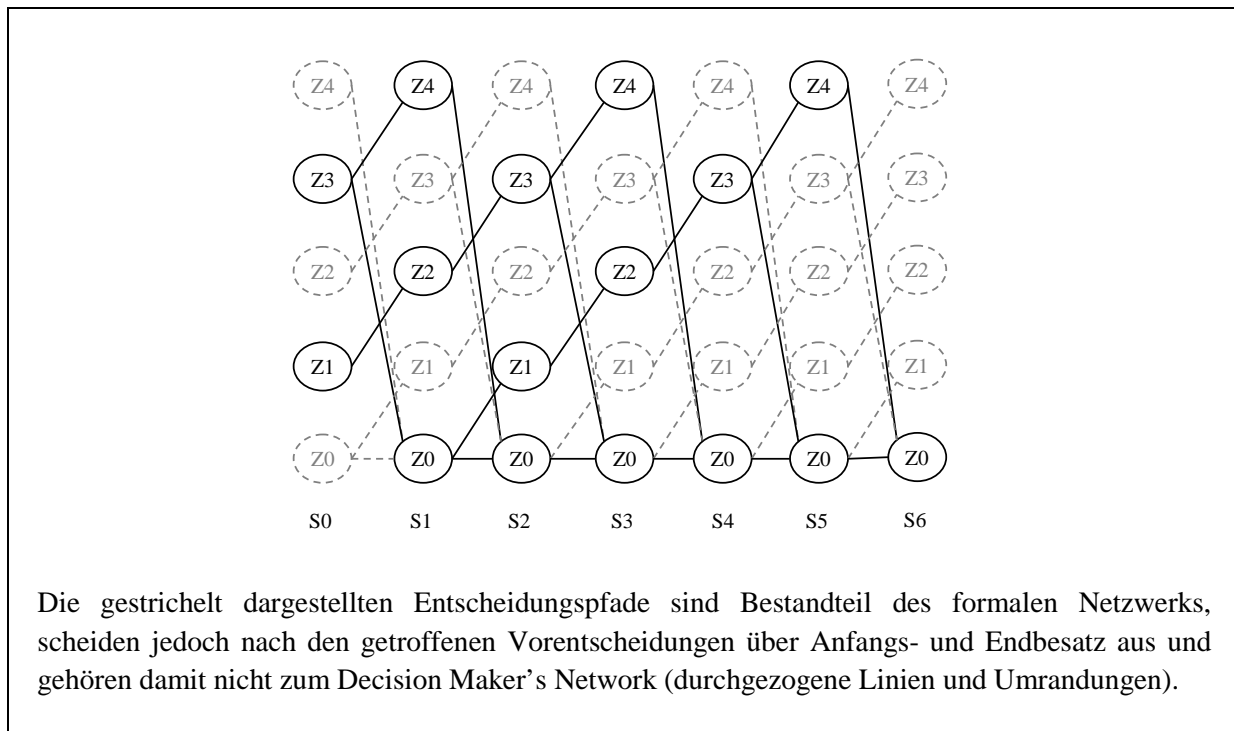


Abb. 7: Netzwerk des dynamisch-linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Das Modell ist in DLPI formuliert, und mithilfe einer Testversion des Lösungsprogramms, das der Veröffentlichung von Nazareth (2001) beigelegt ist, sind Testergebnisse erzeugt worden. Im Anhang A sind sowohl das exemplarische Testmodell (Tab. 24) als auch ein Optimierungsergebnis in Rohform (Tab. 25) zu finden. Da die Rohform der Ergebnisse ohne Vorkenntnisse nicht verständlich ist, sind diese nach Microsoft Excel exportiert und automatisiert in einem Ergebnisbericht aufbereitet worden (Anhang A, Abb. 43).

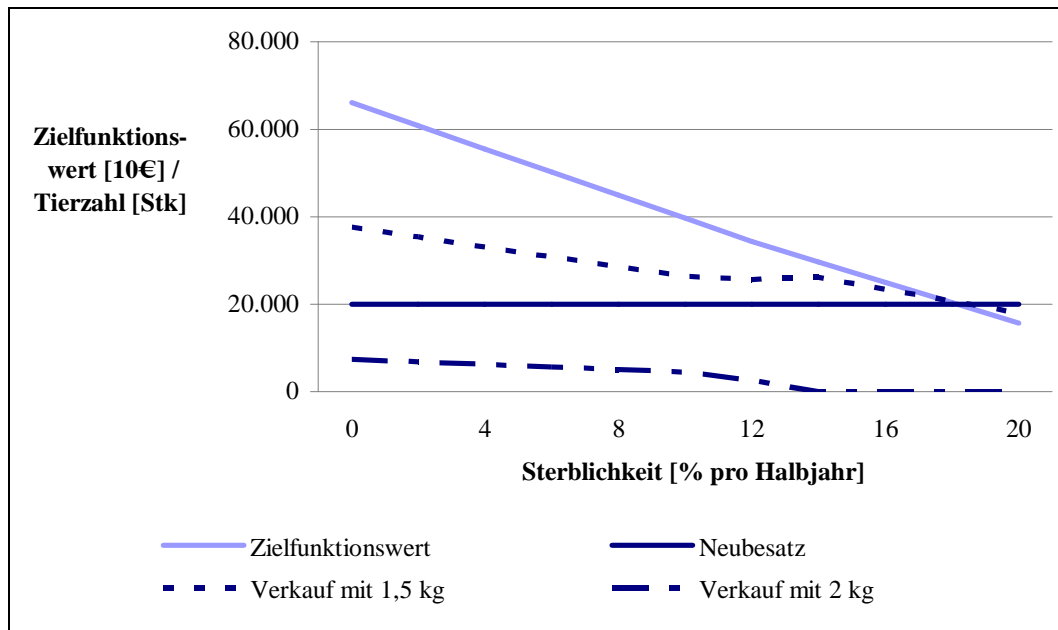


Abb. 8: Reaktion des dynamisch-linearen Testmodells auf steigende Sterblichkeit (eigene Darstellung)

In Abb. 8 sind der Zielfunktionswert, die Anzahl verkaufter Fische eines gewissen Gewichts sowie die Anzahl neu eingesetzter Fische in Abhängigkeit von ceteris paribus steigender Sterblichkeit dargestellt. Die Abbildung stellt die Ergebnisse von 21 separaten Optimierungsrechnungen dar, dabei sind für jede Sterblichkeitsrate (0 %, 1 %, ..., 20 %) die über den Planungszeitraum von drei Jahren kumulierten Werte (Zielfunktionswert und Anzahl der Fische) abgetragen. Das Testmodell liefert plausible erste Ergebnisse: Mit steigender Sterblichkeit fällt der Zielfunktionswert linear, wobei die absolute Höhe aufgrund der starken Modellabstraktion nicht aussagefähig ist. Ebenso sinkt die Anzahl verkaufter Fische, und ab einer gewissen Sterblichkeitsrate ist es vorteilhaft, keine schweren, länger zu mästenden Fische zu produzieren. Auf gleiche Weise ist die Reaktion des Modells auf ceteris paribus steigende Futterpreise (Anhang A, Abb. 41) und veränderte Schlachtfischpreise (Anhang A, Abb. 42) untersucht worden.

Trotz plausibler Rechenergebnisse weist die dynamisch-lineare Programmierung nach John L. Nazareth Defizite in der Abbildbarkeit des Sachproblems auf. Die zu treffenden Vorentscheidungen über die Ausprägung von Anfangs- und Endzustand haben weitreichende Auswirkungen auf die Optimierung insgesamt. Restriktionen sind nur schwer zu modellieren, dabei stehen sogenannte lokale und globale Nebenbedingungen zur Verfügung.

Lokale Nebenbedingungen betreffen nur eine Ressourcenklasse und bilden Ober- oder Untergrenzen für die Entscheidungsvariablen. Globale Nebenbedingungen wirken für alle

Ressourcenklassen begrenzend und stellen rein monetäre Restriktionen dar. So lässt sich die Belegung von Becken mit Fischen einer gewissen Gewichtsklasse nicht als Nebenbedingung formulieren. Zwischen den Ressourcenklassen findet keine Interaktion statt. Auch unter der Annahme, dass Becken eines Beckentyps eine Ressourcenklasse bilden, lässt sich das Umsetzen von Fischen in andere Becken nicht modellieren.

2.10.4 Entwicklung und Erprobung eines gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells

Zentrale Fragen des vorliegenden Entscheidungskomplexes bestehen darin, wann und in welchem Umfang leerstehende Becken mit Fischen besetzt, in welchen Becken welche Altersklassen gehalten und wann marktreife Fische verkauft werden, wobei die vorgefundene Anlagentechnik und Fischbiologie zu berücksichtigen sind. Abstrakt lässt sich das Sachproblem damit als ein sequentielles Entscheidungsproblem mit zeitpunktübergreifenden Restriktionen und Ganzzahligkeitsansprüchen auffassen. Der Einsatz der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung hat sich bei diesem Typ von Entscheidungsproblem vielfach bewährt. Daher ist ein einfacher Modellprototyp als gemischt-ganzzahliges lineares Problem in Microsoft Excel konzipiert und mithilfe des Microsoft Excel Standard-Solvers bearbeitet worden.

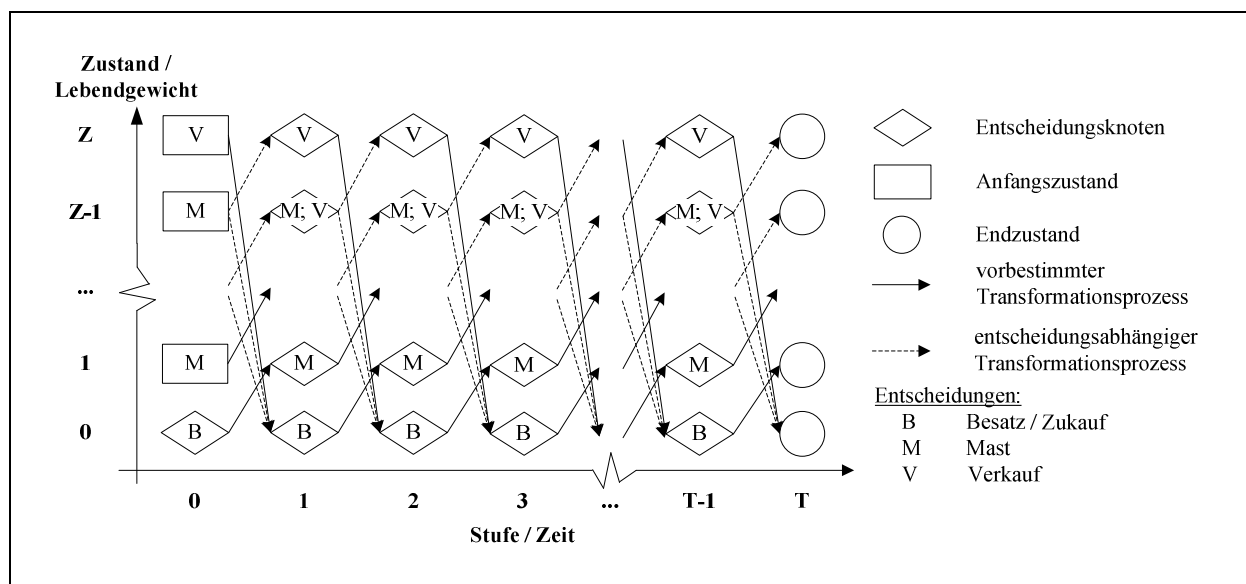


Abb. 9: Schematische Modellstruktur des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Allgemein lässt sich der Entscheidungskomplex zeitlich in Stufen und sachlich in Zustände zerlegen, wie in Abb. 9 dargestellt. Zu jedem Entscheidungszeitpunkt innerhalb des Planungszeitraums (Stufe) sind somit Entscheidungen über die Anzahl zu kaufender, weiterzumästender und zu verkaufender Fische unterschiedlichen Gewichts (Zustands) zu treffen.

Ausgehend von bestimmten Anfangszuständen sind somit auf jeder Stufe Entscheidungen zu treffen, die den Systemzustand so beeinflussen, dass das wirtschaftliche Ergebnis maximiert wird.

Die variablen Kosten der Mast und die Leistungen des Fischverkaufs lassen sich in den Zielfunktionsbeiträgen wiederfinden. Das gesamte Entscheidungsproblem besteht aus Teilproblemen je Stufe, die jeweils ein halbes Jahr voneinander entfernt und über Transformationsgleichungen miteinander verbunden sind. Dabei bilden die Transformationsrestriktionen sowohl das Fischwachstum als auch die natürlichen Tierverluste ab. Das Wachstum der Fische wird als diskrete deterministische Funktion aufgefasst, grob vereinfacht zerlegt in fünf Zustände, die jeweils eine bestimmte Lebendmasse repräsentieren, wie Tab. 5 zeigt.

Tab. 5: Zustände des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Zustand	Lebendmasse (LM) [g]	beanspruchter Futtertyp	beanspruchter Beckentyp
0	10	1	1
1	500	2	2
2	1.100	3	2
3	1.650	4	3
4	2.000	-	-

Bei der Optimierung der Zielfunktion wirken die zur Verfügung stehende Fläche des jeweiligen Beckentyps und die Abbauleistung des biologischen Filters begrenzend. Tiere eines Zustandes benötigen einen gewissen Futtertyp und können nur in einem gewissen Beckentyp gehalten werden. Fische mit dem gleichen Futteranspruch bilden annahmegemäß eine Fischkohorte und können gemeinsam in einem Becken gehalten werden.

Annahmegemäß beanspruchen Fische vom Zustand 1 und 2 zwar den gleichen Beckentyp (2), aber unterschiedliche Futtertypen (2 und 3). Folglich sind sie getrennt voneinander in verschiedenen Becken des gleichen Beckentyps zu halten. Der Modellbetrieb verfügt über sieben Becken des Beckentyps 2, die auf jeder Stufe entweder mit Fischen vom Zustand 1 oder mit Fischen vom Zustand 2 oder gar nicht belegt werden. Dabei ist zu beachten, dass unabhängig von der Anzahl der Fische, die in einem Becken gehalten werden, ein Becken nur ganz oder gar nicht in Betrieb genommen werden kann. Dieser Zusammenhang stellt eine Ganzzahligkeitsbedingung dar und wird mittels Binärvariablen abgebildet (Anhang B, Tab. 28). Die Bewertung des Fischbesatzes erfolgt ebenfalls zustandsabhängig. Mit Erreichen des Zustands 2 ist ein Fisch vermarktungsfähig, kann verkauft werden und ihm wird ein Verkaufserlös zugewiesen. Fische vom Zustand 4 müssen annahmegemäß verkauft werden und

beanspruchen daher für den folgenden Zeitraum weder Futter noch Mastplatz. Fische der Zustände 0 und 1 sind auf der letzten Stufe der Betrachtungszeitspanne mit einem fiktiven Verkaufspreis zu bewerten. Ohne diese Bewertung wären diesen Tieren nur Kosten zuzuordnen, sie würden das wirtschaftliche Planungsergebnis mindern und ihre Mast würde auf einer früheren Stufe daher gar nicht erst beginnen. Die Endzustandsbewertung⁶ verhindert damit, dass wirtschaftlich sinnvolle Prozesse modellbedingt unterdrückt werden. Weitere Modellannahmen sind in Anhang B zu finden.

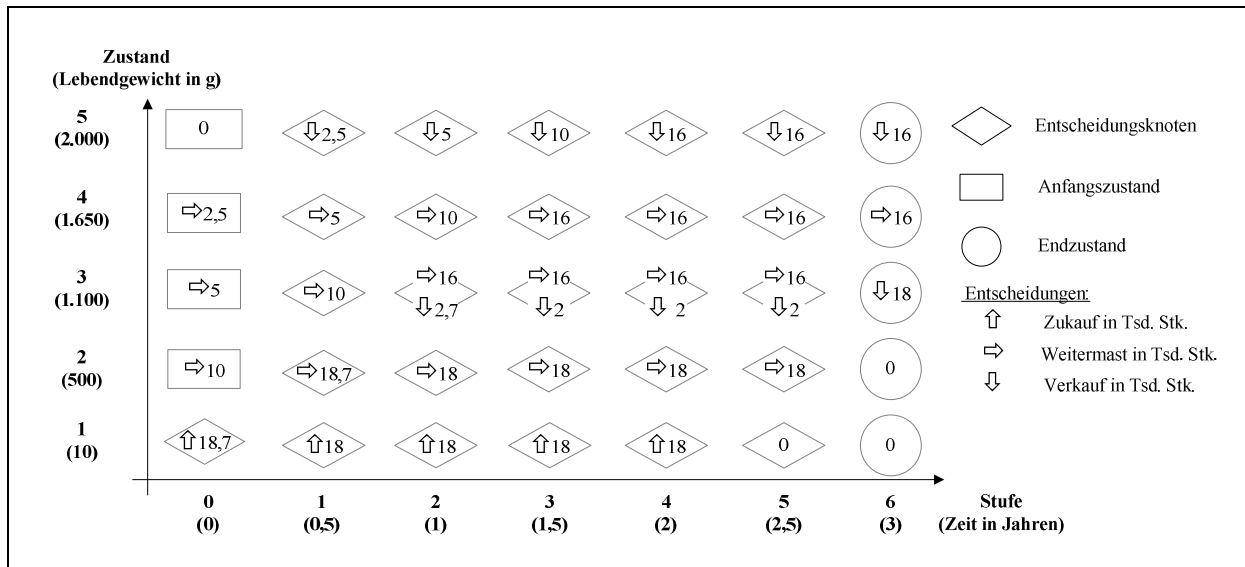


Abb. 10: Ergebnisdarstellung in Anlehnung an das Modellschema des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells unter Referenzannahmen (eigene Darstellung)

Auf Basis dieser Modellannahmen liefert das Testmodell plausible Ergebnisse. Abbildung 10 zeigt in Anlehnung an das Schema des Modells für jede Stufe die optimale Anzahl zu kaufender, weiterzumästender und zu verkaufender Fische. Die Referenzannahmen betreffen die Parameter, die im Folgenden zur Überprüfung der Reaktionsfähigkeit des Modells verändert werden. Referenzwerte: Sterblichkeit 0 % pro Halbjahr; Futterpreis 1,50 € pro kg; Schlachtpreise 12 € pro kg für Fische des Zustands 2, 14 € pro kg für Fische des Zustands 3, 16 € pro kg für Zustands 4. Bis zur Stufe 4 werden stets Setzlinge zugekauft, weitergemästet und bereits bei Zustand 3 teilweise verkauft. Die nicht verkaufsfähigen Fische auf Stufe 6 sind zwar bewertet worden, aber der Wert ist zu niedrig, sodass bereits ab Stufe 5 keine Besatzfische mehr gekauft und keine neuen Mastprozesse gestartet werden. Dieses Testergebnis verdeutlicht den Einfluss der Endzustandsbewertung auf die optimale Prozessplanung.

⁶ Auf die Bedeutung und die Vorgehensweise der Bewertung von Endzuständen wird in Abschnitt 3.1 näher eingegangen.

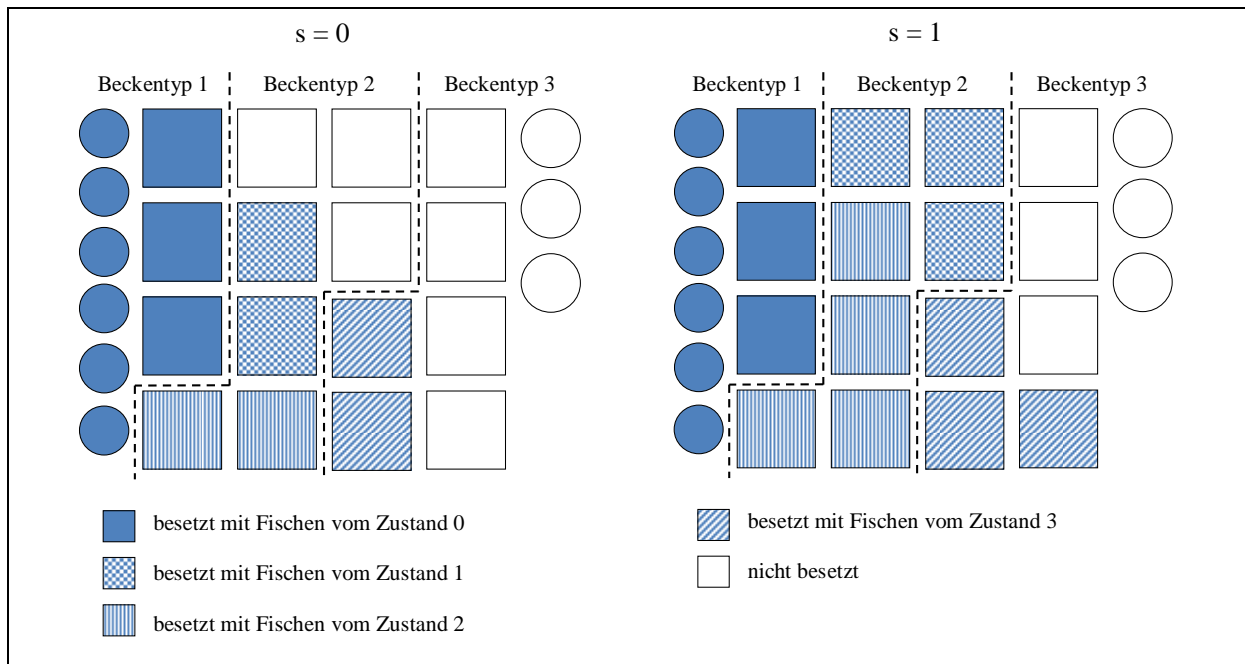


Abb. 11: Beckenbelegungsplan für die ersten beiden Stufen der gemischt-ganzzahligen linearen Testergebnisse unter Referenzannahmen (eigene Darstellung)

Neben Menge und Zeitpunkt des Besatzes, der Weitermast und des Verkaufs liefert die Berechnung Informationen über die optimale Beckenbelegung. Auf jeder Stufe sind Fische mit gleichem Futtertypanspruch auf geeignete Haltungsbecken zu verteilen. Abbildung 11 stellt exemplarisch für die Stufen 0 und 1 einen optimalen Belegungsplan in Anlehnung an den Grundriss der Modellanlage graphisch dar.

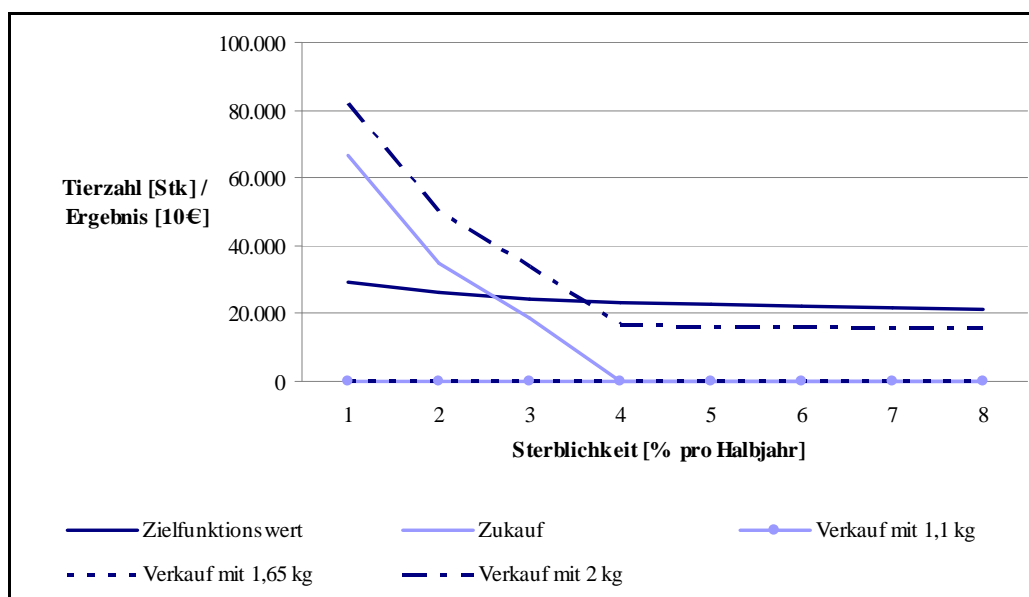


Abb. 12: Reaktion des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells auf steigende Sterblichkeit (eigene Darstellung)

Zur Untersuchung der Reaktionsfähigkeit des Testmodells sind ausgewählte Systemparameter *ceteris paribus* variiert worden. Dazu zeigt Abb. 12 die optimalen Besatz- und Verkaufsmengen und die Zielfunktionswerte in Abhängigkeit veränderter Sterblichkeitsraten. Für jede Sterblichkeitsrate ist eine Optimierungsrechnung durchgeführt worden, sodass sich die abgetragenen Werte jeweils auf den gesamten Planungszeitraum beziehen. Mit steigender Sterblichkeit nimmt der Zielfunktionswert stetig ab, dessen absoluter Wert modellbedingt nicht interpretierbar ist.

Ebenso sinkt die Anzahl der Setzlinge und ab einer gewissen Sterblichkeitsrate lohnt sich der Zukauf von Setzlingen nicht mehr, sodass nur noch der Anfangsbesatz bis zur Marktreife gemästet wird. Die Tiere werden bis zum maximalen Endgewicht gemästet und erst dann verkauft. Es findet kein vorzeitiger Verkauf von leichteren Tieren statt. Selbst unter Annahme hoher Sterblichkeitsraten lohnt es sich aufgrund hoher Verkaufspreise, die Fische länger zu mästen und höhere Tierverluste in Kauf zu nehmen. Die Abbildungen 45 und 46 im Anhang B zeigen die Ergebnisse weiterer Parametrisierungen.

2.11 Kapitelzusammenfassung und Methodenwahl

In den vergangenen 30 Jahren hat sich eine Vielzahl wissenschaftlicher Studien mit der wirtschaftlichen Optimierung von Aquakulturprozessen beschäftigt. Eine Mehrheit der Arbeiten konzentriert sich auf die Quantifizierung sowie Terminierung von Verkaufs- und Einkaufsaktivitäten. Anwendung fanden die Optimierungsmodelle vorwiegend in der Lachs- (Netzgehege in Skandinavien), Wels- (Teichwirtschaft in den Südstaaten der USA) und Garnelenproduktion (Teichwirtschaft in Südostasien und Lateinamerika). Zudem sind Schwerpunkte in der Methodenwahl zu erkennen. Die meisten der ausgewählten Veröffentlichungen verwenden lineare Optimierungsansätze, gefolgt von dynamischer Programmierung und Simulationsverfahren. Neuere Studien bilden das Fischwachstum und die Tatsache, dass das Wachstumspotential innerhalb einer Partie sehr heterogen verteilt ist, mittels Markow-Ketten ab. Es ließ sich bisher keine Studie finden, die die Allokation von Fischkohorten zu Becken berücksichtigt.

Die Methoden, die am ehesten eine Lösung des vorliegenden Sachproblems versprechen, sind mit Modellprototypen untersucht worden. Diese Vorgehensweise hat Stärken und Schwächen der Methoden bezüglich Modellierungspotential, Praxistauglichkeit und Lösungsqualität offenbart. Die Zielsetzung und die Eigenschaft des Sachproblems begünstigen die Anwendung von Optimierungsverfahren gegenüber Simulationstechniken. Selbst eine Integration der frei verfügbaren Simulationssoftware AquaFarm in das Lösungsprogramm

scheidet nach dessen Erprobung aus. Daher ist das Modellierungspotential der dynamischen Programmierung, der dynamisch-linearen Programmierung, und der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung zu bewerten und gegenüberzustellen, wie in Tab. 6 aufgeführt. Je detaillierter ein Optimierungsmodell das reale Planungsproblem abbilden kann, desto realitätsnäher sind die Rechenergebnisse und desto wahrscheinlicher ist auch die Akzeptanz der Ergebnisse bei Nutzern und Entscheidern.

Tab. 6: Modellierungspotential ausgewählter Optimierungsmethoden (eigene Darstellung)

Problembestandteile		Dynamische Programmierung	Dynamisch-lineare Programmierung	Gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung
flexible Anzahl der Fische und Becken	Entscheidungsvariablen / -einheit	+	-	+
sequentielle Entscheidungsfindung zu Zeitpunkten bzw. über Zeitintervalle des Planungszeitraums	Stufen	+	+	+
Wachstum, Sterblichkeit, Selektion	Zustände	+	+	+
	Zustandstransformation	+	+	+
operative Handlung (Zukauf, Verkauf, Weitermast)	Aktivität	+	+	+
Bewertung der operativen Handlungen	Zielfunktionsbeiträge (Kosten und Leistungen)	+	+/-	+
Becken- und Filterkapazität	Nebenbedingungen	-	+	+
Allokation von Fischen mit gleichem Futteranspruch zu geeigneten Becken	Ganzzahlige Entscheidungsvariablen	-	-	+

Die aufgeführten Optimierungsverfahren zeigen deutliche Unterschiede in ihren Abbildungsmöglichkeiten der zentralen Komponenten des praktischen Entscheidungsproblems. So lassen sich in der dynamischen Programmierung Nebenbedingungen, insbesondere stufenübergreifende Nebenbedingungen, nur schwer modellieren. Ähnliche Defizite weist die

dynamisch-lineare Programmierung auf. Zudem betreffen alle Entscheidungen immer eine zuvor bestimmte Entscheidungseinheit; über Fische und Becken kann nicht gleichzeitig entschieden werden. Außerdem werden zu Planungsbeginn den operativen Handlungen monetäre Werte zugeordnet, die sich während des Planungszeitraums nicht ändern lassen.

Die lineare Programmierung ist brauchbar und die Verwendung von ganzzahligen Variablen ermöglicht die Abbildung der Fischkohorten-Becken-Allokation, wie die Ergebnisse des gemischt-ganzzahligen Testprogramms zeigen. Daher ist für die nachfolgende Modellkonstruktion und die numerische Verprobung die gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung als Optimierungsmethode zu wählen.

3 Wirtschaftliche Modellierung der Fischmast in geschlossenen Kreislaufanlagen

In diesem Kapitel werden die operativen Prozesse der Fischmast in geschlossenen Kreislaufanlagen als gemischt-ganzzahliges lineares Gleichungssystem sukzessiv modelliert und die zugrunde gelegten Annahmen erläutert.

Modelle bilden in vereinfachter Form reale Systeme ab, ohne diese direkt zu beeinflussen. Will man den Betrieb von Fischmastanlagen optimieren, sind die wirtschaftlichen Zusammenhänge abzubilden, hier insbesondere die operativen Prozesse intensiver Fischmast in geschlossenen Kreislaufanlagen. Die Abbildung folgt den Konventionen der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung sowie der mathematischen Notation. Dadurch wird die Modellstruktur im Detail offengelegt und der Einsatz von entsprechenden Optimierungsalgorithmen ermöglicht. Zunächst sind die Parameter zu identifizieren und zu kategorisieren, die ein System beschreiben, wie Abb. 13 als formlose Auflistung zeigt.

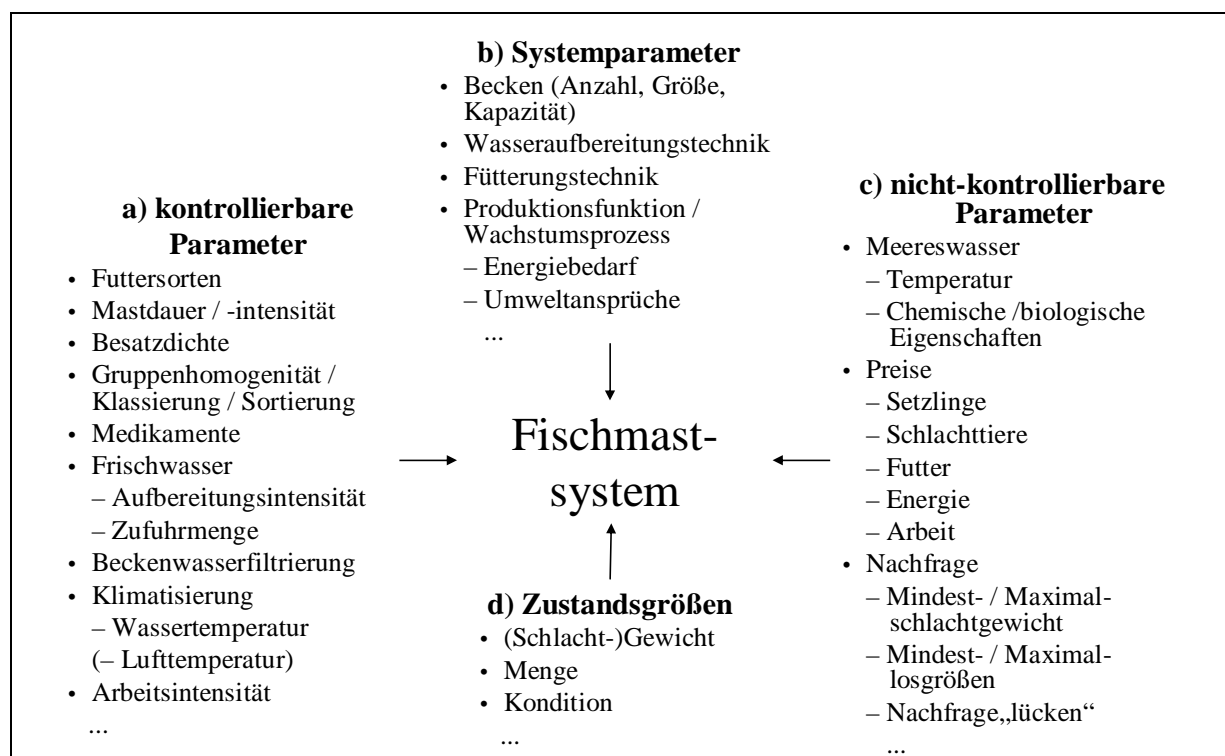


Abb. 13: Systembeschreibende Parameter der Fischmast (eigene Darstellung in Anlehnung an Berg und Kuhlmann 1993)

Dabei lassen sich

- a) kontrollierbare Parameter (vom betrieblichen Management beeinflussbare Inputs),
- b) Systemparameter (von der Struktur des Systems vorgegeben und kurzfristig nicht veränderbar)
- c) nicht-kontrollierbare Parameter (Umgebungsparameter, die das System beeinflussen, auf die jedoch das Betriebsmanagement keinen direkten Einfluss hat) und
- d) Zustandsgrößen (die Produktionsprozesse beschreibende Parameter) unterscheiden.

Übertragen auf lineare Programmierungsmodelle beinhalten Entscheidungsvariablen bzw. Handlungsalternativen der Zielfunktion kontrollierbare Parameter. Systemparameter und nicht-kontrollierbare Parameter bilden Restriktionen. Zustandsgrößen lassen sich sowohl in den Restriktionen als auch in der Zielfunktion wiederfinden (Daellenbach 1995, Dantzig und Thapa 1997, Martin 1999).

Das mathematische Modell gliedert sich dementsprechend in die einzelnen Bestandteile der zu maximierenden Zielfunktion und die Restriktionen, die die Menge zulässiger Lösungen beschränken. Tabelle 7 gibt einen Überblick über die Bestandteile des Modells und zeigt an, in welchen Abschnitten die Beschreibung der Modellelemente der vorliegenden Arbeit zu finden ist.

Tab. 7: Bestandteile des mathematischen Modells (eigene Darstellung)

		Formel	Abschnitt
ZFW	= Zielfunktionsbeitrag (ZFB) aus Schlachtung und Verkauf	(7a)	3.1.1
	+ ZFB aus Zukauf und Besatz	(7b)	3.1.2
	+ ZFB aus der Weitermast	(7c), (7d)	3.1.3
	+ ZFB aus der Weitermast und anschließendem Verkauf	(7e)	3.1.4
	+ ZFB aus der Fischkohorten-Becken-Allokation	(7f)	3.1.5
	+ ZFB aus der Weitermast am Ende des Planungszeitraums auf Basis bewerteter Endzustände	(7g), (7h), (7i)	3.1.6
	= max!		
unter den Restriktionen:			
	Anfangsbesatz	(8)	3.2.1
	Filterkapazität	(9a), (9b), (9c)	3.2.2
	Mastplatzkapazität und Restriktionen der Fischkohorten-Becken-Allokation	(10a), (10b), (10c)	3.2.3
	Transferrestriktionen (Modellierung von Wachstum und Selektion)	(11a), (11b)	3.2.4

Eine zentrale Modellkonvention von mehrperiodigen linearen Planungsproblemen besteht in der zeitlichen und sachlichen Zerlegung des Sachproblems gemäß dem Dekompositionsprinzip (Müller-Merbach 1973). So wird der Wachstumsprozess der Fische hier in sogenannte Zustände zerlegt, die ein bestimmtes Lebendgewicht – keine Gewichtsklassen – repräsentieren und der Planungszeitraum in Stufen, die Entscheidungszeitpunkte – keine Zeiträume – darstellen.

3.1 Bestandteile der Zielfunktion

Die Zielfunktion bildet operative Entscheidungen und daraus resultierende Aktivitäten ab. Jede operative Handlung verursacht Kosten und/oder Erlöse, deren Höhe vom Ausmaß der Entscheidung, der Entscheidungsvariable, abhängt. Die diskontierten Kosten und Erlöse ergeben für jede Entscheidung auf einer Stufe Zielfunktionsbeiträge, aus denen sich wiederum als Summe der Zielfunktionswert zusammensetzt. Daher sollen die in Tab. 7 aufgeführten Bestandteile der Zielfunktion im Folgenden präsentiert und näher erörtert werden.

3.1.1 Schlachtung und Verkauf

Der Verkauf von Fischen erzeugt den Umsatz eines Aquakulturbetriebs. Zu leichte Fische werden als Speisefisch nicht gehandelt.⁷ Zu jedem Betrachtungszeitpunkt ist zu entscheiden, ob und wie viele Fische verkauft werden sollen, die dieses Mindestgewicht erreicht haben:

$$(7a) \quad ZFW = \sum_{s=0}^S \sum_{z=A}^Z v_{sz} \cdot (LM_z \cdot PS_{sz} - KS_{sz} - KV_{sz}) \cdot Q^{-s} \dots$$

mit:

$z = 0, 1, \dots, Z$	Index für Zustände
A	Zustand, ab dem Fische ein marktfähiges, auf dem Absatzmarkt nachgefragtes Gewicht erreicht haben
v_{sz}	Anzahl zu verkaufender Fische auf Stufe s vom Zustand z , wobei $v_{sz} \in \mathbb{R}_+$
LM_z	Lebendmasse von Fischen des Zustands z
PS_{sz}	Schlachtpreise, die auf der Stufe s für Fische des Zustands z zu erzielen sind

⁷ Der Verkauf von Fischen als Besatzfische soll hier nicht betrachtet werden.

KS_{sz}	variable Kosten auf der Stufe s für die Schlachtung von Fischen des Zustands z
KV_{sz}	variable Kosten auf der Stufe s für die Vermarktung von Fischen des Zustands z
Q	Kalkulationszinssatz pro Monat

Fischpreise unterliegen einerseits starken saisonalen Schwankungen (Stufenabhängigkeit) und werden andererseits vom Schlachtgewicht beeinflusst (Zustandsabhängigkeit). Normalerweise steigt der Fischpreis je Kilogramm mit zunehmender Lebendmasse. Außerdem verursachen Verkaufsaktivitäten je nach Anzahl zu verkaufender Tiere Kosten für die Schlachtung (CO₂ zur Betäubung, Arbeit, Schlachtabfälle etc.) und die Vermarktung (Verpackung, Eis, Transport, Kühlung etc.).

3.1.2 Zukauf und Besatz

Beim Kauf von Besatzfischen, meist jungen Tieren, fallen Kosten an, die einen beachtlichen Anteil der Gesamtkosten in der Aquakulturproduktion ausmachen. Daher ist zum einen auf die Herkunft (Zuchtbetrieb) und die damit verbundene Qualität der Setzlinge (gesundheitliche Verfassung, Wachstumspotential etc.) Acht zu geben. Diese qualitativen Entscheidungen berücksichtigt das Modell derzeit nicht. Zum andern ist über den Zeitpunkt und die Menge zu kaufender Fische zu entscheiden. Werden zu einem beliebigen Zeitpunkt⁸ Setzlinge gekauft, so ist diese Entscheidung zwangsläufig damit verbunden, diese Tiere mindestens auch bis zum nächsten Entscheidungszeitpunkt zu mästen:

$$(7b) \quad \dots + \sum_{s=0}^{S-1} \sum_{f=1}^F \sum_{z=0}^Z e_{sz} \cdot (-PB_{sz} - (LM_{z+1} - LM_z) \cdot FVQ_z \cdot PF_{sf} - KA_{sz} - KE_{sz} - KO_{sz}) \cdot Q^{-s} \dots$$

mit:

$f = 1, 2, \dots, F$	Index für Futtertypen, die sich in ihren Inhaltsstoffen und ihrer Pelletgröße unterscheiden
e_{sz}	Anzahl zu kaufender Besatzfische auf der Stufe s vom Zustand z , die in die Anlage eingesetzt und weitergemästet werden, wobei $e_{sz} \in \mathbb{R}_+$

⁸ Die Weitermast-Aktivität zum letzten Zeitpunkt des Planungszeitraums wird gesondert modelliert (Abschnitt 3.1.6).

PB_{sz}	Preise für Besatzfische auf der Stufe s des Zustands z
FVQ_z	Futterverwertungsquotient von Fischen des Zustands z
PF_{sf}	Preise für Futter auf der Stufe s für den Futtertyp f
KA_{sz}	variable Kosten für Arbeit auf der Stufe s für die Betreuung von Fischen des Zustands z
KE_{sz}	variable Energiekosten, die auf der Stufe s bei der Haltung von Fischen des Zustands z anfallen
KO_{sz}	variable sonstige Betriebskosten, die auf der Stufe s die Haltung von Fischen des Zustands z verursachen

Der Zielfunktionsbeitrag für den Zukauf von Besatzfischen setzt sich aus den Setzlingskosten und den Kosten der Weitermast zusammen. Die Setzlinge werden zu Stückpreisen gehandelt, die zeitlichen Schwankungen unterliegen. Das Modell erlaubt den Zukauf von Fischen jedes Gewichts, sodass auch der Kauf relativ schwerer Tiere denkbar ist, die im Sinne einer Endmast nur kurze Zeit bis zum Verkauf im Betrieb verbleiben.

3.1.3 Weitermast

Begonnene Mastprozesse werden aus zwei Gründen fortgesetzt. Entweder können die gehaltenen Tiere noch nicht verkauft werden, weil sie noch kein vermarktungsfähiges Gewicht erreicht haben, oder sie sollen noch nicht verkauft werden, da ein Verkauf zu einem späteren Zeitpunkt wirtschaftlich von Vorteil ist. Alle Fische, die sich zu einem beliebigen Zeitpunkt⁹ in einer Anlage befinden, müssen somit verkauft oder alternativ weitergemästet werden:

$$(7c) \quad \dots + \sum_{s=0}^{S-1} \sum_{f=1}^F \sum_{z=0}^Z w_{sz} \cdot ((LM_{z+1} - LM_z) \cdot FVQ_z \cdot PF_{sf} - KA_{sz} - KE_{sz} - KO_{sz}) \cdot Q^{-s} \dots$$

mit:

w_{sz} Anzahl weiterzumästender Fische auf der Stufe s vom Zustand z , wobei
 $w_{sz} \in \mathbb{R}_+$

⁹ Die Weitermast-Aktivität zum letzten Zeitpunkt des Planungszeitraums wird gesondert modelliert (Abschnitt 3.1.6).

Die Weitermast von einem Entscheidungszeitpunkt bis zum nächsten verursacht mengenabhängige und über die Zeit schwankende Kosten. Die Futterkosten berechnen sich aus der aufgenommenen Futtermenge und dem Futterpreis, der sich nach dem Typ des Futters richtet. Dabei müssen Fische eines gewissen Gewichts mit einem bestimmten Futtertyp gefüttert werden, da die Inhaltsstoffe und insbesondere die Pelletierung der Futtermittel an die Größe und damit an das Gewicht der Fische angepasst sind. Die Futtermenge wiederum ermittelt sich aus dem erwarteten Lebendmassezuwachs und der Futtermittelnutzung:

$$(7d) \quad FVQ_z = QF_z \cdot (LM_{z+1} - LM_z)^{-1}$$

mit:

QF_z Futtermenge, die von Fischen des Zustands z zum Erreichen des Zustands $z+1$ verbraucht wird

Zudem fallen variable Kosten für Arbeit (Anteil für mengenabhängige Arbeit für die Betreuung, Fütterung, Sortierung, Selektion etc.), für Energie (Gas, Heizöl, Strom zur Wassererwärmung und -kühlung etc.) und für sonstige betriebliche Zwecke (Tierkörperbeseitigung, technischer Sauerstoff, Medikamente, Impfstoffe, Desinfektionsmittel, sonstige Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe etc.) an, die sowohl vom Zeitpunkt wie auch vom Fischgewicht abhängen.

3.1.4 Weitermast und anschließender Verkauf

Wird zu einem Zeitpunkt entschieden, die Mast bestimmter Tiere fortzuführen, und steht zu diesem Zeitpunkt auch bereits fest, dass diese Tiere zum folgenden Zeitpunkt verkauft werden sollen, so können diese beiden Entscheidungen zusammengefasst werden:

$$(7e) \quad \dots + \sum_{s=0}^S \sum_{f=1}^F \sum_{z=0}^Z d_{sz} \cdot ((LM_{z+1} - LM_z) \cdot FVQ_z \cdot PF_{sf} - KA_{sz} - KE_{sz} - KO_{zs} + (LM_{z+1} \cdot PS_{s+1z+1} - KS_{s+1z+1} - KV_{s+1z+1}) \cdot Q^{-1}) \cdot Q^{-s} \dots$$

mit:

d_{sz} Anzahl der Fische auf der Stufe s vom Zustand z , über die eine doppelte Entscheidung getroffen wird: Sie werden weitergemästet und auf der Folgestufe verkauft, wobei $d_{sz} \in \mathbb{R}_+$

Einerseits bildet diese Aktivität zwei Aktivitäten in einer ab und spart somit eine Entscheidungsvariable ein; dieser Umstand ist für die Modellrealisierung von Bedeutung. Andererseits müssen Vorentscheidungen getroffen werden, wann oder mit welchem Gewicht die Weitermast von Fischen mit ihrem anschließenden Verkauf verbunden sein soll. Außerdem ist in dieser Aktivität das Wachstum der Tiere als ein Transfer modelliert, wonach Tiere von einem zum nächsthöheren Zustand gelangen, ohne Sterblichkeit oder heterogenes Wachstum zu berücksichtigen.

3.1.5 Fischkohorten-Becken-Allokation

Fische, die auf einer Stufe sowohl den gleichen Beckentyp als auch den gleichen Futtertyp beanspruchen, bilden eine Fischkohorte. Fische eines bestimmten Zustands können einer Fischkohorte eindeutig zugeordnet werden. Da angenommen wird, dass Fische unterschiedlich schnell wachsen, gehören den Fischkohorten nicht immer die gleichen Fische an, sondern sie setzen sich zu jedem Entscheidungszeitpunkt neu zusammen. Daher erfolgt auf jeder Stufe erneut die Zuteilung von Fischkohorten auf zur Verfügung stehende Anlagenbecken:

$$(7f) \quad \dots + \sum_{s=0}^S \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F m_{sf} \cdot (-KB_{sb}) \cdot Q^{-s} \dots$$

mit:

$b = 1, 2, \dots, B$ Index für Beckentypen

m_{sf} Anzahl der Mastbecken auf Stufe s , die mit Fischen zu belegen sind, die den Futtertyp f beanspruchen, wobei $m_{sf} \in \mathbb{N}$

KB_{sb} variable Kosten, die auf Stufe s bei der Belegung eines Beckens vom Beckentyp b anfallen

Die Inbetriebnahme und Belegung von Becken verursacht je nach Beckentyp und Entscheidungszeitpunkt Kosten (Reinigung, Abfischen, Einsetzen etc.). Dabei ist zu beachten, dass Becken nur komplett in Betrieb genommen werden oder leer stehen. Demzufolge ist die Entscheidungsvariable m_{sf} ganzzahlig.

3.1.6 Weitermast am Ende der Planungszeitspanne auf Basis bewerteter Endzustände

Das Ende der Planungszeitspanne stellt eine Zäsur dar und kann die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit noch nicht abgeschlossener Mastprozesse beeinflussen. Da Fische, die am Planungsende kein marktfähiges Gewicht erreicht haben, ausschließlich Kosten verursachen und den

Zielfunktionswert mindern, würde ihre Mast zu einem früheren Zeitpunkt erst gar nicht beginnen. Diese Prozesse wären nicht konkurrenzfähig, obwohl sie durchaus lohnend sein können, da sie zu einem späteren Zeitpunkt – nach dem Planungshorizont – Erlöse erbringen (Abb. 14).

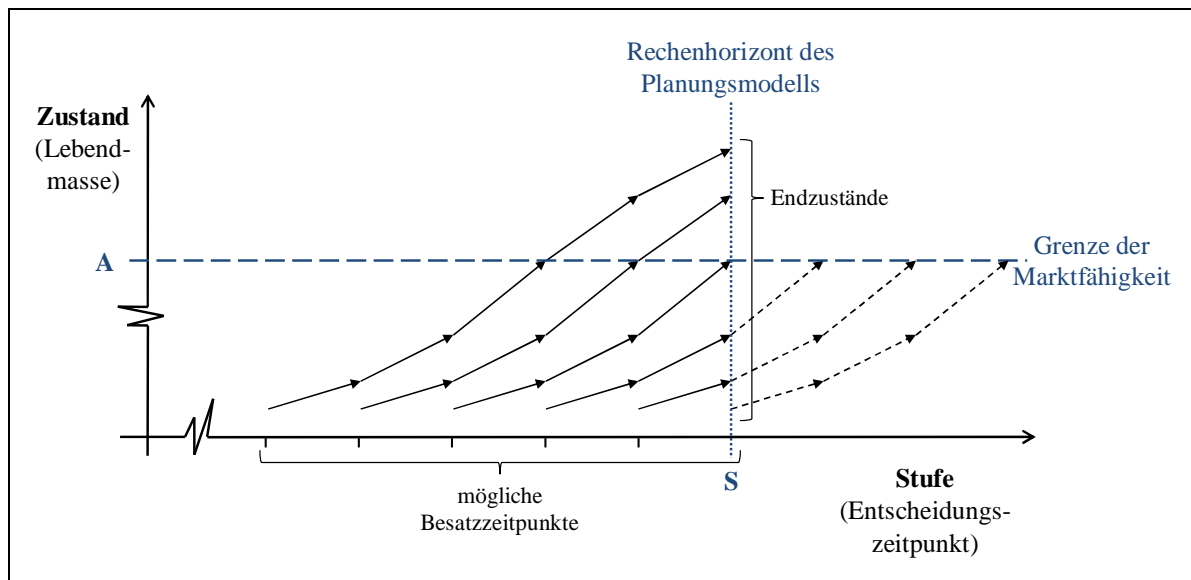


Abb. 14: Unterbrechung laufender Prozesse durch den Planungshorizont (Sundermeier 1987, eigene Darstellung)

Um im Sinne einer rollenden Planung zu verhindern, dass der Start wirtschaftlich sinnvoller Prozesse modellbedingt verhindert wird, sind entweder Endzustandsvektoren zu definieren oder die Endzustände dieser „abgeschnittenen“ Prozesse zu bewerten. Endzustandsvektoren geben die Systembeschaffenheit am Ende der Planung vor, also wie viele Fische sich von welchem Zustand in einer Aquakulturanlage zum Planungsende befinden sollen. Diese Vorentscheidung hat weitreichende Folgen für die gesamte Optimierung, sodass im vorliegenden Modell eine Bewertung der Endzustände vorgenommen wird. Nicht abgeschlossene, „abgeschnittene“ Prozesse bilden die Grundlage für nachfolgende Planungsperioden und haben einen wirtschaftlichen Wert. Wird zum letzten Entscheidungszeitpunkt entschieden, Fische weiterzumästen, ist ihnen entsprechend ihres Zustands ein Wert zuzuweisen:

$$(7g) \quad \dots + \sum_{z=0}^Z (e_{S_z} + w) \cdot EZW_{S_z} \cdot Q^{-S} = \max!$$

mit:

EZW_{S_z} Wert von Fischen des Zustands z zum letzten Entscheidungszeitpunkt S , die weitergemästet werden (Endzustandswert)

Fische, die ein vermarktungsfähiges Gewicht erreicht haben, werden so bewertet, als würden sie verkauft. Für Tiere mit nicht-marktfähigen Gewichten werden Erlöse ermittelt. Dazu wird der Wert der Setzlinge berücksichtigt und auf Basis des aufgenommenen Proteins ein Wertzuwachs berechnet:

$$(7h) \quad EZW_{S_z} = \begin{cases} \left(PB_{S_z} - z \cdot \frac{PB_{S_z}}{A} + \frac{\sum_{z=0}^Z QP_z}{A} \cdot LM_z \cdot PS_z \right) \cdot Q^{-z} & \text{für } z < A \\ LM_z \cdot PS_{S_z} - KS_{S_z} - KV_{S_z} & \text{für } z \geq A \end{cases}$$

mit:

QP_z Menge an Rohprotein, die Fische des Zustands z zum Erreichen des Zustands $z+1$ über das Futter aufnehmen

Die über das Futter aufgenommene Proteinmenge errechnet sich aus der Futtermenge und dem Proteinanteil des jeweils eingesetzten Futtermittels:

$$(7i) \quad QP_z = QF_z \cdot FPA_f$$

mit

FPA_f Rohproteinanteil des Futters vom Typ f

Jeder Futtertyp weist einen festen Rohproteinanteil auf. Außerdem nehmen Fische eines Zustands z bestimmte Futtermengen auf, um den Zustands $z+1$ zu erreichen. Die daraus berechenbare Proteinmenge je Zustand stellt die Basis dar, um den Wert von vermarktungsunfähigen Fischen zu ermitteln.

3.2 Restriktionen

Bei Maximierung der Zielfunktion (Suche nach der optimalen Lösung) ist die Menge zulässiger Lösungen beschränkt von den zum Planungsanfang bereits begonnenen Prozessen und deren Inanspruchnahme von Kapazitäten, den technische Gegebenheiten der Aquakulturanlage sowie weiteren biologischen und wirtschaftlichen Restriktionen. Diese Restriktionen sollen nachfolgend vorgestellt und näher erläutert werden, wie in Tab. 7 aufgeführt.

3.2.1 Anfangsbesatz

Der Planungsbeginn stimmt nicht zwangsläufig mit der Inbetriebnahme einer leerstehenden Aquakulturanlage überein. Daher sind die vor der Planung begonnenen Mastprozesse eines laufenden Betriebs zu berücksichtigen und abzubilden. Auf Basis einer Inventur können somit die bereits in der Anlage befindlichen Fische erfasst werden, die den Ausgangspunkt für weitere Entscheidungen darstellen:

$$(8) \quad \sum_{z=0}^Z v_{0z} + k_{0z} + w_{0z} + d_{0z} = AB_z$$

mit:

k_{sz} Anzahl der Fische, die per Kontrakt verkauft werden, auf der Stufe s vom Zustand z , wobei $k_{sz} \in \mathbb{R}_+$ ¹⁰

Der Besatz von Fischen eines bestimmten Zustands zu Planungsbeginn ($s=0$) kann entweder verkauft oder weitergemästet werden.

3.2.2 Filterkapazität

Die Qualität des Umgebungswassers ist für das Überleben und das Wachstum von Fischen entscheidend. Daher bestimmt die Leistung des Filtrationssystems einer Aquakulturanlage die maximale Anzahl bzw. Lebendmasse der gehaltenen Fische. In geschlossenen Kreislaufanlagen wirkt der biologische Filter innerhalb der Wasseraufbereitung begrenzend. Der sogenannte Biofilter besteht aus Trägermaterial (Biocarrier), auf dem sich Mikroorganismen ansiedeln und durch das das Anlagenwasser im Kreislauf geführt wird. Dabei halten die Mikroorganismen zum einen die Ammoniakkonzentration unterhalb der für Fische toxischen Werte (Nitrifikation) und entfernen zum anderen Nitrat aus dem System (Denitrifikation). Vereinfachend ist davon auszugehen, dass die gemästeten Fische eine bestimmte Stickstoffmenge in das Wassersystem eintragen, die die Stickstoffabbauleistung des Biofilters nicht überschreiten darf:

$$(9a) \quad \sum_{s=0}^S \sum_{z=0}^Z (e_{sz} + w_{sz} + d_{sz}) \cdot QN_z \leq BFK_s$$

mit:

QN_z in das Anlagensystem eingetragene Menge an Stickstoff von Fischen des Zustands z

¹⁰ Auf die Modellierung der Kontraktproduktion wird in Abschnitt 3.3 näher eingegangen.

BFK_s Biofilterkapazität: maximale Stickstoffmenge, die vom biologischen Filter auf der Stufe s bis zum Erreichen der Stufe $s+1$ abgebaut werden kann

Wird zu einem Zeitpunkt entschieden, dass Fische weitergemästet werden sollen, belasten sie bis zum nächsten Entscheidungszeitpunkt das Filtersystem. Die eingetragene Stickstoffmenge von weitergemästeten Tieren ermittelt sich aus der aufgenommenen Menge und dem Rohproteinanteil des Futters:

$$(9b) \quad QN_z = QF_z \cdot FPA_f \cdot PNK$$

mit:

PNK Standardwert für den Anteil des aufgenommenen Futterrohproteins, der als Stickstoff in das Anlagenwasser übergeht

Die Kapazität des Filtersystems – die Stickstoffabbauleistung des Biofilters – ist an die Oberfläche und Abbauleistung des Trägermaterials und an das Volumen des Biofilters gebunden:

$$(9c) \quad BFK_s = OBC \cdot FAR_s \cdot VBF$$

mit:

OBC spezifische Oberfläche der Biocarrier

FAR_s Flächenabbaurate: Stickstoffabbauleistung des Biofilters hinsichtlich der Biocarrieroberfläche im Zeitraum s bis $s+1$

VBF Volumen des Biofilters der Aquakulturanlage

Die Filterkapazität begrenzt die Prozesse der gesamten Aquakulturanlage. Dem hier vorgestellten Modell liegt also die Vorstellung zugrunde, dass eine Aquakulturanlage über nur ein Biofiltersystem verfügt oder mehrere Biofilter sich gedanklich zu einem Biofiltersystem zusammenfassen lassen.

3.2.3 Mastplatzkapazität und Restriktionen der Fischkohorten-Becken-Allokation

Die Größe und Anzahl der Hälterungsbecken bilden zentrale Restriktionen für die Prozessplanung von Aquakulturbetrieben. Da der Fischbesatz als eine Menge von Fischkohorten (Fische mit gleichem Futteranspruch, die in einem Becken gemeinsam gehalten werden dürfen) aufgefasst wird und diese Fischkohorten den zur Verfügung stehenden Becken laufend zuzuordnen sind, sind neben einfachen Kapazitätsgrenzen zusätzliche Nebenbedingungen zu berücksichtigen.

Die Mast der Fische ist über den gesamten Betrachtungszeitraum vom Mastplatz begrenzt,

den die Beckentypen insgesamt bieten:

$$(10a) \quad \sum_{s=0}^S \sum_{b=1}^B \sum_{z=0}^Z (e_{sz} + w_{sz} + d_{sz}) \cdot MPB_{bz} \leq MPK_b$$

mit:

MPB_{bz} Mastplatzbedarf an der Fläche bzw. Volumen der Becken vom Typ b von Fischen des Zustands z

MPK_b Mastplatzkapazität des Beckentyps b

Die weiterzumästenden Tiere beanspruchen Mastplatz – Plattfische Beckenfläche und Rundfische Beckenvolumen. Fische eines Zustands können nur in einem gewissen Beckentyp gehalten werden, dessen zur Verfügung stehender Mastplatz die Anzahl bzw. Lebendmasse gehaltener Fische beschränkt. Während der Mast darf je nach Zustand der Fische eine maximale Besatzdichte nicht überschritten werden. Die zulässige Besatzdichte ist nicht wie die maximale Bestandsdichte, die von Schweine-, Hähnchen- oder sonstigen klassischen Mastbetrieben einzuhalten sind, gesetzlich vorgeschrieben, sondern orientiert sich an der biologisch-technisch realisierbaren Obergrenze. Dabei ist das erwartete Wachstum der Fische bis zum nächsten Entscheidungszeitpunkt zu berücksichtigen, sodass die Mastplatzkapazität nicht schon zum Zeitpunkt der Entscheidung, sondern erst zum nächsten Entscheidungszeitpunkt vollkommen ausgeschöpft werden kann.

Außerdem darf von weiterzumästenden Tieren nicht mehr Mastplatz eines Beckentyps beansprucht werden, als die einzelnen Becken dieses Typs zur Verfügung stellen, die mit Fischen eines bestimmten Futterbedarfs belegt sind:

$$(10b) \quad \sum_{s=0}^S \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F \sum_{z=0}^Z (e_{sz} + w_{sz} + d_{sz}) \cdot MPB_{bz} - m_{sf} \cdot MPA_b \leq 0$$

mit:

MPA_b Mastplatzangebot pro Becken, maximale Fläche bzw. maximales Volumen eines Beckens vom Beckentyp b

Abb. 15 verdeutlicht den Zusammenhang der Restriktionen in den Formeln (10a) und (10b) anhand eines Zahlenbeispiels. Die weiterzumästenden Fische des Zustands 1 und 2 beanspruchen gemeinsam Beckenfläche des Beckentyps X, werden aber mit unterschiedlichem Futter gefüttert: Fische des Zustands 1 mit Futtertyp A und Fische des Zustands 2 mit Futtertyp B. Fische, die zwar im gleichen Beckentyp gehalten werden könnten, aber unterschiedliches Futter nachfragen, dürfen nicht in einem Becken gemeinsam

gehalten werden. Der gemeinsame Mastplatzbedarf von Fischen des Zustands 1 und 2 wird zwar vom Mastplatzangebot vom Beckentyp X gedeckt (Restriktion 10a ist erfüllt). Werden jedoch die Fische vom Zustand 1 getrennt von Fischen des Zustands 2 gehalten, so genügt das Mastplatzangebot eines Beckens vom Typ X nicht, um den Mastplatzbedarf der Fische vom Zustand 2 zu befriedigen (Restriktion 10b ist nicht erfüllt).

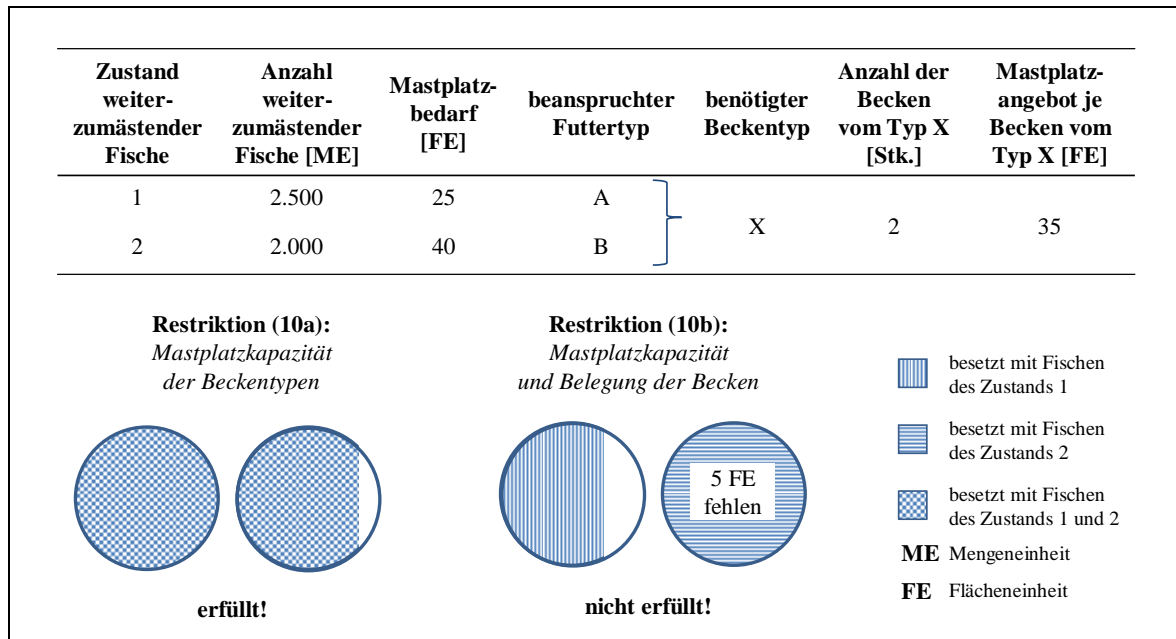


Abb. 15: Restriktionen der Fischkohorten-Becken-Allokation – Zahlenbeispiel (eigene Darstellung)

Des Weiteren verfügt eine Aquakulturanlage nur über eine feste Anzahl an Becken eines Typs:

$$(10c) \quad \sum_{s=0}^S \sum_{b=1}^B \sum_{f=1}^F m_{sf} \leq BK_b$$

mit:

BK_b in der Aquakulturanlage vorhandene Beckenanzahl vom Beckentyp b

Die Anzahl der zu besetzenden Becken eines bestimmten Beckentyps darf nicht größer sein als die Anzahl der vorhandenen Becken dieses Typs.

3.2.1 Transferrestriktionen – Modellierung von Wachstum und Selektion

Unter dem Transfer soll die Überführung des Systems von einer Stufe auf die nächsthöhere verstanden werden. Der Transfer kann eine Systemänderung zur Folge haben, bezogen auf die Fischmast bedeutet das, dass sich zwischen zwei Entscheidungszeitpunkten das Gewicht der Fische ändern kann. Mithilfe der Transferrestriktionen ist somit das Fischwachstum zu

modellieren. Die Überlegungen zur Wachstumsmodellierung sind in vier Schritte zerlegt worden, wie Abb. 16 schematisch zeigt.

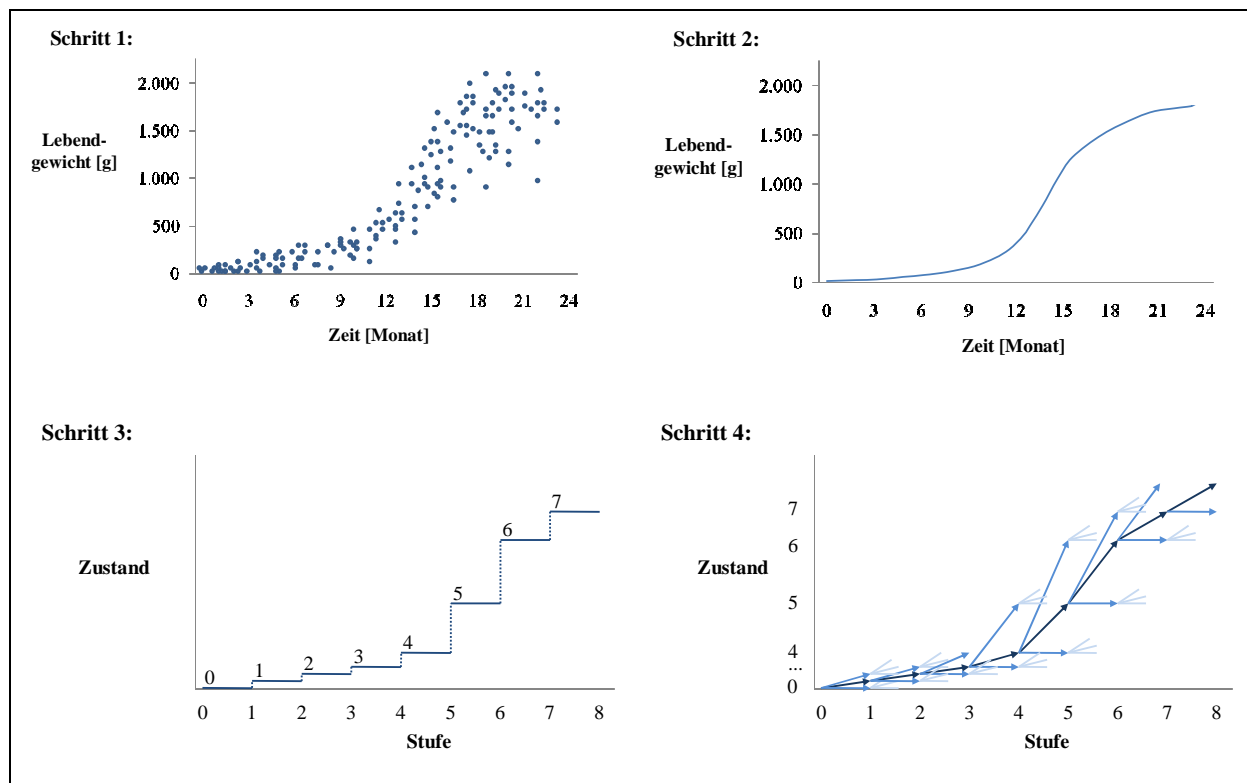


Abb. 16: Schrittweise Modellierung des Fischwachstums (eigene Darstellung)

Schritt 1: Die Tiere werden im Zeitablauf einzeln gewogen und diese Lebendgewichte in Abhängigkeit der Zeit bzw. des Alters abgetragen, wodurch sich eine „Punktwolke“ ergibt.

Schritt 2: Anschließend wird mittels Regression eine kontinuierliche Wachstumsfunktion ermittelt. Diese Wachstumsfunktion dient den folgenden Betrachtungen als Produktionsfunktion. Sie verläuft in der Regel S-förmig und liefert den durchschnittlichen Zuwachs für jeden Zeitabschnitt.

Schritt 3: Um den Modellkonventionen zu entsprechen, ist die Produktionsfunktion zeitlich in Stufen und sachlich in Zustände zu zerlegen. Je größer die Anzahl der Stufen und Zustände, desto eher ähneln sich die glatte Wachstumskurve (Schritt 2) und der treppenförmige „Zustandsgraph“ (Schritt 3). Dennoch ignorieren beide Darstellungen das unterschiedliche Wachstumspotential und -tempo von Fischen gleichen Alters und gleicher Herkunft – den Effekt des „Auseinanderwachsens“. In Abbildung 16, Schritt 1, ist ersichtlich, dass die Gewichte der einzelnen Tiere zu Beginn der Betrachtung deutlich weniger streuen als zum Ende.

Schritt 4: Daher wird angenommen, dass der Transfer von Stufe s zu Stufe $s+1$ nicht mit einem automatischen, sicheren Lebendmassezuwachs verbunden ist (von z zu $z+1$), sondern dass die Gewichtszunahme einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegt.

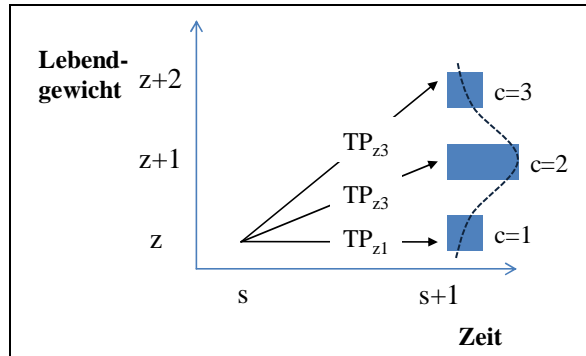


Abb. 17: Modellierung heterogenen Wachstums (eigene Darstellung)

Abbildung 17 veranschaulicht, dass Fische, die zu einem Zeitpunkt gleich schwer sind, nicht homogen wachsen, sondern zum folgenden Zeitpunkt sehr unterschiedliche Gewichte aufweisen können, die sich in Form einer Häufigkeitsverteilung für Gewichtsklassen darstellen lassen (in der Abbildung um 90° gedreht). Vereinfachend wird die Gewichtsverteilung in drei Klassen (c) diskret untergliedert.

So können im Allgemeinen Fische eines Zustands mit einer gewissen Transferwahrscheinlichkeit (TP) am Ende des Wachstumsintervalls entweder den gleichen Zustand aufweisen (nicht wachsen) oder höhere Zustände erreichen (wachsen) oder sogar niedrigere Zustände erlangen (an Gewicht verlieren). Folglich stellt sich das Wachstum nicht als eine treppenförmige, deterministische Funktion dar, sondern bildet eine Markow-Kette, eine Abfolge von wahrscheinlichkeitsbedingten Transfers, wie in Abb. 16 (Schritt 4) angedeutet.

Somit kann nur über den Verkauf oder die Weitermast von Tieren eines gewissen Zustands entschieden werden, die zuvor in diesen Zustand „transferiert“ worden sind:

$$(11a) \quad \sum_{s=0}^{S-1} \sum_{z=0}^Z \sum_{c=1}^C - (e_{sz} + w_{sz}) \cdot TP_{z1} - (e_{s,z-1} + w_{s,z-1}) \cdot TP_{z-1,2} \\ - (e_{s,z-2} + w_{s,z-2}) \cdot TP_{z-2,3} + v_{s+1,z} + k_{s+1,z} \\ + w_{s+1,z} + d_{s+1,z} \leq 0$$

mit:

$c = 1, 2, \dots, C$ Index für Wachstumsklassen

TP_{zc} Transferwahrscheinlichkeit von Fischen des Zustands z der Wachstums-
klasse c

Vom Transfer sind alle weitergemästeten Fische betroffen, ausgenommen die Fische, über die bereits eine Entscheidung zum Verkauf gefallen ist. Die Gewichtszunahme innerhalb eines Zeitabschnitts (von s bis $s+I$) beruht auf Transferwahrscheinlichkeiten, wobei drei Wachstumsklassen unterschieden werden: Langsamwüchsige Tiere nehmen so gut wie gar nicht zu und behalten den Gewichtszustand z mit der Wahrscheinlichkeit TP_{z1} bei, Normalwüchsige erreichen den Zustand $z+1$ mit TP_{z2} und Schnellwüchsige den Zustand $z+2$ mit TP_{z3} (Abb. 17).

Die Transferwahrscheinlichkeiten selbst beruhen wiederum auf Wachstumswahrscheinlichkeiten, den Tierverlusten und der Selektion:

$$(11b) \quad TP_{zc} = WP_{zc} - VA_{zc} - SA_{zc} + SE_{zc}$$

mit:

WP_{zc} Wachstumswahrscheinlichkeit von Fischen des Zustands z der Wachstums-
klasse c , entspricht der Transferwahrscheinlichkeit vor Berücksichtigung von Sterblichkeit und betrieblichen Eingriffen, wobei

$$\sum_{c=1}^C WP_{zc} = 1$$

VA_{zc} Verlustanteil (natürliche Sterblichkeit) der Fische vom Zustand z der
Wachstumsklasse c

SA_{zc} Selektionsanteil der Fische vom Zustand z der Wachstumsklasse c

SE_{zc} Selektionserfolg (Erhöhung des Anteils schnellwüchsiger Tiere) der
Fische vom Zustand z der Wachstumsklasse c

Ausgehend von einer Wachstumswahrscheinlichkeit, die im Wesentlichen genetisch bedingt ist, beeinflussen Selektion und Sterblichkeit die Transferwahrscheinlichkeit von Fischen eines Zustands. Unter Selektion ist das frühzeitige Erkennen, Absammeln und vorzeitige Beenden der Mast schwachwüchsiger Tiere zu verstehen. Mit dieser operativen Aktivität kann gezielt auf das heterogene Fischwachstum reagiert werden.

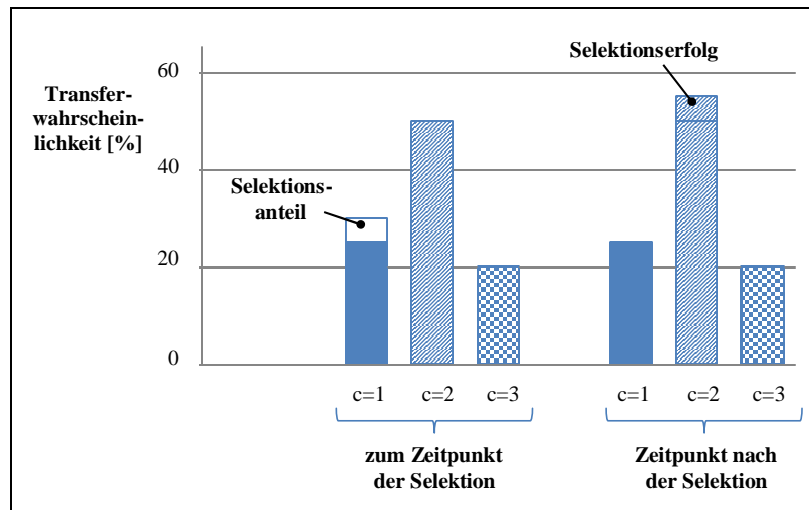


Abb. 18: Modellierung der Selektion und deren Konsequenzen (eigene Darstellung)

Wie Abb. 18 veranschaulicht, wirkt die Selektionsmaßnahme zum Zeitpunkt der Selektion nur wie eine Erhöhung der Sterblichkeit, indem die Transferwahrscheinlichkeit der Langsamwüchsigen ($c=1$) um den Selektionsanteil gemindert wird. Zum folgenden Betrachtungszeitpunkt jedoch verbessert sich die Wachstumsleistung der Fische dadurch, dass die Transferwahrscheinlichkeit der Normalwüchsigen erhöht wird. Der Anteil, um den sich die Transferwahrscheinlichkeit verbessert, der Selektionserfolg, entspricht in der Höhe dem zuvor entnommenen Selektionsanteil.

Im Mastverlauf wird zu fünf Zeitpunkten selektiert, dabei stimmen die Selektionszeitpunkte mit den Zeitpunkten der ersten fünf Futtertypwechsel überein. Verändert sich der Futteranspruch von Fischen, so werden sie in der Praxis sortiert und in andere Becken umgesetzt. Es wird angenommen, dass zu dieser Gelegenheit auch die Selektion stattfinden kann. Die Selektion erfolgt ausschließlich an verkaufsunfähigen Tieren. Die Selektionsmaßnahme selbst sei kostenneutral, das heißt, die Erlöse aus einer Verwertung der selektierten Fische kompensieren die Kosten der Selektion.

An dieser Stelle ist zu betonen, dass die gezielte Merzung schwachwüchsiger Fische in der lokalen Praxis bisher nicht diskutiert wurde und auch in der Literatur kaum Erwähnung findet. Zunächst erscheint eine Merzung wirtschaftlich kontraproduktiv, da bestimmte Teile des Tiervermögens vernichtet werden. Diese Entscheidungsvariante kann jedoch die Gesamtproduktion von unwirtschaftlichen Teilprozessen „befreien“ und gleichzeitig Mastkapazitäten für die profitablen Teilprozesse freisetzen – wie Modellkalkulationen in Abschnitt 5.2.1 zeigen werden.

3.3 Modellierung von Kontraktproduktion

Die Wahl des Absatzkanals hat Einfluss auf den erzielbaren Verkaufspreis und die absetzbare Vermarktungsmenge. Während der Großhandel und der Lebensmitteleinzelhandel Fische tendenziell in großen Mengen zu niedrigen Preisen einkaufen, können hingegen an Fisch-einzelhändler, Gastronomen und per Direktvermarktung kleine Mengen zu höheren Preisen verkauft werden, die stärkeren saisonalen Schwankungen ausgesetzt sind.

Tab. 8: Bestandteile des mathematischen Modells unter Berücksichtigung von Kontraktproduktion (eigene Darstellung)

		Formel	Abschnitt
ZFW	= Zielfunktionsbeitrag (ZFB) aus Schlachtung und Verkauf	(7a)	3.1.1
	+ ZFB aus der Erfüllung von Kontrakten	(7j)	3.3
	+ ZFB aus Zukauf und Besatz	(7b)	3.1.2
	+ ZFB aus der Weitermast	(7c), (7d)	3.1.3
	+ ZFB aus der Weitermast und anschließendem Verkauf	(7e)	3.1.4
	+ ZFB aus der Fischkohorten-Becken-Allokation“	(7f)	3.1.5
	+ ZFB aus der Weitermast am Ende des Planungszeitraums auf Basis bewerteter Endzustände	(7g), (7h), (7i)	3.1.6
	= max!		
unter den Restriktionen:			
	Anfangsbesatz	(8)	3.2.1
	Kontraktmenge	(12)	3.3
	Filterkapazität	(9a), (9b), (9c)	3.2.2
	Mastplatzkapazität und Restriktionen der Fischkohorten-Becken-Allokation	(10a), (10b), (10c)	3.2.3
	Transferrestriktionen (Modellierung von Wachstum und Selektion)	(11a), (11b)	3.2.4

Ein Mittel zur Eingrenzung von Preis- und Mengenrisiken stellen Kontrakte dar. In Kontrakten sind mindestens die abzuliefernde Menge, der Lieferzeitpunkt und der Preis vereinbart. Kontraktproduktion ist für Aquakulturbetriebe eine Besonderheit, sodass auch ihre Modellierung gesondert vorgestellt wird. Tabelle 8 zeigt dazu, wie sich zum einen die Kontraktverkaufsaktivität und zum anderen die Kontraktmengenrestriktion in die Struktur des mathematischen Modells einfügen.

Die Erlöse aus der Erfüllung von Kontrakten berechnen sich so wie die aus der in Formel (7a) beschriebenen Verkaufsaktivität:

$$(7j) \quad \dots + \sum_{s=0}^S \sum_{h=1}^H \sum_{z=0}^Z k_{sz} \cdot LM_z \cdot (PK_{sh} - KS_{sz} - KV_{sz}) \cdot Q^{-s} \dots$$

mit:

$h = 1, 2, \dots, H$ Index für Handelsklassen, in denen Fische über Kontrakte gehandelt werden

PK_{sh} Schlachtpreise, die im Kontrakt vereinbart wurden, auf der Stufe s für Fische der Handelsklasse h

Kontraktvereinbarungen umfassen demzufolge den Erfüllungszeitpunkt (Stufe) und die Preise von Fischen einer bestimmten Handelsklasse. Handelsklassen werden als marktübliche Gewichtsklassen betrachtet, in denen Fische zu einem Preis per Kontrakt gehandelt werden und denen sich Fische eines bestimmten Zustands eindeutig zuordnen lassen.

Neben Erfüllungszeitpunkt und Preisen beinhalten die Kontrakte die zu erbringenden Liefermengen an Fischen der jeweiligen Handelsklassen:

$$(12) \quad \sum_{s=0}^S \sum_{h=1}^H \sum_{z=0}^Z k_{sz} \cdot LM_z = QK_{sh}$$

mit:

QK_{sh} abzuliefernde Menge auf der Stufe s , die im Kontrakt für Fische der Handelsklasse h festgeschrieben ist

Auf die Modellierung von Konventionalstrafen bei Unterschreitung der Kontraktmenge wird verzichtet, sodass die Kontraktmengenrestriktion absolut bindend wirkt.

Kontrakte engen die Freiheit der optimalen Prozessplanung ein. Im Kontrakt vereinbarte Fischmengen müssen produziert werden und belegen Kapazitäten der Aquakulturanlage bis sie zu einem festen Termin zur Schlachtung bereitstehen. Für „Marktproduktion“ steht dementsprechend weniger Kapazität zur Verfügung.

Dabei sind Kontrakte nicht allein als ein Vertrag zwischen einem Mäster und einem Abnehmer aufzufassen. Ebenso kann ein Kontrakt im Sinne der Modellformulierung ein Bündel von Kontrakten enthalten oder die Lieferverpflichtung gegenüber einer Reihe von Abnehmern abbilden. Darüber hinaus ist vorstellbar, dass sich Produzenten selbst verpflichten, zu festen Terminen eine bestimmte Menge zu vermarkten. Außerdem können Kontrakte dazu dienen,

die Erlöse zu terminieren und zur Liquiditätssicherung die Einzahlungen über das Wirtschaftsjahr hinweg zu glätten.

3.4 Implizite Modellannahmen und -vorentscheidungen

Ein Ziel der Modellierung besteht darin, möglichst wenige wirtschaftlich bedeutsame Vorentscheidungen zu fällen, um den „Handlungsspielraum“ der Optimierung nicht von vornherein zu stark zu beschränken und die Ergebnisse nicht zu stark zu beeinflussen. Doch damit das Modell handhabbar bleibt, sind eine Reihe von Vorentscheidungen und Annahmen notwendig:

- a) *Konzentration auf operative Prozesse:* Das Modell umfasst ausschließlich operative Fischmastprozesse: den Kauf von Besatzfischen, die Weitermast von Masttieren, die Selektion schlechtwüchsiger Fische, die Allokation von Fischkohorten zu Becken und den Verkauf von Schlachtfischen. Auch wenn beispielsweise die Optimierung von Futterrationierung oder Anlagenaufbau oder Züchtung wirtschaftliche Vorteile erbringen und Bestandteil wirtschaftlicher Modellierungen bilden könnten, werden diese Faktoren im Rahmen dieser Studie als gegeben betrachtet.
- b) *Abbildung des „Normalbetriebs“ einer Aquakulturanlage:* Die betrieblichen Abläufe einer Kreislaufanlage sind zuverlässig und nicht von außergewöhnlichen Störungen betroffen. In der Praxis können Störungen in Form von technischen Defekten, Krankheitsbefall etc. zu erhöhten Ausfällen – bis zu Totalausfällen – führen. Diese betrieblichen Schocks werden nicht explizit modelliert, ihre Folgen sind jedoch im Modell im Verlustanteil berücksichtigt. Außerdem wird davon ausgegangen, dass intensiv wirtschaftende Aquakulturbetriebe Vorsorgemaßnahmen treffen und über Notstromaggregate und Quarantänestationen verfügen, zuverlässige Steuerungs-, Regelungs- und Alarmtechnik einsetzen, Impfungen und Gesundheitskontrollen durchführen, Versicherungen abschließen etc. Die Kosten für eine Vielzahl dieser Maßnahmen schlagen sich im Modell in den sonstigen betrieblichen Kosten nieder.
- c) *Abbildung des Planungshorizontes in Stufen:* Das Entscheidungsproblem lässt sich zeitlich in Stufen zerlegen. Die betrieblichen Entscheidungen werden zu einem Zeitpunkt getroffen und wirken bis zum folgenden Zeitpunkt. Dabei sind die Abstände zwischen den Stufen frei zu wählen und bestimmen die Realitätsnähe des Modells.
- d) *Vollständige Information während der Planung:* Zu Planungsbeginn liegen alle Informationen, die für den gesamten Planungszeitraum notwendig sind, vollständig und mit Gewissheit vor.

- e) *Abbildung des Wachstumsprozesses in Zuständen:* Der Wachstumsprozess lässt sich quantitativ in Zustände zerlegen. Zwar kann durch die Vervielfachung von Zuständen die Modellgenauigkeit erhöht werden, jedoch muss gewährleistet sein, dass sich während der Mast die Fische eindeutig nach ihrem Zustand unterscheiden lassen.
- f) *Keine Zu- oder Verkaufsbeschränkungen:* Jederzeit kann eine beliebige Anzahl von Fischen zugekauft und abgesetzt werden. Rabatte, feste Losgrößen, Nachfrage- oder Angebotsengpässe werden außer Acht gelassen. Die Kontraktproduktion bildet einen Sonderfall, der separat behandelt wird.
- g) *Keine Preisdifferenzierung:* Verkaufspreise werden nicht nach Abnehmer oder Verkaufsmenge differenziert. Zwar können in Kontrakten andere individuelle Preisvereinbarungen abgebildet werden, aber im Allgemeinen werden Fische eines Zustands auf einer Stufe zu einem einheitlichen Preis verkauft, unabhängig von Kundenart (Großhandel, Einzelhandel, Gastronomie, Verbraucher) oder Absatzmenge.
- h) *Linearer Verlauf, variable Kosten:* Alle berücksichtigten variablen Kosten können sowohl zeitlich schwanken als auch sich hinsichtlich des Gewichts der Fische unterscheiden. Jedoch werden nicht-lineare Kostenverläufe, beispielsweise aufgrund von Rabatten, vernachlässigt.
- i) *Bildung von Fischkohorten:* Fische eines bestimmten Lebendgewichts beanspruchen einen bestimmten Futter- und Beckentyp. Tiere mit gleichem Futter- und Beckentypbedarf bilden eine Fischkohorte. Zum einen wird angenommen, dass Fische eines bestimmten Gewichts nur in bestimmten Beckentypen gehalten werden können. Zum anderen wird unterstellt, dass nur Fische in einem Becken gemeinsam gehalten werden dürfen, die das gleiche Futter benötigen, da pro Becken nur ein Futtertyp verabreicht wird. Daher sind Fischkohorten für die Entscheidung über die Belegung von Becken maßgeblich.
- j) *Wachstumsunabhängiger Futterverbrauch:* Der Futterverbrauch aller Fische eines Zustands im Zeitraum s bis $s+1$ ist gleich. Dabei wird angenommen, dass im Durchschnitt Fische in diesem Zeitraum den nächsthöheren Zustand erreichen und dazu eine gewisse Futtermenge benötigen. So wird ignoriert, dass schnellwüchsige Tiere im gleichen Zeitraum einen tendenziell höheren und langsamwüchsige Tiere einen tendenziell niedrigeren Futterverbrauch aufweisen.
- k) *Modellierung des heterogenen Wachstum als Markow-Kette:* Zum einen gilt für das Fischwachstum die Markow-Eigenschaft, das heißt, der Transfer auf einen Zustand erfolgt nur auf Basis von Informationen über den vorhergehenden Zustand. Damit wird

beispielsweise das Phänomen eines potentiellen kompensatorischen Wachstums von Fischen (zunächst schwachwüchsige Tiere nehmen in späteren Wachstumsabschnitten überdurchschnittlich zu) nicht betrachtet (die aktuelle Datenlage über das Steinbutt-wachstum gibt hierzu auch keine Veranlassung). Zum anderen genügt die Einteilung des Fischbesatzes in drei Wachstumsklassen (Schnellwüchsige, Normalwüchsige und Langsamwüchsige), um heterogenes Wachstum abzubilden. Der Anteil der Fische, die einer bestimmten Wachstumsklasse angehören, ist durch Messungen oder Schätzungen quantifizierbar.

- l) *Transfer der Weitermast-und-Verkauf-Aktivität*: Fällt eine Entscheidung über die Weitermast und den anschließenden Verkauf von Tieren, so liegt zwischen beiden Teilentscheidungen eine Wachstumsperiode. Der an diese Entscheidung gekoppelte Transfer erfolgt ohne Berücksichtigung von Sterblichkeit und heterogenem Wachstum.
- m) *Selektion als Bestandteil des Transfers*: Das Selektieren wird als das Identifizieren, Absammeln und vorzeitiges Beenden der Mast schlechtwüchsiger Tiere aufgefasst und stellt damit eine operative Handlung dar. Jedoch wird die Anzahl zu selektierender Fische nicht als unabhängige Entscheidungsvariable, sondern als Selektionsanteil in einem technischen Koeffizienten modelliert, der vorzubestimmen ist. Ebenso ist der Selektionserfolg, die Folge der Selektion, nicht direkter Optimierungsbestandteil, sondern als technischer Parameter berücksichtigt.
- n) *Biofilter-Restriktion*: Der biologische Filter und seine Stickstoffabbauleistung innerhalb des Filtrationssystems wirken als begrenzende Faktoren für alle Prozesse einer geschlossenen Kreislaufanlage insgesamt restriktiv.
- o) *Berechnung des Endzustandswertes auf Basis der Proteinaufnahme*: Für noch vermarktungsunfähige Fische kann die bis zum Erreichen eines bestimmten Gewichtes aufgenommene Proteinmenge herangezogen werden, um einen fiktiven Verkehrswert zu ermitteln. Die Proteinmenge dient als Maß für die Wertentwicklung.

4 Realisation und Anwendung des Modells in der Steinbuttmast

Das vorgestellte Optimierungsmodell soll auf die operativen Prozesse der Steinbuttmast in geschlossenen Kreislaufanlagen angewandt werden.

Das Steinbuttmastmodell enthält einige Variablen, die ausschließlich ganzzahlige Werte annehmen können, beispielsweise die Anzahl belegter Becken. Das Modell soll mithilfe von Standardsoftware in Matrixform formuliert und gelöst werden (Abschnitt 4.1). Der Planungshorizont und die zeitlichen Abstände zwischen den Entscheidungen sind zu bestimmen (Abschnitt 4.2). Zur Modellrealisierung sind Parameter und Koeffizienten durch betriebliche Daten, die in der betrachteten Anlage erhoben worden sind, oder durch Daten aus der Literatur oder Annahmen zu quantifizieren. Dazu sind biologische Eigenschaften des Steinbutts, insbesondere sein Wachstum, abzubilden (Abschnitt 4.3) wie auch die Gegebenheiten einer geschlossenen Kreislaufanlage zu berücksichtigen (Abschnitt 4.4). Außerdem sollen wirtschaftliche Umweltbedingungen der Steinbuttmast identifiziert und modelliert werden (Abschnitt 4.5).

4.1 Einsatz von Standardsoftware zur Matrixkonstruktion und Modelllösung

Das Modell zur Optimierung der Steinbuttmastprozesse wird in Matrixform aufgestellt und gelöst. In Hinblick auf den Einsatz in der Planungspraxis kommt Standardsoftware zum Einsatz.

Die Steinbuttmast lässt sich als ein mehrperiodiges Entscheidungsproblem auffassen, das in Unterprobleme zerlegt werden kann (Dekomposition). Der Aufbau der Matrix verdeutlicht die Zerlegung und schrittweise Betrachtung des Problems. Abbildung 19 stellt dazu schematisiert die Struktur des Tableaus dar, das mithilfe der Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel 2007 formuliert wurde.

Anhand der weißen Flächen, die Bereiche ohne Koeffizienten oder Variablen symbolisieren, ist ersichtlich, dass die Matrix insgesamt nur dünn mit Koeffizienten besetzt ist. Die Matrix weist eine Koeffizientendichte (*Sparsity Ratio*) von nur 0,26 % auf, das heißt, weniger als 1 % aller Koeffizienten nehmen einen anderen Wert als Null an.¹¹

¹¹ Die Werte beziehen sich auf das Modell ohne Berücksichtigung von Kontraktproduktion; mit Modellierung von Kontrakten liegt die *Sparsity Ratio* bei 0,25 %.

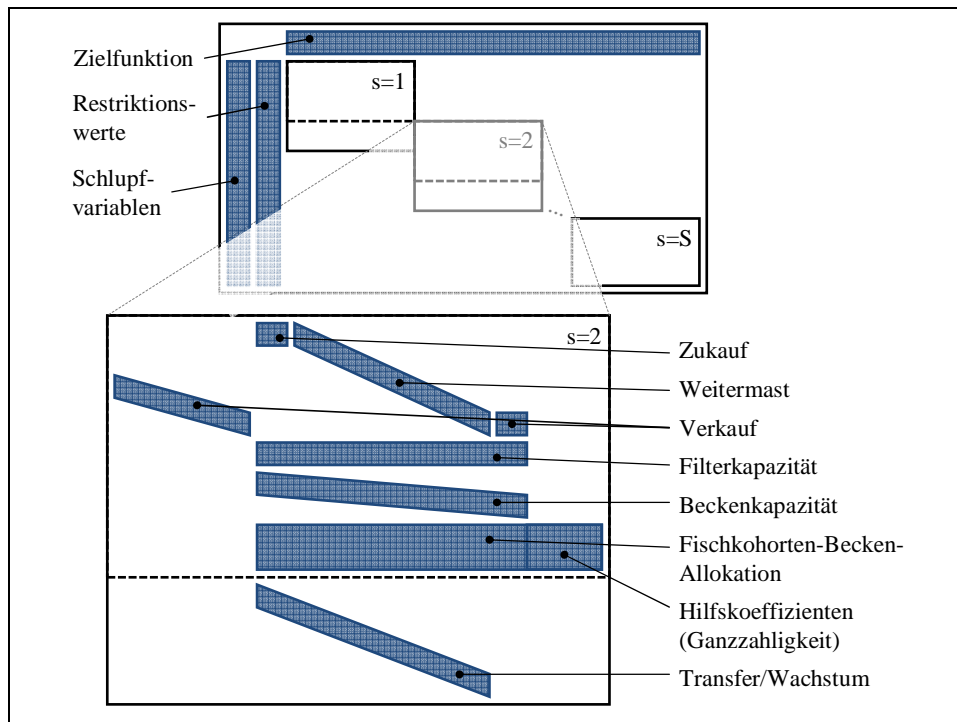


Abb. 19: Schematischer Aufbau der Matrix (eigene Darstellung)

Die Gesamtmatrix enthält zum einen die stufenübergreifende Zielfunktion. Die konkrete Modellierung der einzelnen Bestandteile der Matrix verdeutlichen die Ausschnitte des Excel-Tableaus in Anhang C. Die Ausprägungen der Zielfunktion sind dementsprechend exemplarisch in Tab. 29 nachzuvollziehen. Des Weiteren beinhaltet die Gesamtmatrix die Restriktionswerte (*Right-Hand-Side-Vektor*), die die Ober- bzw. Untergrenzen der Nebenbedingungen definieren, und die Schlupfvariablen (*Left-Hand-Side-Vektor*), die nach der Optimierung die ungenutzten Kapazitäten angeben. Den Kern der Matrix bilden die treppenförmig angeordneten Teilmatrizen. Dabei bildet jede Teilmatrix das Entscheidungsproblem auf einer Stufe ab und enthält die Koeffizienten möglicher operativer Aktivitäten sowie der zugehörigen Restriktionen. Anhang C enthält dazu exemplarisch die Modellierungsdetails der Zukauf- (Tab. 30), Weitermast- (Tab. 31), Verkaufsaktivität (Tab. 32), der Filter- (Tab. 33) und Beckenrestriktion (Tab. 34) sowie der Fischkohorten-Becken-Allokation (Tab. 35). Die Teilmatrizen sind über Transferrestriktionen (Tab. 36) miteinander verbunden.

Das so formulierte Steinbuttmastmodell umfasst 2.583 Entscheidungsvariablen, davon sind 329 ganzzahlig, und 1.764 Restriktionen.¹² Damit ist das Modell zu groß, um es mit dem Standardsolver von Microsoft Excel lösen zu können, der für Probleme mit maximal 200 Variablen und 200 Restriktionen Lösungen ermittelt. Für die Serienrechnung kam daher das

¹² Die Werte beziehen sich auf das Modell ohne Kontrakte; inklusive Kontraktproduktion umfasst das Modell 2.638 Entscheidungsvariablen, davon 329 ganzzahlige, und 1.803 Restriktionen.

Programm Premium Solver Platform 8.0 zum Einsatz. Premium Solver Platform ist ein Add-in für Microsoft Excel, entwickelt von der Firma Frontline, die auch für die Entwicklung des Excel-Standard-Solvers verantwortlich ist. Dementsprechend ist Premium Solver Platform kompatibel zu Microsoft Excel, benutzerfreundlich und liefert auf Basis langer Entwicklungserfahrung zuverlässige Ergebnisse. So können gemischt-ganzzahlige lineare Optimierungsmodelle mit bis zu 8.000 kontinuierlichen Variablen, 2.000 ganzzahligen Variablen und 8.000 Restriktionen zuverlässig gelöst werden (Frontline 2007). Die Berücksichtigung ganzzahliger Variablen führt dazu, dass das Modell nicht-konvex ist und seine Lösung längere Rechenzeit erfordert als Modelle ohne Ganzzahligkeitsbedingungen. Premium Solver Platform greift zur Lösung von gemischt-ganzzahligen linearen Modellen auf die Branch-and-Bound-Methode zurück und verwendet "improved pseudocost-based branch and variable selection, reduced cost fixing, primal heuristics, cut generation, Dual Simplex and preprocessing and probing methods to greatly speed up the solution of integer linear programming problems" (Frontline 2007, S. 116).

Schlechte Skalierung stellt häufig einen Grund für lange Rechenzeiten, Rundungsfehler und unzuverlässige Lösungen dar. Beispielsweise gilt ein Entscheidungsproblem als schlecht skaliert, wenn seine Restriktionswerte Millionenbeträge annehmen und die Entscheidungsvariablen über mehrere Nachkommastellen verfügen (Fleischhauer 1999, Dantzig und Thapa 1997, Martin 1999, Ragsdale 1995). Daher ist für das Steinbuttmastmodell die Entscheidungseinheit auf 1.000 Fische dimensioniert.

4.2 Bestimmung der Planungsdauer und der Entscheidungsintervalle

Die Modellkonventionen der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung erfordern die zeitliche Begrenzung (Planungshorizont) und Zerlegung (Stufen) des Entscheidungsproblems.

Die Steinbuttmast lässt sich anhand unterschiedlicher Kriterien zeitlich unterteilen. Dabei ist eine große Bandbreite zu beobachten. So weist beispielsweise die Kreislaufanlage eine wirtschaftliche Nutzungsdauer von 30 Jahren auf, die Preise schwanken täglich und die Fische wachsen kontinuierlich. Darüber hinaus führt Tab. 9 eine Auswahl von Intervallen auf, in die sich der reale Mastprozess gliedert.

Zur zeitlichen Abbildung des vorliegenden Sachproblems sind insbesondere die tatsächlichen Dokumentations- und Entscheidungsintervalle von Bedeutung. Die laufenden Aufzeichnungen der Prozessdokumentation (Betriebsbuchführung) stellen das Datenmaterial für die Modellrealisierung dar. Die zeitlichen Abstände der betrieblichen Entscheidungen sollen

Tab. 9: Dokumentations-, Regelungs- und betriebliche Entscheidungsintervalle der Steinbuttmast (eigene Darstellung)

Dokumentationsintervalle:	
Jahresabschluss	1 Jahr
Betriebswirtschaftliche Auswertung	1 Monat bzw. 3 Monate
Betriebsstatistik	1 Tag bzw. 1 Monat
Regelungsintervalle:	
pH-Wert, Stickstoff-, Salzgehalt etc.	1 Tag
Wasserreinigung, -austausch	< 1 Minute
Sauerstoffgehalt	< 1 Minute
Intervalle zwischen betrieblichen Entscheidungen:	
Verkauf (mögliche Mastdauer)	15 bis 24 Monate
Futterwechsel	2 bis 5 Monate
Sortierung und Beckenwechsel	6 bis 8 Wochen

möglichst realitätsnah abgebildet werden. Daher umfasst die Planung des betrachteten Steinbuttmastbetriebs einen Zeitraum von vier Jahren (dies entspricht der durchschnittlichen Dauer von zwei aufeinanderfolgenden Mastprozessen bis zum maximalen Verkaufsgewicht), der in 48 Stufen mit einem einheitlichen Abstand von 30 Tagen zerlegt wird. Insbesondere regelmäßige manuelle Sortierungen erfolgen in keinem geringeren Abstand als einem Monat, sodass die Wahl des Entscheidungsintervalls einen annehmbaren Kompromiss zwischen Realitätsnähe und dem Grad der Modellkomplexität darstellt.

4.3 Berücksichtigung der biologischen Eigenschaften des Steinbutts

Biologische Faktoren, die für die Planung betrieblicher Entscheidungen von Bedeutung sind und quantifiziert werden müssen, sind das Wachstum des Steinbutts, sein Futterbedarf, sein Mastplatzanspruch und sein Stickstoffeintrag in das Wassersystem der geschlossenen Kreislaufanlage.

Die Modellierung des Steinbutt Wachstums soll in vier Schritten erfolgen, wie in Abb. 16 dargestellt. Zunächst sind die Fische im Zeitablauf zu wiegen und ihre Einzelgewichte sind zu dokumentieren (Modellierungsschritt 1). Im Steinbuttmastbetrieb, dessen Managementpraxis den Modellierungsüberlegungen zugrunde liegen, sind jedoch nur bis zum 600. Masttag zuverlässige Daten erhoben worden. Nach dieser Mastzeit erreichen Steinbutte im Durchschnitt ein Lebendgewicht von etwa 1,5 kg. Da ein maximales Verkaufsgewicht von etwa 2 kg ange-

strebt wird, werden bezüglich des übrigen Wachstumsverlaufs Annahmen getroffen. So gliedert sich die Wachstumsfunktion des Steinbutts in zwei Teile:

$$(13) \quad LM_t = \begin{cases} LM_0 + ZR_t \cdot t & \text{für } 0 \leq t < 600 \\ MLM \cdot \left(1 - \left(-1 \left(\frac{LM_0}{MLM}\right)^{\frac{1}{3}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-KKW \cdot t}{3}\right)\right)^3 & \text{für } t \geq 600 \end{cases}$$

mit:

$t = 0, 1, \dots, T$ Index für die Masttage

ZR_t durchschnittliche Zuwachsrate pro Masttag t

MLM Asymptote für maximaler Lebendmasse LM bei $t \rightarrow \infty$

KKW Koeffizient für katabolisches Wachstum

Dem ersten Teil der Funktion ($t < 600$) liegen die erfassten Daten zur Gewichtsentwicklung der Steinbutte zugrunde. Dabei wird der Wachstumsverlauf in acht Mastabschnitte zerlegt und jeweils eine lineare Regression vorgenommen (Modellierungsschritt 2). Die durchschnittlichen täglichen Zuwachsraten sind in Tab. 10 für jeden Mastabschnitt aufgeführt.

Tab. 10: Zuwachsraten des Steinbutts für die erste Mastphase für $t < 600$ (eigene Darstellung)

Mastabschnitt [Tage]	tägliche Zunahme [g]
t	ZR
0-84	0,26
85-163	0,46
164-257	0,67
258-336	1,63
337-394	3,73
395-451	6,26
452-504	9,56
505-559	4,35

Der zweite Teil der Wachstumsfunktion ($t \geq 600$) orientiert sich an Bertalanffys Wachstumstheorie, die nach Ansicht von Pauly (1979) eine gute Näherung für die Gewichtszunahme von Fischen darstellt. Bertalanffy (1951) beschreibt das Wachstum von Lebewesen mit zwei

gegensätzlichen Prozessen, einem aufbauenden (Anabolismus) und einem abbauenden (Katabolismus):

$$(14) \quad \frac{\partial LM}{\partial t} = KAW \cdot LM^{EAW} - KKW \cdot LM^{EKW}$$

mit:

KAW	Koeffizient für anabolisches Wachstum
EAW	exponentieller Parameter für das anabolische Wachstum
EKW	exponentieller Parameter für das katabolische Wachstum

Bertalanffy (1951) nimmt an, dass sich die Abbauprozesse proportional zur Lebendmasse verhalten, sodass $EAW = 1$ gesetzt werden kann. Außerdem bezieht er sich auf die Oberflächenregel von Rubner und auf die Meeh'sche Formel, wonach sich die Oberfläche proportional zur $2/3$ -Potenz der Körpermasse verhält, und setzt $EKW = 2/3$. Nach Umformung ergibt sich somit der zweite Term der Formel (13).

Die biologisch maximal erreichbare Lebendmasse von Steinbutt (MLM) beziffert Kändler (1949) mit 32 kg, benennt jedoch ein durchschnittlich erreichbares Endgewicht von etwa 20 kg als realistisch. Unter den Bedingungen der betrachteten Aquakulturanlage ist jedoch nur mit einem Maximalgewicht von 3 kg zu rechnen. Der Koeffizient für das katabolische Wachstum ist mit 0,12 anzusetzen (Griese 2007, Winkelmann 2007).

Weiter ist der Wachstumsprozess diskret in Zustände zu zerlegen, die jeweils eine bestimmte Lebendmasse repräsentieren. Steinbutte benötigen von einem Anfangsgewicht von 5 g zum Erreichen des (wirtschaftlich) maximalen Mastendgewichts von 2 kg im Mittel etwa 24 Monate. Unter der Annahme, dass operative Entscheidungen einmal pro Monat zu treffen sind und dass der Anfangs- wie auch der Endzustand zu modellieren sind, wird das Wachstum in 25 Zustände unterteilt, wie Abb. 20 veranschaulicht (Modellierungsschritt 3). Da solide Daten zur unterschiedlichen Wachstumsgeschwindigkeit des Steinbutts und zur Verteilung der Wachstumswahrscheinlichkeiten fehlen, werden für einige typische Verteilungsarten (symmetrisch, recht- und linkssteil) sieben mögliche Wachstumsverteilungen angenommen, wie Tab. 11 zeigt (Modellierungsschritt 4).¹³

¹³ Die in Kapitel 5 vorzustellenden Berechnungen werden für jede der Verteilungen separat durchgeführt.

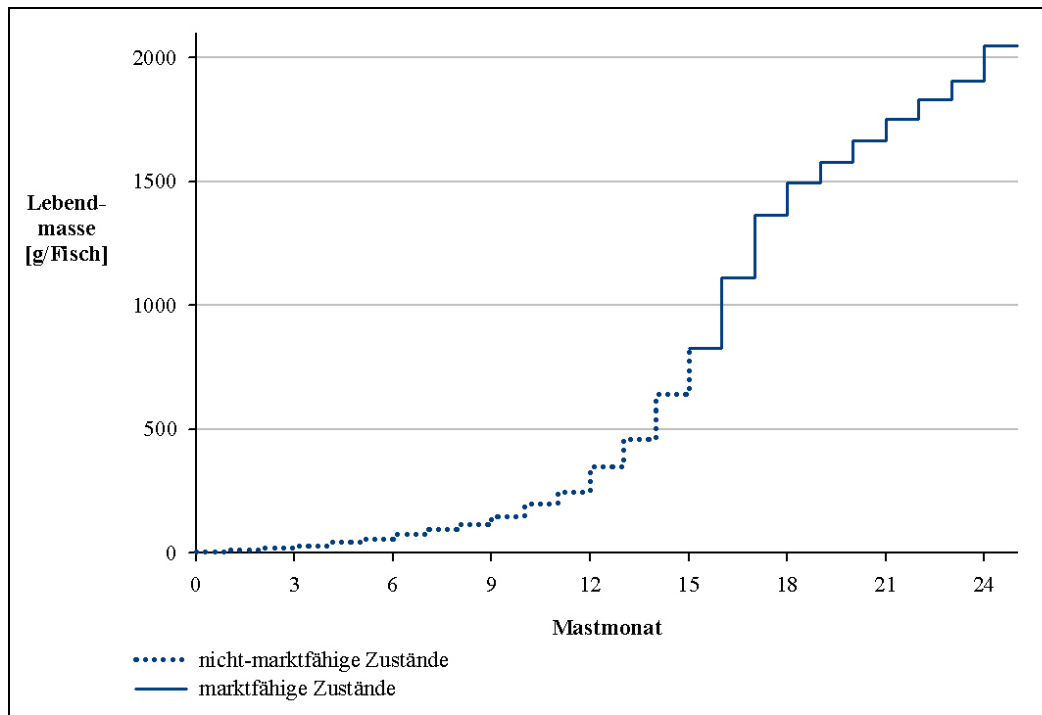
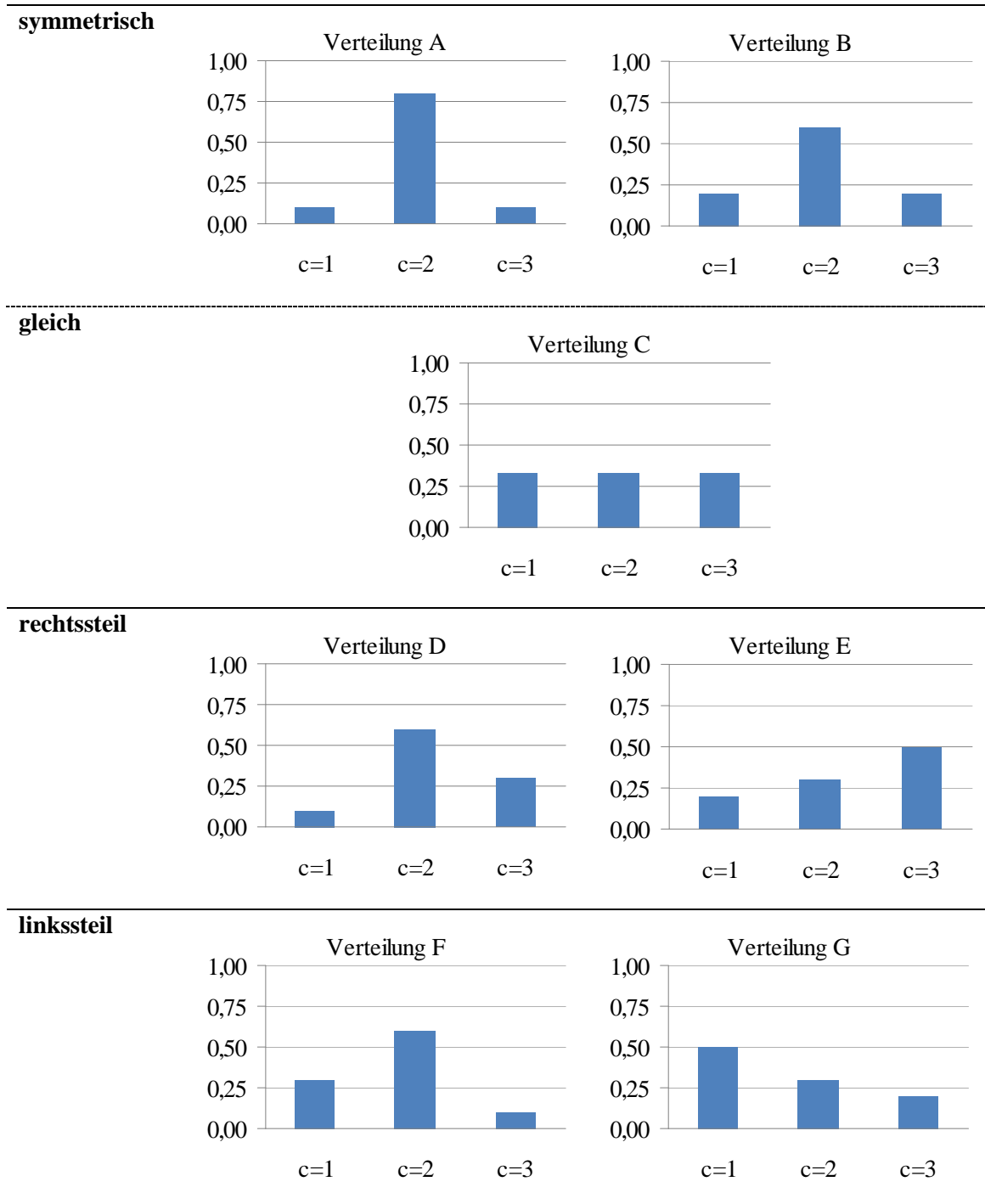


Abb. 20: Durchschnittliche Gewichtsentwicklung des Steinbutts (eigene Darstellung)

Des Weiteren soll eine durchschnittliche natürliche Sterblichkeit von 1 % des Besatzes pro Monat unterstellt werden. Schwankungen der Sterblichkeitsraten zwischen den Wachstumsphasen können in Ermangelung entsprechender Daten derzeit nicht berücksichtigt werden.

Je nach Gewicht beanspruchen Steinbutte Futter und Mastplatz, wie in Tab. 12 dargestellt. So müssen Fische eines Zustands mit einem bestimmten Futtertyp gefüttert und in einem bestimmten Beckentyp gehalten werden. Während des Mastprozesses kommen neun Futtertypen zum Einsatz, die sich in ihrer Zusammensetzung und Pelletierung voneinander unterscheiden. Zwar werden alle betrieblichen Entscheidungen zu Zeitpunkten getroffen, doch bezieht sich der Futterbedarf nicht auf den Entscheidungszeitpunkt oder ist als Tagesration zu verstehen. Stattdessen bezieht sich der Bedarf an Futter auf die Zeitspanne bis zur nächsten Entscheidung und ist damit als Futtermenge zu verstehen, die vom Steinbutt voraussichtlich zum Erreichen des nächsten Zustands im Laufe des folgenden Monats verbraucht wird. Dabei ist der Futtermittlungsquotient zu berücksichtigen, das Verhältnis von aufgenommener Futtermenge zum Lebendmassezuwachs. Die Futtermittlungsquote sinkt von 0,8 im Setzlingsstadium, in dem Fische neben Futter auch Umgebungswasser einlagern, das somit zur Lebendmassezunahme beiträgt, bis auf einen Wert von 1,5 in der Endmastphase. Der Mastplatzbedarf

Tab. 11: Angenommene Wachstumsverteilungen (eigene Darstellung)



ermittelt sich aus der maximalen Besatzdichte und der Lebendmasse der Fische. Steinbutte vom Zustand 24 haben ihr maximales Verkaufsgewicht erreicht, können annahmegemäß nicht weitergemästet werden und beanspruchen daher für den Folgemonat weder Futter noch Mastplatz.

Tab. 12: Mastplatz- und Futteranspruch von Steinbutt (eigene Darstellung)

Becken- typ	Futter- typ	Zustand	Futter- verwertung	Futter- bedarf [kg/1.000 Tiere]	Besatz- dichte [kg/m ²]	Mastplatz- bedarf [m ² /1.000 Tiere]	
b	f	z	FVQ	QF		MPB	
1	1	0	0,8	6,29	25	0,52	
		1	0,8	6,52	25	0,84	
	2	2	0,9	7,94	25	1,21	
		3	0,9	12,23	30	1,47	
2	3	4	0,9	12,65	30	1,92	
		5	1,0	16,70	30	2,51	
		6	1,0	19,74	35	2,73	
	7	7	1,0	20,34	35	3,30	
		8	8	1,0	34,83	35	4,26
			9	1,1	52,17	40	4,95
3	4	10	1,1	53,64	40	6,16	
		5	11	1,1	114,56	40	8,70
			12	1,2	129,81	45	10,22
	6	13	1,2	214,33	45	14,22	
		14	1,2	228,97	50	16,55	
	7	15	1,3	357,21	50	22,27	
		16	16	1,3	319,41	55	24,78
			8	17	1,3	170,99	55
	9	18		1,3	113,20	60	26,30
		19	1,4	121,28	65	25,64	
4		9	20	1,4	118,45	70	25,02
	21		1,4	115,26	75	24,42	
	22		1,5	111,78	80	23,85	
	23		1,5	210,27	85	24,11	

Wird über Fische zu einem beliebigen Zeitpunkt entschieden, dass sie weitergemästet werden sollen, so verbleiben sie bis zum nächsten Entscheidungszeitpunkt in der Anlage und belasten für diese Zeitspanne mit ihren Exkrementen das Wasserreinigungssystem. Die verursachten Emissionen beeinflussen die Wasserqualität und dürfen bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten (ab denen das Wachstum, die Gesundheit oder die Qualität der Fische beeinträchtigt werden). Für die Steinbuttmast in geschlossenen Kreislaufanlagen stellt die Menge an eingetragendem Stickstoff einen guten Indikator für die Wasserverschmutzung dar. Stickstoff und Stickstoffverbindungen (Nitrit, Nitrat, Ammonium etc.) beeinflussen die Wasserqualität entscheidend und werden vom Biofilter in einer begrenzten Menge abgebaut.

Tab. 13: Stickstoffeintrag von Steinbutt im Mastverlauf (eigene Darstellung)

Futtertyp	Rohproteinanteil [%]	Zustand	Stickstoffeintrag [kg TAN/1000 Fische]
f	FPA	z	QN
1	58	0	0,34
		1	0,35
2	58	2	0,42
		3	0,65
		4	0,67
3	54	5	0,83
		6	0,98
		7	1,01
4	54	8	1,73
		9	2,59
		10	2,66
5	54	11	5,69
		12	6,45
6	55	13	10,84
		14	11,59
7	55	15	18,07
		16	16,16
8	55	17	8,65
		18	5,73
		19	6,14
9	55	20	5,99
		21	5,83
		22	5,66
		23	10,64

Die Ermittlung des Stickstoffeintrags erfolgt in Abhängigkeit der Lebendmasse anhand der aufgenommenen Futtermenge, des Rohproteinanteils des Futters und anhand eines Standardwerts (PNK) für den Anteil des aufgenommenen Futterrohproteins, der als Stickstoff in das Anlagenwasser übergeht (Formel 9b). Laut Timmons et al. (2002) kann für PNK ein konstanter Wert von 0,092 angenommen werden. Tabelle 13 führt die Stickstoffmengen auf, die Steinbutte verschiedener Größen über einen Monat hinweg verursachen, angegeben in TAN (*Total Ammoniacal Nitrogen*).

4.4 Berücksichtigung der technischen Eigenschaften der Steinbuttmastanlage

Die Eigenschaften der geschlossenen Kreislaufanlage beeinflussen die Optimierung operativer Mastprozesse. So sind insbesondere der Aufbau der Anlage, die Becken, deren Typen, Anzahl, Größe, Anordnung und Bezeichnung sowie die Leistung des Filtersystems zu berücksichtigen.

Die betrachtete Steinbuttmananlage verfügt über eine begrenzte Anzahl von Fischbecken, die sich in ihrer Größe, ihrer Form und ihren Eigenschaften voneinander unterscheiden. Abbildung 21 veranschaulicht die Anordnung der Becken anhand einer Grundrisskizze. Die aufgeführten Module bilden Wasserkreisläufe, die jedoch nicht komplett separiert sind und beispielsweise auf eine gemeinsame Wasserzufuhr, einen Ozonabschäumer etc. zurückgreifen. An der Unterteilung der Anlage in Module orientiert sich die Bezeichnung der Becken, darüber hinaus haben die Module für die wirtschaftliche Prozessbetrachtung keine Bedeutung.

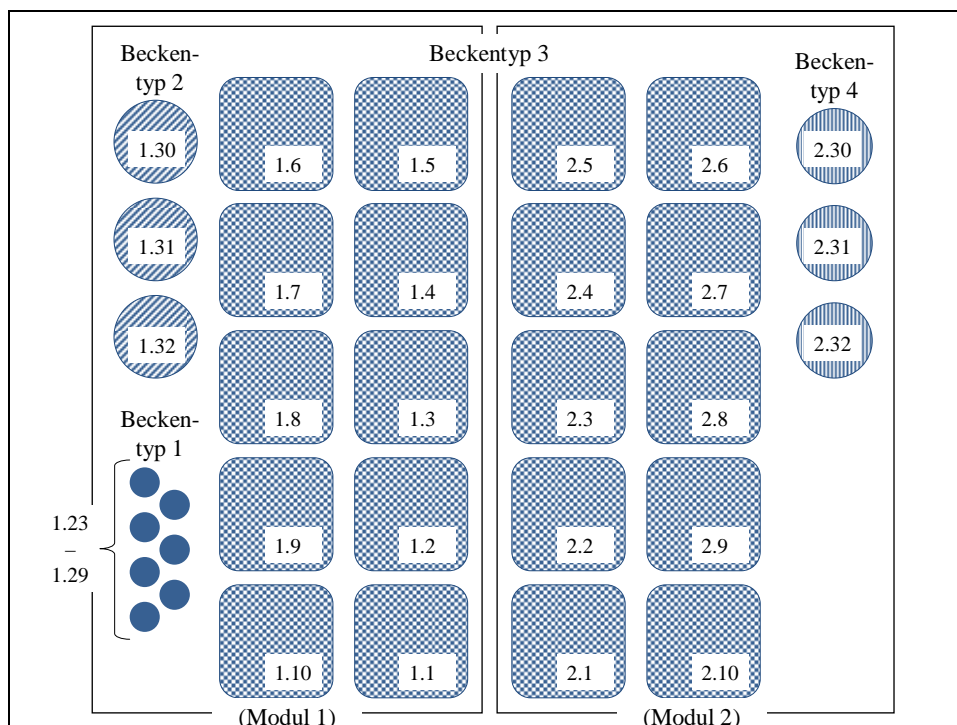


Abb. 21: Schematischer Aufbau der Steinbuttmananlage (eigene Darstellung)

Die 33 Becken lassen sich in vier Beckentypen aufteilen, in denen jeweils nur Steinbutte bestimmter Lebendmasse-Intervalle gehalten werden können. Tabelle 14 stellt die Merkmale der Anlagenbecken heraus.

Tab. 14: Beckeneigenschaften der Steinbuttmananlage (eigene Darstellung)

Becken- typ	Becken- bezeichnung	Anzahl der Becken eines Typs	Mastplatz- angebot [m ² /Becken]
b		BK	MPA
1	1.23–1.29	7	7,07
2	1.30–1.32	3	38,48
3	1.1–1.10; 2.1–2.10	20	64,00
4	2.30–2.32	3	28,27

Das Filtersystem und insbesondere der Biofilter der Steinbuttmastanlage wirken insgesamt begrenzend auf die Planung betrieblicher Prozesse. Formel (9c) ist zu entnehmen, wie sich die Kapazität des Biofilters in geschlossenen Kreislaufanlagen berechnet. Zur Ermittlung der maximalen Stickstoffmenge, die vom biologischen Filter auf der Stufe s bis zum Erreichen der Stufe $s+1$ abgebaut werden kann, sind folgende Parameter zu bestimmen:

- a) *Spezifische Oberfläche der Biocarrier*: Der in der betrachteten Aquakulturanlage verwendete Biocarrier (Typ E3) verfügt über eine spezifische Oberfläche von $836 \text{ m}^2 \text{ pro m}^3$ (Beth 2007).
- b) *Flächenabbaurate*: Die Stickstoffabbauleistung des eingesetzten Biocarrier kann laut Tal et al. (2003) mit $0,59 \text{ g TAN pro m}^2 \text{ pro Tag}$ festgesetzt werden.
- c) *Volumen des Biofilters der Aquakulturanlage*: Die Anlage ist mit zwei Biofilterbecken (Durchmesser: 5 m, Höhe: 2,5 m) ausgestattet. Die Biofilter sind zu 60 % mit Trägermaterial gefüllt, sodass sich ein Biofiltervolumen von $58,9 \text{ m}^3$ berechnet.

Daraus ergibt sich eine Filterkapazität von $871,63 \text{ kg TAN pro Monat}$ (mit 30 Tagen).

4.5 Berücksichtigung der Managementpraxis und der Marktbedingungen der Steinbuttmast

Managementroutinen und Marktgegebenheiten betreffen den Zukauf von Setzlingen, die Bewertung von Fischen am Ende des Planungshorizonts, die Produktion von Fischen, die per Kontrakt vermarktet werden, das maximale Mastendgewicht sowie die Mast und den Verkauf von Fischen, die dieses Endgewicht erreicht haben. Sie wirken wie Vorentscheidungen auf das Planungsmodell ein.

Der Markt für Steinbuttsetzlinge ist von einer geringen Anzahl von Zuchtbetrieben geprägt, wobei die Setzlinge ausschließlich mit einem Lebendgewicht von 5 g pro Tier gehandelt werden.

Das Modell kann einen laufenden Betrieb und seinen gegenwärtigen Besatz an Fischen beliebiger Größen bzw. Gewichte berücksichtigen. Für die Modellberechnungen soll von einem laufenden, aber unterbesetzten Anlagenbetrieb mit einem Anfangsbesatz von 25.000 Tieren vom Zustand $z=8$ und 25.000 Tieren vom Zustand $z=16$ ausgegangen werden.

Die anschließende Mast erfolgt nicht im Rein-Raus-Verfahren, sondern verläuft kontinuierlich – insbesondere aufgrund der heterogenen Wachstumsleistung von Steinbutt. Auch Wartungs- und Renovierungsarbeiten, wie etwa der regelmäßige Austausch der Biocarrier vom Biofilter, finden während des laufenden Betriebs statt. Daher stellt der völlige Still- und Leerstand der Mastanlage einen Sonderfall dar, der im Normalfall nicht abzubilden ist.

Ohne die Bewertung von möglichen Endzuständen könnte es modellbedingt zu Prozessabbrüchen und damit zum Becken- bis hin zum Anlagenleerstand kommen (Abschnitt 3.1.6). Deshalb ist der jeweilige Wert des Steinbuttbesatzes aller Zustände zum Ende des Planungshorizonts zu ermitteln und den in der Anlage verbleibenden Fischen am Ende der Planung zuzuweisen. Tabelle 15 führt dazu die Endzustandswerte von Steinbutt nach erreichter Lebendmasse (Zustand) auf. Zudem sind die aufgenommenen Proteinmengen angegeben, die als Bewertungsmaßstab für die noch nicht marktfähigen Fische dienen.

Steinbutt gilt ab einem Lebendgewicht von 800 g als vermarktungsfähig, das entspricht dem Zustand 15 (Griese 2007, Deutsche See 2009). Steinbutt mit vermarktungsfähiger Größe wird zu Marktpreisen bewertet.

Tab. 15: Wert von Steinbutt am Ende des Planungszeitraums (eigene Darstellung)

Zustand	Protein- aufnahmen [kg/1.000 Fische]	Endzustands- wert [€/1.000 Fische]
<i>z</i>	QP	EZW
0	5	1.087
1	5	1.102
2	5	1.133
3	8	1.213
4	8	1.293
5	9	1.401
6	11	1.534
7	11	1.668
8	18	1.933
9	26	2.347
10	26	2.760
11	55	3.685
12	60	4.707
13	99	6.416
14	103	8.190
15		9.587
16		14.145
17		18.444
18		21.149
19		23.247
20		25.497
21		27.769
22		30.055
23		32.349
24		35.891

die Bewertung ab Zustand 15 erfolgt auf Basis des Schlachtpreisszenarios 0

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass Steinbutte über Kontrakte vermarktet werden können. Die Ausgestaltung von Kontrakten umfasst den Erfüllungszeitpunkt, die vereinbarten Verkaufspreise sowie die abzuliefernden Mengen von Fischen einer Handelsklasse (Abschnitt 3.3). Dabei sollen „Osterkontrakte“ und „Weihnachtskontrakte“ voneinander unterscheiden werden, die jeweils zur Oster- bzw. Weihnachtszeit – den Phasen hoher Nachfrage und hoher Preise für Steinbutt – zu erfüllen sind. Stimmt der Planungsbeginn mit dem Jahresanfang überein, so sind „Osterkontrakte“ auf den Stufen $s=\{3, 15, 27, 39\}$ und „Weihnachtskontrakte“ auf den Stufen $s=\{11, 23, 35, 47\}$ fällig. Die Preise für Fische, die per Kontrakt gehandelt werden, werden anhand von Handelsklassen differenziert. So lassen sich Steinbutte eines Zustands fünf verschiedenen Handelsklassen eindeutig zuordnen, wie Tab. 16 zeigt.¹⁴

Tab. 16: Spezifikation der Handelsklassen für Steinbutt (eigene Darstellung)

Handelsklasse	Handelsklassengrenzen [kg LM/1.000 Fische]	Zustand
h		z
1	800–999	15
2	1.000–1.200	16
3	1.200–1.399	17
4	1.400–1.599	18
		19
5	1.600–1.800	20
		21

Steht bereits zum Zeitpunkt, zu dem über die Weitermast von Fischen entschieden wird, fest, dass diese Fische zum folgenden Zeitpunkt verkauft werden sollen, so können diese beiden Aktivitäten in einer zusammengefasst werden (Abschnitt 3.1.4). Da Steinbutte mit etwa 2 kg ihr wirtschaftliches Mastengewicht erreichen (sobald Grenzerlöse < Grenzkosten), kann über die Weitermast und den anschließenden Verkauf von Fischen, die kurz vor dem Erreichen dieses Gewichtes stehen und weitergemästet werden sollen, gleichzeitig entschieden werden. In der Steinbuttmast betrifft das die Weitermast von Fischen des Zustands 23, die auf der Folgestufe mit dem Zustand 24 (Mastengewicht) verkauft werden.

¹⁴ Kontraktpreise und -mengen werden variiert und mithilfe von Szenarien analysiert (Abschnitt 5.2.5).

5 Ergebnisse der wirtschaftlichen Optimierung des Steinbuttmastmodells

Das für die Probleme der Fischmast entwickelte gemischt-ganzzahlige lineare Programm ist auf die Steinbuttmast angewendet und mithilfe von Standardsoftware formuliert und gelöst worden. Die Rechenergebnisse der Optimierung beantworten folgende Fragen:

- a) Wie hoch ist das wirtschaftlich optimale Masterergebnis für die untersuchte Planungszeitspanne – die Summe der diskontierten Erlös- und Kostenpositionen (Wert des Zielfunktionswertes)?
- b) Wann (auf welcher Stufe) sollen wie viele Fische (Wert der Entscheidungsvariablen) welchen Gewichts (Zustand) jeweils zugekauft, weitergemästet oder verkauft (Wert der Entscheidungsvariablen) werden?
- c) Wann (auf welcher Stufe) sollen wie viele Becken welchen Typs (ganzzahliger Wert der Entscheidungsvariable m) mit wie vielen Fischen welchen Futteranspruchs (Fischkohorten-Becken-Allokation) belegt werden?
- d) Wann (auf welcher Stufe) wird wie viel der jeweiligen Kapazität (Filter, Mastplatz, Beckenanzahl) genutzt bzw. wie viel bleibt ungenutzt (Wert der Schlupfvariablen)?

Aus den Ergebnissen können zusätzliche Rückschlüsse gezogen und Informationen gewonnen werden. Beispielsweise können die Zusammensetzung des Zielfunktionswertes und der Zielfunktionsbeiträge (Kosten und Leistungen pro Monat, die bestimmten betrieblichen Prozessen zuordenbar sind) ermittelt werden. Ebenso lassen sich die Belegung einzelner Becken, die Anzahl der in diesem Becken gemästeten Fische und deren durchschnittliche Lebendmasse für jeden Monat zurückverfolgen. Die Ergebnisse einiger Testrechnungen sollen im Folgenden vorgestellt und interpretiert werden. Zur praktischen Managementunterstützung, zum besseren Verständnis und zur leichteren Analyse werden die mathematischen Lösungen zuvor noch in einem Ergebnis-Report aufbereitet (Abschnitt 5.1). Um die Robustheit des Modells zu testen und die Auswirkungen von veränderten Modellparametern auf die Optimalergebnisse zu untersuchen, sollen in Abschnitt 5.2 die Ergebnisse exemplarischer Szenarien vorgestellt werden.

5.1 Ergebnisaufbereitung

Die Rohergebnisse des Lösungsalgorithmus sind schwer verständlich und unkomfortabel zu interpretieren. Zwar erstellt das eingesetzte Lösungsprogramm automatisiert einen Antwortbericht (Abb. 47 im Anhang), jedoch ist dieser Bericht wegen des großen Umfangs und

mangels Gliederung durch Zwischenüberschriften unübersichtlich (im aufgeführten Beispiel verfügt der Antwortbericht über 4.372 Zeilen). Um die Rechenergebnisse leichter nutzbar zu machen, ist daher eine Aufbereitung der Rechenergebnisse erforderlich. Hierfür ist ebenso wie für Formulierung und Lösung des Modells Standardsoftware zum Einsatz gekommen, im Wesentlichen Komponenten von Microsoft Excel (Pivottabellen, Funktionen der bedingten Formatierung etc.). Auf diese Weise werden Berichte erzeugt (Abschnitte 5.1.1 und 5.1.2), ein vollständiger Finanzplan auf- (Abschnitt 5.1.3) und Schattenpreise begrenzender Faktoren dargestellt (Abschnitt 5.1.4).

5.1.1 Monatliche Managementempfehlung

Monatliche Managementempfehlungen¹⁵ sollen die wichtigsten betrieblichen Entscheidungen, die in einem Monat im Mastbetrieb anstehen, in Berichtsform zusammenfassen und übersichtlich in DIN-A4-Format darstellen. Diese Berichte können somit dem Betriebsleiter einer Aquakulturanlage als Handlungsempfehlung zur praktischen Managementunterstützung dienen. Abbildung 22 zeigt dazu einen Ausschnitt von zwei aufeinanderfolgenden Managementempfehlungen. Die kompletten Berichte sind dem Anhang zu entnehmen (Abb. 48 und 49).

Die monatliche Managementempfehlung stellt nur einen Ausschnitt (ein Monat) der Ergebnisse eines Rechenlaufs (48 Monate) dar. Sie geben den betreffenden Monat, einige betriebliche Stammdaten (Name, Nummer des Betriebs etc.) sowie eine Skizze des Anlagenaufbaus inklusiver der Nummerierung der Becken an. Zudem ist in Form eines Balkendiagramms der Auslastungsgrad der Beckentypen abgetragen.

Den Kern des Reports bilden die tabellarisch aufgeführten betrieblichen Handlungsempfehlungen. Für jedes Becken ist die Anzahl der Fische angegeben,

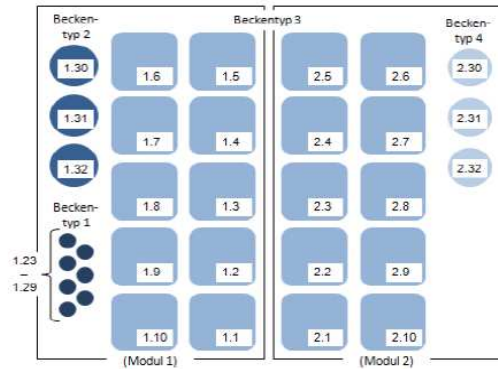
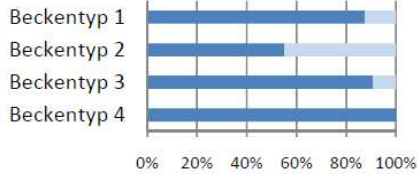
- a) die zugekauft und in das betreffende Becken eingesetzt werden sollen (Neubesatz),
- b) die abgefischt, in Hälterungsbecken umgesetzt und im Folgemonat verkauft und geschlachtet werden sollen (Abfischen),
- c) die am kleinsten sind, vermutlich am schlechtesten wachsen und daher absortiert und nicht weitergemästet werden sollen (Selektion) und
- d) die gewachsen sind, absortiert, in die angegebenen Becken umgesetzt und dort weitergemästet werden sollen.

¹⁵ Die Wahl des Berichtstitels ist frei gewählt und soll seinen zeitlichen Charakter und seine unterstützenden Funktion für das betriebliche Managements verdeutlichen.

Managementempfehlungen - Februar 20XX

Betrieb: NN
Betriebsnummer: XY-12345

Auslastung:



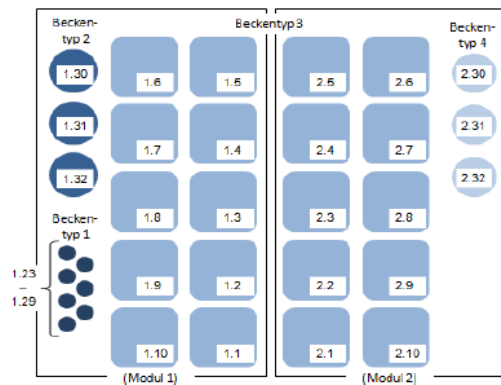
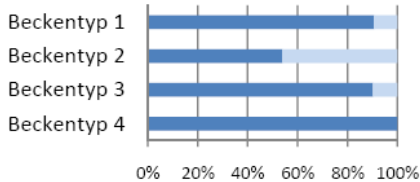
Becken	Anfangsbesatz ¹		Neubesatz	Abfischen ²	Selektion	Verluste	Umsetzen		
	Anzahl	Ø-Gewicht (g)					nach Becken		
1.23	1.189	6	6.187	11	74	1.619	je 648	1.25-1.29	
1.24	1.189	6	6.187	11	74	1.619			
1.25	4.772	29	6.187	11	48	1.160	je 2.900	1.30-1.31	
1.26	4.772	29		11	48	1.160			
1.27	4.772	29		11	48	1.160			
1.28	4.772	29		11	48	1.160			
1.29	4.772	29		11	48	1.160			
...									

¹ Fische, die in diesem Monat verkauft werden, sind im Vormonat abgefischt worden und befinden sich in Hälterungsbecken.
² Abgefischte Tiere werden in Hälterungsbecken gesetzt und im Folgemonat verkauft.

Managementempfehlungen - März 20XX

Betrieb: NN
Betriebsnummer: XY-12345

Auslastung:



Becken	Anfangsbesatz ¹		Neubesatz	Abfischen ²	Selektion	Verluste	Umsetzen		
	Anzahl	Ø-Gewicht (g)					nach Becken		
1.23	5.671	10	2.263	50	79	4.779	je 1.912	1.25-1.29	
1.24	5.671	10	2.263	50	79	4.779			
1.25	4.201	34	2.263	16	42	1.588	je 3.970	1.30-1.31	
1.26	4.201	34		16	42	1.588			
1.27	4.201	34		16	42	1.588			
1.28	4.201	34		16	42	1.588			
1.29	4.201	34		16	42	1.588			
...									

Optimierungsergebnisse auf Basis folgender Annahmen: Stufe $s=0$ repräsentiere den Monat Januar, dargestellt $s=25$ (Februar), $s=26$ (März), Wachstumsverteilung A, Selektionsszenario 1, Schlachtpreisszenario 0

Abb. 22: Ausschnitte aus zwei aufeinanderfolgenden monatlichen Managementempfehlungen (eigene Darstellung)

Als zusätzliche Information sind außerdem der Anfangsbesatz (die Anzahl der zu Beginn der Periode im Becken befindlichen Fische), das Durchschnittsgewicht des Anfangsbesatzes und die Verluste (die erwartete Anzahl toter Fische aufgrund natürlicher Sterblichkeit) aufgeführt.

Beispielsweise ergibt sich für Becken 1.23 folgender Zusammenhang:

	Anfangsbesatz in s:	1.189	Fische
+	Neubesatz:	6.187	Fische
./.	Abfischen:	0	Fische
./.	Selektion:	11	Fische
./.	Verluste:	74	Fische
./.	Umsetzen (Abgang):	1.619	Fische
+	Umsetzen (Zugang):	0	Fische
=	Anfangsbesatz in s+1:	5.671	Fische ¹⁶

Monatliche Handlungsempfehlungen können somit als Führungshilfe das praktische Prozessmanagement unterstützen.

5.1.2 Halbjahresüberblick

Im Halbjahresüberblick¹⁷ sind die optimalen Planungsergebnisse für ein halbes Jahr zusammengefasst dargestellt. Diese Übersicht enthält die künftigen betrieblichen Maßnahmen und gleichzeitig die daraus resultierende Bestandsentwicklung. Den Aufbau eines Halbjahresüberblicks stellt Abb. 23 exemplarischen dar.

Ebenso wie die monatlichen Managementempfehlungen umfasst die Halbjahresübersicht nur einen Teil der Ergebnisse eines Rechenlaufs. Im oberen Teil des Berichtes sind der Zeitraum, den die aufbereiteten Daten umfassen, die Stammdaten des Betriebs und einige Kennzahlen, die sich auf den Betrachtungszeitraum von einem halben Jahr beziehen (Produktionsmenge, Zuwachs und Anlagenauslastung) angegeben. Der restliche Bericht enthält eine Tabelle, deren Spalten die betrachteten sechs Monate und deren Zeilen zum einen eine Reihe von betrieblichen Kennzahlen und zum anderen die bevorstehenden operativen Aktivitäten abbilden. Die Hintergrundfarbe der betrieblichen Kennzahlen korrespondiert mit den jeweiligen Werten der Kennzahlen (je höher der Wert, desto heller die Hintergrundfarbe).

¹⁶ Ungenauigkeiten kommen durch programmbedingte Rundungsfehler zustande.

¹⁷ Die Wahl des Berichtstitels ist frei gewählt und soll seinen zeitlichen Charakter und seine unterstützenden Funktion für das betriebliche Managements verdeutlichen.

Halbjahresüberblick - 1. HJ 20XX

Betrieb: NN	HJ-Gesamtproduktion (in kg):	62.044
Betriebsnummer: XY-12345	Ø Gesamtzuwachs (in kg) ¹ :	11.034
	Ø Anlagenauslastung (in %):	79,81

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Produktionswirtschaftliche Kennzahlen						
Ø Lebendmasse -LM (in g)	492	482	495	467	491	492
Gesamtbesatz (in kg)	69.226	70.251	70.556	70.160	69.792	70.843
Ø Verkaufsgewicht (in g)	1.702	1.722	1.717	1.710	1.711	1.719
Gesamtproduktion (in kg)	9.659	10.455	11.069	10.947	9.666	10.248
Gesamtzuwachs (in kg) ¹	12.423	11.415	11.350	10.467	9.298	11.250
Anlagenauslastung (in %) ²	80	80	79	79	80	81

Besatzentwicklung

Anfangsbesatz:

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
Klasse 1 (bis 13 g LM)	13.553	2.377	11.343	6.051	15.257	2.700
Klasse 2 (bis 44 g LM)	22.351	23.861	21.006	22.336	20.475	26.659
Klasse 3 (bis 95 g LM)	19.219	22.726	21.704	21.694	21.756	20.744
Klasse 4 (bis 198 g LM)	21.983	18.811	17.566	18.989	20.897	20.758
Klasse 5 (bis 348 g LM)	12.684	14.715	14.820	12.815	11.123	11.504
Klasse 6 (bis 640 g LM)	12.399	11.375	12.557	14.110	13.960	12.232
Klasse 7 (bis 1.113 g LM)	13.018	13.382	12.084	11.459	12.532	13.710
Klasse 8 (bis 1.578 g LM)	16.359	16.498	17.810	16.962	17.211	17.268
Klasse 9 (bis 2.049 g LM)	9.184	9.583	9.071	3.483	8.931	9.182

Setzlingseinkauf		12.374	4.527	16.012		9.336
------------------	--	--------	-------	--------	--	-------

Verkauf von Schlachttieren:

Klasse 7 (bis 1.113 g LM)			863	1.095	222	285
Klasse 8 (bis 1.578 g LM)						
Klasse 9 (bis 2.049 g LM)	5.674	6.073	5.583	5.308	5.428	5.678

Selektion:

Klasse 1 (bis 13 g LM)	121	22	101	55	136	25
Klasse 2 (bis 44 g LM)	95	56	78	84	56	76
Klasse 3 (bis 95 g LM)	52	63	75	78	64	73
Klasse 4 (bis 198 g LM)	81	75	59	54	62	71
Klasse 5 (bis 348 g LM)	57	69	76	70	57	54

erwartetet Verluste:

Klasse 1 (bis 13 g LM)	136	148	159	221	153	120
Klasse 2 (bis 44 g LM)	224	239	210	223	205	267
Klasse 3 (bis 95 g LM)	192	227	217	217	218	207
Klasse 4 (bis 198 g LM)	220	188	176	190	209	208
Klasse 5 (bis 348 g LM)	127	147	148	128	111	115
Klasse 6 (bis 640 g LM)	124	114	126	141	140	122
Klasse 7 (bis 1.113 g LM)	130	134	121	115	125	137
Klasse 8 (bis 1.578 g LM)	164	165	169	170	170	170
Klasse 9 (bis 2.049 g LM)	26	23	23	27	26	24

¹ ohne Gewichtsveränderung durch Zukauf

² Indikator ist die Auslastung des biologischen Filters

Optimierungsergebnisse auf Basis folgender Annahmen: Stufe $s=0$ repräsentiere den Monat Januar, dargestellt $s=24$ (Januar) bis $s=29$ (Juni), Wachstumsverteilung A, Selektionsszenario 1, Schlacht-preisszenario 0

Abb. 23: Exemplarischer Halbjahresüberblick (eigene Darstellung)

Des Weiteren sind neben dem Anfangsbestand und den erwarteten natürlichen Verlusten die operativen Aktivitäten für das betrachtete Halbjahr angegeben – die Anzahl der Fische, die zugekauft, verkauft und selektiert werden sollen. Dabei werden neun Gewichtsklassen unterschieden, in die sich Steinbutte eines bestimmten Gewichts und gleichen Futtertypenanspruchs einordnen lassen. Zum einen entspricht die vorgenommene Klassierung der in der Praxis vorgefundenen Betrachtungsweise (Griese 2007), zum anderen trägt die gröbere Darstellungsform zum Erhalt der Übersichtlichkeit des Berichtes bei.

Für die laufende Steuerung der Mastprozesse sind eigentlich nur die unmittelbar bevorstehenden Entscheidungszeitpunkte von Interesse. Der lange Planungshorizont von 48 Monaten soll insbesondere in der Zukunft liegende Ereignisse und Bewertungen einbeziehen. Der Halbjahresüberblick veranschaulicht den kurzfristig optimalen Prozessplan, lässt Engpässe, Leerstände, Arbeitsspitzen etc. erkennen und kann somit das praktische Prozessmanagement unterstützen.

5.1.3 Vollständiger Finanzplan

Die optimierten Steinbuttmastprozesse erfolgen nicht kontinuierlich oder in Rhythmen, sondern unterliegen Schwankungen. Dementsprechend schwanken die Verkaufserlöse und Mastkosten ebenso wie der Bestand an liquiden Mitteln. Vollständige Finanzpläne stellen ein Begleitinstrument zur praktischen Unterstützung des Liquiditäts- und Finanzierungsmanagements dar und sollen hier exemplarisch vorgestellt werden.

Die Zielfunktionsbeiträge, die die Erlöse und Kosten der Mastprozesse pro Monat enthalten, schwanken stark über den Planungszeitraum hinweg. Je nach Kapazitätsauslastung, Marktbedingungen, alternativer Faktorverwertung etc. werden zu einem Zeitpunkt in sehr unterschiedlichem Umfang und mit sehr unterschiedlichem Lebendgewicht (und damit sehr unterschiedlichem Futter- und Beckenanspruch) Fische zugekauft, gemästet oder verkauft.

Unter der Annahme, dass die Umsatzerlöse und variablen Kosten in dem Monat, in dem sie anfallen, auch zu einer Erhöhung bzw. Minderung des Zahlungsmittelbestands führen, können sie als Ein- und Auszahlungen betrachtet werden. Damit beeinflussen betriebliche Mastentscheidungen unmittelbar die Liquiditätslage eines Aquakulturbetriebs. Um die ständige und dauerhafte Aufrechterhaltung der Liquidität zu gewährleisten, ist eine sorgfältige Planung der Finanzierung notwendig. Ein Instrument dazu stellt das Konzept des Vollständigen Finanzplans dar. Vollständige Finanzpläne sind eine tabellenorientierte Methode der Investitionsrechnung, die sich auch zur Integration der kurzfristigen Kosten- und Leistungsrechnung, insbesondere der Liquiditätsplanung, in die langfristige Unternehmensplanung eignen. Ein Vollständiger Finanzplan zeichnet sich aus durch seine Einfachheit (leichte Nachvollziehbarkeit

der einem Controllingobjekt zuzurechnenden Daten: Zahlungsfolge einer Investition, Kreditaufnahmen etc.) und durch seine Ausbaufähigkeit (mögliche Modellerweiterung durch unterschiedliche Finanzierungsformen bzw. -alternativen, Berücksichtigung von Steuern oder Unsicherheit etc.).

Die Zahlungsfolge des zu untersuchenden Controllingobjektes steht im Mittelpunkt der Betrachtungen. Zur Abbildung der Finanzierung sind periodenweise die relevanten Ausprägungen von Eigen- und Fremdkapitaldisposition zu berücksichtigen. Zudem sind weitere Zahlungen in Form von Re- und Ergänzungsinvestitionen zu erfassen. Abschließend werden die jeweiligen Finanz- und Kreditbestände ausgewiesen. Periodisch-sukzessive¹⁸ werden zu jedem Betrachtungszeitpunkt die Kredit- oder Anlagedispositionen so vorgenommen, dass sich ein Liquiditätsgleichgewicht einstellt – der Finanzierungssaldo Null beträgt (Grob 1989).

Tab. 17: Exemplarischer Ausschnitt eines Vollständigen Finanzplans für die Steinbuttmast (eigene Darstellung)

	Stufe	...	8	9	10	11	...
	Monat*		Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
Zahlungsfolge	{	Einzahlungsüberschuss*	-66.236	-86.479	-87.563	87.668	
		Eigenkapital					
Eigenkapitaldispositionen	{	./. Entnahme	0	0	0	0	
		+ Einlage	0	0	0	0	
		Standard-Kredit					
Fremdkapitaldispositionen	{	+ Aufnahme	0	52.798	90.777	0	
		./. Tilgung	0	0	0	76.182	
		./. Sollzinsen**	0	0	4.224	11.486	
		Standard-Anlage					
Re- und Ergänzungsinvestitionen	{	./. Anlage	0	0	0	0	
		+ Auflösung	63.436	32.700	981	0	
		+ Habenzinsen***	2.800	981	29	1	
		= Finanzierungssaldo	0	0	0	0	
		Bestandsgrößen:					
Kredit- und Guthabenbestände	{	Kreditstand	0	52.798	143.57	67.392	
		Guthabenstand	32.700	981	29	30	
		Bestandssaldo	32.700	-51.817	-143.546	-67.362	

* Optimierungsergebnisse (Zielfunktionsbeiträge) auf Basis folgender Annahmen: Stufe s=0 repräsentiere den Monat Januar, Wachstumsverteilung A, Selektionsszenario 1, Schlachtpreisszenario 0
** Sollzinssatz: 8 %
*** Habenzinssatz: 3 %

¹⁸ Ebenso ist eine simultane Vorgehensweise zur Optimierung der Finanzierung denkbar, die mithilfe der Linearen Programmierung formuliert- und lösbar sei.

Auf diese Weise sind die Ergebnisse einer beliebig ausgewählten Optimierungsrechnung in Form eines einfachen vollständigen Finanzplans aufbereitet worden. Tabelle 17 zeigt einen Ausschnitt des Finanzplans, der sich auf die Darstellung einer Finanzierungsalternative („Standard-Kredit“) und einer Geldanlagealternative („Standard-Anlage“) beschränkt. Für eine umfassende Betrachtung wären realistische Eigenkapitalentnahmen, Finanzierungs- und Anlagemöglichkeiten abzubilden. Ebenso wären die Ein- und Auszahlungsüberschüsse um auszahlungswirksame Fixkosten (Auszahlungen für Löhne und Gehälter, soweit noch nicht als Finanzierungsalternative abgebildet: Zinszahlungen für langfristige Kredite, Versicherungszahlungen etc.) sowie Steuern zu ergänzen. Das aufgeführte Beispiel für einen Vollständigen Finanzplan für die Steinbuttmast ist absichtlich einfach gehalten, um vom Optimalplanungskern des Konzepts nicht abzulenken und das Ausmaß von Annahmen nicht zu strapazieren. Das Beispiel zeigt jedoch, dass sich die Optimierungsergebnisse für das Erstellen eines vollständigen Finanzplans eignen und ein vollständiger Finanzplan das Erkennen von Liquiditätsengpässen und die Planung von Gegenmaßnahmen ermöglicht.

5.1.4 Schattenpreise

Für jede bindende Restriktionsgleichung in der optimalen Lösung eines linearen Programms kann eine Dualvariable ermittelt werden. Dualwerte geben an, um welchen Betrag sich der Zielfunktionswert ändert, wenn der Restriktionswert um eine Einheit verändert wird. Die Dualwerte werden als Schattenpreise bezeichnet, da sie als Basis von Preiskalkulationen oder Komponenten von Verrechnungspreisen interpretiert und verwendet werden können. Das zugrunde liegende Steinbuttmastmodell stellt ein gemischt-ganzzahliges lineares Modell dar, in dem kontinuierliche und ganzzahlige Variablen nebeneinander auftreten. Auch hier können im Gegensatz zu rein kombinatorischen Problemen Schattenpreise ausgewiesen werden (Kallrath 2002b, Kleindienst 2004). Jedoch können mithilfe des eingesetzten Lösungsprogramms Premium Solver Platform die Schattenpreise für gemischt-ganzzahlige Optimierungsmodelle nicht auf direktem Weg ermittelt werden. Dazu ist zunächst auf herkömmliche Weise das Modell mit seinen kontinuierlichen wie auch ganzzahligen Entscheidungsvariablen zu lösen. Auf Basis dieser optimalen Lösung wird ein zweites Mal eine optimale Lösung ermittelt, nun jedoch ohne die ganzzahligen Variablen zu berücksichtigen (Relaxation). Somit ist ein Sensitivitätsbericht abrufbar, der die Schattenpreise aller bindenden Restriktionen enthält (Frontline 2007).

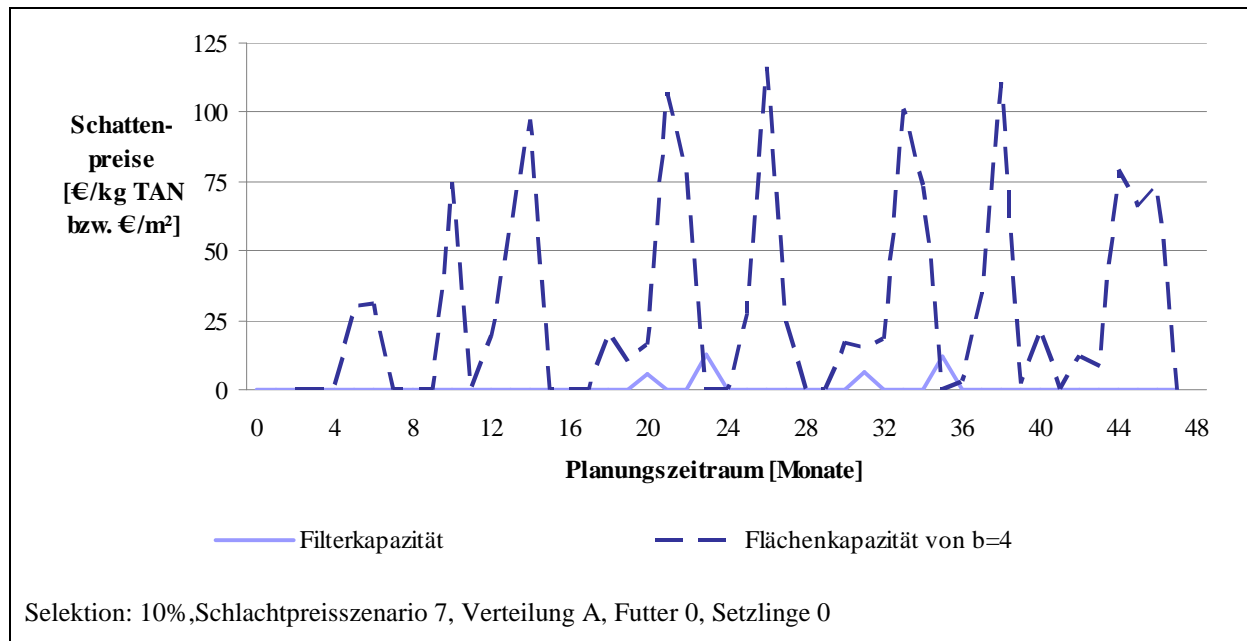


Abb. 24: Exemplarischer Verlauf von Schattenpreisen für Filter- und Mastplatzkapazität (eigene Darstellung)

Auf diese Weise sind exemplarisch Schattenpreise ermittelt worden, wie Abb. 24 zeigt. Im aufgeführten Beispiel wirken unter den getroffenen Annahmen (die Ergebnisse hängen stark von den getroffenen Annahmen bezüglich Wachstumsverteilung der Fische und Verlauf der Schlachtpreise ab) über den gesamten Planungszeitraum hinweg ausschließlich die Stickstoffabbauleistung des Biofilters und das Mastplatzangebot des Beckentyps 4 (Endmastbecken) begrenzend – abgesehen von den Hilfsrestriktionen, die das Wachstum über die Gewichtsklassen abbilden. Daher können auch nur für den Biofilter und die Endmastbecken 4 Schattenpreise ermittelt werden. Diese schwanken über den Zeitablauf stark. Zeitweise würde sich der Zielfunktionswert bei einer temporären Erhöhung der Filterleistung um 1 kg TAN um bis zu 115 € erhöhen und bei einer Ausweitung der Mastplatzkapazität um 1 m² um bis zu 15 €. Die Ergebnisse verdeutlichen, welche Restriktionen begrenzend wirken und welche Konsequenzen eine Ausweitung dieser Restriktionen auf das wirtschaftliche Ergebnis hätte. Eine kurzfristige Kapazitätsausweitung durch Pacht oder Miete ist nicht praktikabel. Aber mithilfe der Schattenpreise lassen sich die begrenzend wirkenden Faktoren identifizieren und können bei langfristigen Entscheidungen, die eine Kapazitätserweiterung betreffen, berücksichtigt werden.

5.2 Ergebnisse numerischer Variationen

Um den Einfluss zentraler produktionswirtschaftlicher Parameter der Steinbuttmast auf die optimale Planung der Mastprozesse zu untersuchen, sind eine Reihe dieser Parameter variiert worden, wie in Tab. 18 aufgeführt.

Tab. 18: Vorgenommene Parametrisierungen (eigene Darstellung)

Gegenstand der Parametrisierung	Anzahl der Szenarien	Abschnitt
Selektionsanteil	9	5.2.1
Schlachtpreise	9	5.2.2
Futterpreise	5	5.2.3
Setzlingspreise	5	5.2.4
Kontraktspezifikationen	7	5.2.5

Dabei dienen die Parametrisierungen – die numerischen Experimente –

- zur Untersuchung der Selektionsintensität auf die optimale Planung der Mastprozesse (Abschnitt 5.2.1),
- zur Prüfung der Reaktionsfähigkeit des entwickelten Optimierungsmodells auf schwankende Preissituationen (Abschnitte 5.2.2, 5.2.3 und 5.2.4) sowie
- zur Betrachtung der Auswirkungen von Kontraktproduktion – Zeitpunkte und Mengen an marktreifen Fischen werden vorgegeben – auf die produktionswirtschaftlichen Fischmastprozesse (Abschnitt 5.2.5).

So sind sukzessive Szenarien entwickelt und analysiert worden, wie Abb. 25 zeigt. Die Ergebnisse der zuvor untersuchten Szenarien fließen in die Erstellung neuer Szenarien ein. Auf diese Weise sind insgesamt 252 „Planungswelten“ modelliert und untersucht worden.

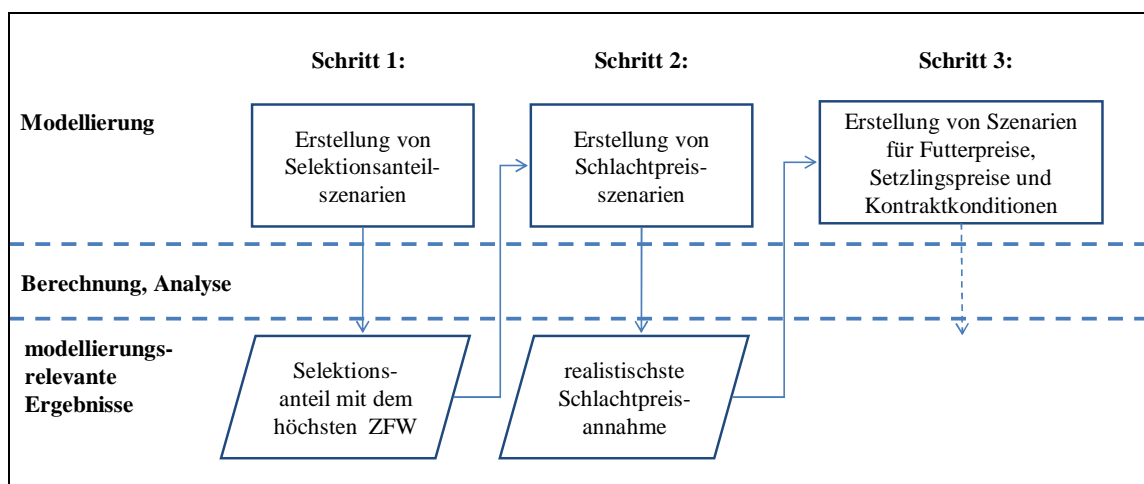


Abb. 25: Abfolge der Szenarienerstellung und -analyse (eigene Darstellung)

Für jedes auf diese Weise konzipierte Szenario und für jede der angenommenen Wachstumsverteilungen (Tab. 11) ist ceteris paribus jeweils eine Optimierung durchgeführt worden. Da viele Daten auf Annahmen beruhen, sind die absoluten Werte eines Großteils der Ergebnisse nicht besonders aussagekräftig, interessanter sind dagegen die relativen Veränderungen der Rechenergebnisse gegenüber einem Ausgangsszenario.

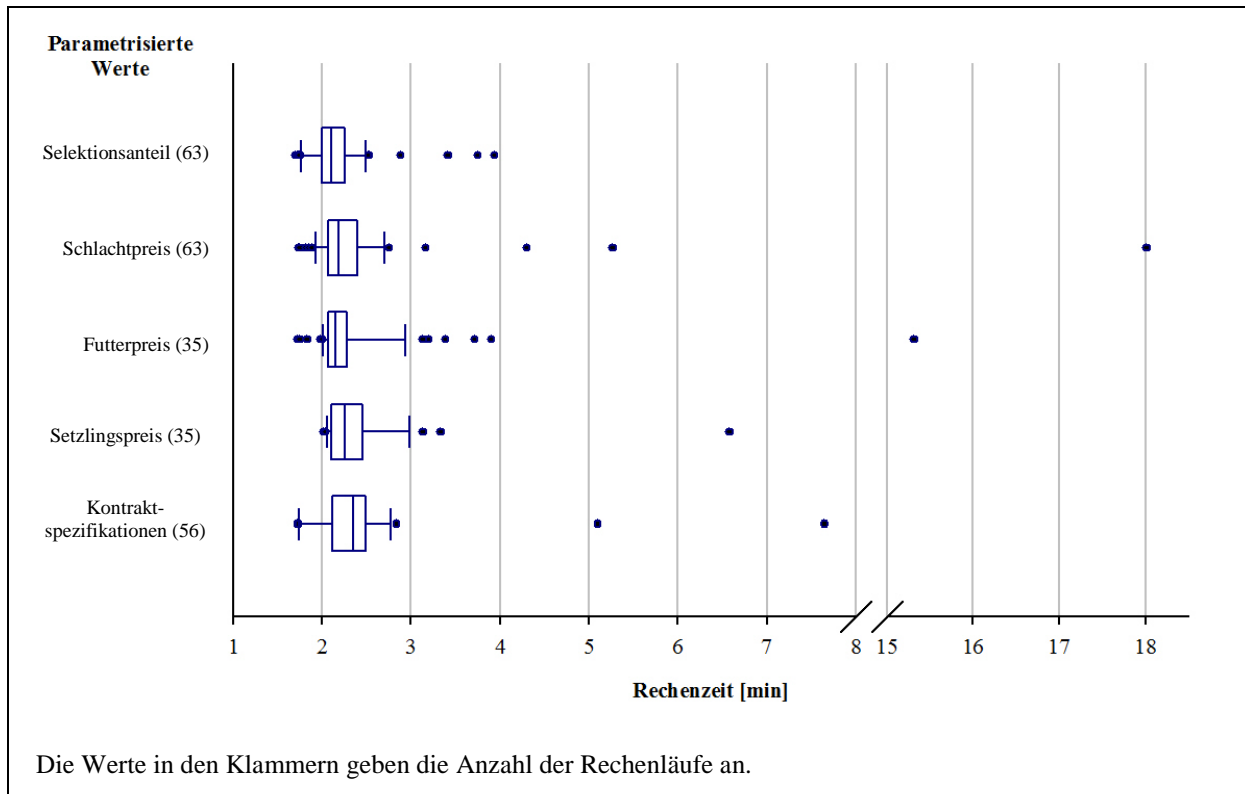


Abb. 26: Boxplot-Diagramme zur Darstellung der Rechenzeiten (eigene Darstellung)

Abbildung 26 stellt den zeitlichen Aufwand für die durchgeführten Optimierungsrechnungen in einem Boxplot-Diagramm dar. Boxplot-Diagramme veranschaulichen die Verteilung statistischer Daten und enthalten verschiedene robuste Streuungs- und Lagemaße. In der Box ist die Lage des Medians dargestellt, die Box selbst entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen, und wird durch das untere und obere Quartil begrenzt. Die Whisker repräsentieren das 10. und 90. Perzentil. Zudem sind alle Ausreißer als Punkte aufgeführt. Die Diagramme zeigen, dass die Berechnungen in der Regel zwischen zwei und drei Minuten Rechenzeit beanspruchen und eine Optimierung nur im Extremfall länger als eine Viertelstunde dauert (verwendeter Rechner: DELL Inspiron 545; Arbeitsspeicher: 8,192 GB, 800 MHz; Betriebssystem: Microsoft Windows Vista; Festplatte: 640 GB; Prozessor: Intel Core 2,5 GHz, 4 MB cache, 1333 MHz).

5.2.1 Parametrisierung des Selektionsanteils

Die Selektion – das Erkennen, Absammeln und vorzeitige Beenden der Mast schlechtwüchsiger Fische – sollte nach unseren Überlegungen eine zentrale operative Handlung in der Steinbuttmast darstellen. Um die Auswirkungen der Selektionsintensität auf die optimale Planung der operativen Mastprozesse zu analysieren, sind neun Szenarien aufgestellt worden:

Selektionsszenario 0: 0 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 1: 5 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 2: 10 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 3: 15 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 4: 20 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 5: 25 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 6: 30 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 7: 35 % Selektionsanteil

Selektionsszenario 8: 40 % Selektionsanteil

Der Selektionsanteil quantifiziert dabei, wie viel Prozent einer Setzlingspartie im Laufe ihrer Mast im Mittel selektiert werden. Unter der Annahme von sieben verschiedenen Wachstumsverteilungen sind 63 Rechenläufe durchgeführt worden, deren Ergebnisse im Nachfolgenden vorzustellen und zu interpretieren sind. Dabei soll exemplarisch die Reaktion der Produktionsmenge, das Verkaufsgewicht, das zahlenmäßige Verhältnis von Setzlingen zu Schlachtfischen sowie das wirtschaftliche Ergebnis auf steigende „Selektionsschärfe“ erläutert werden.

Die Kurven in Abb. 27 bilden die durchschnittlich jährlich produzierte Menge an Steinbutt in Tonnen und deren Veränderung bei verschiedenen Selektionsanteilen ab. Je höher der Anteil der schnellwüchsigen Fische, desto höher ist die jährliche Ausbringungsmenge. Der Anteil der Schnellwüchsigen hängt von der Art der betrachteten Wachstumsverteilung ab. Sind die zugrunde gelegten Wachstumsverteilungen symmetrisch, gleich oder rechtssteil, so steigt die Produktionsmenge leicht an, erreicht einen Hochpunkt und fällt dann wieder leicht. Unter diesen Annahmen können zwischen 90 und 160 Tonnen Fisch pro Jahr erzeugt werden. Ist die Wachstumsverteilung linkssteil, das heißt, ein großer Anteil der Fische ist langsamwüchsig, so werden weniger Fische produziert – zwischen 10 und 75 Tonnen pro Jahr. Unterstellt man Verteilung G, so werden ausschließlich diejenigen Fische weitergemästet und anschließend verkauft, die sich annahmegemäß bereits zu Planungsbeginn in der Anlage befinden. Wird die Verteilung F unterstellt, so lohnt sich der Start zusätzlicher Prozesse ab einer Selektionsquote von etwa 25 % – jedoch nur in einem geringen Umfang. Der Selektionsanteil, bei dem je nach

betrachteter Verteilung die maximale Produktionsmenge erreicht wird, stimmt nicht zwingend mit dem Selektionsanteil überein, bei dem der Zielfunktionswert sein Maximum erlangt.

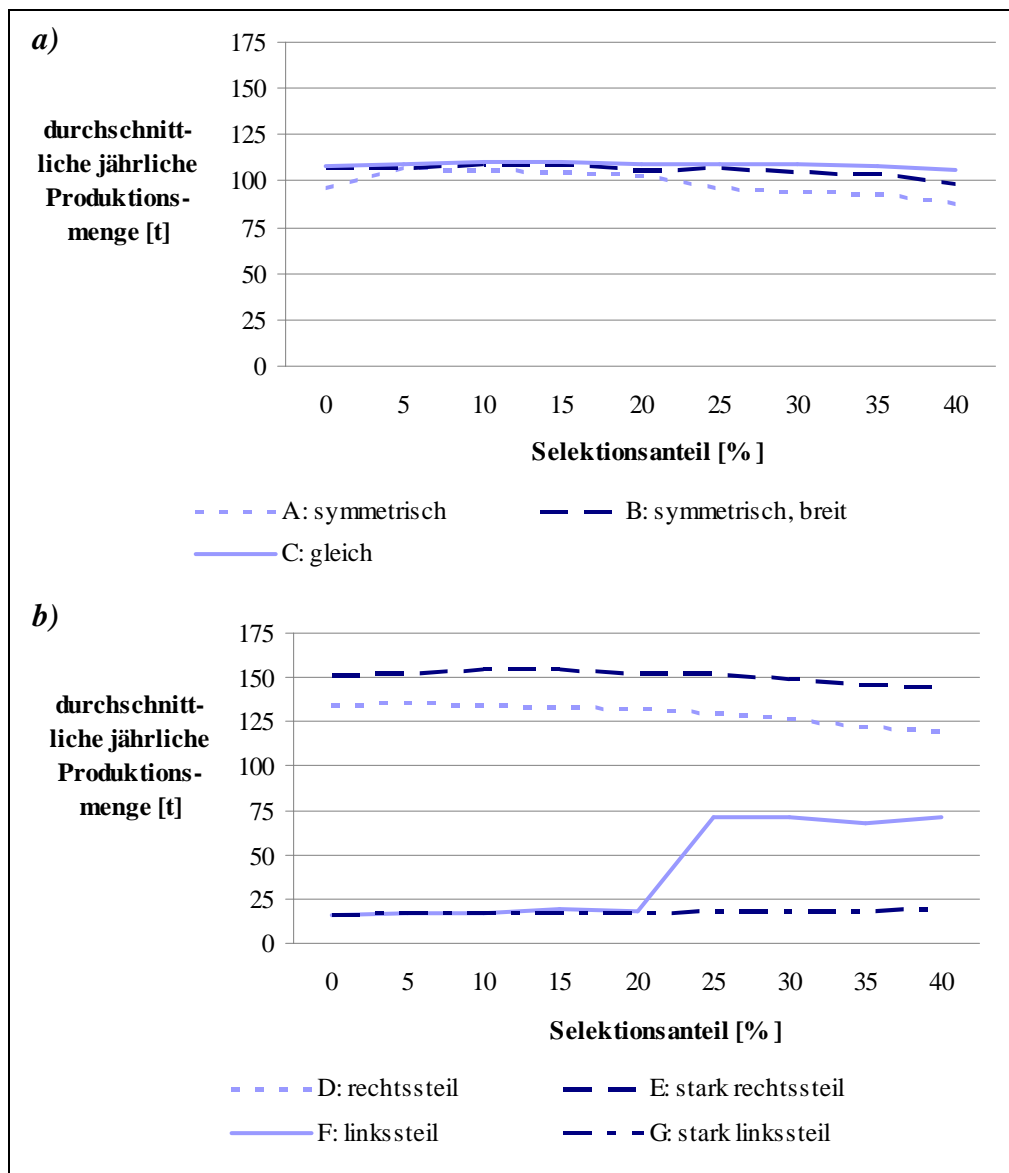


Abb. 27: *Jahresproduktion in Abhängigkeit der Selektion (eigene Darstellung)*

In Abb. 28 ist das durchschnittliche Verkaufsgewicht pro Steinbutt in Kilogramm in Abhängigkeit verschiedener Selektionsregime abgetragen. Je höher das Verkaufsgewicht eines Fisches ist, desto höher ist auch sein Marktpreis je Kilogramm, aber desto höher sind auch seine Produktionskosten (eine längere Mastdauer verursacht höhere Kosten für Futter, Energie, Beckenbelegung und ein höheres Sterblichkeitsrisiko). Mit zunehmendem Selektionsanteil nimmt der Anteil der schwachwüchsigen Tiere ab und die durchschnittliche Wachstumsgeschwindigkeit steigt. Bei einem höheren Wachstumstempo wiederum lohnt es sich, die Tiere im Mittel schwerer zu verkaufen. Daher steigt das durchschnittliche Verkaufsgewicht auf Werte zwischen 1,7 und 1,8 kg pro Tier bei Selektionsquoten von über 25 %.

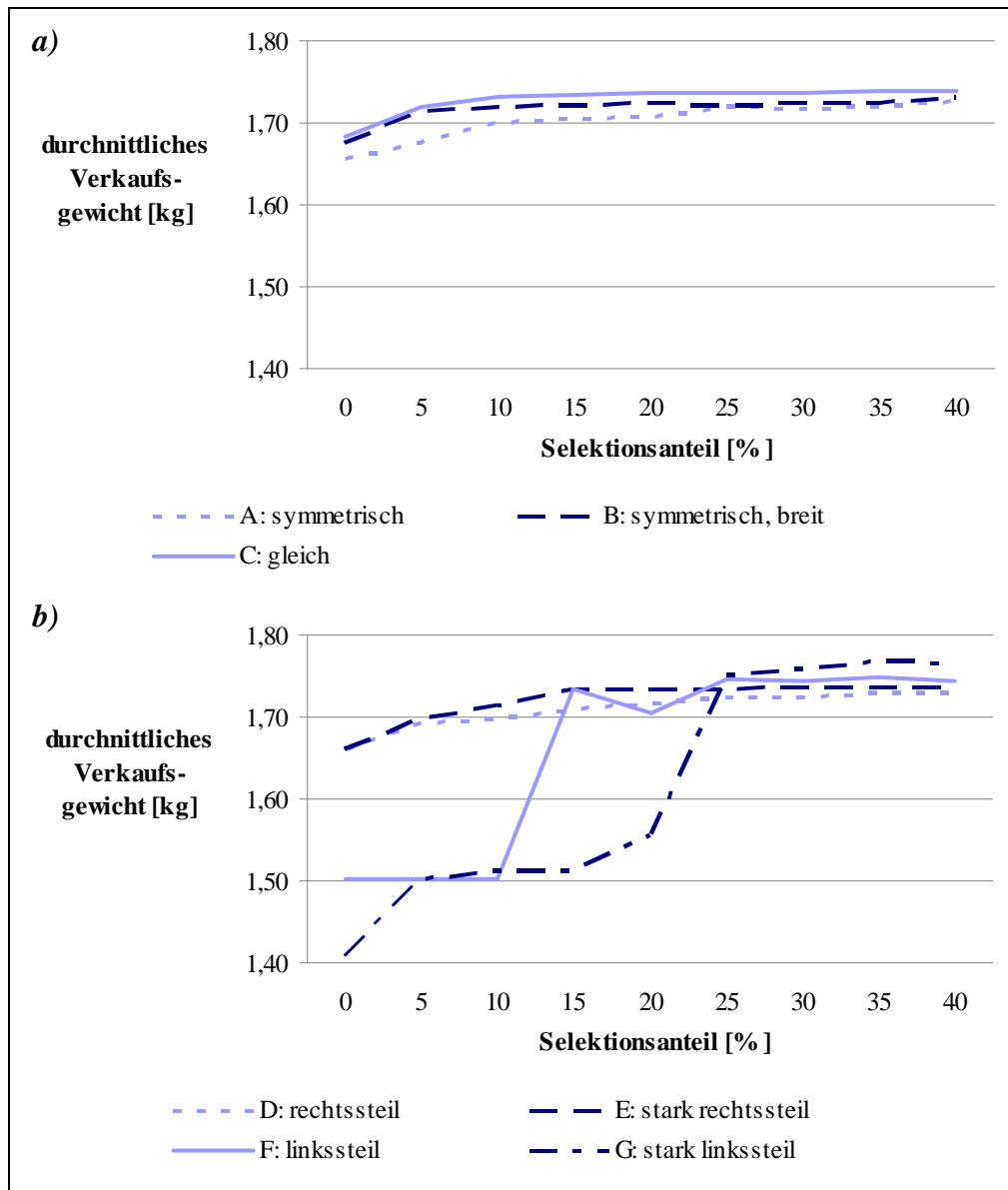


Abb. 28: Verkaufsgewicht in Abhängigkeit der Selektion (eigene Darstellung)

Abbildung 29 stellt das mengenmäßige Verhältnis zwischen zugekauften Steinbuttsetzlingen und verkauften Schlachttieren bei steigendem Selektionsanteil dar. Mit zunehmender Selektionsintensität steigt tendenziell die Anzahl der Setzlinge pro verkauftem Fisch. Der Quotient liegt bei Vernachlässigung der Selektion (Szenario 0) aufgrund der natürlichen Sterblichkeit zwischen 1,4 und 1,65 und steigt bei einem Selektionsanteil von 40 % auf Werte von etwa 1,6 bis 1,9. Das steigende Setzling-Schlachtfisch-Verhältnis verursacht einen höheren Kostenanteil für den Setzlingszukauf pro Fisch bzw. Kilogramm Lebendgewicht. Das Abknicken der Kurve von Verteilung B in Szenario 9 ist dadurch zu erklären, dass die Produktion insgesamt zurückgefahren wird und die Anzahl gemästeter Fische abnimmt. So ist auch eine leichte Abnahme der Produktionsmenge zu beobachten, die jedoch durch den An-

stieg der durchschnittlichen Verkaufsgewichte kompensiert wird und dementsprechend weniger ausgeprägt ist.

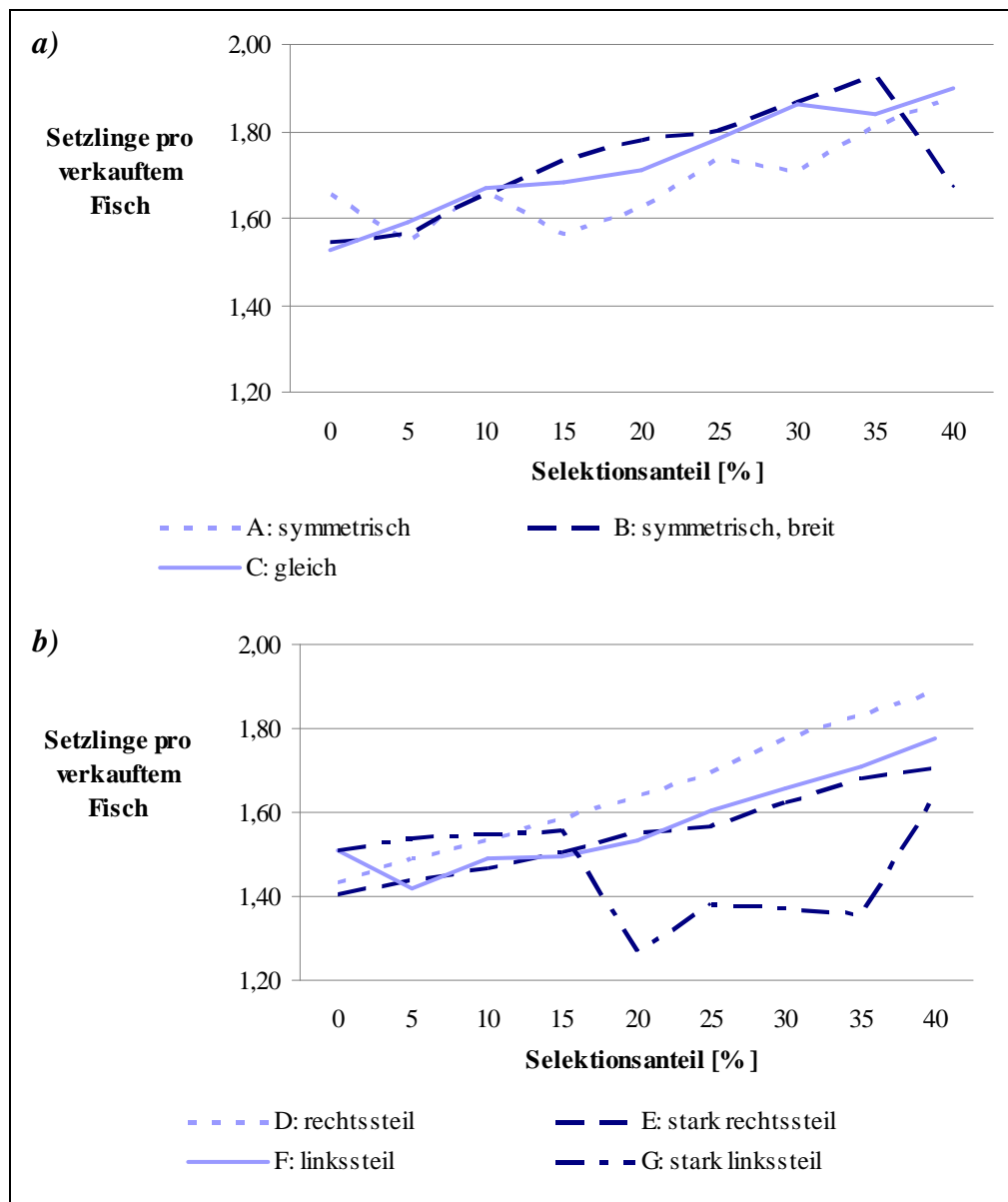


Abb. 29: *Setzling-Schlachtfisch-Verhältnis in Abhängigkeit der Selektion (eigene Darstellung)*

Abbildung 30 stellt die relative Veränderung des Zielfunktionswerts bei unterschiedlich starker Selektion der schwachwüchsigen Tiere dar. Basis der relativen Veränderung bildet Selektionsszenario 0 mit einem Selektionsanteil von 0 %. Die absoluten Werte zeigt Abb. 50 im Anhang. Die Selektion hat einen deutlichen Einfluss auf den Zielfunktionswert – das wirtschaftliche Mastergebnis. Mit zunehmender Selektion steigt der Zielfunktionswert und nach Erreichen eines Hochpunktes fällt dieser wieder. Der Zielfunktionswert kann durch gezielte Selektion zwischen 10 und 60 % gesteigert werden.

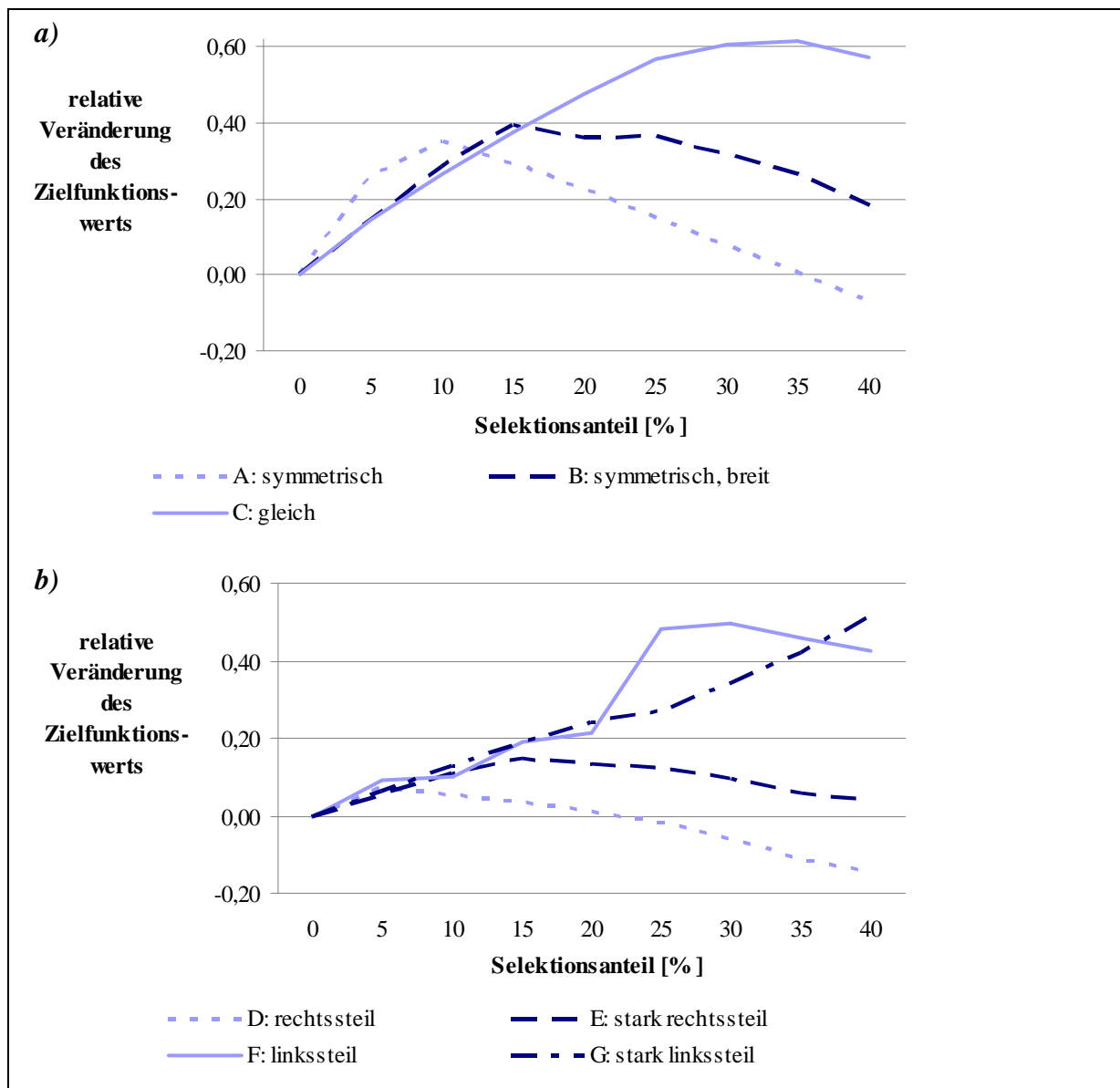


Abb. 30: Veränderung des Zielfunktionswerts in Abhängigkeit der Selektion (eigene Darstellung)

Die Wachstumsverteilung G stellt dabei eine Ausnahme dar. Der Verteilung liegt die Annahme zugrunde, dass der Anteil der schlechtwüchsigen Fische sehr hoch ist (50 %). Unter dieser Annahme werden keine Mastprozesse gestartet, ausschließlich der Anfangsbesatz wird weitergemästet und verkauft. Eine Zunahme der Selektion mindert den (Anfangs-)Tierbestand und damit die Mastkosten, sodass der Zielfunktionswert von einem niedrigen Ausgangsniveau mit steigendem Selektionsanteil annähernd linear steigt.

Die Rechenergebnisse auf Basis der Parametrisierung des Selektionsanteils zeigen unter der Annahme heterogenen Fischwachstums, dass aus dem Identifizieren, Absortieren und vorzeitigen Beenden der Mast langsamwüchsiger Tiere wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können. Die Selektion kann – je nach Selektionsanteil – bei einer Erhöhung des „Outputs“

(Produktionsmenge) sowie bei einer gleichzeitigen Zunahme des „Inputs“ (Setzlinge pro Verkaufsfisch) das wirtschaftliche Ergebnis maßgeblich positiv beeinflussen. Folglich können durch eine Intensitätssteigerung der Steinbuttmast die knappen Ressourcen besser genutzt und die Wirtschaftlichkeit verbessert werden.

5.2.2 Parametrisierung der Schlachtpreise

Die Höhe der Schlachtpreise beeinflusst direkt die Erlöse und damit den wirtschaftlichen Erfolg eines Fischmastbetriebs. In der Vergangenheit waren Schwankungen des Steinbuttpreises zu beobachten. Diese Schwankungen sind zum einen auf volatile Angebotsmengen zurückzuführen, die zum Großteil Ergebnis des Fangerfolgs oder -misserfolgs der Fischerei sind, und zum anderen auf unbeständige Nachfragemengen, die insbesondere saisonalen Ausschlägen unterliegen. Um die Effekte der veränderlichen Schlachtpreise auf die optimale Planung der operativen Mastprozesse zu analysieren, sind neun Szenarien entwickelt worden:

Schlachtpreisszenario 0: konstante Preise

Die Schlachtpreise behalten ihre Anfangswerte über den gesamten Betrachtungszeitraum bei.

Schlachtpreisszenario 1: Preisanstieg um 10 %

Die Schlachtpreise steigen über die Planungsperiode hinweg linear um 10 %.

Schlachtpreisszenario 2: Preisanstieg um 25 %

Die Schlachtpreise steigen über die Planungsperiode hinweg linear um 25 %.

Schlachtpreisszenario 3: Preisrückgang 10 %

Die Schlachtpreise fallen über die Planungsperiode hinweg linear um 10 %.

Schlachtpreisszenario 4: Preisrückgang um 25 %

Die Schlachtpreise fallen über die Planungsperiode hinweg linear um 25 %.

Schlachtpreisszenario 5: engerer, hoher Preiskorridor

Die Schlachtpreise für leichte Schlachttiere steigen und nähern sich den unverändert hohen Preisen für schwere Fische an.

Schlachtpreisszenario 6: engerer, niedriger Preiskorridor

Die Schlachtpreise für schwere Schlachttiere sinken und nähern sich den unverändert niedrigen Preisen für leichte Fische an

Schlachtpreisszenario 7: schwache Saisonfigur

Die Schlachtpreise steigen nachfragebedingt zweimal pro Jahr (zur Oster- und Weihnachtszeit) parallel um jeweils 10 %.

Schlachtpreisszenario 8: ausgeprägte Saisonfigur

Die Schlachtpreise steigen nachfragebedingt zweimal pro Jahr (zur Oster- und Weihnachtszeit) parallel um jeweils 25 %.

Der Schlachtpreis für Steinbutt steigt mit zunehmendem Lebendgewicht pro Tier. So wird davon ausgegangen, dass für jeden vermarktungsfähigen Zustand, den ein Tier erreichen kann, sich ein spezieller Preis bildet. Alle Szenarien basieren auf einem gleichen Ausgangsniveau der Preise. Für die verwendeten Wachstumsverteilungen sind die in Tab. 19 aufgeführten Selektionsanteile zugrunde gelegt worden, die zuvor durch Parametrisierung zu den besten Ergebnissen (den höchsten Zielfunktionswerten) geführt haben. Diese Selektionsannahmen gelten für alle nachfolgenden Szenariokalkulationen.

Tab. 19: *Zugrunde gelegtes Selektionsregime für die Parametrisierung der Schlacht-, Futter- und Setzlingspreise sowie der Kontraktsspezifikationen (eigene Darstellung)*

Wachstumsverteilung	Selektionsanteil [%]
A symmetrisch	10
B symmetrisch, breit	15
C gleich	30
D rechtssteil	5
E stark rechtssteil	15
F linkssteil	30
G stark linkssteil	40

Dies führte zu 63 Rechenläufen, deren Ergebnisse im Folgenden vorzustellen und zu analysieren sind. Dabei konzentrieren sich die Ausführungen auf die relative Veränderung der Produktionsmenge, des Verkaufsgewichts sowie des wirtschaftlichen Ergebnisses. Basis für die relativen Veränderungen bilden die jeweiligen absoluten Werte des Futterpreisszenarios 0, die im Anhang in Abb. 51, 52 und 53 aufgeführt sind.

Abbildung 31 bildet die relative Veränderung der produzierten Menge an Steinbutt für verschiedene Schlachtpreisszenarien ab. Unter der Annahme, das Wachstum der Masttiere sei symmetrisch, gleich oder rechtssteil verteilt (Verteilung A, B, C, D und E) haben die unterschiedlichen Preisszenarien nur geringe Auswirkung auf die Menge an verkauftem Fisch. Ausschließlich im Szenario 4 (Preisrückgang um 25 %) nimmt die Produktion um bis zu 75 % ab. Werden linkssteile Wachstumsverteilungen unterstellt (F und G), lassen sich stärkere Schwankungen beobachten. So steigen bzw. sinken die Produktionsmengen auch bei geringeren Preisveränderungen. Dabei ist zu beachten, dass der Anteil der schlechtwüchsigen Fische hoch (F: 30 %, G: 50 %) und das absolute Ausgangsniveau niedrig ist (F: 70 Tonnen pro Jahr, G: 41 Tonnen pro Jahr).

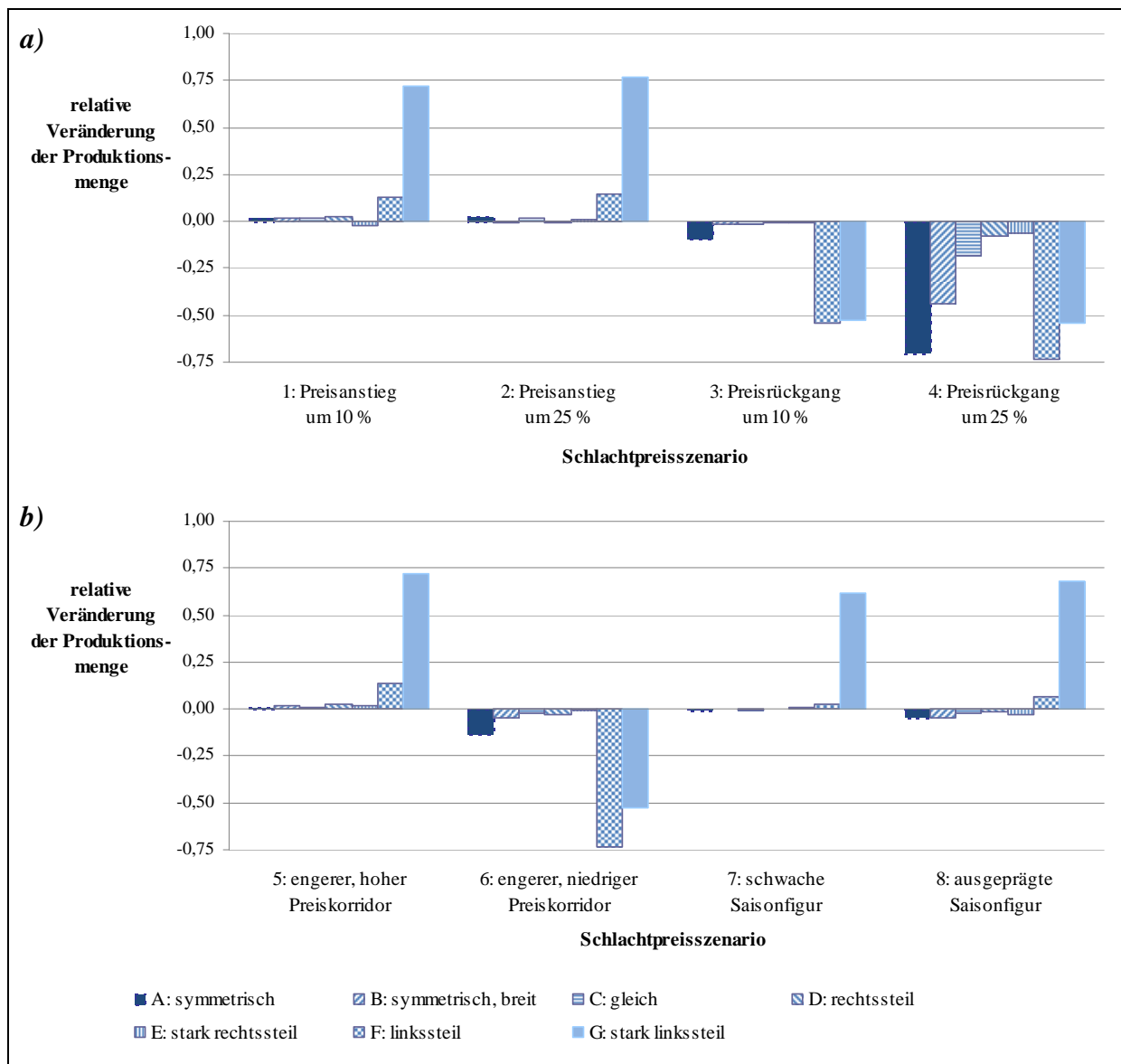


Abb. 31: Veränderung der Produktionsmenge unter verschiedenen Schlachtpreisannahmen (eigene Darstellung)

In Abb. 32 sind bezüglich unterschiedlicher Schlachtpreisannahmen die relativen Veränderungen des Lebendgewichts abgetragen, zu dem die Steinbutte im Mittel verkauft werden. Basis der relativen Veränderung bildet das Preisszenario 0 (konstante Schlachtpreise). Insgesamt sind nur geringe Unterschiede zu beobachten, die nur selten die 10%-Marke überschreiten. Steigen die Schlachtpreise (Szenario 1 und 2), nehmen die durchschnittlichen Verkaufsgewichte tendenziell ab; es lohnt sich, Tiere früher zu schlachten und Beckenplatz für neue Prozesse zu räumen. Sinken die Schlachtpreise (Szenario 3 und 4), nehmen die durchschnittlichen Verkaufsgewichte tendenziell zu; es lohnt sich, Tiere länger zu halten und später zu schlachten. Bei einer Abnahme des Preisunterschieds zwischen schweren und leichten Schlachttieren (Szenario 5 und 6) werden eher leichtere Fische verkauft. Unter

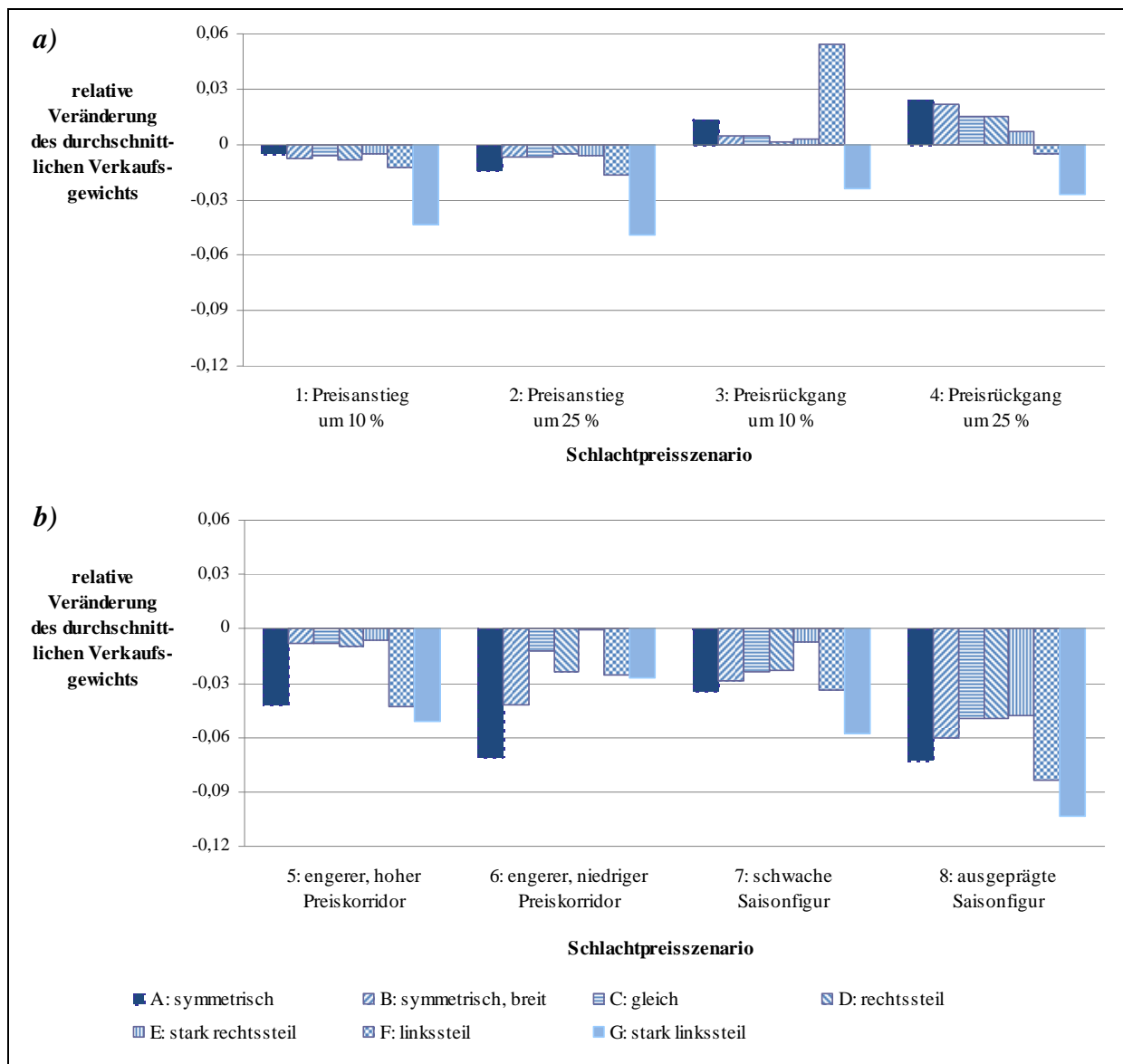


Abb. 32: Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts unter verschiedenen Schlachtpreisannahmen (eigene Darstellung)

liegen die Schlachtpreise Saisonfiguren, kommt dies einem temporären Preisanstieg gleich, einer Gelegenheit, zu der mehr Tiere verkauft werden als zu „normalen“ Preisbedingungen. Die unterjährigen, saisonalen Preishochs, insbesondere in Szenario 8, führen dazu, dass sich die durchschnittliche Mastdauer verkürzt. Die Schwankungen der Verkaufsgewichte sind von der Modellierung der Kosten- und Preisbeziehungen beeinflusst.

Abbildung 33 zeigt die relative Veränderung des Zielfunktionswerts in unterschiedlichen Schlachtpreisszenarien. Basis der relativen Veränderung ist eine Situation, in der die Preise konstant sind (Szenario 0). Der Verlauf der Schlachtpreise über den Planungszeitraum hinweg hat einen direkten Einfluss auf den Zielfunktionswert. Erwartungsgemäß nimmt der Ziel-

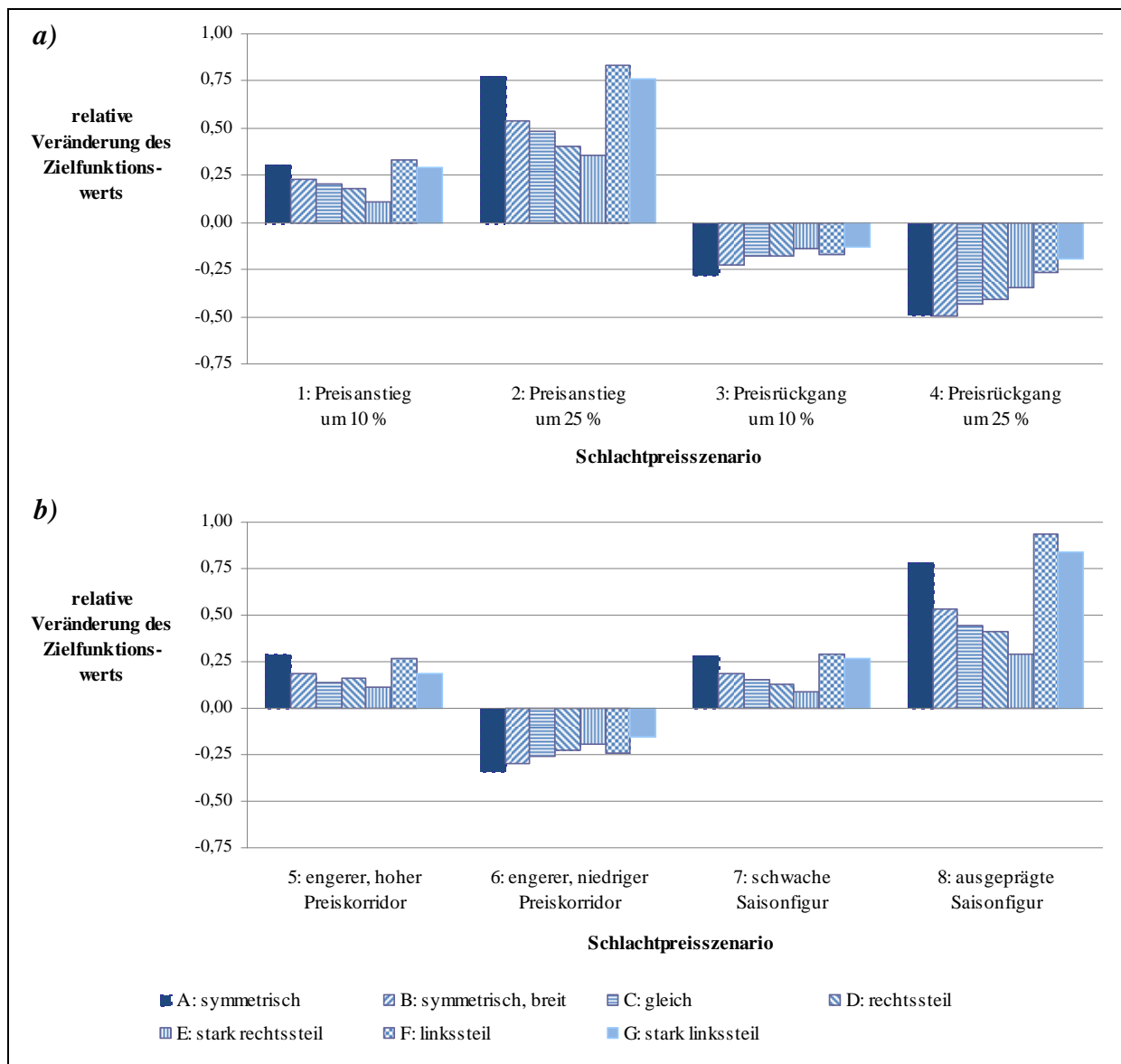


Abb. 33: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Schlachtpreisannahmen (eigene Darstellung)

funktionswert zu bei linear steigenden Preisen (Szenario 1 und 2), bei einer enger werdenden aber hohen Preisspanne (Szenario 5), sowie bei saisonal höheren Preisen (Szenario 7 und 8). Hingegen nimmt der Zielfunktionswert ab bei linear sinkenden Preisen (Szenario 3 und 4) sowie bei einer enger werdenden und niedrigen Preisspanne (Szenario 6). Unter der Annahme, das Fischwachstum sei so verteilt, wie es die Verteilungen A, G und F darstellen, beeinflussen ausgeprägte Preisveränderungen (beispielsweise Szenario 2 und 8) das wirtschaftliche Ergebnis vergleichsweise stark. Dieser Effekt ist unter anderem damit zu erklären, dass der Anteil der schnellwüchsigen Fische gering ist (< 20 %) und somit auch nur ein geringer absoluter Zielfunktionswert erreicht werden kann (Abb. 53 im Anhang). Die aus Verkauf-

preisvariationen resultierenden Ergebnisse sind plausibel und zeigen, dass das entwickelte Modell erwartungsgemäß bzw. erklärbar reagiert. Insbesondere ist ersichtlich und nachvollziehbar, dass der wirtschaftliche Masterfolg je nach Preisannahme eindeutig positiv oder negativ ausschlägt und von der zugrunde liegenden Wachstumsverteilung abhängt.

5.2.3 Parametrisierung der Futterpreise

Das eingesetzte Futter bestimmt den Erfolg von Mastbetrieben und die Futterqualität und -inhaltsstoffe bestimmen den Preis. Schwankungen der Futterpreise wirken sich unmittelbar auf die Kosten und damit das wirtschaftliche Ergebnis der Steinbuttmast aus. Um den Einfluss unterschiedlich hoher Futterpreise auf die Optimierung operativer Mastprozesse zu analysieren, sind fünf Szenarien aufgestellt worden:

Futterpreisszenario 0: unveränderte Preise

Die Preise für Futter behalten ihr bisher angenommenes Niveau bei und verändern sich über den gesamten Planungshorizont hinweg nicht.

Futterpreisszenario 1: Preisanstieg um 10 %

Die Futterpreise sind um 10 % ihres jeweiligen Ausgangswertes (Szenario 0) erhöht und behalten dieses Preisniveau während des Planungszeitraums bei.

Futterpreisszenario 2: Preisanstieg um 25 %

Die Futterpreise sind um 25 % ihres jeweiligen Ausgangswertes (Szenario 0) erhöht und behalten dieses Preisniveau während des Planungszeitraums bei.

Futterpreisszenario 3: Preisrückgang um 10 %

Die Futterpreise sind um 10 % ihres jeweiligen Ausgangswertes (Szenario 0) vermindert und bleiben für die Planungsdauer konstant.

Futterpreisszenario 4: Preisrückgang um 25 %

Die Futterpreise sind um 25 % ihres jeweiligen Ausgangswertes (Szenario 0) vermindert und bleiben für die Planungsdauer konstant.

Die Preise für Futter verschiedener Futtertypen unterscheiden sich. So ist Futter für die Aufzuchtphase generell teurer als Futter für die Endmast. Den Szenarien liegt die Annahme zugrunde, dass zum einen die Schlachtpreise saisonal leicht schwanken, so wie im Schlachtpreisszenario 7 modelliert, und zum anderen routinemäßig schlechtwüchsige Fische zu den Anteilen selektiert werden, wie Tab. 19 darstellt. Bei Berücksichtigung von sieben verschiedenen Wachstumsverteilungen ergeben sich 35 Rechenläufe, deren aufbereitete Ergebnisse im Folgenden vorzustellen und zu interpretieren sind. Dabei soll exemplarisch auf

die relative Veränderung der Produktionsmenge, des Verkaufsgewichts sowie des wirtschaftlichen Ergebnisses eingegangen werden. Basis der relativen Veränderungen bilden die jeweiligen absoluten Werte des Futterpreisszenarios 0, die im Anhang in Abb. 54, 55 und 56 aufgeführt sind.

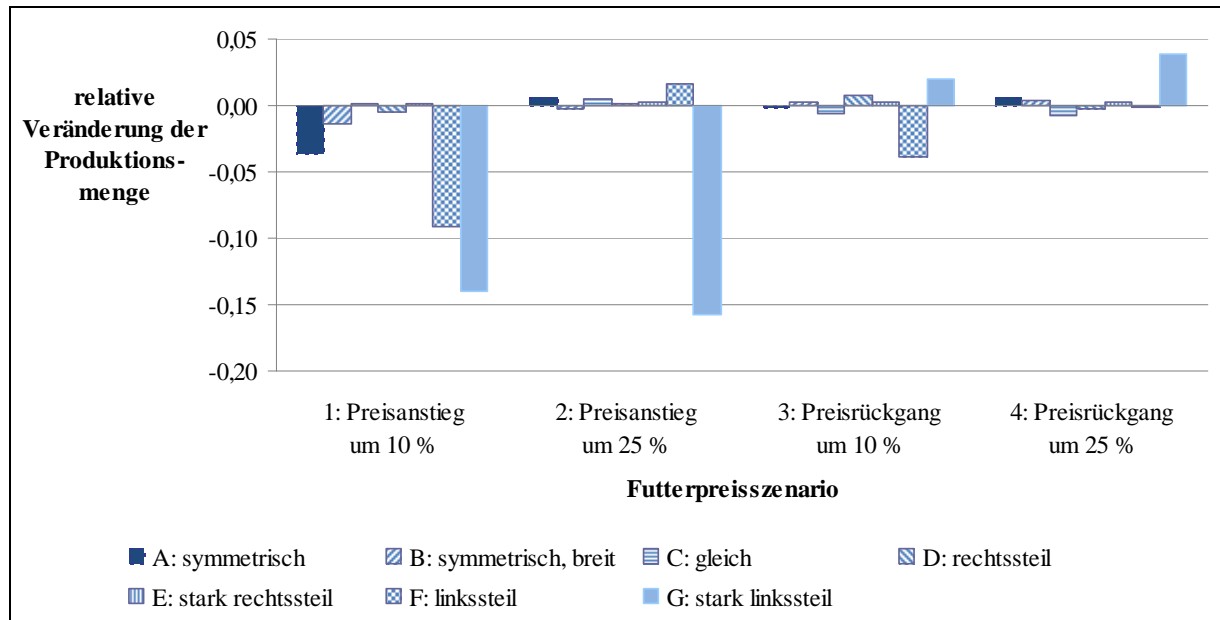


Abb. 34: Veränderung der Produktionsmenge unter verschiedenen Futterpreisannahmen (eigene Darstellung)

Abbildung 34 bildet die relative Veränderung der produzierten Steinbuttmenge für verschiedene Futterpreisszenarien ab. Erwartungsgemäß nimmt die Produktionsmenge bei steigenden Inputpreisen tendenziell ab und bei sinkenden tendenziell zu. Zum einen kann zudem in einigen Fällen ein gegenläufiger Trend beobachtet werden. Diese gegenläufigen Tendenzen sind jedoch sehr schwach (< 4 %). Zum anderen reagiert Verteilung G besonders sensibel aufgrund des hohen Anteils schlechtwüchsiger Tiere.

Abbildung 35 stellt die relative Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts unter verschiedenen Futterpreisszenarien gegenüber dem Szenario 0 dar. Die Höhe der Futterpreise hat kaum Einfluss auf das Verkaufsgewicht und damit auf die Mastdauer der Fische. Ausschließlich unter der Annahme, das Fischwachstum sei stark linkssteil verteilt (Verteilung G), werden bei höheren Futterpreisen die Fische leichter verkauft und bei niedrigeren Preisen mit höheren Lebendgewichten. Folglich beeinflussen die Futterpreise nur das Verkaufsgewicht von Fischen, deren durchschnittliche Wachstumsleistung äußerst schwach und deren Selektionanteil besonders hoch ist.

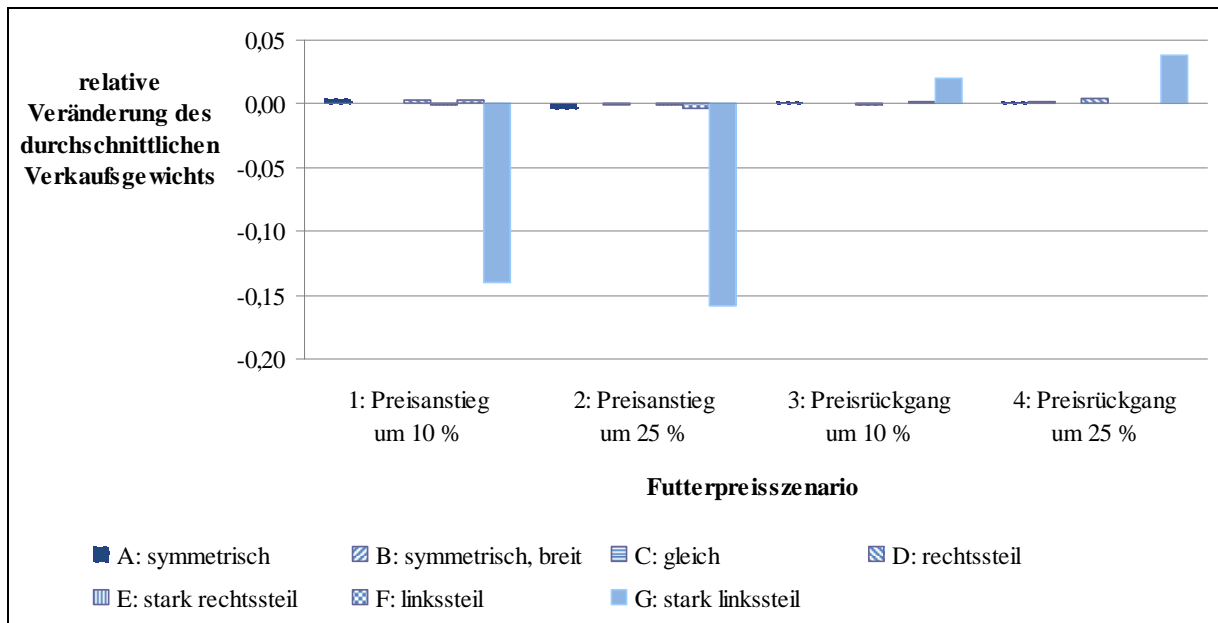


Abb. 35: Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts unter verschiedenen Futterpreisannahmen (eigene Darstellung)

Abbildung 36 veranschaulicht die relative Veränderung des Zielfunktionswerts in unterschiedlichen Futterpreisszenarien. Die Höhe der Futterpreise hat einen unmittelbaren Einfluss auf den Zielfunktionswert. Erwartungsgemäß nimmt der Zielfunktionswert bei einem Anstieg der Futterpreise ab (Szenario 1 und 2) und bei einem Rückgang der Preise zu (Szenario 3 und 4). Wird angenommen, das Fischwachstum unterliege den Verteilungen A, F und G, so ist die

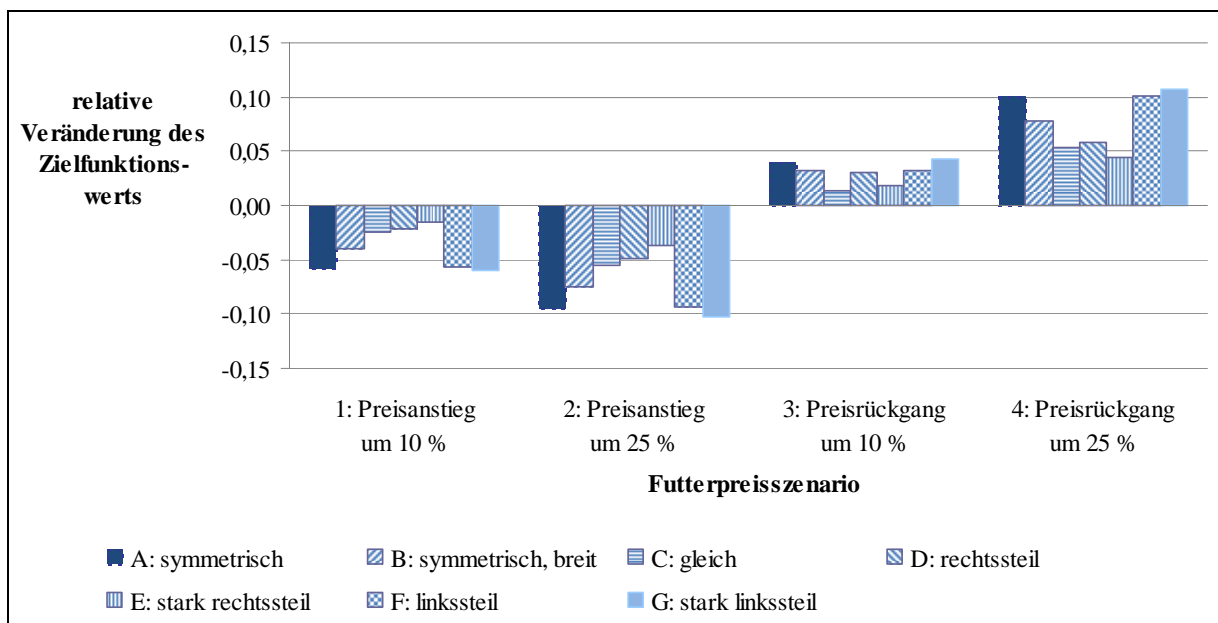


Abb. 36: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Futterpreisannahmen (eigene Darstellung)

Mast futterintensiver und der Zielfunktionswert reagiert stärker auf Futterpreisänderungen gegenüber anderen Wachstumsannahmen. Die Parametrisierung der Futterpreise liefert plausible Ergebnisse. Insbesondere die Auswirkungen auf den Zielfunktionswert zeigen nachvollziehbar, dass der wirtschaftliche Masterfolg von der Höhe der Futterpreise beeinflusst wird.

5.2.4 Parametrisierung des Setzlingspreises

Setzlinge verursachen – neben Futter – den größten Anteil am Spezialaufwand von intensiven Fischmastbetrieben. Sowohl die Qualität als auch der Preis der Setzlinge wirken unmittelbar auf den wirtschaftlichen Masterfolg. Steinbuttsetzlinge werden ausschließlich mit einer Lebendmasse von etwa 5 g pro Fisch gehandelt. Der entsprechende Preis pro Setzling ist zeitlichen Schwankungen ausgesetzt.

Die Auswirkungen eines veränderten Setzlingpreises auf die optimale Planung der operativen Mastprozesse werden unter fünf Szenarien analysiert:

Setzlingspreisszenario 0: unveränderte Preise

Der Preis für Setzlinge behält sein bisher angenommenes Niveau bei und verändert sich über den gesamten Planungshorizont hinweg nicht.

Setzlingspreisszenario 1: Preisanstieg um 10 %

Der Setzlingspreis ist um 10 % seines Ausgangswertes (Szenario 0) erhöht und behält diesen Preis während des Planungszeitraums bei.

Setzlingspreisszenario 2: Preisanstieg um 25 %

Der Setzlingspreis ist um 25 % seines Ausgangswertes (Szenario 0) erhöht und behält diesen Preis während des Planungszeitraums bei.

Setzlingspreisszenario 3: Preisrückgang um 10 %

Der Setzlingspreis ist um 10 % seines Ausgangswertes (Szenario 0) vermindert und bleibt für die Planungsdauer konstant.

Setzlingspreisszenario 4: Preisrückgang um 25 %

Der Setzlingspreis ist um 25 % seines Ausgangswertes (Szenario 0) vermindert und bleibt für die Planungsdauer konstant.

Den Betrachtungen liegen die bereits beschriebenen Annahmen zur Selektion und zum Verlauf der Schlachtpreise zugrunde. Unter Berücksichtigung der sieben verschiedenen Wachstumsverteilungen sind 35 Rechenläufe durchgeführt worden, deren Ergebnisse im Nachfolgenden vorzustellen und zu interpretieren sind. Dabei soll explizit die Reaktion des Zielfunktionswertes auf die unterschiedlichen Setzlingspreisszenarien erörtert werden, da die sonstigen Ergebnisse denen der Parametrisierung der Futterpreise ähneln.

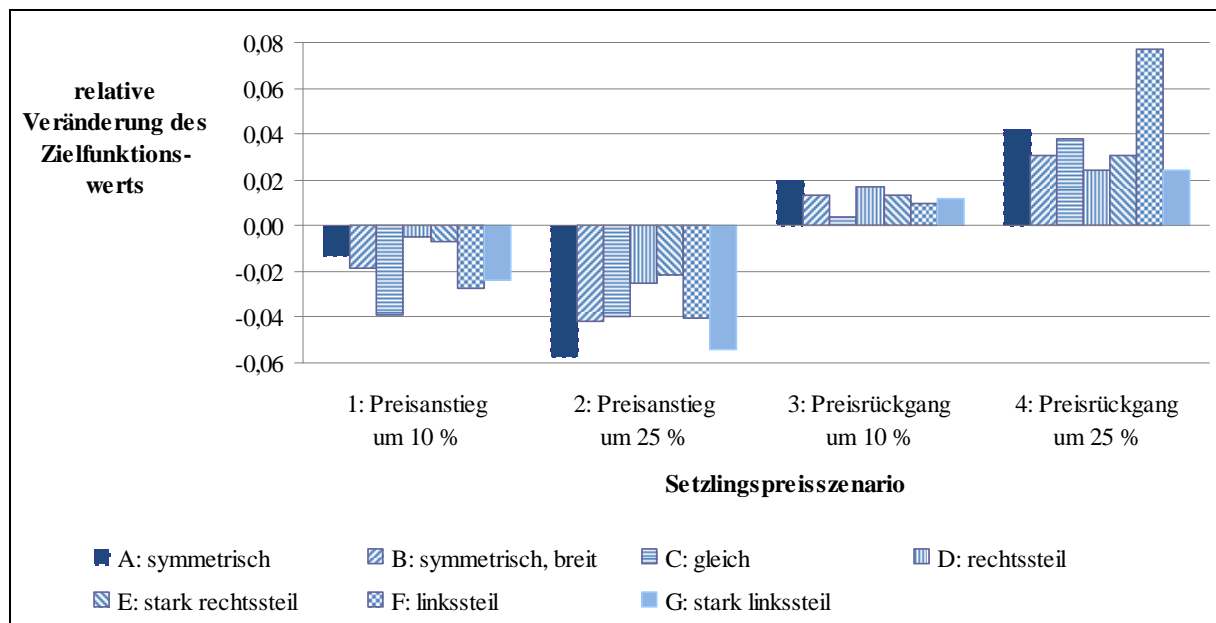


Abb. 37: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Setzlingspreisannahmen (eigene Darstellung)

Abbildung 37 zeigt die relative Veränderung des Zielfunktionswerts in unterschiedlichen Futterpreisszenarien. Als Basis der Veränderungen dient Szenario 0; die entsprechenden absoluten Zielfunktionswerte sind in Abb. 56 im Anhang aufgeführt. Die Parametrisierung des Setzlingspreises liefert plausible Ergebnisse: Die Höhe des Setzlingspreises hat einen unmittelbaren Einfluss auf den Zielfunktionswert. Erwartungsgemäß nimmt der Zielfunktionswert beim Anstieg des Setzlingspreises ab (Szenario 1 und 2) und beim Rückgang des Preises zu (Szenario 3 und 4). Ist die Steinbuttmast „setzlingsintensiv“, das heißt, ist das Verhältnis von zugekauften Setzlingen zu verkauften Schlachtfischen hoch ($> 1,7$), so reagiert auch der Zielfunktionswert auf Preisveränderungen stärker (Verteilung B, C und F). Dabei sind zudem die grundsätzliche Wachstumsleistung (Anteil schnell- und langsamwüchsiger Tiere) und die absoluten Ausgangswerte der relativen Veränderungen zu beachten.

5.2.5 Parametrisierung von Kontraktsspezifikationen

In Kontrakten sind die abzuliefernden Mengen sowie die vereinbarten Preise für Steinbutt spezifiziert. Damit unterliegt nur noch ein Teil der Produktionsmenge den Schwankungen der Schlachtpreise. So können Marktrisiken gemindert und Planbarkeit von Erlösen erhöht werden. Um den Einfluss unterschiedlicher Kontraktvereinbarungen auf die Optimierung operativer Mastprozesse zu analysieren, sind acht Szenarien aufgestellt worden, wie Tab. 20 zeigt. Das Kontraktsszenario 0 stellt die Vergleichssituation dar, in der keine Kontrakte geschlossen werden.

Tab. 20: Ausprägungen der Kontraktsszenarien (eigene Darstellung)

Kontraktsszenario			Handelsklasse					
			1	2	3	4	5	
1	12,5 t/Jahr; niedrigpreisig	Preis [€/kg]	13,00	13,50	14,00	14,50	15,00	
		Menge [t]	Jahr 2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
			Jahr 3–4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
2	12,5 t/Jahr; normalpreisig	Preis [€/kg]	14,00	14,50	15,00	15,50	16,00	
		Menge [t]	Jahr 2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
			Jahr 3–4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
3	12,5 t/Jahr; hochpreisig	Preis [€/kg]	15,00	15,50	16,00	16,50	17,00	
		Menge [t]	Jahr 2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
			Jahr 3–4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
4	5 t/Jahr; hochpreisig	Preis [€/kg]	15,00	15,50	16,00	16,50	17,00	
		Menge [t]	Jahr 2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
			Jahr 3–4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5	25 t/Jahr; hochpreisig	Preis [€/kg]	15,00	15,50	16,00	16,50	17,00	
		Menge [t]	Jahr 2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
			Jahr 3–4	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
6	10 t/Jahr; leichte Fische; hochpreisig	Preis [€/kg]	15,00	15,50	16,00	16,50	17,00	
		Menge [t]	Jahr 2	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0
			Jahr 3–4	5,0	5,0	0,0	0,0	0,0
7	10 t/Jahr; schwere Fische; hochpreisig	Preis [€/kg]	15,00	15,50	16,00	16,50	17,00	
		Menge [t]	Jahr 2	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0
			Jahr 3–4	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0

Den Szenarien liegt die Annahme zugrunde, dass sich die verkaufsfähigen Fische anhand ihres Lebendgewichts in die fünf zuvor definierten Handelsklassen einteilen lassen. Die Kontrakte sind zweimal pro Jahr (zur Weihnachts- und Osterzeit) zu bedienen. Die Abstimmung der Produktionsprozesse auf die Erfüllung der Kontrakte benötigt Vorlaufzeit. So müssen beispielsweise zur Produktion von 2 kg schweren Tieren etwa 2 Jahre zuvor Setzlinge gekauft werden. Daher werden im ersten Planungsjahr keine Kontrakte geschlossen, im zweiten Jahr nur in einem geringen Umfang und im dritten sowie vierten Jahr im vollen Umfang, woran sich auch die Kurzbezeichnung der Kontraktsszenarien orientiert. Wie zuvor wird davon ausgegangen, dass zum einen routinemäßig schlechtwüchsige Fische selektiert werden (Tab. 19) und zum anderen die Schlachtpreise für Fische, die über die Kontraktmenge hinaus produziert und am „Spotmarkt“ verkauft werden, saisonal leicht schwanken (Schlachtpreisszenario 7). Unter Berücksichtigung von sieben verschiedenen Wachstumsverteilungen ergeben sich 56

Rechenläufe, deren aufbereitete Ergebnisse im Folgenden interpretiert werden. Dabei soll insbesondere auf die jährliche Produktionsmenge, die relative Veränderung des Verkaufsgewichts und des Zielfunktionswertes eingegangen werden. Basis der relativen Veränderungen bilden die jeweiligen absoluten Werte des Futterpreisszenarios 0, die im Anhang in Abb. 55 und 56 aufgeführt sind.

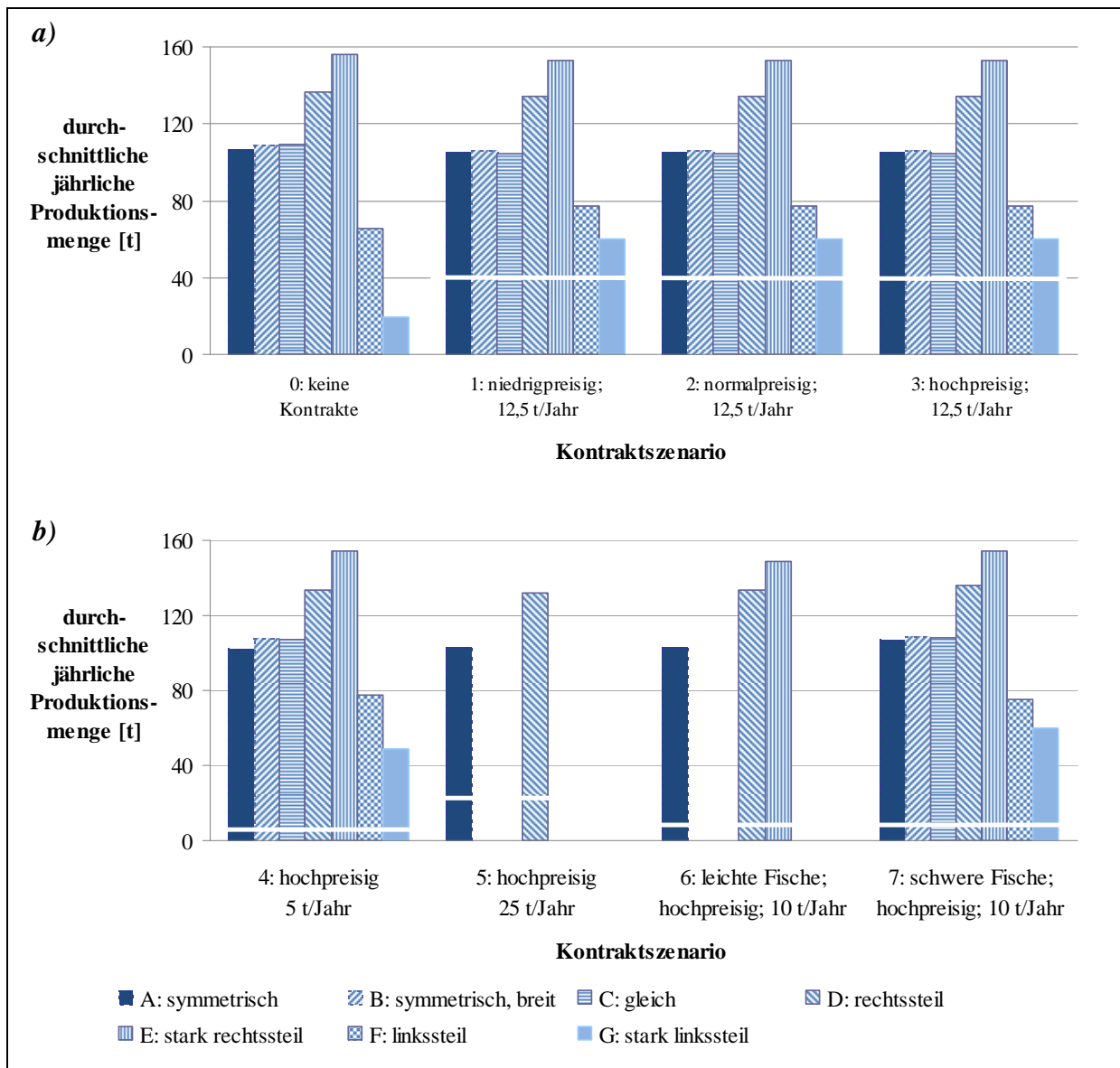


Abb. 38: Jahresproduktion unter verschiedenen Kontraktannahmen (eigene Darstellung)

Abbildung 38 führt die durchschnittlich produzierte Menge an Steinbutt pro Jahr für die jeweiligen Kontraktvarianten auf. Dabei setzt sich die Produktionsmenge aus der im Kontrakt vereinbarten Fischmenge (Balken unterhalb der weißen Trennlinie) und der frei zu vermarktenden Fischmenge (Balken oberhalb der Trennlinie) zusammen. Insgesamt sind kaum Auswirkungen der unterschiedlichen Kontraktvarianten auf die jährlichen Ausbringungsmengen zu beobachten, da bereits in Szenario 0 die Produktion sich am Kapazitätsmaximum der

Becken und des Filters bewegt. Die Wachstumsverteilungen F und G bilden eine Ausnahme, die über einen hohen Anteil schlechtwüchsiger Tiere verfügen: Liegen diese Verteilungen den Berechnungen zugrunde, wird die Produktion im Vergleich zum Szenario 0 deutlich ausgeweitet. So ist für Verteilung F ein Anstieg von etwa 15 Tonnen pro Jahr und für Verteilung G ein Anstieg von etwa 40 Tonnen pro Jahr verzeichnen. Der Anstieg ist auf das geringe Ausgangsniveau in Szenario 0 zurückzuführen, in dem fast ausschließlich der in die Berechnung „hineingezwungene“ Anfangsbesatz vermarktet wird. Ebenso ist zu beobachten, dass die Kontraktbedingungen von Szenario 5 nur erfüllt werden können, wenn das Fischwachstum den

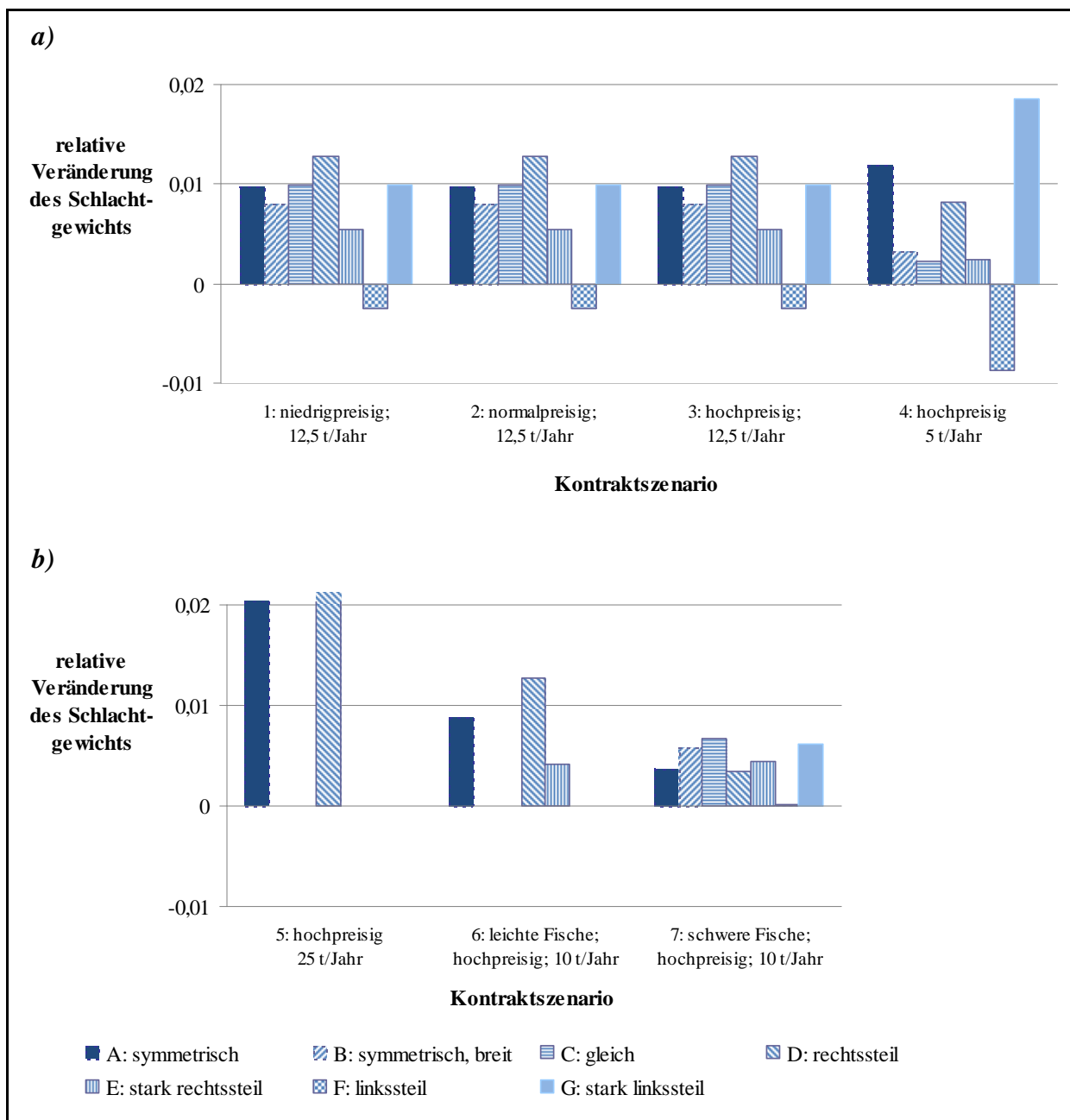


Abb. 39: Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts unter verschiedenen Kontraktannahmen (eigene Darstellung)

Verteilungen A und D unterliegt, und von Szenario 6, wenn es den Wachstumsverteilungen A, D und E entspricht. Für die sonstigen Verteilungen kann keine zulässige Lösung ermittelt werden, das heißt, die Wachstumsleistung reicht nicht aus, um die Kontrakte zu bedienen.

Abbildung 39 stellt die relative Veränderung des durchschnittlichen Verkaufsgewichts für verschiedene Kontraktsszenarien gegenüber dem Szenario 0 dar. Basis der relativen Veränderungen bilden die jeweiligen absoluten Werte des Kontraktsszenarios 0, die im Anhang in Abb. 55 aufgeführt sind. Die Verkaufsgewichte beziehen sich nicht auf die per Kontrakt vermarkteten Fische sondern auf die frei am „Spotmarkt“ verkauften Tiere. Die Ergebnisse zeigen, dass die Auswirkung der Kontrakte sehr gering sind (höchstens etwa 2 % relative Veränderung) und die betrachteten Kontrakte die Vermarktungsgewichte der restliche Fische kaum beeinflussen.

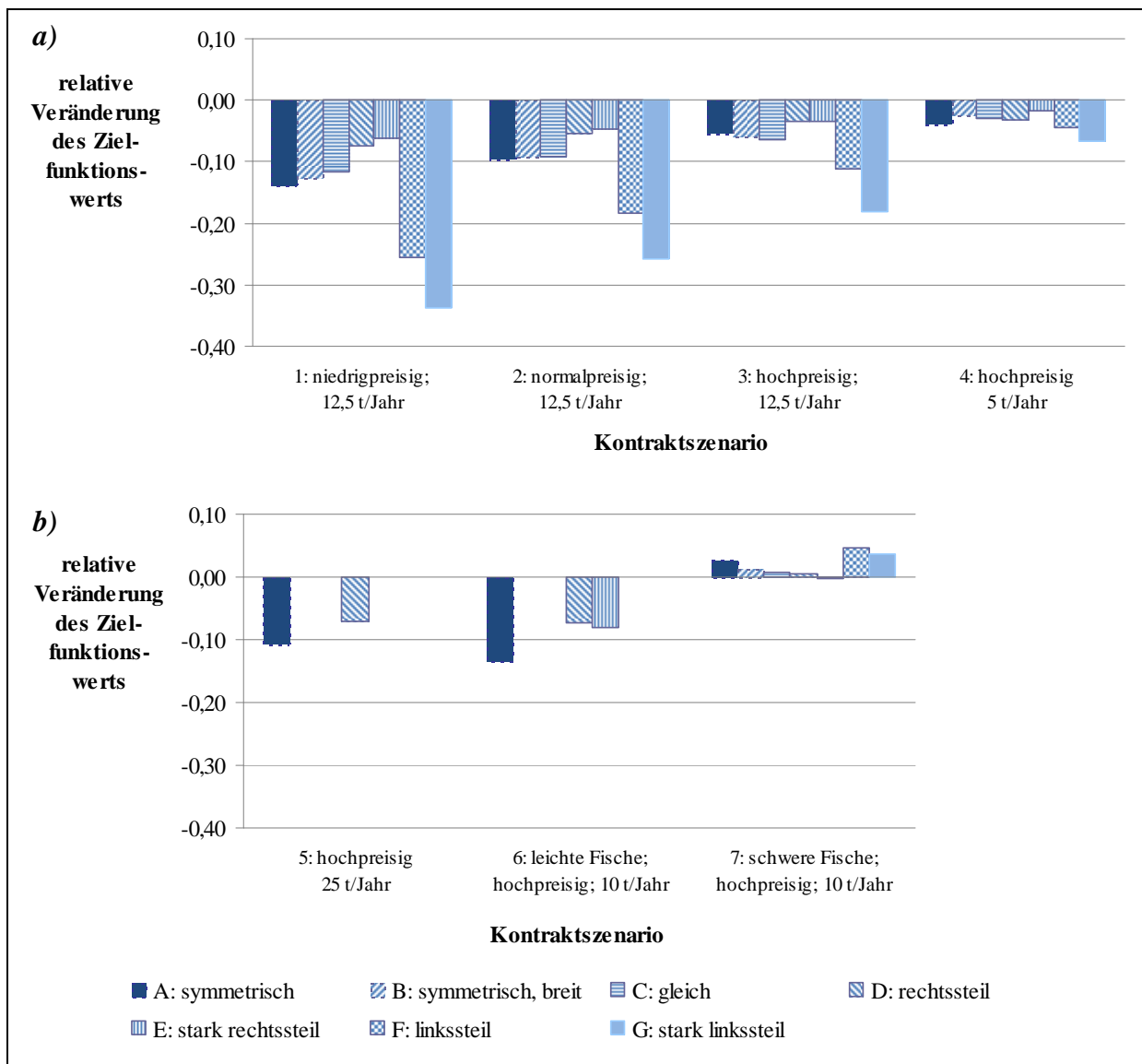


Abb. 40: Veränderung des Zielfunktionswerts unter verschiedenen Kontraktannahmen (eigene Darstellung)

Abbildung 40 stellt die die relative Veränderung des Zielfunktionswerts für unterschiedliche Kontraktsszenarien dar. Basis der relativen Veränderungen bildet Szenario 0; die entsprechenden absoluten Zielfunktionswerte zeigt Abb. 56 im Anhang. In allen Szenarien, ausgenommen Szenario 7, ist eine Abnahme des Zielfunktionswerts zu verzeichnen. Besonders stark sind die Veränderungen (bis zu -35 %), wenn die Wachstumsverteilungen F und G (hoher Anteil schlechtwüchsiger Tier) zugrunde gelegt werden. Grund dafür sind im Wesentlichen die im Kontrakt festgelegten Verkaufspreise. Ein weiterer Grund besteht in dem indirekten Einfluss der Kontrakterfüllung auf die Terminierung und Quantifizierung anderer Prozesse: So wird angenommen, dass zu den Zeitpunkten der saisonalen Preishochs gleichzeitig die Kontrakte zu bedienen sind. Zu diesen Zeitpunkten würde sich der Verkauf von Fischen am freien Markt ebenso lohnen, jedoch sind in erster Linie die Kontrakte zu erfüllen. Zu diesen Spitzenzeiten kommt es zu Gunsten der Kontraktproduktion zu Kapazitätsengpässen. Das Schließen von Kontrakten kann Risiken mindern, sodass der Betrag, um den sich der Zielfunktionswert mindert, als Risikoprämie aufgefasst werden kann.

6 Überblick und Ergebnisdiskussion

Zum einen sollen im Folgenden die zentralen Ergebnisse der Parametrisierungsrechnungen in einem Überblick zusammengefasst (Abschnitt 6.1), zum anderen die Ergebnisse der gesamten Arbeit diskutiert werden (Abschnitt 6.2).

6.1 Rechenergebnisse im Überblick

Um die wichtigsten Ergebnisse hervorzuheben, werden diese auf der folgenden Doppelseite – graphisch und thesenhaft – aufgeführt. Das soll nicht heißen, dass die restlichen Ergebnisse, sowohl die der Berechnungen als auch die der Literaturrecherche, der Modellierung oder der Modellrealisierung, weniger bedeutend oder zu vernachlässigen seien, sondern es soll ausschließlich ein Überblick – insbesondere dem eiligen Leser – über die umfangreichen Rechenergebnisse gegeben werden.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

In einer Gesamtbetrachtung sollen die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit einer kritischen Würdigung unterzogen werden.

Die Rechenergebnisse verdeutlichen die Auswirkung der Wachstumsleistung auf den wirtschaftlichen Erfolg des Aquakulturbetriebs. Mastbetriebe nehmen über die Fütterung und Gestaltung der Haltungsumgebung Einfluss auf die Lebendmassezunahme der Tiere. Jedoch ist zu einem großen Teil das Wachstumspotential genetisch bestimmt und daher vom Mäster nicht beeinflussbar. Die Modellannahme, dass das Wachstum der Fische ein wahrscheinlichkeitsverteilter Prozess sei, versucht das „Auseinanderwachsen“ abzubilden und damit einen zentralen Bestandteil des Produktionsrisikos von Aquakulturbetrieben zu berücksichtigen. Je stärker die Wachstumsheterogenität ist, desto wichtiger sind Selektionsmaßnahmen (das Erkennen und Merzen von schlechtwüchsigen Tieren). Damit kann die durchschnittliche Wachstumsgeschwindigkeit einer Kohorte stärker vereinheitlicht werden. Die Analyseergebnisse der Wachstumsszenarien zeigen, dass, je heterogener das Wachstum der Tiere ist, der Einfluss der Selektion auf das wirtschaftliche Masterergebnis desto größer ist und sich die Implementierung der Selektion als routinemäßige betriebliche Managementstrategie desto eher lohnt. Die plausiblen Rechenergebnisse belegen, dass das Modell die zentralen betrieblichen Entscheidungen, betriebswirtschaftlichen Restriktionen und Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge abbildet und dass die Lösungsmethode der gemischt-ganzzahligen linearen Programmierung für die Anwendung auf das Problem geeignet ist.

Die Verwendung von Standardsoftware zur Formulierung und Optimierung des Modells betont den Praxisbezug der Arbeit. Das Modell ist damit transparent und für eine praktische Nutzung wie auch potentiellen Weiterentwicklungen zugänglich. Durch den Einsatz einer Programmiersprache hätte das Problem eventuell kompakter formuliert werden können, jedoch sollte keine „Insellösung“ geschaffen werden, sondern ein integrationsfähiger Softwarebestandteil. So sind beispielsweise auf Basis einheitlicher Datenformate Schnittstellen nutzbar, sodass mithilfe anderer Standardsoftwareprodukte Daten verdichtet, ausgewertet und graphisch oder tabellarisch aufbereitet werden konnten. Insbesondere für die Überführung des Modells in die Praxis sind entsprechende Schnittstellen ebenso notwendig, wie Eingabemasken und Benutzeroberflächen.

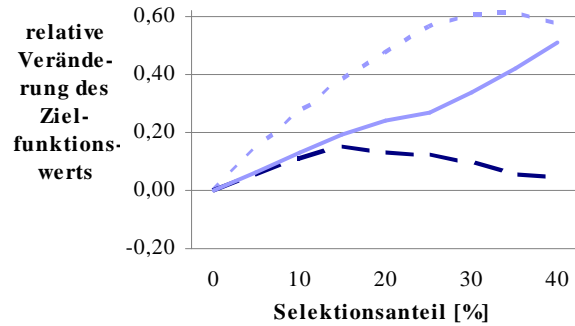
Das Modell ist so konzipiert, dass es jederzeit mit angemessenem Aufwand erweiterbar ist. So können zusätzliche Restriktionen oder Entscheidungsvariablen aufgenommen oder Koeffizienten an individuelle Anforderungen angepasst werden: Die Selektion ist bisher als gegebene Konstante modelliert worden, die in Szenarien variiert wurde. Das Selektieren kann auch als Aktivität aufgefasst und als eigenständige Entscheidungsvariable ins Modell integriert werden. Außerdem ist das Modell auf die Besonderheiten der Steinbuttmast angewendet worden. Um es zur Optimierung der Mastprozesse von anderen Fisch- bzw. Tierarten in anderen Anlagentypen bzw. Haltungsumgebungen einzusetzen, sind entsprechende biologische (Wachstumsfunktion, -heterogenität, Sterblichkeit etc.), technische (Anlagenausstattung, -größe, Filterkapazität etc.), betriebswirtschaftliche (Managementpraxis, Marktumgebung etc.) und sonstige (Wasserqualität, Umweltauflagen etc.) Konstituenten zu quantifizieren und in die Zielfunktion oder Nebenbedingungen mit aufzunehmen. Beispielsweise könnte somit auch die Wettbewerbsfähigkeit verschiedener Fischarten oder Anlagentypen analysiert werden. Die vorgenommenen Untersuchungen konzentrieren sich auf die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsprozesse. Ebenso ließe sich nach Modifizierung des Modells die Lagerhaltung (Optimierung der Bestellzeitpunkte für Futter, der Losgrößen, der Lagerkapazität oder der Lagerdauer), die Fütterung (Optimierung der Futterzusammensetzung, -rationierung, Substitution von Futterinhaltsstoffen) oder die Finanzierung (Optimierung von Kreditaufnahmen und Geldanlage) von Fischmastbetrieben analysieren.

Der untersuchte Planungszeitraum erstreckt sich über vier Jahre, wobei die Preisentwicklungen vom Planer in Form von Szenarien vorgegeben wurden. Der Verlauf der meisten Preise schwankt und ist mit Unsicherheit behaftet. So ist der Einsatz von komplexen Prognose- oder Schätzverfahren denkbar, worauf jedoch aufgrund fehlender Preisdaten und der Gefahr der Ablenkung vom Arbeitsschwerpunkt verzichtet wurde. Unsicherheit lässt sich

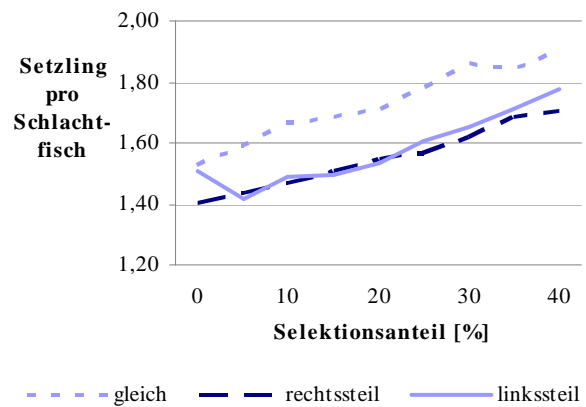
Tab. 21: Kurzgefasster Überblick über einige Rechenergebnisse (eigene Darstellung)

Selektion (Merzung)

- die Selektion beeinflusst das wirtschaftliche Betriebsergebnis maßgeblich
- durch das Identifizieren, Absammeln und Merzen der Schwächwüchsigen lässt sich das Ergebnis um bis zu 60 % verbessern
- je heterogener das Wachstumspotential der Masttiere, desto stärker ist der Einfluss der Selektion auf den Zielfunktionswert

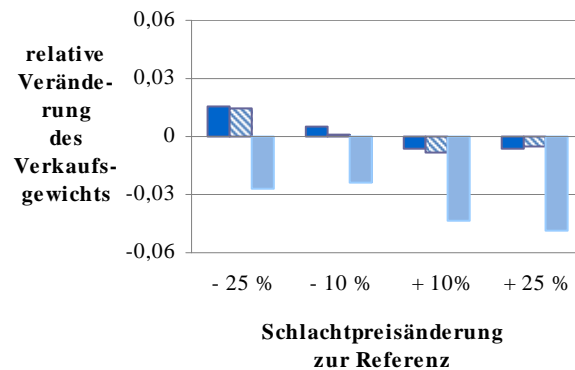


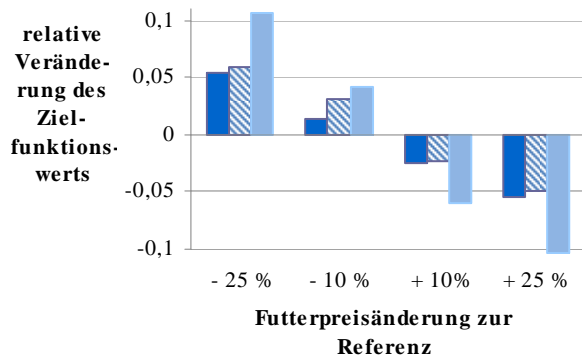
- mit zunehmender Selektionsintensität steigt das Verhältnis „Fingerling zu Schlachtfisch“: Bei einem Selektionsanteil von 40 % gelangt fast nur jeder zweite Setzling in die Vermarktung
- höhere Setzlingskosten werden durch einen gesteigerten Durchsatz kompensiert
- die Intensität der Produktion nimmt zu



Schlachtpreise

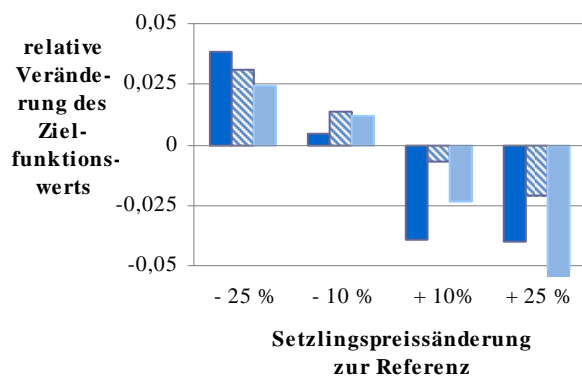
- nehmen die Verkaufspreise ab, lohnt sich eine längere Mast und die Fische werden tendenziell mit höheren Gewichten vermarktet
- steigen die Verkaufspreise, werden die Fische kürzer gemästet und leichter verkauft
- veränderte Outputpreise beeinflussen die Produktionsplanung insgesamt





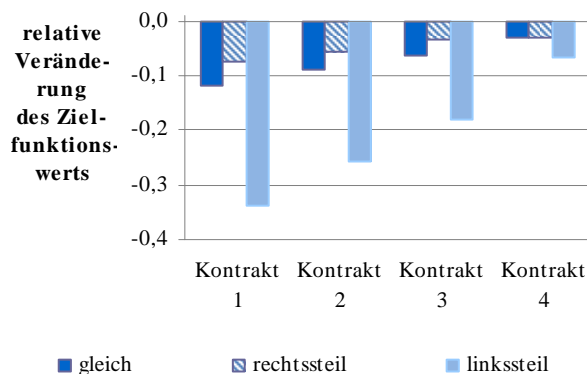
Futterpreise

- erwartungsgemäß steigt das wirtschaftliche Ergebnis bei fallenden Futterpreisen und sinkt bei zunehmenden
- je schlechter das Wachstumspotential der Fische, desto futterintensiver ist die Mast und desto stärker wirken sich Futterpreise auf das betriebliche Ergebnis aus



Setzlingspreise

- erwartungsgemäß nimmt das wirtschaftliche Ergebnis bei fallenden Futterpreisen zu und bei steigenden ab
- der Effekt ist umso stärker, je größer das Verhältnis von Setzlingen zu Schlachtfisch ist, das wiederum vom Selektionsregime und der Wachstumsheterogenität bedingt ist



Kontrakte

- je nach Kontraktspezifikation (Abschnitt 5.2.5) ändert sich das wirtschaftliche Ergebnis
- negative Veränderungen können als Prämie zur Risikobegrenzung interpretiert werden
- Kontrakte wirken auf die Produktionsoptimierung wie zusätzliche Restriktionen, schränken den möglichen Handlungsspielraum ein und beeinflussen damit die gesamte Prozessplanung

beispielsweise auch mithilfe von Chance Constraints modellieren. Jedoch ist von deren Einsatz abgesehen worden. Die Lösungen von Modellen mit Chance Constraints müssen nicht alle Nebenbedingungen voll erfüllen. Stattdessen werden probabilistische Nebenbedingungen definiert, die in einem Teil der Szenarien verletzt sein dürfen. Die Lösbarkeit dieses Modelltyps hängt davon ab, ob ein effizient lösbares äquivalentes deterministisches Modell abgeleitet werden kann. Ist dies nicht der Fall, sind diese Modelle sehr schwer lösbar (Charnes und Cooper 1959). Stattdessen wird das Preis-/Marktrisiko indirekt berücksichtigt, indem ein Teil der Fische mittels Kontrakten vermarktet werden kann. Der Entscheider kann laufend seine aktualisierten Erwartungen bezüglich künftiger Preisentwicklungen einfließen lassen und damit eine rollende Planung vornehmen.

Modelle bilden allgemein die Realität in reduzierter und abstrahierter Form ab, um nur bestimmte Größen zu beobachten und wiederum Rückschlüsse auf diese Größen im realen System vorzunehmen. Dementsprechend erfordert die Bildung von Modellen, eine Balance zwischen Abstraktion und Realitätsnähe zu finden. So enthält auch das Steinbuttmastmodell eine Reihe von Vereinfachungen, Annahmen und Vorentscheidungen (Abschnitt 3.4).

Aufgrund der wirtschaftlichen Schwierigkeiten des Praxisbetriebs, der als Vorbild für die Modellkonstruktion diente, konnte das Planungsmodell keinem Praxistest unterzogen werden. Da weltweit nur wenige ähnliche Betriebe existieren, konnte innerhalb eines vertretbaren zeitlichen Aufwands kein Ersatzbetrieb zur praktischen Verprobung des Modells gefunden werden. Stattdessen sind einige relevante Parameter variiert und Szenarien vorempfunden und auf dieser Basis „numerische Experimente“ durchgeführt worden, um die Reaktionsfähigkeit des Modells zu prüfen.

Faktoren, die in dem Modell als gegeben angesehen werden, bedürfen einer Weiterentwicklung. So ist etwa längerfristig durch züchterische Maßnahmen die Heterogenität des Wachstums von Steinbutt abzubauen oder die Fütterung, Sortierung und Selektion zu automatisieren. Insbesondere sollte in Anlehnung an klassische Nutztierhaltungssysteme eine technische Lösung zur Einzeltier- bzw. Gruppenidentifizierung in der Fischmast angestrebt werden. Aus ökonomischer Perspektive ist der Wert bzw. das maximale Investitionsvolumen für diese Maßnahmen zu ermitteln.

Die Rechenergebnisse zeigen, dass das Geschäfts- und Managementmodell eines Mastbetriebs an die Wachstumsheterogenität bzw. -leistungsfähigkeit der gehaltenen Spezies angepasst sein muss. Ohne die Berücksichtigung des biologischen Potentials der Masttiere – von der Planung eines Investitionsobjektes bis zum Management der Produktionsprozesse – werden Ressourcen nicht optimal genutzt und wirtschaftliche Probleme sind absehbar.

7 Zusammenfassung

Angesichts zunehmender Überfischung und steigender Nachfrage nach Fisch wächst das Interesse an der Fischproduktion in Aquakulturen.

Neben Ansprüchen an die Qualität von Lebensmitteln werden zunehmend auch ökologische und sonstige Anforderungen an deren Erzeugung gestellt. Geschlossene Kreislaufanlagen repräsentieren einen besonderen Typ von Aquakulturanlagen, die äußerst emissionsarm arbeiten und eine nahezu vollkommen kontrollierbare Haltungsumgebung versprechen. Gleichzeitig ist deren operativer Betrieb sehr komplex und erfordert ein hohes Maß an Know-how, Kontrolle sowie Kapital.

Die vorliegende Arbeit behandelt die wirtschaftliche Optimierung von operativen Fischmastprozessen in kommerziell betriebenen Aquakulturanlagen am Beispiel einer geschlossenen Kreislaufanlage für Steinbutt. Steinbutt gilt als hochpreisiger Edelfisch, der bisher kaum züchterisch bearbeitet ist und damit eine besondere Herausforderung für das operative Prozessmanagement darstellt. Aktuell reagieren die operativen Prozesse der Steinbuttmast kaum auf wirtschaftliche, technische oder biologische Rahmenbedingungen: Infolge der Wachstumsheterogenität des Steinbutts nimmt der Anteil langsamwüchsiger Tiere stetig zu und Produktionsfaktoren (Mastplatz, Futter etc.) werden zunehmend von unprofitablen Prozessen beansprucht. Damit nehmen die durchschnittliche Wachstumsleistung des Fischbesatzes insgesamt sowie die Wirtschaftlichkeit des ganzen Betriebs ab (Kapitel 1 und 2).

Zur wirtschaftlichen Optimierung ist zunächst ein lineares Modell der operativen Fischmastprozesse (Einsetzen von Setzlingen, Wachstum der Fische, Selektieren von Schlechtwüchsigen, Zuteilen von Fischkohorten auf passende Becken, Verkaufen von Schlachtfischen etc.) und der Produktionsbedingungen (biologische Wachstumsleistung, technische Anlagenkapazität, wirtschaftlichen Umweltbedingungen) entwickelt worden. Als Lösungsmethode kam gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung zum Einsatz (Kapitel 3 und 4).

Eine Reihe von Szenariorechnungen, in denen Selektionsanteil, Schlacht-, Futter- und Setzlingspreise sowie Kontraktsspezifikationen variieren, stellt unter Beweis, dass die entwickelte Entscheidungshilfe plausible Planungsergebnisse erzeugt und erwartungsgemäß reagiert. Umfangreiche Szenariorechnungen und Parametrisierungsergebnisse quantifizieren die wirtschaftlichen Potentiale bzw. Risiken der Steinbuttmast und zeigen, dass die knappen Ressourcen durch Merzung schwachwüchsiger Tiere erheblich besser genutzt werden können (Kapitel 5 und 6).

Damit leistet die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Planungs- und Entscheidungsunterstützung von operativen Fischmastprozessen und führt aus, warum Geschäfts- und Managementmodell an die Wachstumsheterogenität der gehaltenen Spezies angepasst sein sollten.

Summary

With respect to rising overfishing and a growing demand for fish, the interest in aquaculture grows. In addition to food quality standards, the fish production has to meet ecological, social, and other requirements. Recirculating aquaculture systems represent a special type of aquacultural facilities, which avoids polluting emissions and provides almost perfect production control. At the same time, their operational management is complex and requires substantial amounts of know-how, control, and capital.

This study concentrates on economical optimisation of operational fish fattening processes in commercial aquaculture facility using the example of turbot production in recirculating aquaculture systems. Turbot is regarded as an upscale blue white fish, which is barely bred with economic production intent yet. For this reason turbot fattening is a special challenge for operational process management. Currently the operational turbot fattening processes are marginally responsive to economic, technical, or biological conditions. Due to the fact that the growth of turbot is very heterogeneous, the proportion of slowly growing animals becomes larger and unprofitable processes occupy scarce production factors (rearing basins, feed, etc.). Devoid of operational reactions to turbot's growth heterogeneity, the average growth performance of the whole stock and the profitability of the complete farm decrease continuously (chapter 1 and 2).

Thus, first of all a linear model of operational fish fattening processes (buying fingerlings, culling slow growing fish, allocating fish cohorts to suitable basins, selling fish for slaughter) and the production conditions (biological growth performance, technical facility capacities, economic framework requirements) was built. Mixed integer linear programming was used to solve the model (chapter 3 and 4).

Varying the selection quota, the price of fish, of feed as well as of fingerlings and the specification of sales contracts – several scenario based calculations show, that the developed model generates plausible results, reacts as expected, and is generally able to support operational decisions. The results of the parameterisation calculations quantify the economic potential respectively the risk of turbot fattening and demonstrate, that the scarce resources could be better used by culling slowly growing animals in early production stages (chapter 5 and 6).

This study contributes to planning and decision support of operational fish fattening processes and explicates why business and management model have to be adapted to the heterogeneous growth of the kept species.

Literaturverzeichnis

Andersen, N. G. und N. S. Alsted (1991) Growth and body composition of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) in relation to different lipid – protein ratios in the diet. *Fish nutrition in practice*, 56, 479-491.

Arnason, R. (1992) Optimal feeding schedules and harvesting time in aquaculture. *Marine Resource Economics*, 7, 15-35.

Bala, B. K. und M. A. Satter (1989) System dynamics simulation and optimization of aquacultural systems. *Aquacultural Engineering*, 8, 381-391.

Becker, J., M. Kugeler und M. Rosemann (2008) *Prozessmanagement – Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*. Berlin: Springer.

Berg, E. und F. Kuhlmann (1993) *Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen*. Stuttgart: Ulmer.

Bertalanffy, L. von (1951) *Theoretische Biologie: Stoffwechsel, Wachstum*. Bern: Francke.

Beth, S. (2007) *Biotechnologische Optimierung von Biofiltern im moving-bed Verfahren für die Meerwasseraquakultur (Masterarbeit)*. Fachhochschule Flensburg.

Beverton, R. J. H. und S. J. Holt (1957) On the Dynamics of Exploited Fish Populations. *Fishery Investigations Series*, 19, 533-551.

Bjørndal, T. (1988) Optimal harvesting of farmed fish. *Marine Resource Economics*, 5, 139-159.

Bjørndal, T., D. E. Lane und A. Weintraub (2004) Operational research models and the management of fisheries and aquaculture: A review. *European Journal of Operational Research*, 156, 533-540.

Blohm, H. und K. Lüder (1985) *Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. München: Vahlen.

Bolte, J., S. Nath und D. Ernst (2000) Development of decision support tools for aquaculture: The POND experience. *Aquacultural Engineering*, 23, 103-119.

Cacho, O. J. und H. Kinnucan (1991) Optimal control of fish growth. *American Journal of Agricultural Economics*, 73, 174-182.

Charnes, A. und W. Cooper (1959) Chance-constrained programming. *Management Science*, 5, 73-79.

- Clayton, E. (1995) A mixed-integer linear-programming approach to the problem of production control of multi-enclosure aquaculture systems. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 8, 106-109.
- Corey, P. D. und M. J. English (1985) Optimization of feeding schedules in salmon hatcheries. *Simulation*, 44, 81-93.
- Cyrus, J. P. und R. Pelot (1998) A site management system for shellfish aquaculture. *Aquaculture Economics and Management*, 2, 101-118.
- Daellenbach, H. G. (1995) *Systems and decision making – A management science approach*. Chichester: Wiley.
- Danancher, D. und E. Garcia-Vazquez (2009) *Genimpact – final scientific report*. <http://www.aquanic.org/species/marine-fish/documents/turbot.pdf>, Zugriff: 20.05.2009.
- Dantzig, G. B. und M. N. Thapa (1997) *Linear Programming*. Berlin: Springer.
- Deuflhard, P. und A. Hohmann (2002) *Numerische Mathematik – Eine algorithmisch orientierte Einführung*. Berlin: de Gruyter.
- Deutsche See (2009) *Produktinformation Steinbutt*. Internetpräsenz Deutsche See GmbH, http://www.deutschesee.de/produkte/produkt_detail.jsp?primaryKey=1111, Zugriff: 26.01.2009.
- Deutsche Umwelt AG (1998) *Aquakultur Schleswig-Holstein – Endbericht*. Auftraggeber: Ministerium für ländliche Räume, Landwirtschaft, Ernährung und Tourismus des Landes Schleswig-Holstein.
- Diana, J. S., S. L. Kohler und D. R. Ottey (1988) A yield model for walking catfish production in aquaculture systems. *Aquaculture*, 71, 23-35.
- Domschke, W. und A. Drexl (1990) *Einführung in Operations Research*. Berlin: Springer.
- Eiselt, H. A. und C. Sandblom (2000) *Integer programming and network models*. Berlin: Springer.
- Ellinger, T., G. Beuermann und R. Leisten (2003) *Operations Research*. Berlin: Springer.
- Engle, C. R. und G. L. Pounds (1994) Trade-offs between single and multiple batch production of channel catfish, *Ictalurus punctatus*: An economics perspective. *Journal of Applied Aquaculture*, 3, 311-332.
- Ernst, D. H. (2009) *AquaFarm*. <http://www.aquafarm.com/index.htm>, Zugriff: 14.01.2009.

- Ernst, D. H., J. P. Bolte und S. S. Nath (2000) AquaFarm: Simulation and decision support for aquaculture facility design and management planning. *Aquacultural Engineering*, 23, 121-179.
- FAO (2008) *European price report*. Internetpräsenz der Food and Agriculture Organization of the United Nations, <http://www.globefish.org/index.php?id=281>, Zugriff: 28.03.2009.
- FAO (2009) *The state of world fisheries and aquaculture 2008*. Rom: FAO.
- Fishbase (2009) *Global scientific information system on fishes*. <http://www.fishbase.org/Summary/SpeciesSummary.php?id=1348>, Zugriff: 20.05.2009.
- Fleischhauer, C. (1999) *Excel in Naturwissenschaft und Technik. Grundlagen und Anwendung*. München: Addison-Wesley.
- Forsberg, O. I. und A. G. Guttormsen (2006) The value of information in salmon farming: Harvesting the right fish at the right time. *Aquaculture Economics and Management*, 10, 183-200.
- Forsberg, O. I. (1996) Optimal stocking and harvesting of size-structured farmed fish: A multi-period linear programming approach. *Mathematics and Computers in Simulation*, 42, 299-305.
- Forsberg, O. I. (1999) Optimal harvesting of farmed atlantic salmon at two cohort management strategies and different harvest operation restrictions. *Aquaculture Economics and Management*, 3, 143-158.
- Frontline (2007) *Premium Solver Platform – User Guide*. Incline Village: Frontline Systems.
- Griese, M. (2007) Mündliche Mitteilung. Ecomares GmbH, Büsum, April 2007.
- Grob, H.-L. (1989) *Investitionsrechnung mit vollständigen Finanzplänen*. München: Vahlen.
- Halachmi, I. (2006) Systems engineering for ornamental fish production in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 259, 300-314.
- Halachmi, I. (2007) Biomass management in recirculating aquaculture systems using queuing networks. *Aquaculture*, 262, 514-520.
- Halachmi, I., Y. Simon, R. Guetta und E. M. Hallerman (2005) A novel computer simulation model for design and management of re-circulating aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 32, 443-464.
- Haley, K. B. (1967) *Mathematical programming for business and industry*. New York: MacMillan.

- Harris, J. M., J. L. Hirst und M. J. Mossinghoff (2000) *Combinatorics and Graph Theory*. Berlin: Springer.
- Hatch, U. und C. F. Tai (1997) A survey of aquaculture production economics and management. *Aquaculture Economics and Management*, 1, 13-27.
- Hatch, U. und J. Atwood (1988) A risk programming model for farm-raised catfish. *Aquaculture*, 70, 219-230.
- Hatch, U., J. Atwood und J. Segar (1989) An application of safety-first probability limits in a diskret stochastic farm management programming model. *Southern Journal of Agricultural Economics*, 21, 65-72.
- Hazell, P. B. R. und R. D. Norton (1986) *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York: MacMillan.
- Hean, R. L. (1994) An optimal management model for intensive aquaculture – An application in atlantic salomon. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 1, 31-47.
- Heaps, T. (1995) Density dependent growth and the culling of farmed fish. *Marine Resource Economics*, 10, 285-298.
- Helbig, R. (2003) *Prozessorientierte Unternehmensführung*. Heidelberg: Physica.
- Heller, W., H. Lindenberg, M. Nuske und K. Schriever (1978) *Stochastische Systeme*. Berlin: de Gruyter.
- Hochman, E., P. Leung, L. W. Rowland und J. A. Wyban (1990) Optimal scheduling in shrimp mariculture: A stochastic growing inventory problem. *American Journal of Agricultural Economics*, 72, 382-393.
- Jensen, F. V. (2001) *Bayesian networks and decision graphs*. Berlin: Springer.
- Jensson, P. und E. A. Gunn (2001) *Optimization of production planning in fish farming (Arbeitsbericht)*. Dalhousie University, Halifax.
- Kändler, R. (1949) Über den Steinbutt in der Ostsee. H. Lübbert (Hrsg.) *Berichte der deutschen wissenschaftlichen Kommission für Meeresforschung*. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Kallrath, J. (2002a) Combined strategic and operational planning – An MILP success story in chemical industry. *OR Spectrum*, 24, 315-341.

- Kallrath, J. (2002b) *Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modelle und Anwendungen: Mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Metallgewerbe, Produktion und Logistik*. Wiesbaden: Vieweg und Teubner.
- Kaplan, R. S. und D. P. Norton (2004) *Strategy Maps – Der Weg von immateriellen Werten zum materiellen Erfolg*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Karp, L., A. Sadeh und W. L. Griffin (1986) Cycles in agricultural production: The case of aquaculture. *American Journal of Agricultural Economics*, 68, 553–561.
- Kazmierczak (Junior), R. F. und R. H. Caffey (1995) Management ability and the economics of recirculating aquaculture production systems. *Marine Resource Economics*, 10, 187-209.
- Kennedy, J. O. S. (1986) *Dynamic Programming*. London: Elsevier.
- Kirk, D. E. (1970) *Optimal control theory*. London: Prentice Hall.
- Kistner, K. (2003) *Optimierungsmethoden*. Heidelberg: Physica.
- Kleindienst, E. (2004) *Aggregation und Allokation in der hierarchischen Produktionsplanung*. Wiesbaden: Gabler.
- Kuhlmann, D., D. Kloth und G. Quantz (2005) *Emissionsprospekt der Ecomares Inc. (Nr. 2)*. Las Vegas: Ecomares Inc.
- Lavens, P. und R. A. M. Remmerswaal (1994) *Turbot culture: Problems and perspectives*. Gent: European Aquaculture Society.
- Leung, P. und E. Hochman (1990) Modeling shrimp production and harvesting schedules. *Agricultural Systems*, 32, 233-249.
- Leung, P. und Y. C. Shang (1989) Modeling prawn production management system: A dynamic Markov decision approach. *Agricultural Systems*, 29, 5-20.
- Lew, A. und H. Mauch (2007) *Dynamic programming – A computational tool*. Berlin: Springer.
- Lillestøl, J. (1986) On the problem of optimal timing of slaughtering in fish farming. *Modeling, Identification and Control*, 7, 199-207.
- Ludwig, D. und C. J. Walters (1982) Optimal harvesting with imprecise parameter estimates. *Ecological Modelling*, 14, 272-292.
- Martin, R. K. (1999) *Large scale linear and integer optimization: A unified approach*. Boston: Kluwer.

- Maßmann, M. (2006) *Kapazitierte stochastisch-dynamische Facility-Location-Planung*. Wiesbaden: Gabler.
- Mendelssohn, R. (1978) Optimal harvesting strategies for stochastic single-species, multiage class models. *Mathematical Biosciences*, 41, 159-174.
- Mistiaen, J. A. und I. Strand (1999) Optimal feeding and harvest time for fish with weight-dependent prices. *Marine Resource Economics*, 13, 231-246.
- Müller-Merbach, H. (1973) *Operations Research*. München: Vahlen.
- Nazareth, J. L. (2001) *DLP and Extensions*. Berlin: Springer.
- Neumann, K. (1975) *Operations Research Verfahren*. München: Hanser.
- Pascoe, S., P. Wattage und D. Naik (2002) Optimal harvesting strategy: Practice versus theory. *Aquaculture Economics and Management*, 6, 295-310.
- Pauly, D. (1979) *Gill size and temperature as governing factors in fish growth: A generalization of von Bertalanffy's growth formula (Arbeitsbericht Nr 36)*. Institut für Meereskunde, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Pelot, R. P. und J. P. Cyrus (1999) Optimization of a large-scale scallop hanging culture operation. *European Journal of Operational Research*, 115, 1-18.
- Perkins, J. D. und R. A. Fleming (2000) An Economic evaluation of commercial paddlefish (polyodon spathula) production (Tagungsbeitrag). Tenth Biennial Conference of the International Institute of Fisheries Economics and Trade, Oregon, 2000.
- Ragsdale, C. T. (1995) *Spreadsheet modeling and decision analysis: A practical introduction to management science*. Cambridge: Course Technology.
- Rauch, H. E., L. W. Botsford und R. A. Shleser (1975) Economic optimization of an aquaculture facility. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 20, 301-319.
- Richards, R. H. (2001) *Annual Report 2000-2001 of the Institute of Aquaculture*. University of Sterling.
- Rizzo, G. und M. Spagnolo (1996) A Model for the optimal management of sea bass *dicentrarchus labrax* aquaculture. *Marine Resource Economics*, 11, 267-286.
- Rupasinghe, J. W. und J. O. S. Kennedy (2006) Optimal batch lengths for barramundi farming under seasonal variations: A dynamic programming approach (Tagungsbeitrag). *Séminaire Amure und Conférence Ecole Doctorale des sciences de la mer, IIFET, Portsmouth, 2006*.

- Schulz, C., R. Herbst, M. Langensiepen und C. Ulrichs (2005) Herausforderungen einer umweltgerechten Aquakultur. *Humboldt Spektrum*, 1-2005, 42-48.
- Seginer, I. und I. Halachmi (2008) Optimal stocking in intensive aquaculture under sinusoidal temperature, price and marketing conditions. *Aquacultural Engineering*, 39, 103-112.
- Shaftel, T. L. und B. M. Wilson (1990) A mixed-integer linear programming decision model for aquaculture. *Managerial and Decision Economics*, 11, 31-38.
- Sparre, P. (1977) A Markovian decision process applied to optimization of production planning in fish farming. *Meddr Danm. Fisk.-og Havunders*, 7, 97-111.
- Subasinghe, R. P., M. G. Bondad-Reantaso und S.E. McGladdery (2001) Aquaculture development, health and wealth (Tagungsbeitrag). *Conference on aquaculture in the third millennium, Bangkok, FAO und NACA, 2000*.
- Sundermeier, H.-H. (1987) *Ein dynamisches Planungsmodell für die wirtschaftliche Optimierung der Rindermast (Arbeitsbericht)*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Sundermeier, H.-H., R. Klepper und C. Hartjen (1987) *Dynamische Programmierung zur wirtschaftlichen Optimierung von Tierproduktionsprozessen (Arbeitsbericht)*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Sæther, B. S. (2001) *Feed management in fish, with special emphasis on turbot (Schophthalmus maximus L.): Effects of ration size and diet composition on feed intake and growth (Dissertation)*. Norwegian College of Fishery, University of Tromsø.
- Tal, Y., J. Watts, S. Schreier, K. Sowers und H. Schreier (2003) Characterization of the microbial community and nitrogen transformation processes associated with moving bed bioreactors in a closed recirculated mariculture system. *Aquaculture*, 215, 187-202.
- Talpaz, H. und Y. Tsur (1982) Optimising aquaculture management of a single-species fish population. *Agricultural Systems*, 9, 127-142.
- Tian, X., P. Leung und D. Lee (2000) Size economies and optimal scheduling in shrimp production: Results from a computer simulation model. *Aquacultural Engineering*, 22, 289-307.
- Timmons, M. B., J. M. Ebeling, F. W. Wheaton, S. T. Summerfelt und B. J. Vinci (2002) *Recirculating aquaculture systems*. Ithaca: Cayuga Aqua Ventures.
- Valderrama, D. und C. R. Engle (2000) A risk programming model for shrimp farming in Honduras (Tagungsbeitrag). *Tenth Conference of the International Institute of Fisheries Economics and Trade*.

- Varvarigos, P. und M. T. Horne (1986) Application of linear programming to fish farm production planning (Tagungsbeitrag). *IFAC Symposium*. Oxford: Pergamon Press.
- Waldmann, K. und U. M. Stocker (2004) *Stochastische Modelle: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Berlin: Springer.
- Waller, U. (2000) Tank culture and recirculating systems. K. D. Black (Hrsg.) *Environmental impacts of aquaculture*. Chichester: Blackwell.
- Walters, C. J. (1981) Optimum escapments in the face of alternative recruitment policies. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 38, 678-689.
- Wang, Y., R. Turton, K. Semmens und T. Borisova (2008) Raceway design and simulation system (RDSS): An event-based program to simulate the day-to-day operations of multiple-tank raceways. *Aquacultural Engineering*, 39, 59-71.
- Williams, H. P. (1985) *Model building in mathematical programming*. Chichester: Wiley.
- Wilson, B. M., T. L. Shaftel und R. M. Barefield (1991) A mathematical programming approach to production decisions in the emerging aquaculture industry. *Decision Sciences*, 22, 194-205.
- Winkelmann, M. (2007) *Anwendung von Prozessmanagement- und Optimierungsansätzen in der Marikultur zur Unterstützung operativer Entscheidungen – Fallstudie (Masterarbeit)*. Institut für Agrarökonomie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Wöhe, G. und U. Döring (2008) *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Vahlen.
- Yu, R. und P. Leung (2005) Optimal harvesting strategies for a multi-cycle and multi-pond shrimp operation: A practical network model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 68, 339-354.
- Yu, R. und P. Leung (2006) Optimal partial harvesting schedule for aquaculture operations. *Marine Resource Economics*, 21, 301-315.
- Yu, R., P. Leung und P. Bienfang (2006) Optimal production schedule in commercial shrimp culture. *Aquaculture*, 254, 426-441.

Anhang

Anhang A: Zusatzmaterial zum dynamisch-linearen Testmodell

Tab. 22: Beckentypen und deren Beanspruchung im dynamisch-linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Beckentyp	beansprucht von	Kapazität [m ²]	Platzbedarf [m ² /Stk]	Kapazität [Stk]
1	Z1	107	0,002	53.500
2	Z2 Z3	1.280	0,018	71.111
3	Z4	59	0,024	2.458

Annahme: Fische vom Zustand Z2 und Z3 beanspruchen den gleichen Beckentyp und können auch gemeinsam gemästet werden

Tab. 23: Bewertungsansätze des dynamisch-linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Futterkosten [€/kg Futter]:	1,20						
Futterverwertung [Futter/Zuwachs]:	1						
Setzlingskosten [€/Stk]:	1,00						
sonstige variable Betriebskosten [€/Stk]:							
	VK	BM	WK	WM	WG	VG	BL
	0,20	0,50	0,75	1,00	1,25	0,40	0,00
Schlachtpreis [€/kg LM]:							
	Z3	Z4					
	12,00	14,00					

Die Kürzel für die Handlungsalternativen sind in Tab. 4 erläutert.

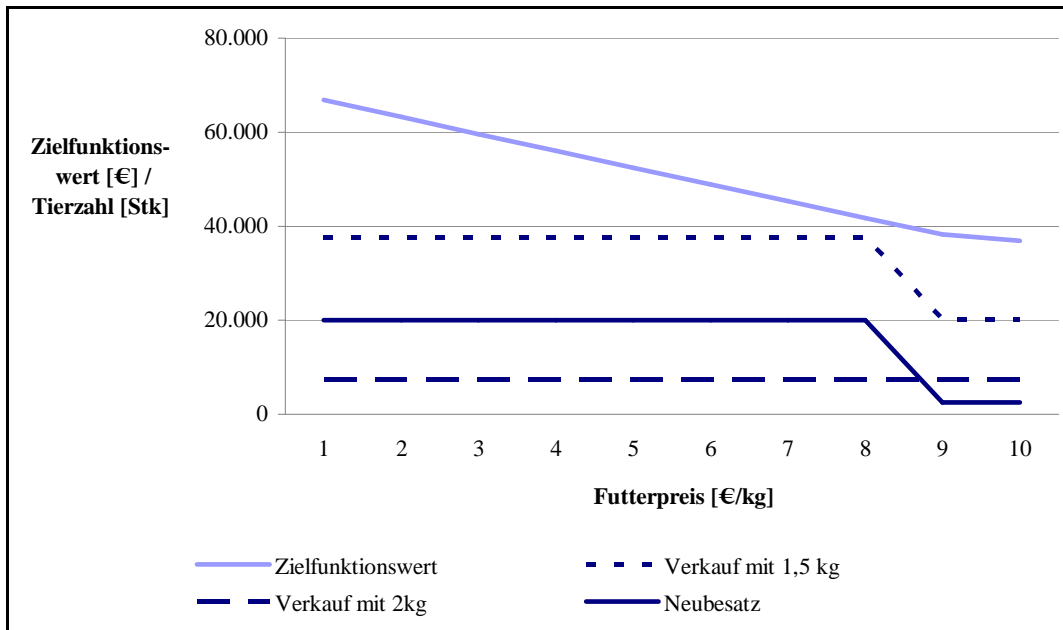


Abb. 41: Reaktion des dynamisch-linearen Testmodells auf steigende Futterpreise (eigene Darstellung)

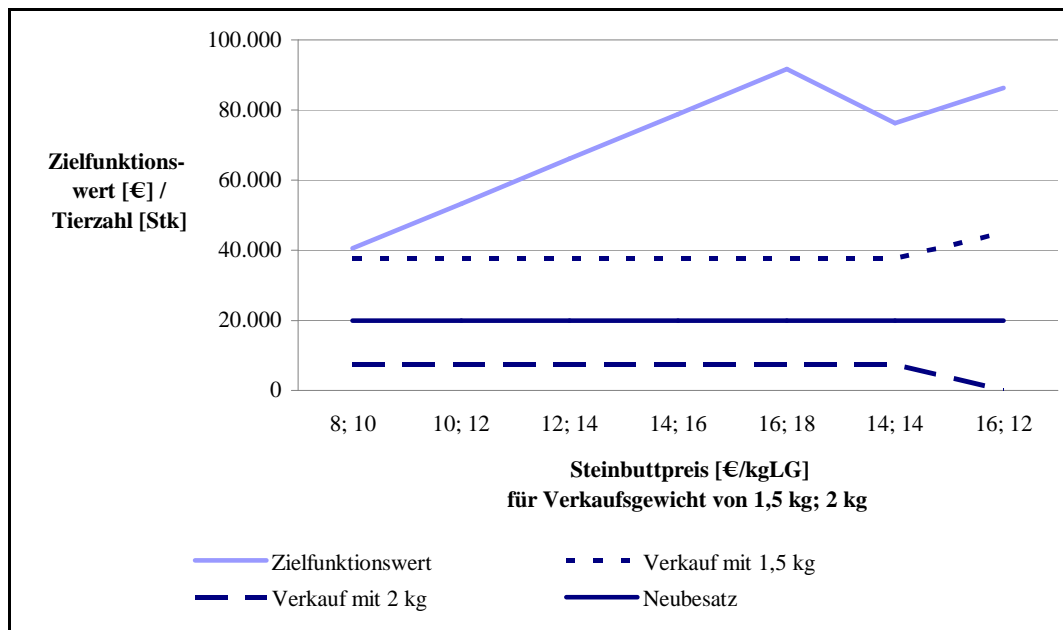


Abb. 42: Reaktion des dynamisch-linearen Testmodells auf veränderte Steinbuttpreise (eigene Darstellung)

Tab. 24: *Dynamisch-lineares Testmodell in DLPFI – exemplarische Input-Datei (eigene Darstellung)*

```

?PROBLEM   FISCHMAST
?PERIODS
  6
?CLASSES
  ANLBUESU
?NAME ANLBUESU
?STATES ANLBUESU
  S0 S1 S2 S3 S4
?ACTIONS ANLBUESU
  VK BM WK WM WG VG BL
?NETWORK ANLBUESU
  S0 BL 0. 0. S0
  S0 BM 0. -1.58 S1
  S1 WK 0. -1.08 S2
  S2 WM 0. -2.37 S3
  S3 WG 0. -1.84 S4
  S3 VK 0. 17.72 S0
  S4 VG 0. 27.33 S0
?LOCAL ANLBUESU
?INITIAL ANLBUESU
  S1 = 5000.
  S3 = 20000.
?CONSTRAINTS ANLBUESU
  T: S1 + S2 + S3 + S4 = 0.
  1: S1 <= 20000.
  1: S2 + S3 <= 36364.
  1: S4 <= 15000.
  2: S1 <= 20000.
  2: S2 + S3 <= 36364.
  2: S4 <= 15000.
  3: S1 <= 20000.
  3: S2 + S3 <= 36364.
  3: S4 <= 15000.
  4: S1 <= 20000.
  4: S2 + S3 <= 36364.
  4: S4 <= 15000.
  5: S1 <= 20000.
  5: S2 + S3 <= 36364.
  5: S4 <= 15000.
?GLOBAL
  C[:]=ZCOST
  B[:]=ZBEN
?OBJECTIVE
  MAXIMIZE ZBEN
?ENDATA

```

Tab. 25: Ergebnisbericht des dynamisch-linearen Testmodells in DLPI – exemplarische Ergebnisdatei (eigene Darstellung)

```

?PROBLEM   FISCHMAST
?NAME      ANLBUESU
?ALTERNATIVES  2
?CLUSTER   7.50000E-01
?INITIAL   S1      5.00000E+03      3.75000E+03
WK          0.00000E+00      -1.08000E+00      S2
WM          0.00000E+00      -2.37000E+00      S3
WG          0.00000E+00      -1.84000E+00      S4
VG          0.00000E+00      2.73300E+01      S0
BL          0.00000E+00      0.00000E+00      S0
BL          0.00000E+00      0.00000E+00      S0
?INITIAL   S3      2.00000E+04      1.50000E+04
VK          0.00000E+00      1.77200E+01      S0
BM          0.00000E+00      -1.58000E+00      S1
WK          0.00000E+00      -1.08000E+00      S2
WM          0.00000E+00      -2.37000E+00      S3
WG          0.00000E+00      -1.84000E+00      S4
VG          0.00000E+00      2.73300E+01      S0
?CLUSTER   2.50000E-01
?INITIAL   S1      5.00000E+03      1.25000E+03
WK          0.00000E+00      -1.08000E+00      S2
WM          0.00000E+00      -2.37000E+00      S3
WG          0.00000E+00      -1.84000E+00      S4
VG          0.00000E+00      2.73300E+01      S0
BL          0.00000E+00      0.00000E+00      S0
BL          0.00000E+00      0.00000E+00      S0
?INITIAL   S3      2.00000E+04      5.00000E+03
WG          0.00000E+00      -1.84000E+00      S4
VG          0.00000E+00      2.73300E+01      S0
BM          0.00000E+00      -1.58000E+00      S1
WK          0.00000E+00      -1.08000E+00      S2
WM          0.00000E+00      -2.37000E+00      S3
VK          0.00000E+00      1.77200E+01      S0
?LOCAL CONSTRAINTS  16
0.00000E+00      E      0.00000E+00
2.00000E+04      L      2.00000E+04
3.13640E+04      L      3.63640E+04
1.00000E+04      L      1.50000E+04
5.00000E+03      L      2.00000E+04
3.13640E+04      L      3.63640E+04
1.50000E+04      L      1.50000E+04
1.50000E+04      L      2.00000E+04
2.13640E+04      L      3.63640E+04
1.00000E+04      L      1.50000E+04
2.00000E+04      L      2.00000E+04
1.63640E+04      L      3.63640E+04
1.50000E+04      L      1.50000E+04
2.00000E+04      L      2.00000E+04
3.13640E+04      L      3.63640E+04
0.00000E+00      L      1.50000E+04
?GLOBAL CONSTRAINTS  2
0.00000E+00      ZCOST      0.00000E+00
-8.73800E+05      ZBEN      0.00000E+00
?OBJECTIVE  2
8.73800E+05
?ENDATA

```

Periode [Halbjahr]	Aktivität	Deckungsbeitrag	
		[€/Tier]	[€]
Anfangsbestand: 5000 Tiere á 75 g			
	davon: 3750		
1	➡ Weitermast mit 75 g	-1,08	-4.050
2	➡ Weiermast mit 348 g	-2,37	-8.888
3	➡ Weitermast mit 1483g	-1,84	-6.900
4	⬇ Verkauf mit ~2 kg	27,33	102.488
5	➡ Becken leer lassen	0,00	0
6	➡ Becken leer lassen	0,00	0
	1250		
1	➡ Weitermast mit 75 g	-1,08	-1.350
2	➡ Weiermast mit 348 g	-2,37	-2.963
3	➡ Weitermast mit 1483g	-1,84	-2.300
4	⬇ Verkauf mit ~2 kg	27,33	34.163
5	➡ Becken leer lassen	0,00	0
6	➡ Becken leer lassen	0,00	0
Anfangsbestand: 20000 Tiere á 1493 g			
	davon: 15000		
1	⬇ Verkauf mit ~1,5 kg	17,72	265.800
2	⬆ Besatz und Weitermast	-1,58	-23.700
3	➡ Weitermast mit 75 g	-1,08	-16.200
4	➡ Weiermast mit 348 g	-2,37	-35.550
5	➡ Weitermast mit 1483g	-1,84	-27.600
6	⬇ Verkauf mit ~2 kg	27,33	409.950
	5000		
1	➡ Weitermast mit 1483g	-1,84	-9.200
2	⬇ Verkauf mit ~2 kg	27,33	136.650
3	⬆ Besatz und Weitermast	-1,58	-7.900
4	➡ Weitermast mit 75 g	-1,08	-5.400
5	➡ Weiermast mit 348 g	-2,37	-11.850
6	⬇ Verkauf mit ~1,5 kg	17,72	88.600
Gesamtdeckungsbeitrag:			873.800
Legende:			
	⬆	Besatz	
	➡	Weiermast	
	➡	Leerstand	
	⬇	Verkauf	

Abb. 43: Aufbereiteter Ergebnisbericht des dynamisch-linearen Testmodells (eigene Darstellung)

Anhang B: Zusatzmaterial zum gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell

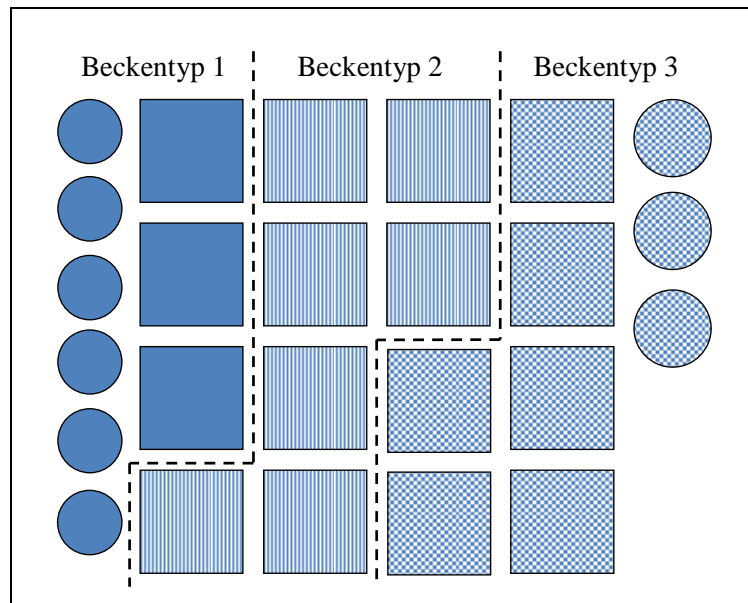


Abb. 44: Anlagenaufbau im gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell (eigene Darstellung)

Tab. 26: Beckeneigenschaften im gemischt-ganzzahligen Testmodell (eigene Darstellung)

Beckentyp	Anzahl [Stk]	Fläche		Besatzdicht [kg LM/m ²]	Mastkapazität	
		[m ² /Becken]	[m ²]		[kg LM/Becken]	[kg LM]
1	3; 6*	64; 20*	312	30	1.920; 600*	9.360
2	7	64	448	60	3.840	26.880
3	6; 3*	64; 28*	468	80	5.120; 2.240*	37.440

*runde Beckenanzahl des jeweiligen Beckentyps

Tab. 27: *Kostenansätze im gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell (eigene Darstellung)*

Investitionsvolumen	2.500.000 €
Nutzungsdauer	25 Jahre 50 Halbjahre (HJ)
kein Restwert	0 €
Abschreibung	50.000 €/HJ
Zinssatz	5 % p.a.
Zinsen	62.500 €/HJ
Arbeitskräfte	2 Arbeitskräfte (AK)
Bruttolohnansatz	50.000 €/AK/Jahr
Arbeit	50.000 €/HJ
Energie (fixer Anteil)	10.000 €/kg LM
Setzlinge	1,00 €/Fisch
Futter	1,50 €/kg Futter
Arbeit (variabler Anteil)	1,25 €/kg Futter/HJ
Energie (variabler Anteil)	1,25 €/kg LM/HJ
Sauerstoff	0,75 €/kg LM/HJ

Tab. 28: *Modellierung der ganzzahligen Inbetriebnahme des Becken des Beckentyps 2 mittels Binärvariablen im gemischt-ganzzahligen linearen Testmodell (eigene Darstellung)*

Beckenanzahl		1	2	4
	Mastkapazität	3.840	7.680	15.360
(Koeffizienten der Binärvariablen)				
1	3.840	1	0	0
2	7.680	0	1	0
3	11.520	1	1	0
4	15.360	0	0	1
5	19.200	1	0	1
6	23.040	0	1	1
7	26.880	1	1	1
(Binärvariablen)				

eigene Darstellung

Binärvariablen können die Werte 1 oder 0 annehmen. Die Koeffizienten der Binärvariablen werden als exponentielle Folge modelliert: $2^0=1$, $2^1=2$, $2^2=4$, ... So lassen sich mithilfe von nur drei Binärvariablen sieben ganzzahlige Entscheidungen (Inbetriebnahme von einem, zwei, ..., sieben Becken) darstellen.

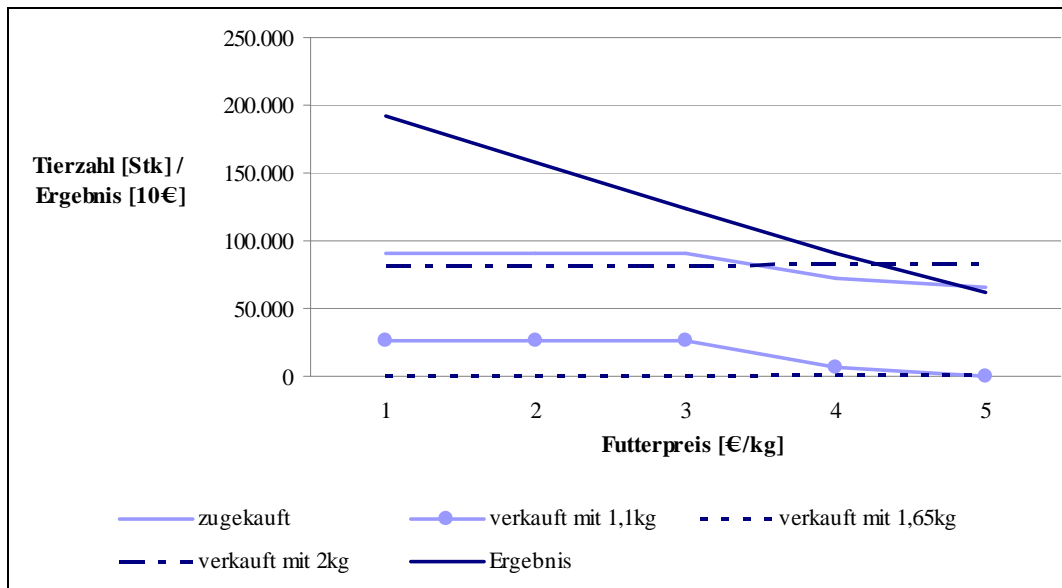


Abb. 45: Reaktion des gemisch-ganzzahligen linearen Testmodells auf steigende Futterpreise (eigene Darstellung)

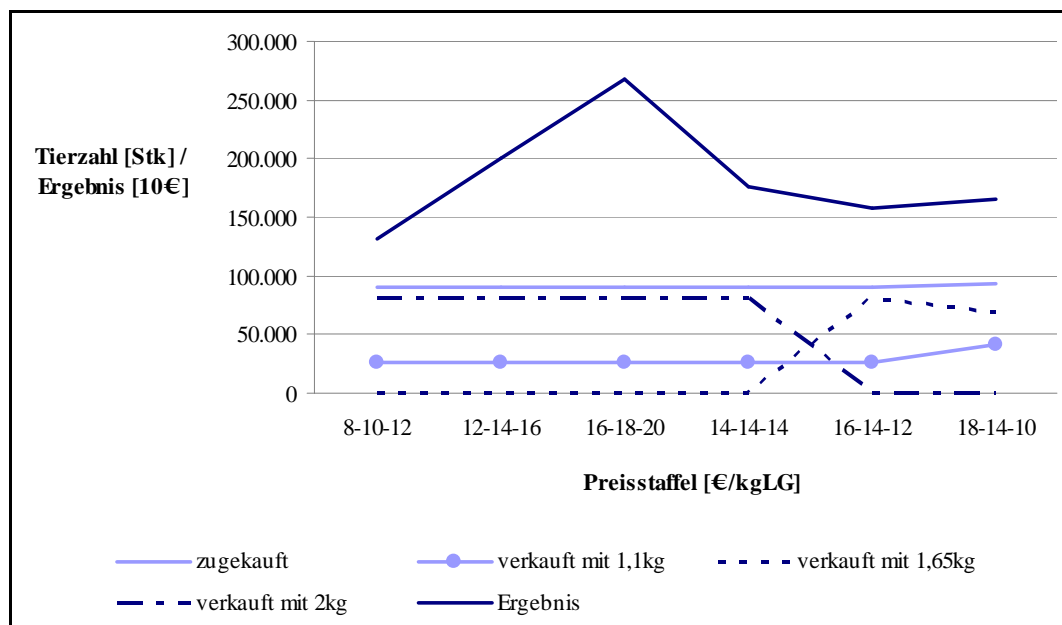


Abb. 46: Reaktion des gemischt-ganzzahligen linearen Testmodells auf veränderte Schlachtpreise (eigene Darstellung)

Anhang C: Zusatzmaterial zur Modellrealisierung

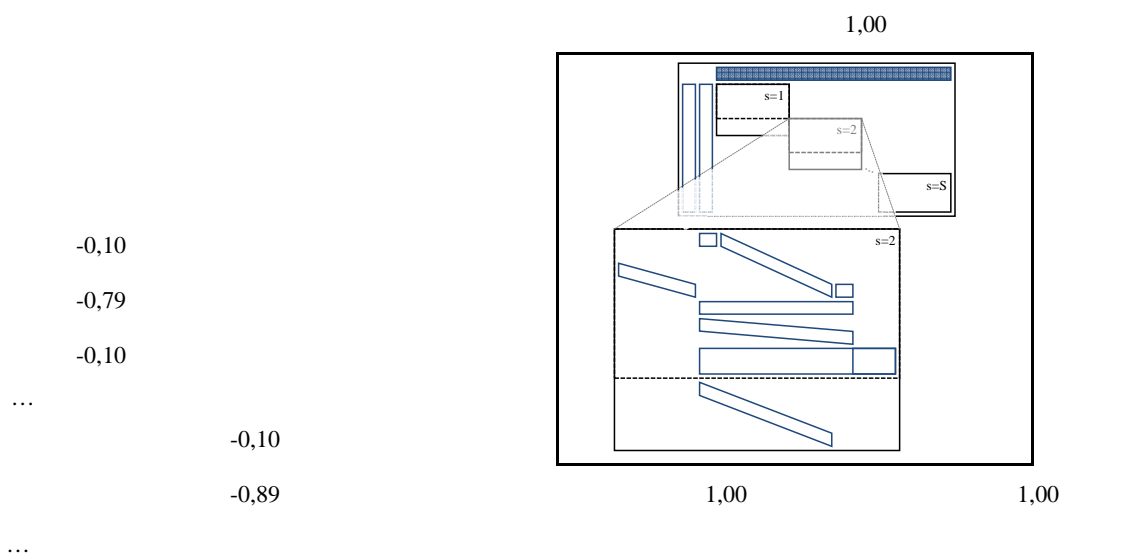
Tab. 29: Modellierung der Zielfunktion – Matrixausschnitt (eigene Darstellung)

			Spalte	...						
			Einheit	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
			Text	Tsd Stk	Tsd Stk	Tsd Stk	Tsd Stk	...	Tsd Stk	...
				s=5;	s=5;	s=5;	s=5;	...	s=5;	...
				Verkauf	Verkauf	Zukauf,	Weiter-	...	Weiter-	...
				von z=22	von z=23	Weiter-	mast von	...	mast von	...
						mast	z=0	...	z=2	...
			Entscheidungs-							
			variable							
			LHS	0,339	0,000	21,283	0,357		5,701	
			RHS							
Zeile	Einheit	Text								
8	€ prc Einheit	Zielfunktion	873.563max		28.421	30.621	-1.144	-168		-307
...										
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00 <=	0,00				1,00		
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00 <=	0,00						
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00 <=	0,00						1,00
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00 <=	0,00						
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00 <=	0,00						
...										
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00 <=	0,00	1,00					
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00 <=	0,00		1,00				
163	kg TAN	s=5; Filter- kapazität	71,99 <=	871,63			0,34	0,34		0,65
164	m ²	s=5; Kapa- zität b=1	42,00 <=	49,48			0,52	0,52		1,21
...										
167	m ²	s=5; Kapa- zität b=4	84,82 <=	84,82						
168	m ²	s=5; f=1 in b=1	0,00 <=	0,00			0,52	0,52		
169	m ²	s=5; f=2 in b=1	-0,42 <=	0,00						1,21
170	Stk	s=5; Bele- gung b=1	6,00 <=	7,00						
...										
176	Stk	s=5; Bele- gung b=3	2,00 <=	20,00						
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00 <=	0,00			-0,10	-0,10		
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00 <=	0,00			-0,79	-0,79		
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00 <=	0,00			-0,10	-0,10		-0,10
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00 <=	0,00						-0,79
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00 <=	0,00						-0,10
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00 <=	0,00						
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00 <=	0,00						
...										
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00 <=	0,00						
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00 <=	0,00						
...										

...	HE	...	HW	HX	HY	HZ	...	JC	...	JE	...	KB	...
	Tsd Stk s=5; Weitermast von z=4		Tsd Stk s=5; Weitermast von z=22	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=6	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=1	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=2		Tsd Stk s=6; Verkauf von z=23		Tsd Stk s=6; Weitermast von z=0		Tsd Stk s=6; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=7	
	7,267		0,000	0,000	2	4		0,000		2,164		0,000	
	-453		-1.789	35.007	-24	-24		30.469		-167		34.833	

...

1,00													
...													
		1,00											
			1,00										
0,83	10,64	140,12											
1,92													
...													
	23,85	24,11											
1,92													
...													
...													



Tab. 30: Modellierung der Zukaufaktivität – Matrixausschnitt (eigene Darstellung)

Zeile	Einheit	Text	Entscheidungsvariable		Spalte														
			LHS	RHS	Einheit	Text	...	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...					
8	€ pro Einheit	Zielfunktion	873.563	max															
...																			
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00	<=	0,00														
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00														
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00														
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00														
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00														
...																			
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00	<=	0,00			1,00											
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00				1,00										
163	kg TAN	s=5; Filterkapazität	71,99	<=	871,63					0,34		0,34						0,65	
164	m²	s=5; Kapazität b=1	42,00	<=	49,48					0,52		0,52						1,21	
...																			
167	m²	s=5; Kapazität b=4	84,82	<=	84,82														
168	m²	s=5; f=1 in b=1	0,00	<=	0,00					0,52		0,52							
169	m²	s=5; f=2 in b=1	-0,42	<=	0,00														1,21
170	Stk	s=5; Belegung b=1	6,00	<=	7,00														
...																			
176	Stk	s=5; Belegung b=3	2,00	<=	20,00														
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00	<=	0,00														
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00														
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00														
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00														
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00														
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00	<=	0,00														
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00	<=	0,00														
...																			
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00	<=	0,00														
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00														
...																			

HE	HW	HX	HY	HZ	JC	JE	KB
Tsd Stk s=5; Weitermast von z=4	Tsd Stk s=5; Weitermast von z=22	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=6	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=1	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=2	Tsd Stk s=6; Verkauf von z=23	Tsd Stk s=6; Weitermast von z=0	Tsd Stk s=6; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=7
7,267	0,000	0,000	2	4	0,000	2,164	0,000
-453	-1.789	35.007	-24	-24	30.469	-167	34.833

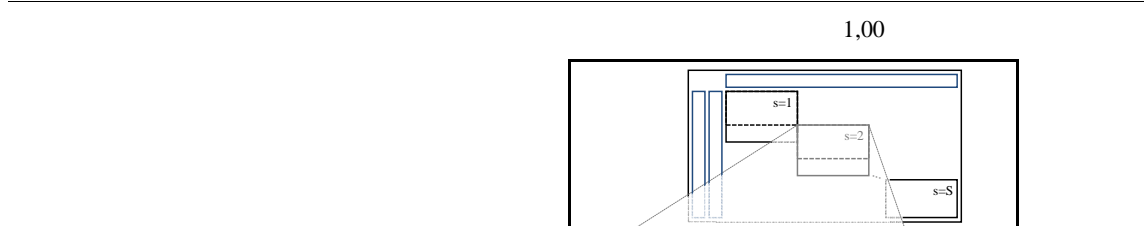
...

1,00							
	1,00						
		1,00					

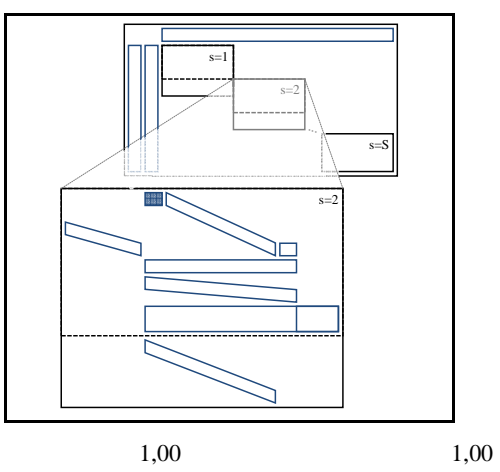
0,83	10,64	140,12					
1,92							
	23,85	24,11					

			-7,07				
1,92				-7,07			
			1,00	1,00			

...



-0,10							
-0,79							
-0,10							
	-0,10						
	-0,89						



...

Tab. 31: Modellierung der Weitermastaktivität – Matrixausschnitt (eigene Darstellung)

Zeile	Einheit	Text	Spalte		...	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
			Einheit	Text								
			Entscheidungsvariable									
			LHS	RHS								
8	€ pro Einheit	Zielfunktion	873.563max			Tsd Stk s=5; Verkauf von z=22	Tsd Stk s=5; Verkauf von z=23	Tsd Stk s=5; Zukauf, Weitermast	Tsd Stk s=5; Weitermast von z=0		Tsd Stk s=5; Weitermast von z=2	
						0,339	0,000	21,283	0,357		5,701	
						28.421	30.621	-1.144	-168		-307	
...												
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00	<=	0,00				1,00			
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00							
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00						1,00	
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00							
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00							
...												
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00	<=	0,00	1,00						
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00		1,00					
163	kg TAN	s=5; Filterkapazität	71,99	<=	871,63			0,34	0,34		0,65	
164	m ²	s=5; Kapazität b=1	42,00	<=	49,48			0,52	0,52		1,21	
...												
167	m ²	s=5; Kapazität b=4	84,82	<=	84,82							
168	m ²	s=5; f=1 in b=1	0,00	<=	0,00			0,52	0,52			
169	m ²	s=5; f=2 in b=1	-0,42	<=	0,00						1,21	
170	Stk	s=5; Belegung b=1	6,00	<=	7,00							
...												
176	Stk	s=5; Belegung b=3	2,00	<=	20,00							
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00	<=	0,00			-0,10	-0,10			
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00			-0,79	-0,79			
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00			-0,10	-0,10		-0,10	
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00						-0,79	
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00						-0,10	
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00	<=	0,00							
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00	<=	0,00							
...												
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00	<=	0,00							
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00							
...												

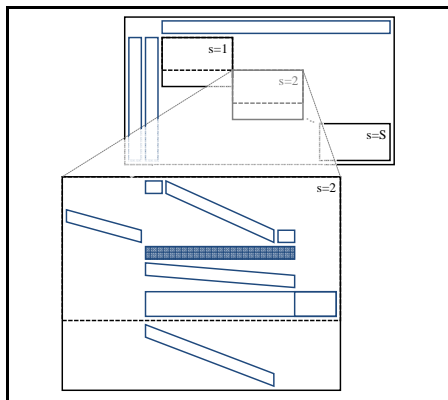
Tab. 32: Modellierung der Verkaufsaktivität – Matrixausschnitt (eigene Darstellung)

Zeile	Einheit	Text	Spalte		LHS	RHS	...	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
			Einheit	Text			Tsd Stk s=5; Verkauf von z=22	Tsd Stk s=5; Verkauf von z=23	Tsd Stk s=5; Zukauf, Weiter- mast	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=0	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=2			
8	€ pro Einheit	Zielfunktion	873.563	max			0,339	0,000	21,283	0,357			5,701	
...							28.421	30.621	-1.144	-168			-307	
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00	<=	0,00						1,00			
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00									
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00									1,00
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00									
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00									
...														
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00	<=	0,00		1,00							
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00			1,00						
163	kg TAN	s=5; Filter- kapazität	71,99	<=	871,63				0,34	0,34			0,65	
164	m ²	s=5; Kapa- zität b=1	42,00	<=	49,48				0,52	0,52			1,21	
...														
167	m ²	s=5; Kapa- zität b=4	84,82	<=	84,82									
168	m ²	s=5; f=1 in b=1	0,00	<=	0,00				0,52	0,52				
169	m ²	s=5; f=2 in b=1	-0,42	<=	0,00									1,21
170	Stk	s=5; Bele- gung b=1	6,00	<=	7,00									
...														
176	Stk	s=5; Bele- gung b=3	2,00	<=	20,00									
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00	<=	0,00				-0,10	-0,10				
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00				-0,79	-0,79				
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00				-0,10	-0,10			-0,10	
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00								-0,79	
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00								-0,10	
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00	<=	0,00									
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00	<=	0,00									
...														
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00	<=	0,00									
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00									
...														

Tab. 33: Modellierung der Filterrestriktion – Matrixausschnitt (eigene Darstellung)

		Spalte		...						
		Einheit	Text	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
				Tsd Stk s=5; Verkauf von z=22	Tsd Stk s=5; Verkauf von z=23	Tsd Stk s=5; Zukauf, Weiter- mast	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=0	...	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=2	...
				0,339	0,000	21,283	0,357	...	5,701	...
Zeile	Einheit	Text	Entscheidungs- variable	LHS	RHS					
8	€ pro Einheit	Zielfunktion		873.563max		28.421	30.621	-1.144	-168	-307
...										
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0		0,00 <=	0,00			1,00		
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1		0,00 <=	0,00					
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2		0,00 <=	0,00					1,00
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3		0,00 <=	0,00					
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4		0,00 <=	0,00					
...										
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22		0,00 <=	0,00	1,00				
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23		0,00 <=	0,00		1,00			
163	kg TAN	s=5; Filter- kapazität		71,99 <=	871,63			0,34	0,34	0,65
164	m ²	s=5; Kapa- zität b=1		42,00 <=	49,48			0,52	0,52	1,21
...										
167	m ²	s=5; Kapa- zität b=4		84,82 <=	84,82					
168	m ²	s=5; f=1 in b=1		0,00 <=	0,00			0,52	0,52	
169	m ²	s=5; f=2 in b=1		-0,42 <=	0,00					1,21
170	Stk	s=5; Bele- gung b=1		6,00 <=	7,00					
...										
176	Stk	s=5; Bele- gung b=3		2,00 <=	20,00					
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0		0,00 <=	0,00			-0,10	-0,10	
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1		0,00 <=	0,00			-0,79	-0,79	
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2		0,00 <=	0,00			-0,10	-0,10	-0,10
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3		0,00 <=	0,00					-0,79
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4		0,00 <=	0,00					-0,10
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5		0,00 <=	0,00					
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6		0,00 <=	0,00					
...										
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22		0,00 <=	0,00					
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23		0,00 <=	0,00					
...										

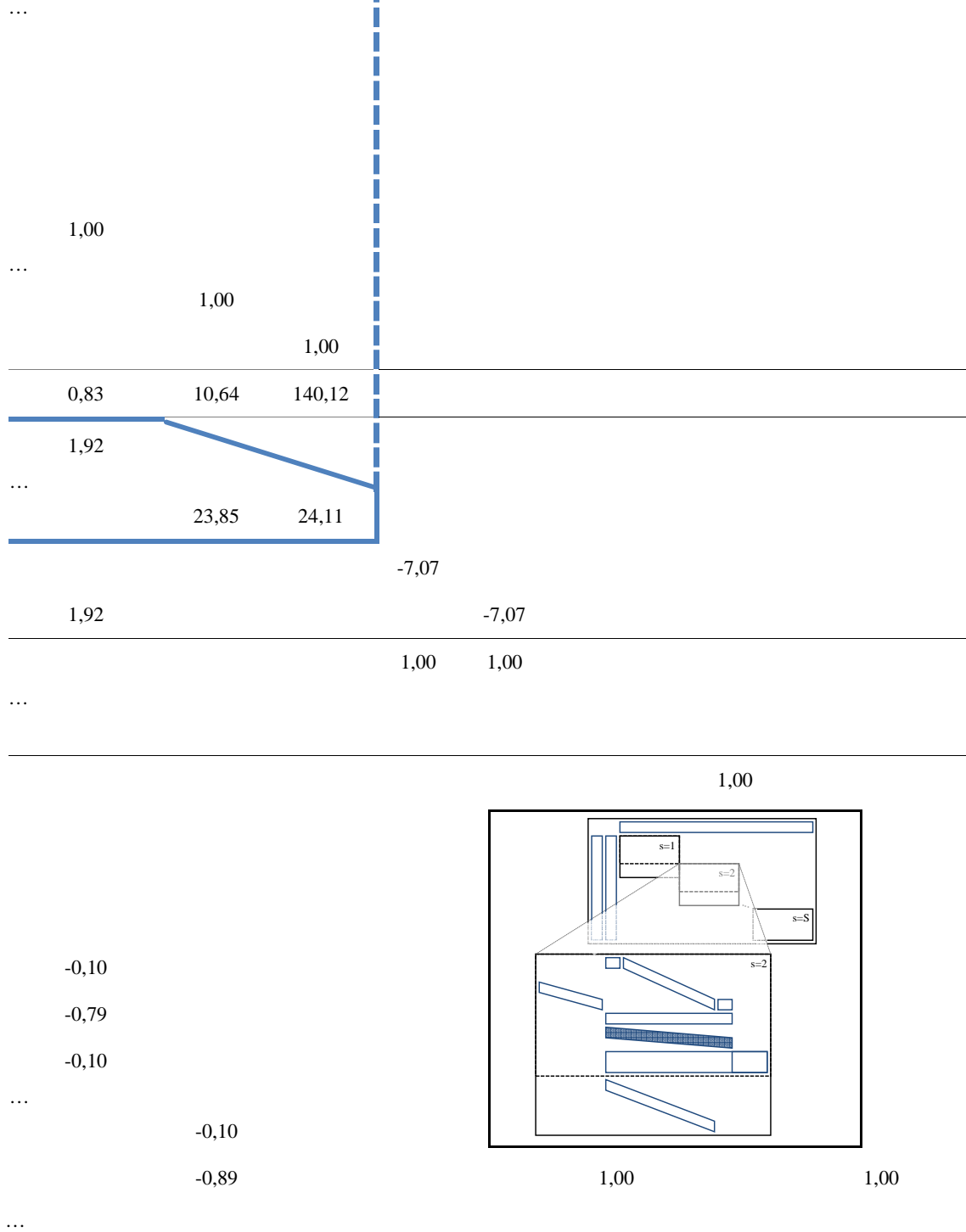
...	HE	...	HW	HX	HY	HZ	...	JC	...	JE	...	KB	...
	Tsd Stk s=5; Weitermast von z=4		Tsd Stk s=5; Weitermast von z=22	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=6	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=1	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=2		Tsd Stk s=6; Verkauf von z=23		Tsd Stk s=6; Weitermast von z=0		Tsd Stk s=6; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=7	
	7,267		0,000	0,000	2	4		0,000		2,164		0,000	
	-453		-1.789	35.007	-24	-24		30.469		-167		34.833	
...													
	1,00												
...			1,00										
				1,00									
	0,83		10,64	140,12									
	1,92												
...			23,85	24,11									
					-7,07								
	1,92									-7,07			
					1,00	1,00							
...													
												1,00	
	-0,10												
	-0,79												
	-0,10												
...													
			-0,10										
			-0,89										
...													
												1,00	1,00



Tab. 34: Modellierung der Beckenrestriktion – Matrixausschnitt (eigene Darstellung)

Zeile	Einheit	Text	Spalte		...	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
			Einheit	Text								
			Entscheidungsvariable									
			LHS	RHS								
8	€ pro Einheit	Zielfunktion	873.563	max		0,339	0,000	21,283	0,357		5,701	
...												
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00	<=	0,00				1,00			
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00							
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00						1,00	
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00							
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00							
...												
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00	<=	0,00	1,00						
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00		1,00					
163	kg TAN	s=5; Filterkapazität	71,99	<=	871,63			0,34	0,34		0,65	
164	m ²	s=5; Kapazität b=1	42,00	<=	49,48			0,52	0,52		1,21	
...												
167	m ²	s=5; Kapazität b=4	84,82	<=	84,82							
168	m ²	s=5; f=1 in b=1	0,00	<=	0,00			0,52	0,52			
169	m ²	s=5; f=2 in b=1	-0,42	<=	0,00						1,21	
170	Stk	s=5; Belegung b=1	6,00	<=	7,00							
...												
176	Stk	s=5; Belegung b=3	2,00	<=	20,00							
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00	<=	0,00			-0,10	-0,10			
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00			-0,79	-0,79			
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00			-0,10	-0,10		-0,10	
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00						-0,79	
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00						-0,10	
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00	<=	0,00							
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00	<=	0,00							
...												
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00	<=	0,00							
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00							
...												

HE	HW	HX	HY	HZ	JC	JE	KB
Tsd Stk s=5; Weitermast von z=4	Tsd Stk s=5; Weitermast von z=22	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=6	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=1	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=2	Tsd Stk s=6; Verkauf von z=23	Tsd Stk s=6; Weitermast von z=0	Tsd Stk s=6; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=7
7,267	0,000	0,000	2	4	0,000	2,164	0,000
-453	-1.789	35.007	-24	-24	30.469	-167	34.833



Tab. 35: Modellierung der Fischkohorten-Becken-Allokation – Matrixausschnitt (eigene

Zeile	Einheit	Text	Spalte		...	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
			Einheit	Text								
			Entscheidungsvariable									
			LHS	RHS								
8	€ pro Einheit	Zielfunktion	873.563	max		0,339	0,000	21,283	0,357		5,701	
...												
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00	<=	0,00				1,00			
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00							
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00						1,00	
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00							
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00							
...												
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00	<=	0,00	1,00						
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00		1,00					
163	kg TAN	s=5; Filterkapazität	71,99	<=	871,63			0,34	0,34		0,65	
164	m ²	s=5; Kapazität b=1	42,00	<=	49,48			0,52	0,52		1,21	
...												
167	m ²	s=5; Kapazität b=4	84,82	<=	84,82							
168	m ²	s=5; f=1 in b=1	0,00	<=	0,00			0,52	0,52			
169	m ²	s=5; f=2 in b=1	-0,42	<=	0,00						1,21	
170	Stk	s=5; Belegung b=1	6,00	<=	7,00							
...												
176	Stk	s=5; Belegung b=3	2,00	<=	20,00							
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00	<=	0,00			-0,10	-0,10			
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00	<=	0,00			-0,79	-0,79			
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00	<=	0,00			-0,10	-0,10		-0,10	
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00	<=	0,00						-0,79	
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00	<=	0,00						-0,10	
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00	<=	0,00							
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00	<=	0,00							
...												
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00	<=	0,00							
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00	<=	0,00							
...												

Darstellung)

...	HE	...	HW	HX	HY	HZ	...	JC	...	JE	...	KB	...
	Tsd Stk s=5; Weitermast von z=4		Tsd Stk s=5; Weitermast von z=22	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=6	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=1	Stk s=5; Belegung von b=1 durch f=2		Tsd Stk s=6; Verkauf von z=23		Tsd Stk s=6; Weitermast von z=0		Tsd Stk s=6; Weiter- mast von z=23, Ver- kauf in s=7	
	7,267		0,000	0,000	2	4		0,000		2,164		0,000	
	-453		-1.789	35.007	-24	-24		30.469		-167		34.833	
...													
	1,00												
...			1,00										
				1,00									
	0,83		10,64	140,12									
	1,92												
...			23,85	24,11									
					-7,07								
	1,92					-7,07							
					1,00	1,00							
...													

Tab. 36: Modellierung der Transfer- bzw. Wachstumsrestriktion – Matrixausschnitt

Zeile	Einheit	Text	Spalte		LHS	RHS	...	GX	GY	GZ	HA	...	HC	...
			Einheit	Text			Tsd Stk s=5; Verkauf von z=22	Tsd Stk s=5; Verkauf von z=23	Tsd Stk s=5; Zukauf, Weiter- mast	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=0	Tsd Stk s=5; Weiter- mast von z=2			
8	€ pro Einheit	Zielfunktion	873.563max				0,339	0,000	21,283	0,357	5,701			
...														
139	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=0	0,00 <=	0,00							1,00			
140	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=1	0,00 <=	0,00										
141	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=2	0,00 <=	0,00									1,00	
142	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=3	0,00 <=	0,00										
143	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=4	0,00 <=	0,00										
...														
161	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=22	0,00 <=	0,00			1,00							
162	Tsd Stk	s=5; Transfer von z=23	0,00 <=	0,00				1,00						
163	kg TAN	s=5; Filter- kapazität	71,99 <=	871,63					0,34	0,34	0,65			
164	m ²	s=5; Kapa- zität b=1	42,00 <=	49,48					0,52	0,52	1,21			
...														
167	m ²	s=5; Kapa- zität b=4	84,82 <=	84,82										
168	m ²	s=5; f=1 in b=1	0,00 <=	0,00					0,52	0,52				
169	m ²	s=5; f=2 in b=1	-0,42 <=	0,00									1,21	
170	Stk	s=5; Bele- gung b=1	6,00 <=	7,00										
...														
176	Stk	s=5; Bele- gung b=3	2,00 <=	20,00										
177	Tsd Stk	s=6; Transfer z=0	0,00 <=	0,00					-0,10	-0,10				
178	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=1	0,00 <=	0,00					-0,79	-0,79				
179	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=2	0,00 <=	0,00					-0,10	-0,10	-0,10			
180	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=3	0,00 <=	0,00									-0,79	
181	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=4	0,00 <=	0,00										-0,10
182	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=5	0,00 <=	0,00										
183	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=6	0,00 <=	0,00										
...														
199	Tsd Stk	s=6; Transfer z=22	0,00 <=	0,00										
200	Tsd Stk	s=6; Transfer von z=23	0,00 <=	0,00										
...														

Anhang D: Zusätzliche Ergebnisse

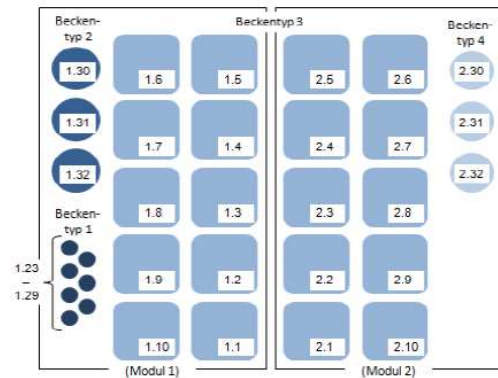
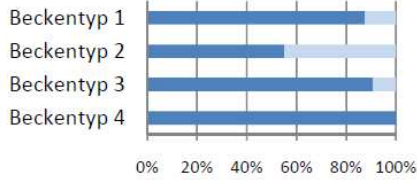
Zeile					
1	Microsoft Excel 12.0 Answer Report				
2	Worksheet: [LP Selektion SelekAkt.xlsx]Matrix				
3	Report Created: 11.12.2008 15:40:05				
4	Result: Solver found an integer solution within tolerance. All constraints are satisfied.				
5	Engine: Standard LP/Quadratic				
6	Solution Time: 03 Minutes, 25 Seconds				
7	Iterations: 0				
8	Subproblems: 8095				
9	Incumbent Solutions: 3				
...					
12	Objective Cell (Max)				
			Original	Final	
13	Cell	Name	Value	Value	
14	\$E\$8	Zielfunktionswerte	0	873562,5533	
...					
17	Decision Variable Cells				
			Original	Final	
18	Cell	Name	Value	Value	
...					
210	\$GQ\$5	s=5; Verkauf von z=15	0	0	
...					
219	\$GZ\$5	s=5; Zukauf, Weitermast	0	21	
220	\$HA\$5	s=5; Weitermast von z=0	0	0	
...					
242	\$HW\$5	s=5; Weitermast von z=22	0	0	
243	\$HX\$5	s=5; Weitermast von z=23, Verkauf in s=6	0	0	
244	\$HY\$5	s=5; Belegung von b=1 durch f=1	0	2	
245	\$HZ\$5	s=5; Belegung von b=1 durch f=2	0	4	
...					
266	\$IU\$5	s=6; Verkauf von z=15	0	0	
...					
2602	\$CUQ\$5	s=47; Belegung von b=3 durch f=8	0	0	
...					
2606	Cell	Name	Cell Value	Formula	Status Slack
...					
2611	\$E\$12:\$E\$1772<=\$G\$12:\$G\$1772				
...					
2739	\$E\$139	s=5; Transfer von z=0	0	\$E\$139<=\$G\$139	Binding 0
...					
2762	\$E\$162	s=5; Transfer von z=23	0	\$E\$162<=\$G\$162	Binding 0
2763	\$E\$163	s=5; Filterkapazität	72	\$E\$163<=\$G\$163	Not Binding 799,63438
2764	\$E\$164	s=5; Kapazität von b=1	42	\$E\$164<=\$G\$164	Not Binding 7,4767706
...					
2767	\$E\$167	s=5; FKapazität von b=4	85	\$E\$167<=\$G\$167	Binding 0
2768	\$E\$168	s=5; Bedarf von f=1 an b=1	0	\$E\$168<=\$G\$168	Binding 0
2769	\$E\$169	s=5; Bedarf von f=2 an b=1	0	\$E\$169<=\$G\$169	Not Binding 0,4166863
2770	\$E\$170	s=5; Belegung von b=1	6	\$E\$170<=\$G\$170	Not Binding 1
...					
2776	\$E\$176	s=5; Belegung von b=3	2	\$E\$176<=\$G\$176	Not Binding 18
2777	\$E\$177	s=6; Transfer von z=0	0	\$E\$177<=\$G\$177	Binding 0
...					
4372	\$E\$1772	s=47; Belegung von b=3 LHS	7	\$E\$1772<=\$G\$1772	Not Binding 13

Abb. 47: Rohergebnisse in Form des Standard-Antwortberichts – exemplarischer Ausschnitt (eigene Darstellung)

Managementempfehlungen - Februar 20XX

Betrieb: NN
Betriebsnummer: XY-12345

Auslastung:



Becken	Anfangsbesatz ¹		Neubesatz	Abfischen ²	Selektion	Verluste	Umsetzen								
	Anzahl	Ø-Gewicht (g)					Anzahl	nach Becken							
1.23	1.189	6	6.187		11	74	1.619	je 648	1.25-1.29						
1.24	1.189	6													
1.25	4.772	29	6.187		11	48	1.160	je 2.900	1.30-1.31						
1.26	4.772	29													
1.27	4.772	29													
1.28	4.772	29													
1.29	4.772	29													
1.30	11.363	74	6.187		32	114	3.265	je 3.265	1.1-1.2						
1.31	11.363	74													
1.32															
1.1	9.405	159	6.187		38	94	3.756	je 2.504	1.3-1.5						
1.2	9.405	159													
1.3	4.905	294													
1.4	4.905	294													
1.5	4.905	294	6.187		23	49	2.397	je 2.397	1.6-1.8						
1.6	3.792	550													
1.7	3.792	550													
1.8	3.792	550	6.187		38	94	1.965	je 1.179	1.9-2.3						
1.9	2.676	973													
1.10	2.676	973	6.187		27	1.412	je 1.009	1.009	2.4-2.10						
2.1	2.676	973													
2.2	2.676	973													
2.3	2.676	973													
2.4	2.357	1.473								419		24	502	je 1.170	2.30-2.32
2.5	2.357	1.473													
2.6	2.357	1.473													
2.7	2.357	1.473													
2.8	2.357	1.473													
2.9	2.357	1.473													
2.10	2.357	1.473													
2.30	1.170	1.827	6.187		12										
2.31	1.170														
2.32	1.170														

¹ Fische, die in diesem Monat verkauft werden, sind im Vormonat abgefischt worden und befinden sich in Hälterungsbecken

² Abgefischte Tiere werden in Hälterungsbecken gesetzt und im Folgemonat verkauft

Optimierungsergebnisse auf Basis folgender Annahmen: Stufe $s=0$ repräsentiere den Monat Januar, dargestellt $s=25$ (Februar), Wachstumsverteilung A, Selektionsszenario 1, Schlachtpreisszenario 0

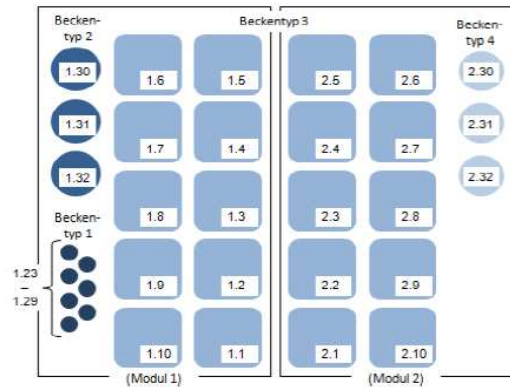
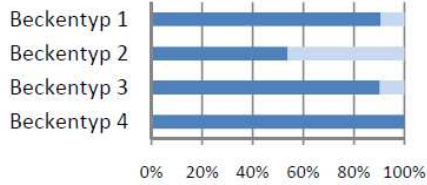
Abb. 48: Exemplarische monatliche Managementempfehlung für „Februar“ (eigene Darstellung)

Managementempfehlungen - März 20XX

Betrieb: NN

Betriebsnummer: XY-12345

Auslastung:



Becken	Anfangsbesatz ¹		Neubesatz	Abfischen ²	Selektion	Verluste	Umsetzen							
	Anzahl	Ø-Gewicht (g)					Anzahl	nach Becken						
1.23	5.671	10	2.263		50	79	4.779	je 1.912	1.25-1.29					
1.24	5.671	10												
1.25	4.201	34	2.263		16	42	1.588	je 3.970	1.30-1.31					
1.26	4.201	34												
1.27	4.201	34												
1.28	4.201	34												
1.29	4.201	34												
1.30	10.852	77								38	109	3.829	je 3.829	1.1-1.2
1.31	10.852	77												
1.32														
1.1	8.783	154			30	88	3.000	je 3.000	1.3-1.4					
1.2	8.783	154												
1.3	4.940	298												
1.4	4.940	298												
1.5	4.940	298												
1.6	4.186	543			25	49	3.928	je 1.964	1.5-1.8					
1.7	4.186	543												
1.8	4.186	543												
1.9	4.186	543												
1.10	2.417	980			24	1.336	je 954	2.4-2.10						
2.1	2.417	980												
2.2	2.417	980												
2.3	2.417	980												
2.4	2.421	1.468							416		24	512	je 1.194	2.30-2.32
2.5	2.421	1.468												
2.6	2.421	1.468												
2.7	2.421	1.468												
2.8	2.421	1.468												
2.9	2.421	1.468												
2.10	2.421	1.468												
2.30	1.163	1.805			12									
2.31	1.163	1.805			12									
2.32	1.163	1.805			12									

¹ Fische, die in diesem Monat verkauft werden, sind im Vormonat abgefischt worden und befinden sich in Hälterungsbecken

² Abgefischte Tiere werden in Hälterungsbecken gesetzt und im Folgemonat verkauft

Optimierungsergebnisse auf Basis folgender Annahmen: Stufe $s=0$ repräsentiere den Monat Januar, dargestellt $s=26$ (März), Wachstumsverteilung A, Selektionsszenario 1, Schlachtpreisszenario 0

Abb. 49: Exemplarische monatliche Managementempfehlung für „März“ (eigene Darstellung)

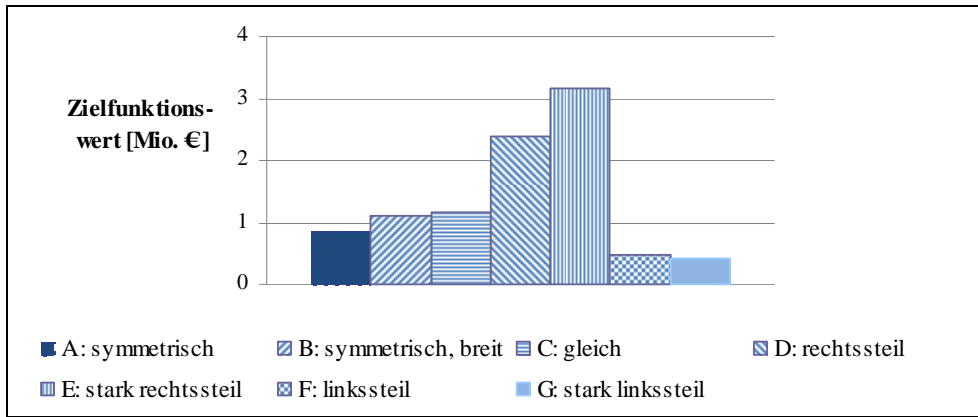


Abb. 50: Zielfunktionswert – Selektionsanteil 0 % (eigene Darstellung)

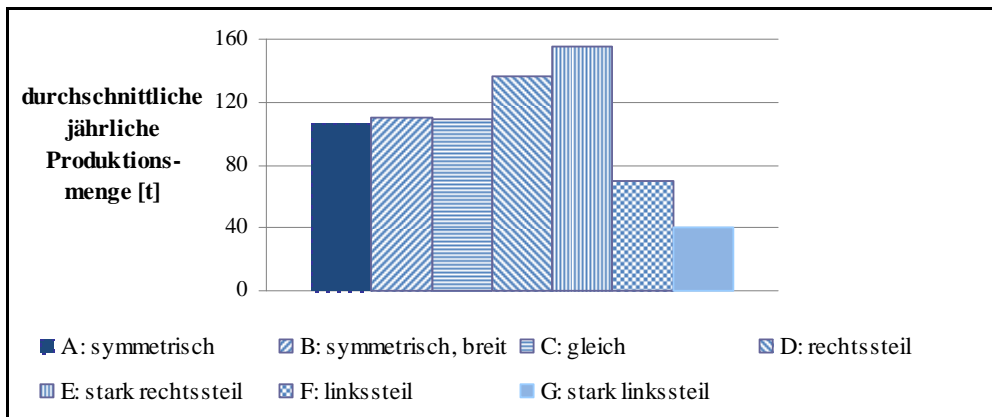


Abb. 51: Durchschnittliche jährliche Produktionsmenge – Schlachtpreisszenario 0 (eigene Darstellung)

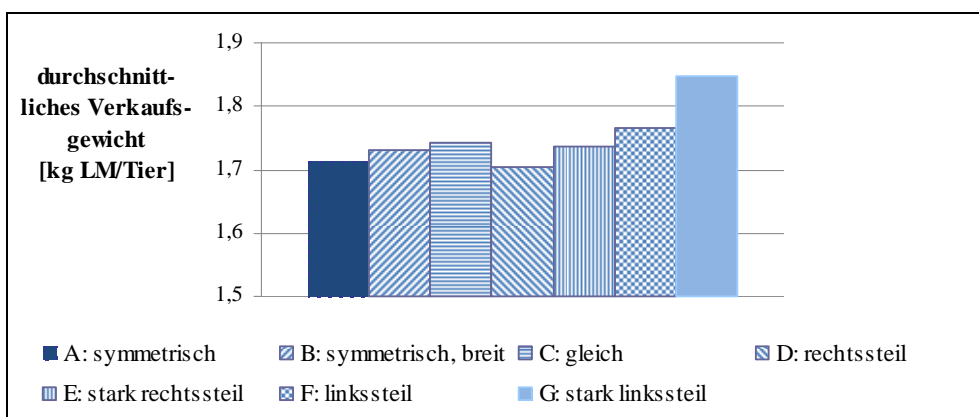


Abb. 52: Durchschnittliches Verkaufsgewicht – Schlachtpreisszenario 0 (eigene Darstellung)

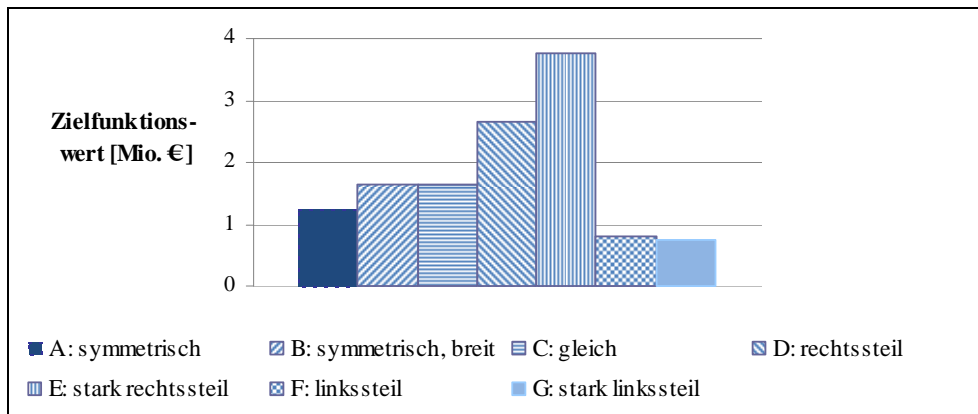


Abb. 53: Zielfunktionswert – Schlachtpreisszenario 0 (eigene Darstellung)

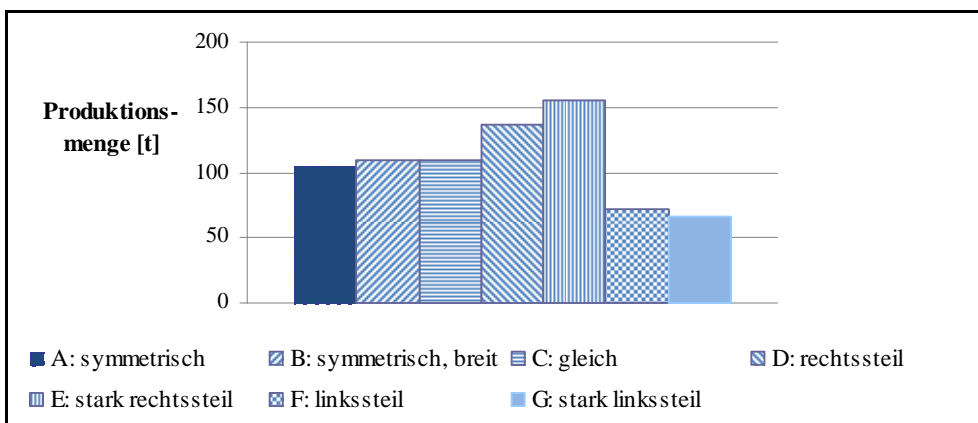


Abb. 54: Durchschnittliche jährliche Produktionsmenge – Futterpreis-, Setzlingspreis- und Kontraktsszenario 0 (eigene Darstellung)

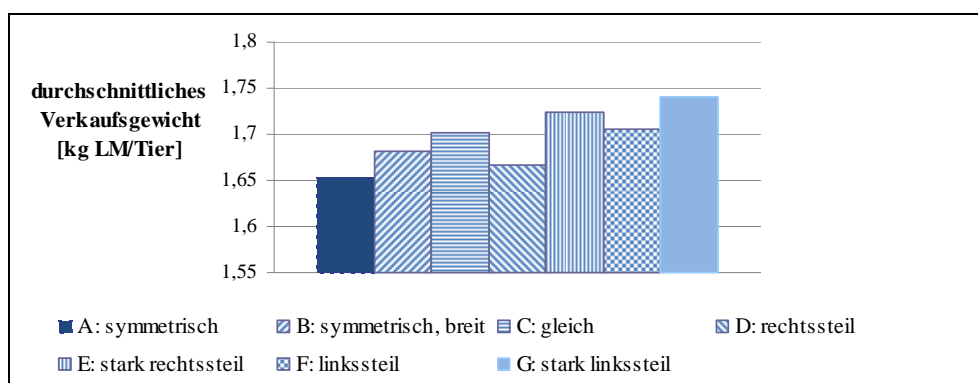


Abb. 55: Durchschnittliches Verkaufsgewicht – Futterpreis-, Setzlingspreis- und Kontraktsszenario 0 (eigene Darstellung)

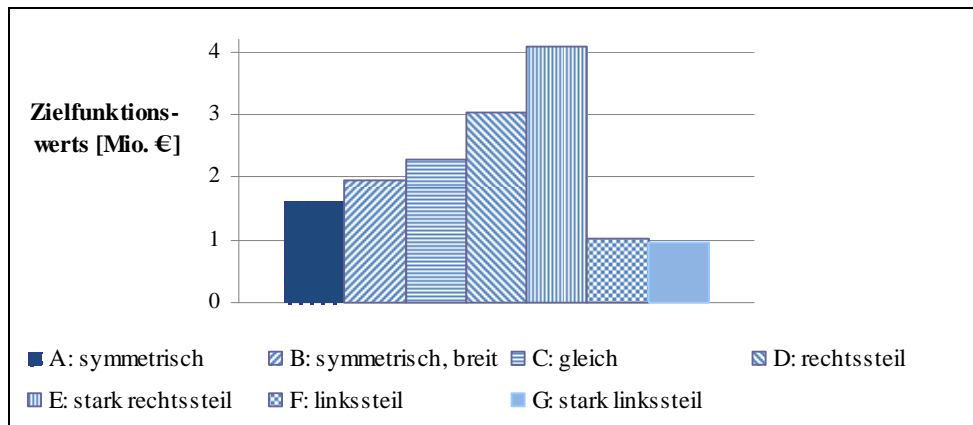


Abb. 56: Zielfunktionswert – Futterpreis-, Setzlingspreis- und Kontraktsszenario 0 (eigene Darstellung)