

Achim Tillessen
Institut für Siedlungs- und Wohnungswesen
an der Westf. Wilhelms-Universität Münster
Am Stadtgraben 9

EIN MODELL ZUR REGIONALEN DIFFERENZIERUNG
DER ABWASSERABGABE

	<u>Seite</u>
1. Einleitung	164
2. Zum Untersuchungsgebiet	165
3. Modellstruktur	167
3.1 Vorbemerkungen	
3.2 Modellbestandteile	
3.3 Zur Ermittlung der regionalen Abgabe	
4. Ergebnisse	179
4.1 Abgabe bei einheitlichem Gewässerziel	
4.2 Abgabe bei differenzierten Gewässerzielen	
5. Schlußbemerkungen	182
Literaturverzeichnis	184
Anhang	185

Der Beitrag ist Teil der vom Umweltbundesamt aus Mitteln des Umweltforschungsplans des Bundesministers des Innern geförderten Untersuchung 'Anwendungsmöglichkeiten, Vorzüge und Probleme bei der regionalen Differenzierung von umweltpolitischen Instrumenten. Differenzierung im Abwassersektor am Beispiel des Abwasserabgabengesetzes und des § 7a Wasserhaushaltsgesetz (WHG)'.

1. Einleitung

Mit Einführung des Abwasserabgabengesetzes 1976 wurde für den Gewässerschutz erstmals ein anreizorientiertes Instrument geschaffen¹.

Im allgemeinen werden einer Abgabe die folgenden Vorteile zugeschrieben²:

- Erstens geht von ihr eine Anreizfunktion aus, d.h. die Abgabe soll einen finanziellen Anreiz zu Vermeidungsmaßnahmen bieten.
Bei entsprechender Gestaltung der Abgabe (Höhe) wird ein Eigeninteresse an Reinigungsmaßnahmen geschaffen.
- Zweitens führt die Abgabe zur Vorteilsabschöpfung. Die Einleiter, die durch unterlassene bzw. verzögerte Vermeidungsmaßnahmen einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber denjenigen haben, denen durch Abwasserreinigung Kosten entstehen, werden durch die Abgabe zur Zahlung herangezogen.
- Drittens führt die Abgabe zu volkswirtschaftlich effizienteren Lösungen als Auflagen nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG). Während das WHG jedem Unternehmen, unabhängig von dessen Größe und Leistungsfähigkeit, dieselben Auflagen macht, ist es bei der Abwasserabgabe dem einzelnen Unternehmen freigestellt, Reinigungsmaßnahmen zu ergreifen oder aber eine Abgabe zu entrichten. Unternehmen, für die die Reinigung sehr kostenintensiv ist, werden eher weniger reinigen und stattdessen eine Abgabe bezahlen; für Unternehmen, die - durch große Abwassermengen bedingt - niedrige spezifische Reinigungskosten erzielen können, wird es lohnenswerter sein, mehr zu reinigen³.
- Viertens soll das Aufkommen der Abgabe zweckgebunden eingesetzt werden. Diejenigen Einleiter, die wegen zu hoher Reinigungskosten die Abgabe entrichten, tragen damit zur Finanzierung von Anlagen bei, die an Schwerpunkorten errichtet werden sollen.

¹ Bisher dominierte in diesem wie auch in anderen Umweltbereichen der Einsatz imperativer Instrumente (z.B. Wasserhaushaltsgesetz).

² Vgl. dazu G. Rincke, Untersuchung über wirtschaftliche Auswirkungen der vorgesehenen Abwasserabgabe auf abwasserintensive Produktionszweige, Gutachten i.A. des Bundesministers des Innern, Darmstadt 1976.

³ Vgl. Die Abwasserabgabe, 2. Sondergutachten, Stuttgart und Mainz 1974, S. 12 ff. Es wird hier ein Vergleich einer uniformen Abgabe mit uniformen Standards durchgeführt.

Diese Vorteile können allerdings nur bei entsprechender Ausgestaltung der Abgabe (Höhe) in die Realität umgesetzt werden. Wie noch zu zeigen sein wird, kann der augenblickliche Abgabesatz, der als politischer Kompromiß zustandegekommen ist, für die Einleiter kaum einen Anreiz bieten, Reinigungsmaßnahmen zu ergreifen. Ursprünglich war ein Abgabesatz von 40 DM pro Schadeinheit (SE) vorgesehen, jedoch wurde er letztendlich auf 12 DM/SE festgesetzt (für 1981). Dieser soll jährlich um 6 DM/SE ansteigen, bis 1986 die Höhe von 40 DM/SE erreicht ist.

Weiterhin wurde im Abwasserabgabengesetz auf jegliche regionale Differenzierung verzichtet. Eine solche regionale Differenzierung aber erscheint dringend erforderlich, weil die Gewässer der Bundesrepublik Deutschland sehr unterschiedlich verschmutzt sind. Ursachen dafür sind

- regional verschiedene Industriemassierungen, Siedlungsdichten,
- regional ungleichmäßige Assimilationskapazitäten d.h. unterschiedlich ausgeprägte Fähigkeiten der Gewässer, Verunreinigungen innerhalb einer bestimmten Strecke wieder abzubauen. Diese Fähigkeit hängt von Fließwassermenge, Fließgeschwindigkeit, Temperatur usw. ab.

Mit Hilfe eines regional differenzierten Instrumenteneinsatzes könnte einerseits die Gewässergüte gerade an Brennpunkten verbessert werden, andererseits eine unter Beachtung einer anzustrebenden Gewässergüte sinnvolle Ansiedlung oder Verlagerung von Industrien sowie der Wohnbevölkerung erreicht werden. Im folgenden soll anhand eines ausgewählten Untersuchungsgebietes gezeigt werden, wie die Abwasserabgabe regional differenziert werden und welche Höhe sie haben müßte, um einen Anreiz zu Reinigungsmaßnahmen zu bieten.

2. Zum Untersuchungsgebiet

Die Untersuchung bezieht sich auf das Gebiet der Planungsregion Untermain (s. Abbildung 1). Diese wirtschaftlich und bevölkerungsmäßig bedeutendste der fünf hessischen Planungsregionen umfaßt eine Fläche von 4 107 km², hat über 2 Mio. Einwohner und ist gekennzeichnet durch eine sehr starke bauliche Verdichtung sowie Konzentration von Industrieaktivitäten im Ballungsraum Frankfurt-Offenbach-Hanau. Nordöstlich dieses Agglomerationszentrums

Abb. 1: Ausgewählte Untersuchungsräume



befinden sich nur wenige Industrie- und Gewerbegebiete. Dieses Gebiet soll als Freizeit- und Erholungsraum für die am Main ansässige Bevölkerung dienen sowie ökologische Ausgleichsfunktionen erfüllen.

Aus diesem Untersuchungsraum sollen ein stark sowie ein schwach belastetes Gebiet herausgegriffen werden, um so die Unterschiede hinsichtlich der zu erbringenden Reinigungsleistungen und hinsichtlich der zu zahlenden Abgabe deutlicher herausstellen zu können. Dabei kristallisierte sich der Großraum Frankfurt-Offenbach-Hanau entsprechend seiner Funktion als Produktions- und Dienstleistungszentrum als stark belastetes Gebiet sowie der Kinzig-Raum als schwach belastetes Gebiet heraus. Es zeigt sich, daß mit Ausnahme einiger Regionen des Main-Gebietes (z.B. Frankfurt) die Reinigung der Abwässer überwiegend in öffentlicher Regie erfolgt (vgl. Tab. 1).

3. Modellstruktur
 3.1 Vorbemerkungen

Mit Hilfe eines linearen Optimierungsmodells sollen am Beispiel der in Punkt 2 vorgestellten Untersuchungsregion regionsspezifische Abwasserabgaben ermittelt werden.

Da die Abgabe ein anreizorientiertes Instrument ist, ist die Wahl eines geeigneten Kriteriums zur Bestimmung der Höhe der Abgabe von wesentlicher Bedeutung. Einen anerkannten Maßstab bilden die Grenzkosten der Abwasserreinigung. Wird die Abgabe pro Schadeinheit in der Höhe der Grenzkosten pro zu reinigender Einheit festgelegt oder liegt sie etwas darüber, dann müßten die Einleiter unter der Annahme rationalen Verhaltens (d.h. in diesem Fall: kostenminimierenden Verhaltens) Reinigungsmaßnahmen ergreifen.

Da die Reinigung überwiegend in öffentlicher Regie betrieben wird, werden hier die Grenzkosten öffentlicher Kläranlagen zugrundegelegt. Damit wird den Großeinleitern mit privaten Reinigungsanlagen zwar nicht ganz Rechnung getragen. Bekannt ist aber, daß mit zunehmender Anlagengröße eine Annäherung der Grenzkosten der privaten an die öffentlichen Kläranlagen erfolgt.

Tabelle 1: Anteil der direkt eingeleiteten Schadstoffmenge der Industriesektoren an der insgesamt anfallenden regionalen Schadstoffmenge (1973)

Region	Fluß	Direkteinleitung der Industrie (1)	Schadstoffmenge insgesamt (2)	Anteil (1)/(2)
		EGW/Tag	E+EGW/Tag	%
340	Kinzig	3211	42713	7,5
334	Kinzig	1777	34105	5,2
333	Kinzig	1653	78498	2,1
351	Kinzig	294	55630	0,5
503	Main	855	121035	0,7
502 ¹	Main	10339	153048	6,8
403	Main	4397	234040	1,9
402 ²	Main	194441	600365	32,4
401	Main	1460843	2917157	50,1
201	Main	59727	237564	25,1

1 Das Abwasser aus Region 502 fließt z.T. direkt, überwiegend jedoch indirekt über den kleinen Vorfluter Rodau in den Main in Region 402.
 2 Das in die öffentliche Kanalisation eingeleitete Abwasser wird größtenteils nach Frankfurt a.M. (401) "exportiert".

Neben der Sicherstellung der Anreizwirkung der Abgabe durch das Kriterium Grenzkosten müssen die Gewässerziele beachtet werden. Selbst wenn alle Einleiter Reinigungsmaßnahmen ergreifen, ist damit noch nicht sichergestellt, daß die gewünschte Gewässergüte auch erreicht wird.

Mit der Aufstellung unseres linearen Optimierungsmodells tragen wir diesem Sachverhalt Rechnung. Ziel soll es nämlich sein, die Grenzkosten der Abwasserreinigung zu minimieren unter der Berücksichtigung von bestimmten Gewässerzielen. Ziel für die Gewässergüte ist die Einhaltung der Gewässergütekategorie II (nach der Forderung des Umweltprogramms der Bundesregierung von 1971). Diese Gewässergütekategorie wird im Modell durch Indikatoren (erlaubter Sauerstoffmindestgehalt, biochemischer Sauerstoffbedarf) präzisiert.

3.2 Modellbestandteile

Das Modell besteht aus

1. Zielfunktion
2. Bilanzen, die die regionalen Schadstoffeinleitungen unter Berücksichtigung von Schadstoffex- und -importen beschreiben
3. Bilanzen, die den Einfluß von Schadstoffemissionen auf die Fließwasserqualität beschreiben sowie Restriktionen, die eine nutzungsbedingte Gewässergüte (Immissionsnormen) verlangen.

zu 1. Zielfunktion

In der Zielfunktion 'Minimierung der Abwasserreinigungskosten' werden folgende Typen neu zu bauender öffentlicher Kläranlagen unterstellt

- teilbiologische Reinigung - Reinigungsleistung 85 vH
- vollbiologische Reinigung - Reinigungsleistung 90 vH
- weitergehende Reinigung - Reinigungsleistung 95 vH

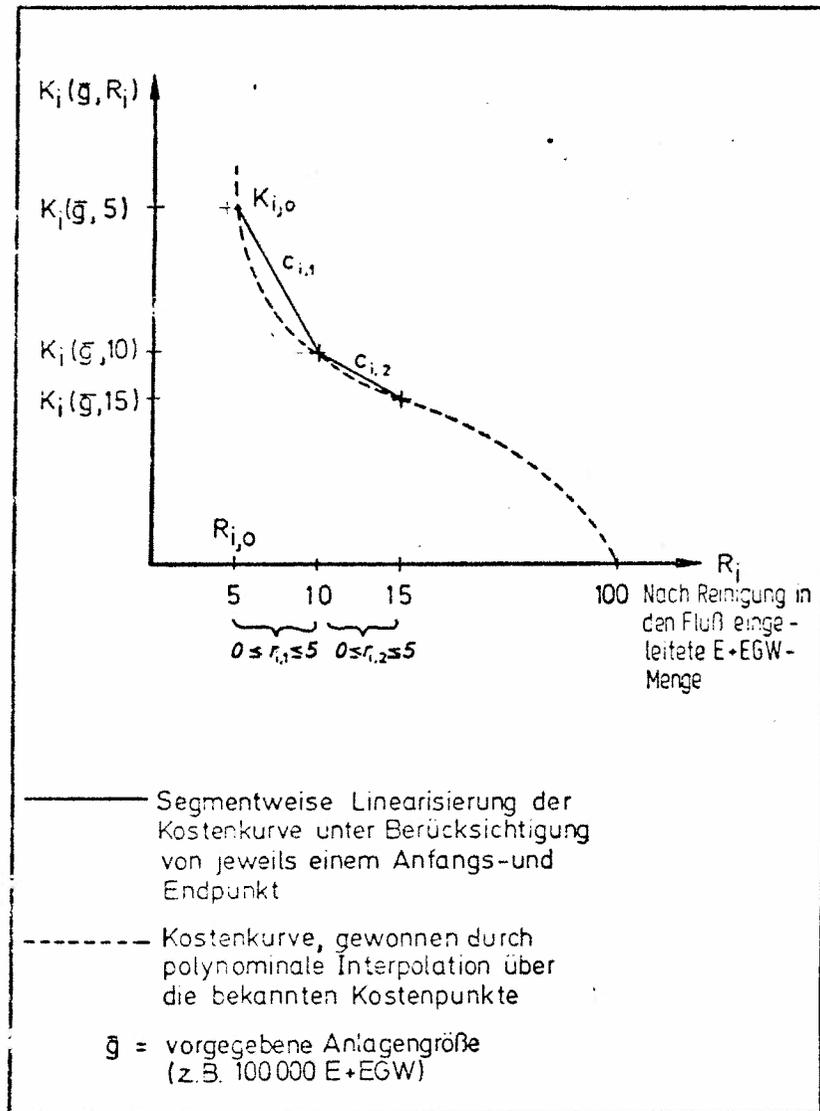
Die Kosten der Kläranlagen hängen von Kapazität g und Reinigungseffizienz e_i ab.

$$K_i = f(g, e_i)$$

Ist die Kapazität vorgegeben, hängen die Kosten nur noch vom Reinigungsgrad ab. Diese Kosten kann man auch als Funktion der nach Reinigung anfallenden Schadstoffmengen R_i ausdrücken (vgl. Abb. 2).

$$K_i = f(\bar{g}, R_i)$$

Abb. 2: Reinigungskosten in Abhängigkeit vom Reinigungsgrad



Quelle: H.W. Herzog jr., The Economics of Regional Water Quality Management, Diss., University of Maryland 1974, S. 134 (abgeändert).

Zu den Einwänden¹ gegenüber einem kontinuierlichen Verlauf der Kostenfunktion ist folgendes anzumerken:

Aus der Sicht eines Einleiters ist es sicherlich berechtigt zu sagen, daß "Sprünge" in der Kostenfunktion beim Übergang von einer Reinigungstechnologie auf die nächsthöhere auftreten, mithin also ein "treppenförmiger" Verlauf der Funktion vorliegen müßte. Betrachten wir allerdings eine Flußbehörde oder einen Wasserwirtschaftsverband, der mehrere Anlagen mit unterschiedlichen Kostenfunktionen plant und diesen Anlagen verschiedene Schadstoffmengen zuweisen kann, dann ist die Annahme eines kontinuierlichen Kostenverlaufs sicher nicht unberechtigt.

Die in Abb. 2 dargestellte Kostenfunktion ist nicht - linear. Um sie für die lineare Programmierung anwendbar zu machen, werden die in der Zeichnung vorhandenen 3 Kostenpunkte durch lineare Segmente miteinander verbunden, d.h. zwischen jeweils 2 Punkten ist die Steigung $c_{i,n}$ der Kostenkurve konstant ($c_{i,n} < 0$). Wir beschränken uns in der Analyse auf 2 Segmente. $c_{i,n}$ gibt die Grenzkosten der Abwasserbehandlung der i-ten Anlage im n-ten Segment in Abhängigkeit von der eingeleiteten Schadstoffmenge an. Kostendaten für bestimmte Kläranlagengrößen lagen aus früheren Untersuchungen von Wiik vor². Für diejenigen Kläranlagengrößen, für die Informationen über Kosten nicht vorhanden waren, wurde näherungsweise eine Funktion von Graves u.a. angewendet³. Mit Hilfe dieser Kostendaten konnten dann die Steigungen der linearen Teilstücke ermittelt werden. Wird die zu behandelnde Schadstoffmenge \bar{g} mit dem effizientesten und kostspieligsten Verfahren (Reinigungsleistung $e = 95$ vH) gereinigt, dann verbleibt eine Restbelastung $R_{i,0}$ von 5 vH. Diese wird in das Gewässer eingeleitet. Die dieser Menge entsprechenden Kosten betragen

$$K_{i,0}(\bar{g}, R_{i,0}).$$

Wird statt der weitergehenden Reinigung die vollbiologische Reinigung mit ihrer höchsten Reinigungsleistung von 90 vH benutzt, so wird die Restbelastung $R_{i,0}$ zuzüglich der Menge $\bar{r}_{i,1}$ eingeleitet.

Allgemein wird mit $r_{i,n}$ die aus der i-ten Kläranlage aus dem n-ten Segment in den Fluß eingeleitete Schadstoffmenge bezeichnet.

- 1 Vgl. D. Ewringmann u.a., Auswirkungen des Abwasserabgabengesetzes auf industrielle Indirekteinleiter, Gutachten für Bundesministerium des Innern, Köln 1978.
- 2 Vgl. K. Wiik, Raumordnung und Gewässerschutz im Großraum Frankfurt/M. Veröffentlichung in Vorbereitung.
- 3 Vgl. W. Graves, G. Hatfield, A. Whinston, Mathematical Programming for Regional Water Quality Management, in: Water Resources Research, Vol 8, No 2 (1972), S. 279.

Aufgrund der stückweisen Konvexität der Kostenfunktion kann die durch die Segmente $c_{i,n}$ linearisierte Funktion als Zielfunktion in einem linearen Programmierungsmodell benutzt werden. Bedingung dabei ist, daß die zu den Komponenten $c_{i,n}$, die als Koeffizienten der Zielfunktion in das Modell eingehen, gehörigen Variablen $r_{i,n}$ segmentweise beschränkt werden¹.

Die Kostenkomponente $K_{i,0}$ ist eine bekannte und konstante Größe. Sie bleibt bei der Optimierung unberücksichtigt.

Die Zielfunktion des Modells lautet folgendermaßen

$$(1) \quad \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^2 c_{i,n} r_{i,n} \rightarrow \text{Min !}$$

Die einschränkenden Bedingungen lauten (Bedingung der segmentweisen Beschränkung)

$$(2) \quad r_{i,n} \leq \bar{r}_{i,n} \quad \forall i,n$$

Dadurch werden die oberen Grenzen der Schadstoffeinleitung aus dem n-ten Segment festgelegt.

zu 2. Bilanzen, die die regionalen Schadstoffeinleitungen unter Berücksichtigung von Schadstoffex- und -importen beschreiben

Die insgesamt anfallenden Schadstoffmengen aus Produktion und Bevölkerung sind mit Hilfe einer anderen Untersuchung ermittelt worden² und gehen als exogene Größe in das Kostenminimierungsmodell ein.

¹ Eine gute Beschreibung der Methode der stückweisen (separablen) konvexen Programmierung wird z.B. von F.S. Hillier, G.J. Lieberman, Introduction to Operations Research, San Francisco 1968, S. 581-586, gegeben. Für jede durch v Segmente linearisierte konvexe Funktion garantiert die konvexe Eigenschaft der Funktion, daß

$$\bar{r}_{i,j} = 0 \text{ für } \bar{r}_{i,n} \leq \bar{r}_{i,n} \quad \begin{cases} n=1,2,\dots,v-1 \\ j=n+1, n+2,\dots,v, \end{cases}$$

wobei mit $\bar{r}_{i,n}$ die Werte der Variablen $r_{i,n}$ in der optimalen Lösung definiert sind. Die äquivalente Aussage kann selbstverständlich in analoger Form für den Fall formuliert werden, daß die linearisierte Funktion konkav ist.

² Vgl. K. Wiik, Ein Entscheidungsmodell zur Analyse und Koordinierung von Umwelt- und Räumplanung, Vortrag am 30.9.1977, Deutsche Gesellschaft für Operations Research e.V. (DGOR).

Diese Mengen werden in den bestehenden Anlagen sowie den neu zu errichtenden Kapazitäten gereinigt. Die Altanlagen müssen in ihrem technischen Standard derart erneuert werden, daß durchschnittliche Reinigungsleistungen von 90 vH erzielt werden. Einige der weniger effizienten Anlagen wurden dennoch berücksichtigt, da in manchen Regionen aufgrund des dort geringeren Schadstoffanfalls diese Reinigungsleistungen ausreichen. Die verbleibende Restverschmutzung dieser Anlagen (R_A) geht in die Bilanz der regionalen Schadstoffeinleitungen mit ein.

Die Kapazitäten der neuen Kläranlagen bestimmen sich wie folgt: Von der insgesamt in der Region anfallenden Schadstoffmenge werden zunächst die unge-reinigten Exporte subtrahiert bzw. die Importe werden hinzuaddiert. Danach werden die Kapazitäten der Altanlagen subtrahiert. Die Differenz ergibt den Kapazitätsneubedarf, der auf verschiedene Kläranlagengrößen verteilt wird. Dabei ist den Erfordernissen der Planungsregion Untermain Rechnung getragen worden. Die in der Region geplanten Anlagen wurden mitberücksichtigt. Die Einleitungen aus den neuen Anlagen werden durch die Restverschmutzung bei 95 %iger Reinigung sowie durch die schon aus der Zielfunktion bekannten Variablen $r_{i,n}$ bestimmt. Das Modell weist den Variablen $r_{i,n}$ Werte zu, die die Auslastung der Kläranlagen angeben. Die insgesamt aus einer Kläranlage i in ein Gewässer eingeleitete Schadstoffmenge $R_{i,*}$ beträgt

$$(3) \quad R_{i,*} = R_{i,0} + \sum_{n=1}^2 r_{i,n}$$

Zusätzlich zu den Restmengen aus Altanlagen sowie Einleitungen aus neu zu bauenden Kläranlagen sind nun noch die in anderen Regionen behandelten Abwässer, die in die betrachtete Region importiert werden (W^{Sr}) sowie die in der betrachteten Region behandelten Mengen, die exportiert werden (W^{rs}), zu berücksichtigen.

Als insgesamt in die Gewässer eingeleitete Schadstoffmenge ergibt sich:

$$(4) \quad R_*^r = R_A^r + R_{i,*}^r + W^{Sr} - W^{rs}$$

R_A = Restmenge aus Altanlage

Diese Menge R_* ist auch Ausgangspunkt der Bestimmung des regionalen Reinigungsgrades. Ermittelt werden soll das Verhältnis zwischen gereinigter Menge

und anfallender Menge Schadstoffe in Region r.
 Dazu müssen aber von R_{**}^r die Importe W^{Sr} subtrahiert werden sowie die Exporte von behandelten Abwässern wieder hinzuaddiert werden.
 Es ergibt sich die Menge R_{**}^r .

$$(5) \quad R_{**}^r = R_{*}^r - W^{Sr} + W^{rS} = R_A^r + R_{i,*}^r$$

Der Reinigungsgrad berechnet sich dann folgendermaßen

$$(6) \quad e = 1 - \frac{R_{**}^r}{\bar{g}}$$

\bar{g} = die insgesamt in Region r zu reinigende Menge

zu 3. Bilanzen, die den Einfluß von Schadstoffemissionen auf die Fließwasserqualität beschreiben sowie Restriktionen, die eine nutzungsbedingte Gewässergüte (Immissionsnormen) verlangen

Zur Beschreibung der funktionalen Beziehungen zwischen Emissionen, Immissionen und Sauerstoffhaushalt sind Transformationsfunktionen vom Typ Streeter-Phelps im Modell enthalten¹.

Bei der nun folgenden Betrachtung wird vereinfachend von 2 Regionen r und s ausgegangen. Dabei werden beide Regionen von einem Gewässer durchzogen, und Region r liegt flußaufwärts von s.

Mit a^{rs} werden BSB-Transferkoeffizienten definiert. Sie geben an, was von einer Region r bzw. in Region s eingeleiteten Schadstoffeinheit an den BSB-Meßstellen in Region r bzw. s im Flußwasser ankommt.

Mit b^{rs} werden Koeffizienten definiert, die die Auswirkung einer in Region r bzw. s eingeleiteten Schadeinheit auf den Sauerstoffhaushalt quantifizieren. Aufgrund der Lage der Meßstellen und unter der Annahme, daß eine sofortige Mischung von Abwasser und Flußwasser an den Einleitstellen stattfindet, gelten die folgenden Definitionen für die dimensionslosen Koeffizienten a^{rs} und b^{rs} :

¹ Die zur Berechnung der Schadstoffabbau- und Sauerstoffwiederbelüftungskoeffizienten erforderlichen Daten sind von Mitarbeitern des Forschungsinstituts Senckenberg, Frankfurt/Main, während der Jahre 1975-1979 regelmäßig bei kritischer Niedrigwasserführung der relevanten Gewässer ermittelt worden. Vgl. auch K. Wiik, Raumordnung und Gewässerschutz..., a.a.O.

$$a^{rs} = \begin{cases} 1, & \text{für } r = s \\ 0 < a^{rs} < 1, & \text{für } r \neq s \text{ und } r \text{ liegt flußaufwärts von } s \end{cases}$$

und

$$0 < b^{rs} < 1, \quad \text{für } r, s, \text{ einschließlich } r=s \text{ und } r \text{ liegt flußaufwärts von } s.$$

Mit Hilfe der BSB- und Sauerstoffkoeffizienten läßt sich die Selbstreinigungskraft der betrachteten Gewässer ermitteln. So zeigt sich, daß von den insgesamt in die Kinzig eingeleiteten Schadstoffmengen bis zur Mündung in den Main etwa 50 vH durch Abbauprozesse im Flußwasser "entfernt" werden. Die BSB-Reduktionskraft des Mains drückt sich in einer 36 %igen Verminderung der biochemisch abbaubaren Schadstoffmenge aus, die aus den angrenzenden Regionen insgesamt über die Flußstrecke von der hessisch-bayrischen Landesgrenze bis zur unteren Grenze der Region 201 eingeleitet werden (vgl. Anhang Tab. A1).

Für diese Untersuchung wesentlich ist auch die Frage, wieviel von der in einer Region eingeleiteten Schadstoffmenge in einer flußabwärts gelegenen Region ankommt. Will man etwa im Rahmen einer räumlich-funktionalen Arbeitsteilung zwischen den Regionen überregionale Planung betreiben, dann ist die Kenntnis der Verringerung der Schadstoffaufnahmekapazität einer Region durch die flußaufwärts liegenden Regionen von Bedeutung.

Die im Modell ermittelten Abbaukoeffizienten zeigen, daß von der in Region 340 eingeleiteten Schadstoffmenge nach einer Fließstrecke von weit über 100 km noch 16 vH in Region 201 ankommen. Von der in Region 503 eingeleiteten Menge kommt noch etwa 40 vH in Region 201 an (vgl. Tab. A1).

Aufgrund der Berücksichtigung derartiger Zusammenhänge im Modell kann untersucht werden, inwieweit ein regionalisierter Instrumenteneinsatz aus ökologischer Sicht von Bedeutung sein könnte. Wenn z.B. die Gewässergüteziele in einer Region bzw. in einem Regionenverbund geändert werden, kann dies Bedeutung für das Niveau der Abwasserreinigungsmaßnahmen in der betrachteten Region sowie in anderen mit dieser Region über den Schadstofftransport im Wasser verbundenen Regionen haben. Dies wird im Ergebnisteil der Untersuchung zu zeigen sein.

Mit R_N^r wird die regionale Schadstoffaufnahmekapazität in bezug auf die höchstzulässige BSB-Konzentration (Immissionsnorm) und mit S_N^r die regionale Schadstoffaufnahmekapazität in bezug auf den tolerierbaren Mindestgehalt an ge-

Löstem Sauerstoff pro Mengeneinheit Flußwasser (Immissionsnorm) an der regionalen Meßstelle definiert. Die BSB-Konzentration wird kurz nach einer Einleitung und die Sauerstoffkonzentration kurz vor einer Einleitung bzw. in Region 201 an der flußabwärts liegenden Gebietsgrenze der Regionalen Planungsgemeinschaft Untermain (RPU) gemessen.

Die Immissionsnormen lauten in unserem Modell z.B. für BSB 7 mg/l, für Sauerstoff (O₂) 4 mg/l.

Die Schadstoffaufnahmekapazität einer Region bezüglich BSB stellt die höchstzulässige Menge an BSB dar, die durch Schadstoffeinleitungen in dieser Region und in anderen flußaufwärts liegenden Regionen zusammenkommen darf.

Die Schadstoffaufnahmekapazität einer Region bezüglich Sauerstoffgehalt ist durch die Menge an gelöstem Sauerstoff im Flußwasser gegeben, der zur Deckung des Sauerstoffbedarfs von Schadstoffeinleitungen in dieser Region und in allen anderen flußaufwärts liegenden Regionen höchstens zur Verfügung steht.

Die Schadstoffaufnahmekapazität einer Region, z.B. konkretisiert durch die Qualitätsindikator 'gelöster Sauerstoff an der regionalen Meßstelle' wird dabei folgendermaßen bestimmt:

Sauerstoffsättigungswert
./.. Sauerstoffnorm (=erlaubter O ₂ -Mindestgehalt)
./.. Sauerstoffminderung durch Zufluß sauerstoffzehrender Substanzen aus flußaufwärts liegenden diffusen Quellen (Bäche)
./.. Anfangsbelastung (natürliche Belastung)
= Schadstoffaufnahmekapazität

Zur Bestimmung der Restriktionen der Schadstoffaufnahmekapazität der Region s in unserem Modell ist es nun erforderlich, die Abwassereinleitungen, die Region r verursacht, mit deren BSB- und Sauerstoffkoeffizienten zu gewichten und ebenfalls eine Gewichtung der Abwassereinleitungen der Region s mit deren Koeffizienten vorzunehmen.

Diese die Schadstoffaufnahmekapazität einer Region (hier s) belastenden Einleitungen müssen kleiner oder gleich der insgesamt zur Verfügung stehenden Schadstoffaufnahmekapazität der Region s sein.

$$(7) \quad a^{rs} R_*^r + a^{ss} R_*^s < \bar{R}_N^s \quad 0 < a^{rs} < 1, a^{ss} = 1$$

$$(8) \quad b^{rs} R_*^r + b^{ss} R_*^s < \bar{S}_N^s \quad 0 < b^{rs}, b^{ss} < 1$$

\bar{R}_N^s = Schadstoffaufnahmekapazität bzgl. BSB

\bar{S}_N^s = Schadstoffaufnahmekapazität bzgl. Sauerstoff

R_* hat die Dimension Einwohner + Einwohnerequivalent (E+EGW). Durch Berücksichtigung der jeweiligen Flußwassermengen (m³/Tag) lassen sich ebenfalls \bar{R}_N^s und \bar{S}_N^s in Mengeneinheiten E+EGW ausdrücken¹.

3.3 Zur Ermittlung der regionalen Abgabe

Der Vorzug eines linearen Programmierungsmodells (LP-Modell) liegt darin, daß neben den Aktivitätsniveaus z.B. für Reinigungsgrad, in Anspruch genommene Schadstoffaufnahmekapazitäten simultan Opportunitätskosten für knappe Ressourcen ausgewiesen werden. Der Allokationsprozeß ist damit untrennbar mit einem Preisbildungsprozeß verknüpft. Dies wird bei der Berechnung der Abwasserabgabe im folgenden berücksichtigt.

Dazu sind folgende Überlegungen anzustellen:²

Im Modell gibt der optimale Zielfunktionswert den niedrigsten finanziellen Betrag an, mit dem die Gewässerziele erreicht werden können (Ziel Kostenminimierung). Eine weitere Kostenverringerung ist aufgrund der Zielniveaus für die Gewässer nicht möglich.

Würde jetzt ein Gewässerziel in einer Region gelockert, so verringerten sich die Reinigungskosten. Würde andererseits das Gewässerziel restriktiver formuliert, so verteuerte sich die Abwasserreinigung.

Die marginale Änderung der Reinigungskosten bei einer Änderung des Gewässerziels zeigt sich in den Dualwerten der Gewässergüterrestriktionen. Ein Dualwert für eine regionale Gewässergüterrestriktion (siehe Gleichung (7), (8)) spiegelt den Zusatzaufwand bzw. die Zusatzerparnis wider, die bei strengerer Fixierung bzw.

1 Durch Umrechnung der nicht in Anspruch genommenen Schadstoffaufnahmekapazitäten bezüglich BSB und O₂ von E+EGW in mg BSB₅/l lassen sich Gewässergüterindikatoren bilden, die die Schadstoffkonzentration angeben. Diese wird im Ergebnisteil berücksichtigt.

2 Vgl. dazu K. Wiik, Raumordnung und Gewässerschutz..., a.a.O.

Lockerung eines regionalen Gewässerziels auftritt.

Aufgrund der dualen Eigenschaften eines LP-Modells¹ ergibt sich, daß die Schattenpreise für die bindenden Gewässergüteziele gleich den Grenzkosten der Verhinderung weiterer Schadstoffeinleitungen (in diesem Fall: Grenzkosten der Reinigung) in das Gewässer bei erfüllten Gewässergütezielen sein müssen.

Da der Schattenpreis eines Güteziels den Wert der hierdurch definierten Wassergüte angibt und die Schadstoffemittenten die Gewässergüte durch ihre Schadstoffeinleitungen in Anspruch nehmen, folgt hieraus, daß eine verursachergerechte Abgabe auf Schadstoffeinleitungen auf der Grundlage der Schattenpreise der Gewässergüteziele ermittelt werden muß.

Da aber die Gewässergüteziele Immissionswerte sind, müssen nun die funktionalen Beziehungen zwischen Emissionen und Immissionen herangezogen werden, um genaue Aussagen über die jeweilige regionsspezifische Abgabenhöhe machen zu können. Mit Hilfe der regionsspezifischen Koeffizienten des BSB-Transfers bzw. des Sauerstoffhaushalts ist eine verursachergerechte Zurechnung der Schadstoffeinleitungen auf die einzelnen Regionen möglich². So kann die verursachergerechte regionsspezifische Abgabe durch Multiplikation der Koeffizienten mit den Schattenpreisen der Gewässergüteziele ermittelt werden.

Bsp.: In einer Region s existiert ein Schattenpreis für die BSB-Restriktion, der die Knappheit der Ressource zum Ausdruck bringt; eine flußaufwärts liegende Region r leitet Schadstoffe in das Gewässer ein (vor oder nach Reinigung). Von diesen Schadstoffen (Emissionen) kommt ein bestimmter Anteil in der flußabwärts liegenden Region s an (Immission; ausgedrückt durch BSB-Transferkoeffizienten) und nimmt dort die knappen Schadstoffaufnahmekapazitäten in Anspruch. Im Sinne einer verursachergerechten Abgabenermittlung hat Region r die Kosten dieser Inanspruchnahme, die darin besteht, das Region s höhere Reinigungskosten hat, zu tragen.

1 Vgl. u.a. W. Buhr, Dualvariable als Kriterien unternehmerischer Planung, Schriften zur Wirtschaftswissenschaftlichen Forschung, Bd. 20, Meisenheim am Glan 1967.

2 Vgl. dazu Abschnitt 3.2 Pkt. 3: Bilanzen zur Beschreibung des Einflusses von Schadstoffemissionen auf die Fließwasserqualität.

Schattenpreis in Region s bezüglich BSB-Restriktion

$$\lambda_{BSB} = 100 \text{ DM}$$

Transferkoeffizient von Region r nach Region s:

$$a^{rs} = 0,4$$

d.h. 40 vH der in Region r eingeleiteten Schadstoffe beanspruchen die Kapazitäten von Region s.

Ermittlung der verursachergerechten Abgabe:

$$t^r = \lambda_{BSB}^s * a^{rs}$$

$$t^r = 100 \text{ DM} * 0,4 = 40 \text{ DM}$$

Der Region r wären demnach 40 DM zuzurechnen.

In gleicher Weise kann die Berechnung auch für Schattenpreise von Gewässergüterestriktionen bezüglich Sauerstoff (O₂) vollzogen werden.

Als insgesamt zu erhebende Abgabe ergibt sich allgemein:

$$t^r = \lambda_{BSB}^r * a^{rr} + \lambda_{O_2}^r * b^{rr} + \lambda_{BSB}^s * a^{rs} + \lambda_{O_2}^s * b^{rs}$$

4. Ergebnisse

Bei den Ergebnissen wird unterschieden zwischen

1. Abgaben bei einheitlichem Gewässerziel (Tab.2)
2. Abgaben bei differenzierten Gewässerzielen (Tab.3)

4.1 Abgaben bei einheitlichem Gewässerziel

Für die Abgabe bei einheitlichem Gewässerziel sind zwei Rechenläufe durchgeführt worden, die sich durch unterschiedliche Schadstoffmengen vor Reinigung unterscheiden. In Lauf 1 ist dabei die vor Reinigung anfallende Menge in den Regionen, die den schwach belasteten Teil des Untersuchungsgebietes darstellen (Kinzig-Regionen) niedriger als in Lauf 2. Dies läßt sich an den Gewässergüteindikatoren BSB₅ und O₂ ablesen, die für die Regionen 340 bis 351 (Kinzig-Regionen) in Lauf 1 besser als in Lauf 2 sind.

Tabelle 2 : Gewässergüte, regionspezifische Abgaben und Reinigungsgrade (RG) bei einheitlichen Immissionsstandards

Region	Lauf 1					Lauf 2				
	Gewässergüte		Abgabe (DM/E+EGW)	RG %	Abgabe (DM/E+EGW)	Gewässergüte		Abgabe (DM/E+EGW)	RG %	
	BSB ₅ (mg/l)	O ₂ (mg/l)				BSB ₅ (mg/l)	O ₂ (mg/l)			
340	6.14	4.62	65.25	85.0	65.25	6.43	4.57	104.70	85.3	
334	5.11	5.57	78.37	85.0	78.37	7.00	5.38	128.29	90.0	
333	7.00	5.86	97.20	90.4	97.20	7.00	5.81	97.20	90.9	
351	5.06	6.28	111.72	88.7	111.72	5.06	6.26	108.87	88.7	
503	6.49	4.22	117.61	90.0	117.61	6.44	4.22	114.60	92.2	
403	5.14	4.19	123.70	95.0	123.70	5.13	4.19	120.32	95.0	
502	4.96	4.17	124.60	90.7	124.60	4.94	4.18	121.91	89.0	
402	4.96	4.17	124.60	95.0	124.60	4.94	4.18	121.91	95.0	
401	5.50	4.00	118.28	95.0	118.28	5.55	4.00	117.04	95.0	
201	7.00	4.02	104.60	90.4	104.60	7.00	4.00	104.70	93.0	

In beiden Rechenläufen zeigt sich, daß die Abgabe in den hochbelasteten Regionen (wie 401, 402, 403) höher sein muß als in den schwachbelasteten (340, ...351). Da in diesem Modell kein Zusammenhang mit dem Rest der Bundesrepublik Deutschland besteht, liegt die Abgabe in Region 201 niedriger als in den anderen stark belasteten Regionen.

Eine Ausnahme bildet in Lauf 2 die Region 334. In dieser Region muß eine deutlich höhere Abgabe bezahlt werden (im Vergleich zu den flußabwärts liegenden Regionen des Main-Gebiets) weil in der flußabwärts liegenden Region (333) das Gewässergüteziel stark gefährdet ist.

Würde nun in der flußaufwärts liegenden Region (334) mehr Abwasser eingeleitet, dann käme davon noch ein recht hoher Anteil in der flußabwärts liegenden Region an. Dort müßte dieser dann entweder gereinigt werden oder aber würde die Schadstoffaufnahmekapazitäten des dortigen Flußabschnittes zusätzlich belasten. Diese Belastung ist in der Abgabe für die flußaufwärts liegende Region berücksichtigt. Auf diese Weise ließe sich das Verursacherprinzip optimal verwirklichen.

Bei einem Vergleich zwischen Lauf 1 und Lauf 2 ergibt sich, daß die schlechtere Gewässerqualität der Kinzig-Regionen in Lauf 2 zu höheren Abgaben führen muß, da nunmehr sowohl Region 334 als auch 333 Schattenpreise der Gewässergüteziele (bzgl. BSB₅) aufweisen. Diese Schattenpreise drücken den gestiegenen Wert der Gewässerressourcen aus (bzgl. der Aufnahmefähigkeit von organischen Stoffen). Das vorher freie Gut Schadstoffaufnahmekapazität der Region 334 wird aufgrund seiner Knappheit nunmehr ebenfalls mit einem Preis bewertet (vgl. Tab. A2). Da von der in Region 340 eingeleiteten Schadstoffmenge noch 79 vH in Region 334 ankommen, wird nun die gegenüber Lauf A erheblich gestiegene Abgabe verständlich (von 65,25 DM auf 104,70 DM). Diese wird durch den Schattenpreis, den die Gewässerressource in Region 334 zugewiesen bekommt, verursacht.

4.2 Abgaben bei differenzierten Gewässerzielen

Im folgenden wird der Fall unterstellt, daß von einer Behörde für einzelne Flußgebiete differenzierte Gewässergüteziele gesetzt werden (dafür kämen die Bewirtschaftungspläne nach § 36b WHG in Betracht).

Im Rahmen dieser gesetzten Standards könnte eine Abgabe auf die Benutzung der verbleibenden Restkapazität für Schadstoffeinführungen erhoben werden.

Wie diese auszusehen hätte, soll nun anhand eines Rechenlaufes demonstriert werden.

Es wird dazu eine Variation des BSB-Standards in den Kinzig-Regionen vorgenommen. Sollen in den Kinzig-Regionen höhere Gewässerziele realisiert werden als in den Main-Regionen, so läßt sich die in Tab. 3 dargestellte Tendenz der Abgabehöhe feststellen.

Wird das Gewässergüteziel bezüglich BSB₅ auf 6,65 mg/l verschärft, so steigen die Abgaben in den oberen Kinzig-Regionen (340,334). Aufgrund der strengeren Standards ist die Ressource Schadstoffaufnahmekapazität in der Region 334 wertvoller geworden und bekommt daher einen höheren Schattenpreis zugewiesen (vgl. Tab. A3). Dies führt zu steigenden Abgaben in dieser und der flußaufwärts liegenden Region 340.

Anhand der regionalen Reinigungsgrade läßt sich zusätzlich zeigen, daß 3 der Kinzig-Regionen nunmehr verstärkte Anstrengungen zur Reinigung des Gewässers unternehmen müssen (in den Regionen 333 und 334 ist dabei die Anwendung von Verfahren der weitergehenden Reinigung erforderlich). Die Verschärfung des Gewässerziels in den Kinzig-Regionen führt zu einer Entlastung der Main-Regionen (Entlastung der Schadstoffaufnahmekapazitäten). Dadurch sinken die Abgaben in diesen Regionen etwas.

5. Schlußbemerkungen

Der vorliegende Beitrag zeigt anhand eines ausgewählten Untersuchungsgebietes die Notwendigkeit einer regionalen Differenzierung der Abwasserabgabe, wie sie sich aufgrund der räumlich unterschiedlichen Belastungsdichte durch Industrie und Siedlungen sowie der regional verschiedenen Assimilationskapazitäten einstellen müßte. Auffallend ist die Diskrepanz zwischen der modellmäßig ermittelten und der im politischen Kompromiß erzielten Abgabehöhe.

Aber auch andere in der Literatur vorzufindende Untersuchungen¹, in denen für einzelne abwasserintensive Sektoren Grenzkostenfunktionen der Schadstoffvermeidung ermittelt wurden, führen zu erheblich höheren Abgabesätzen.

Damit die Abgabe einen Anreiz zur verstärkten Abwasserreinigung ausüben kann, müßte sie demnach in der hier ermittelten Größenordnung liegen.

¹ Vgl. G. Rincke, Untersuchung über wirtschaftliche Auswirkungen..., a.a.O.

Tabelle 3 : Gewässergüte, regionspezifische Abgaben und Reinigungsgrade (RG) bei einer Variation des BSB₅-Immissionsstandards in den Kinzig-Regionen

Region	Standard = 7 (mg/l)			6,65 (mg/l)			6,21 (mg/l)					
	Gewässergüte		Abgabe (DM/E+ECW) (%)	Gewässergüte		Abgabe (DM/F+FGW) (%)	Gewässergüte		Abgabe (DM/E+EGW) (%)			
	BSB ₅ (mg/l)	O ₂ (mg/l)		BSB ₅ (mg/l)	O ₂ (mg/l)		BSB ₅ (mg/l)	O ₂ (mg/l)		RG (%)		
340	6,43	4,57	104,70	85,3	5,92	4,66	109,55	88,2	5,92	4,66	109,04	88,2
334	7,00	5,38	128,29	90,0	6,65	5,49	134,40	90,0	6,21	5,57	134,40	94,2
333	7,00	5,81	97,20	90,9	6,65	5,91	97,20	91,9	6,21	6,02	97,20	93,0
351	5,06	6,26	108,87	88,7	4,89	6,33	108,87	88,7	4,68	6,40	97,20	88,7
503	6,44	4,22	114,60	92,2	6,46	4,22	114,60	90,4	6,48	4,22	102,29	88,3
403	5,13	4,19	120,32	95,0	5,14	4,19	120,32	95,0	5,14	4,20	109,01	95,0
502	4,94	4,18	121,91	89,0	4,94	4,18	121,91	89,0	4,95	4,19	111,59	89,0
402	4,94	4,18	121,91	95,0	4,94	4,18	121,91	95,0	4,95	4,19	111,59	95,0
401	5,55	4,00	117,04	95,0	5,55	4,00	117,04	95,0	5,55	4,00	111,71	95,0
201	7,00	4,00	104,70	93,0	7,00	4,00	104,70	93,0	7,00	4,00	104,70	93,1

Literaturverzeichnis

- Buhr, W., Dualvariable als Kriterien unternehmerischer Planung, Schriftenreihe zur wirtschaftswissenschaftlichen Forschung, Bd. 20, Meisenheim a. Glan 1967.
- Ewringmann, D. u.a., Auswirkungen des Abwasserabgabengesetzes auf industrielle Indirekteinleiter, Gutachten für das Bundesministerium des Innern, Köln 1978.
- Graves, W., Hatfield, G., Whinston, A., Mathematical Programming for Regional Water Quality Management, in: Water Resources Research, Vol 8, No 2 (1972).
- Herzog jr., H.W., The Economics of Regional Water Quality Management, Diss. University of Maryland 1974.
- Hillier, F.S., Liebermann, G.J., Introduction to Operations Research, San Francisco 1968.
- Rat von Sachverständigen f. Umweltfragen Mainz 1974. Die Abwasserabgabe, 2. Sondergutachten, Stuttgart und Mainz 1974.
- Rincke, G., Untersuchung über wirtschaftliche Auswirkungen der vorgesehenen Abwasserabgabe auf abwasserintensive Produktionszweige, Gutachten i.A. des Bundesministers des Innern, Darmstadt 1976.
- Wiik, K., Ein Entscheidungsmodell zur Analyse und Koordinierung von Umwelt- und Raumplanung, Vortrag am 30.9.1977, Deutsche Gesellschaft für Operations Research e.V. (DGOR).
- Derselbe, Raumordnung und Gewässerschutz im Großraum Frankfurt a.M., Veröffentlichung in Vorbereitung.

A n h a n g

TABELLE A1 : REGIONALE SAUERSTOFFHAUHALTKOEFFIZIENTEN(S⁵) UND SAUERSTOFFNORMEN (S_N)

BEEINFLUSSTE REGION***	S ⁵ (IN EGW)																	
	503	340	334	351	403	402	401	320	331	313(1)	100	311	313(2)	332	314	312	201	S _N
503	.20	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	18044.
340	.00	.08	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	2042.
334	.00	.24	.19	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	4459.
351	.00	.25	.24	.20	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	10655.
403	.00	.21	.23	.24	.19	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	16883.
402	.27	.23	.25	.28	.25	.12	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	25457.
401	.16	.23	.27	.32	.34	.30	.34	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	38340.
320	.39	.23	.27	.32	.37	.35	.37	.17	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	55310.
331	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	2223.
313(1)	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	4240.
100	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	8237.
311	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	3705.
313(2)	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	6229.
332	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	18937.
314	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1897.
312	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	8255.
201	.38	.22	.26	.31	.36	.34	.23	.13	.17	.21	.13	.14	.00	.16	.22	.25	.11	106511.

TABELLE A1 : REGIONALE BSB-ABBAUKOEFFIZIENTEN(S⁵) UND EGW-NORMEN(R_N)

BEEINFLUSSTE REGION***	R _N (IN EGW)																						
	001	352	501	503	340	334	333	351	403	402	401	320	331	313(1)	100	311	313(2)	332	314	312	201	R _N	
001	1.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	11000000.
352	.00	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	12400.
501	.00	0.	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	12300.
503	.00	0.	0.	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	58280.
340	.00	0.	0.	0.	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	7831.
334	.00	0.	0.	0.	.00	.79	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	8631.
333	.00	0.	0.	0.	.00	.60	.75	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	18409.
351	.00	0.	0.	0.	.00	.43	.54	.72	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	17173.
403	.00	0.	0.	0.	.78	.32	.41	.54	.75	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	328745.
402	.00	0.	0.	0.	.69	.28	.36	.47	.66	.86	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	329182.
401	.00	0.	0.	0.	.49	.20	.25	.34	.47	.63	.71	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	8793.
320	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.87	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	18301.
331	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.65	1.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	19291.
100	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	4738.
313(1)	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.61	1.	.00	.00	.00	.00	11891.
311	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	33378.
313(2)	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.45	.52	.80	1.	.00	.00	.00	.00	5288.
332	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	12468.
314	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	51617.
312	.00	0.	0.	0.	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	428000.
201	.00	0.	0.	0.	.40	.16	.21	.28	.38	.51	.59	.82	.19	.21	.33	.19	.30	.00	.31	.41	.58	1.	428000.

ERLAUTERUNGEN I

I EINWOHNERGLEICHHEIT(EGW) IST GLEICH 60 * BSB₅ PRO EINWOHNER PRO TAG
 S_N (IN EGW) : FUER ABWASSEREINLEITUNGEN ZUR VERFUEHRUNG STEHENDES SAUERSTOFFPOTENTIAL DER REGION
 R_N (IN EGW) : FUER ABWASSEREINLEITUNGEN ZUR VERFUEHRUNG STEHENDE BSB₅-AUFNAHMEKAPAZITAET DER REGION
 DIE REGION 202 EXPORTIERT 100 G/SARTES ABWASSER IN DIE REGIONEN 312 UND 401.
 DIE REGION 502 EXPORTIERT 100 G/SARTES ABWASSER IN DIE REGION 402.

Tabelle A2 : Schattenpreise der Gewässergüterrestriktionen im Kostenminimierungsmodell

Region	Gewässergüterrestriktion	Schattenpreise (DM/E+EGW)	
		Lauf 1	Lauf 2
334	BSB ₅	-	50.13
333	BSB ₅	5.23	7.74
401	O ₂	196.61	188.7
201	BSB ₅	104.6	104.7

Tabelle A3 : Schattenpreise der Gewässergüterrestriktionen im Kostenminimierungsmodell bei Variation des BSB₅-Immissionsstandards
 a) in Kinzig-Regionen

Region	Gewässergüterrestriktion	Schattenpreise (DM/E+EGW)		
		Standard = 7(mg/l)	6.65 (mg/l)	6.21 (mg/l)
334	BSB ₅	50.13	56.24	57.11
333	BSB ₅	7.74	7.74	18.00
401	O ₂	188.7	188.7	156.72
201	BSB ₅	104.7	104.7	104.7

Obersicht A4: Gleichungssystem

Modellrestriktionen (Kostenminimierungsmodell)

$$(N) \sum_i \sum_n c_{i,n}^r r_{i,n}^r \rightarrow \text{Min!} \quad (1)$$

$$(L) r_{i,n}^r \leq \bar{r}_{i,n}^r \quad (2)$$

$$(T) R_{i,*} = R_{i,0} + \sum_n r_{i,n}^r \quad (3)$$

$$(T) R_*^r = R_A^r + \sum_i R_{i,*}^r + W^{sr} - W^{rs} \quad (4)$$

$$(T) R_{**}^r = R_*^r - W^{sr} + W^{rs} = R_A^r + \sum_i R_{i,*}^r \quad (5)$$

$$(T) e^r = 1 - \frac{R_{**}^r}{g} \quad (6)$$

$$(L) a^{rr} R_*^r \leq \bar{R}_N^r \quad (7)$$

$$(L) b^{rr} R_*^r \leq \bar{S}_N^r \quad (8)$$

$$(L) a^{rs} R_*^r + a^{ss} R_*^s \leq \bar{R}_N^s \quad (9)$$

$$(L) b^{rs} R_*^r + b^{ss} R_*^s \leq \bar{S}_N^s \quad (10)$$

Verzeichnis der verwendeten Symbole im Kostenminimierungsmodell

Symbol	Erklärung
--------	-----------

Aktivitäten (endogene Variablen) des Modells

$r_{i,n}$	Einleitung aus dem n-ten Segment der i-ten Kläranlage in EGW
R_*	Insgesamt in den Fluß eingeleitete Schadstoffmenge in EGW

R_{**}	In den Fluß eingeleitete Schadstoffmenge (Korrekturgröße zur Berechnung des regionalen Reinigungsgrades)
W	Vektor der nach anderen Regionen exportierten Schadstoffmengen
e	regionaler Reinigungsgrad

Koeffizienten und exogene Aktivitätsniveaus

$c_{i,n}$	Grenzkostenkoeffizient des n-ten Segments der i-ten Kläranlage
$R_{i,0}$	Schadstoffmenge, die bei 95 %iger Reinigung anfällt (Restmenge)
R_A	Schadstoffmenge, die nach Reinigung in den alten Kläranlagen anfällt
\bar{g}	Kläranlagenkapazität
a	Koeffizient des im Flußwasser stattfindenden Prozesses von organischen Stoffen (BSB ₅ -Koeffizient)
b	Sauerstoffverbrauchskoeffizient d.h. Verbrauch von gelöstem Sauerstoff pro eingeleitetem EGW und Fließzeit
\bar{R}_N	BSB ₅ -Standard (in EGW)
\bar{S}_N	Sauerstoffstandard (in EGW)

Interpretation von Indices

r,s	Regionen
i	Kläranlagentypen (nach Regionen verschieden)
n	Anzahl der Segmente $n = 1,2$