Entwicklung eines Methodenkonzeptes zur Umweltbilanzierung und dessen Anwendung am Beispiel kommunaler Kläranlagentechnik

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Jörn E. Fischer

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Norbert Räbiger
	Prof. Dr.-Ing. Franz J. Heeg
Tag der mündlichen Prüfung:	11.07.2006

Berichte aus der Umwelttechnik

Jörn E. Fischer

Entwicklung eines Methodenkonzeptes zur Umweltbilanzierung und dessen Anwendung am Beispiel kommunaler Kläranlagentechnik

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2006

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.ddb.de abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5381-5
ISBN-13: 978-3-8322-5381-3
ISSN 0945-1013

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Produktionstechnik, Fachgebiet Umweltverfahrenstechnik der Universität Bremen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. N. Räbiger für die Betreuung und Unterstützung der Arbeit und für die Übernahme des Hauptreferats.

Herrn Prof. Dr.-Ing. F. J. Heeg danke ich für die Übernahme des Korreferats und für die freundliche Aufnahme der Arbeit.

Für die fachliche Unterstützung möchte ich mich bei allen Kollegen und Mitarbeitern des Instituts für Umweltverfahrenstechnik der Universität Bremen bedanken. Besonders erwähnen möchte ich in diesem Zusammenhang Dr.-Ing. Gürhan Özoğuz, Dr. rer. nat. Horst Moormann, Dr.-Ing. Michael Rüdebusch, Dr. rer. nat. Jens Wohlers und Dipl.-Ing. Götz v. Wuthenau für die vielen in freundschaftlicher Atmosphäre geführten fachlichen und weniger fachlichen, jedoch ausschließlich konstruktiven Gespräche.

Für die moralische Unterstützung danke ich meiner Frau Tanja, welche mir zu jeder Zeit während meines Promotionsvorhabens den Rücken frei gehalten hat.

Meinen Eltern, die mir meine akademische Ausbildung ermöglicht haben und mein Promotionsvorhaben mit großem Interesse verfolgt haben, ist diese Arbeit gewidmet.

Bremen, im November 2005 Jörn E. Fischer

„Bei der Suche nach einfachen und gleichzeitig aussagekräftigen Messgrößen bewegen wir uns zwischen zwei Extremen: Das Einfache ist theoretisch falsch, und das Komplizierte ist praktisch undurchführbar. Wir sollten etwas finden, das theoretisch zumindest nicht falsch und praktisch nicht unbrauchbar ist."

Prof. Dr.-Ing. Michael F. Jischa
Institut für Technische Mechanik der TU Clausthal
über Umweltindikatoren zur Technikbewertung

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS VIII

FORMELZEICHEN VIII
GRIECHISCHE BUCHSTABEN X
INDICES X
ABKÜRZUNGEN IM TEXT X
ORGANISATIONEN X

ZUSAMMENFASSUNG XII

1 EINLEITUNG 1

1.1 AUSGANGSSITUATION 1
1.2 PROBLEMSTELLUNG 2
1.3 GLIEDERUNG UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT 3

2 GRUNDLAGEN DER UMWELTBILANZIERUNG 5

2.1 GESCHICHTLICHER HINTERGRUND DER UMWELTBILANZIERUNG 5
2.1.1 Motivation 5
2.1.2 Datenerhebung und Bilanzierung 6
2.1.3 Umfassende Bewertungsansätze und Standardisierung 7
2.2 DIE MODERNE UMWELTBILANZ 8
2.2.1 Zielsetzungen, Instrumentarien und Anwendungen 8
2.2.2 Standardisierung gemäß EN ISO 14040 ff. 11
2.2.3 Ansätze zur Vereinfachung von Umweltbilanzen 13

3 STAND DES WISSENS - BEWERTUNG VON UMWELTWIRKUNGEN 15

3.1 WIRKUNGSKATEGORIEN UND -INDIKATOREN 16
3.1.1 (Human-) Toxizität und weitere Wirkungen auf den Organismus 18
3.1.2 Ökotoxizität 21
3.1.3 Globale Erwärmung 21
3.1.4 Stratosphärischer Ozonabbau 23
3.1.5 Bildung von Photooxidantien 23
3.1.6 Versauerung 24
3.1.7 Eutrophierung (Überdüngung) 25
3.1.8 Ressourcen 26
3.2 ANFORDERUNGEN AN EIN METHODENKONZEPT 27
3.3 BEWERTUNGSANSÄTZE ZUR WIRKUNGSABSCHÄTZUNG 29
3.3.1 Verbal-argumentativer Ansatz 33
3.3.2 Orientierung an physikalischen Leitgrößen 34
3.3.3 Orientierung an ökonomischen Leitgrößen 35
3.3.4 Ableitung aus Umweltstandards 36
3.3.5 Schadensfunktionsorientierter Ansatz 36

4 NEUES METHODENKONZEPT ZUR UMWELTBILANZIERUNG 38

4.1 MODUL I: ZIELDEFINITION 40
4.2 MODUL II: SACHBILANZIERUNG 41
4.2.1 Methoden zur Datenerfassung 42
4.2.2 Anforderungen an die Datenqualität 44
4.2.3 Daten-Allokation 45
4.2.4 Daten-Verifikation 48
4.3 MODUL III: (SYSTEM-) MODELLIERUNG 49
4.3.1 Modellierung mit Hilfe von Stoffstromnetzen 50
4.3.2 Modellierung einer Rückkopplung 51
4.3.3 Softwareunterstützte Modellierung 52
4.4 MODUL IV: WIRKUNGSABSCHÄTZUNG ANHAND VON LEITPARAMETERN 53
4.4.1 Materialintensität als Leitgröße 54
4.4.2 Toxikologischer/ökotoxikologischer Kennwert als Leitgröße 55
4.4.3 Qualitative Bewertung der Umweltwirkung mit Hilfe der R-Sätze 59
4.5 MODUL V: WIRKUNGSABSCHÄTZUNG MIT WIRKUNGSPROFIL 61
4.5.1 Auswahl der Kategorien, Indikatoren und Modelle 62
4.5.2 Klassifizierung und Charakterisierung 76
4.5.3 Normierung, Ordnung, Gewichtung 76
4.6 MODUL VI: BETRACHTUNG DER UNSICHERHEITEN 78
4.6.1 Qualitative Abschätzungen 80
4.6.2 Abschätzung der Unsicherheit mit Szenarien 81
4.7 MODUL VII: SZENARIENTECHNIK 82
4.8 MODUL VIII: AUSWERTUNG 83

5 UMWELTBILANZIERUNG IN DER KOMMUNALEN ABWASSERREINIGUNG 85

5.1 HISTORIE DER KOMMUNALEN ABWASSERREINIGUNG 86
5.2 STAND DER UMWELTBILANZIERUNG IN DER KOMMUNALEN ABWASSERREINIGUNG . 88
5.3 ANWENDUNG DES ENTWICKELTEN METHODENKONZEPTES ZUR UMWELTBILANZIERUNG AUF DIE KOMMUNALE KLÄRANLAGENTECHNIK 92
5.3.1 Zieldefinition (Modul I) 92
5.3.2 Sachbilanz (Modul II) 95
5.3.3 Modellierung einer Kläranlage (Modul III) 101
5.3.4 Wirkungsabschätzung anhand von Leitparametern (Modul IV) 109
5.3.5 Wirkungsabschätzung mit Wirkungsprofil (Modul V) 115
5.3.6 Betrachtung der Unsicherheiten (Modul VI) 119
5.3.7 Szenarientechnik: Membranverfahren (Modul VII) 125
5.3.8 Auswertung (Modul VIII) 135
5.4 VERGLEICHBARKEIT DER ERGEBNISSE VON UMWELTBILANZEN 143

6 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK 146

ANHANG 150

A1 KURZBESCHREIBUNG AUSGEWÄHLTER BEWERTUNGSMETHODEN 150
A1.1 ABC/XYZ-Analyse 150
A1.2 Methode des Battelle Instituts 151
A1.3 Methode der kritischen Volumina 152
A1.4 Bewertungsmodell der Umweltbelastungspunkte (UBP) 154
A1.5 EPS-Modell 155
A1.6 VNCI-Methode, Critical Surface Time CST, C.A.U.-Methodik 156
A1.7 Tellus-Modell 158
A1.8 IKP-Methodik (Ansatz der Ganzheitlichen Bilanzierung) 159
A1.9 CML-Methode 160
A1.10 MIPS / FIPS – Material- bzw. Flächenintensität pro Serviceeinheit 162
A1.11 SPI-Methode 164
A1.12 KEA (kumulierter Energieaufwand) 165
A1.13 Wirkungsabschätzung mit verbal-argumentativer Bewertung (UBA-Methode) 166
A1.14 Eco-Indikator Methode 168
A1.15 LCA Impact Assessment of Toxic Releases (unter Verwendung von USES) 171
A1.16 Methode des IZM (TPI) 174
A2 KENNWERTE NACH GEBLER 175
A3 R-SÄTZE 176
A4 ÄQUIVALENPOTENTIALE ZUR WIRKUNGSABSCHÄTZUNG 178
A4.1 (Human-) Toxizität 178
A4.2 Ökotoxizität 179
A4.3 Globale Erwärmung 180
A4.4 Stratosphärischer Ozonabbau 181
A4.5 Bildung von Photooxidantien 182
A4.6 Versauerung 183
A4.7 Eutrophierung (Überdüngung) 184

LITERATURVERZEICHNIS 185

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

Zeichen	Einheit[1]	Beschreibung
a	-	Flächenverhältnis
a	$m^2\ PE^{-1}$	spezifische (nachhaltige) Betriebsfläche
A	m^2	Fläche
AFS	$mg\ L^{-1}$	abfiltrierbare Stoffe
AOX	$mg\ L^{-1}$	adsorbierbare organische Halogenverbindungen
AP	-	Versauerungspotenzial (engl.: Acidification Potential)
b_S	kg	integrierte Emission der organisch flüchtigen Komponente S
BCF	-	Biokonzentrationsfaktor: Anreicherung von Schadstoffen in lebenden Organismen im Vergleich zum Außenmedium
BF	-	Faktor biologische Abbaubarkeit
BSB_5	$mg\ L^{-1}$	biologischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
CSB	$mg\ L^{-1}$	chemischer Sauerstoffbedarf
EC	$mg\ kg^{-1}$	Effektkonzentration
EE	$mg\ L^{-1}$	Estradiol-Äquivalente
EEF	-	Estradiol-Äquivalenzfaktor
EF	-	Extrapolationsfaktor
EF	m^2	ökologischer Fußabdruck (engl.: Ecological Footprint)
EFET	$kg\ mg^{-1}$	Äquivalenzfaktor Ökotoxizität
EFHT	$kg\ mg^{-1}$	Äquivalenzfaktor Humantoxizität
ELU	€	Environmental Load Unit
ETF	$kg\ mg^{-1}$	Ökotoxizitätsfaktor
ETP	-	Ökotoxizitätspotenzial (engl.: Ecological Toxicity Potential)
E	-	Einwohner
EW	-	Einwohnerwert
f	-	Verteilung zwischen Kompartimenten
F	$t\ a^{-1}$	Belastung, Fluss
FAETP	-	Süßwasser Ökotoxizitätspotenzial (engl.: Freshwater Aquatic Ecotoxicity Potential)
FIPS	$m^2\ PE^{-1}$	Flächenintensität pro Serviceeinheit
FSETP	-	Süßwasser-Sediment Ökotoxizitätspotenzial (engl.: Freshwater Sediment Ecotoxicity Potential)
GWP	-	Potenzial Globale Erwärmung (engl.: Global Warming Potential)
H	$mol\ m^{-3}\ Pa^{-1}$	Henry-Konstante
HTF	$kg\ mg^{-1}$	Humantoxizitätsfaktor
HTP	-	Humantoxizitätspotenzial (engl.: Human Toxicity Potential)
ICP	-	Potenzial ionisierende Strahlung (engl.: Ionization Creating Potential)
k	-	Konstante
K_d	-	Adsorptionskoeffizient
KEA	$MJ\ kg^{-1}$	Kumulierter Energieaufwand
LC_{50}	ppm oder $mg\ m^{-3}$	letale Konzentration eines Stoffes, bei der 50% der Versuchsorganismen sterben (engl.: Lethal Concentration Fifty)
LD_{50}	$mg\ kg^{-1}$	letale Dosis eines Stoffes, bei der 50% der Versuchsorganismen sterben (engl.: Lethal Dose Fifty)

[1] PE: Produktionseinheit, E: Einwohner

LOEL	mg kg^{-1}	niedrigste Dosis eines Stoffes, bei der gerade noch eine Wirkung bemerkbar ist (engl.: Low Observed Effect Level)
m	kg	Masse
$\dot{m}$	kg s^{-1}	Massenstrom
M	kg mol^{-1}	molspezifische Masse
MAETP	-	Marines Ökotoxizitätspotenzial (engl.: Marine Ecotoxicity Potential)
MI	-	Mass Index
MIPS	kg PE^{-1}	Materialintensität pro Serviceeinheit
MLI	-	Mass Loss Indices
MOS	%	Margin of Safety
MSETP	-	Marines Sediment Ökotoxizitätspotenzial (engl.: Marine Sediment Ecotoxicity Potential)
NET	Pa s Pa^{-1}	Noise Exposure Time
N_{ges}	mg L^{-1}	Gesamtstickstoff
NOEL	mg kg^{-1}	Wirkungsschwelle (engl.: No Observed Effect Level)
NP	-	Eutrophierungspotenzial (engl.: Nutrification Potential)
ODP	-	Ozonzerstörungspotenzial (engl.: Ozone Depletion Potential)
OTV	m^3	Odour Treshold Value
PEC	mg kg^{-1}	Predicted Environmental Concentration
PF	-	Persistenzfaktor
P_{ges}	mg L^{-1}	Gesamtphosphor
PNEC	mg kg^{-1}	Predicted No-Effect Concentration
POCP	-	Ozonbildungspotenzial (engl.: Photochemical Ozone Creation Potential)
P_{ow}	-	Oktanol/Wasser-Verteilungskoeffizient
R	-	Recyclinggrad
SPI	m^2 PE^{-1} E^{-1}	Sustainable Process Index
t	s	Zeit
t_{atmos}	s	atmosphärische Halbwertzeit
TAETP	-	Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial (engl.: Terrestrial Ecotoxicity Potential)
TC	mg L^{-1}	Gesamtkohlenstoff (engl.: Total Carbon)
TCLo	ppm oder mg/m^3	geringste toxische Konzentration eines Stoffes, bei der ein toxischer Effekt bei Versuchsorganismen auftritt (engl.: toxic concentration low)
TDLo	mg kg^{-1}	geringste toxische Dosis eines Stoffes, bei der ein toxischer Effekt bei Versuchsorganismen auftritt (engl.: Toxic Dose Low)
Te	kg_{Bio} PE^{-1}	Toxizitätsäquivalent in kg gefährdete Biomasse pro Produktionseinheit
TLm_{96}	ppm	Schadstoffkonzentration, bei der 50% aller im Wasser lebenden Organismen nach 96 Stunden Expositionszeit sterben (engl.: Median Tolerance Limit)
TPI	-	Toxic Potenzial Indicator
TS	g L^{-1}	Trockensubstanz
Tx	kg kg^{-1}	Toxizitätsfaktor
$Tx_{ök}$	kg mg^{-1}	Ökotoxizitätsfaktor
UBP	-	Umweltbelastungspunkt

Griechische Buchstaben

α	$W\ m^{-2}\ kg^{-1}$	Absorption der Wärmestrahlung pro Einheitskonzentrationsanstieg eines Treibhausgases
$\delta(S)$	$kg\ a^{-1}$	Abbau der Substanz S pro Jahr
γ	-	stöchiometrischer Koeffizient
η	$mol\ kg^{-1}$	Anzahl der H^+-Ionen, welche pro kg freigesetzt werden können
λ	-	stöchiometrischer Faktor, berücksichtigt stöchiometrische Massenänderungen im Laufe einer Reaktion
ρ	$mg\ L^{-1}$ oder $kg\ m^{-3}$	(Massen)-Konzentration

Indices

0	Ausgangszustand
-sc	chronische Wirkungen im Boden
-wa	akute Wirkungen im Wasser
-wc	chronische Wirkungen im Wasser
A	Abbau
air	Kompartimente Luft
water	Kompartimente Wasser
soil	Kompartimente Boden
e	Endzustand
ges.	gesamt
k	kritisch
RA	Risk Assessment
S	Substanz
tot.	total
V	Verbreitung

Abkürzungen im Text

Organisationen

ATV	Abwassertechnische Vereinigung
ATV-DVWK	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
B&G	Fuels and Raw Materials Bureau (Niederlande)
BMI	Bundesministeriums des Innern (Deutschland)
BUA	Beratergremium für umweltrelevante Stoffe (Deutschland)
BUS	Bundesamt für Umweltschutz, heute BUWAL (Schweiz)
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz)
C.A.U.	Gesellschaft für Consulting und Analytik im Umweltbereich (Dreieich)
CML	Center of Environmental Science (Leiden, Niederlande)
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EG	Europäische Gemeinschaft
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Schweiz)
EPA	Environmental Protection Agency (U.S.A)
IAWQ	International Association on Water Quality
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung (Heidelberg)
IFU	Institut für Umweltinformatik (Hamburg)
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis (Österreich)
IKP	Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde (Stuttgart)

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
IVL	Umweltforschungsinstitut (Schweden)
IZM	Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (Berlin)
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development
RIVM	National Institute of Public Health and the Environment (Niederlande)
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
TME	Institute for Applied Environmental Economics
TNO	The Netherlands Organization for Applied Scientific Research
UBA	Umweltbundesamt (Berlin)
UNECP	United Nations Economic Commission for Europe
UNEP	United Nations Environment Programme
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VNCI	Association of the Dutch Chemical Industry
WCED	World Commission on Environmental and Development
WMO	World Meteorological Organization

Zusammenfassung

Bei der Optimierung bestehender oder der Konzeptionierung innovativer Produktionssysteme kann die Betrachtung von Nachhaltigkeitsaspekten u.a. Informationen über Effizienzsteigerung und verminderten Ressourceneinsatz liefern, durch welche sich der Grad der mit Hilfe der Systeme zu erzielenden Wertschöpfung erhöhen lässt. Nach dem „3-Säulen-Konzept der Nachhaltigkeit“ spielen bei einer Nachhaltigkeitsbetrachtung neben ökonomischen und sozialen Aspekten umweltrelevante Kriterien eine wesentliche Rolle.
In der vorliegenden Arbeit wird unter Berücksichtigung der Anforderungen der Norm EN ISO 14040 ff. „Ökobilanzen“ ein neues Methodenkonzept zur Bewertung der von Systemen wie Unternehmen, Prozessen und Produkten ausgehenden Umweltwirkungen entwickelt. Der modulare Aufbau des Methodenkonzeptes und die Einteilung in zwingend erforderliche Module (Zieldefinition, Sachbilanzierung, Wirkungsabschätzung mit Wirkprofil, Auswertung) und optional anwendbare Module (System-Modellierung, Wirkungsabschätzung mit Kennzahlen, Unsicherheitsbetrachtung, Szenarientechnik) erlauben dem Anwender eine fallweise Festlegung des Umfangs der Umweltbilanz bzw. des Verhältnisses von Aufwand zu Nutzen. Eine Berücksichtigung der optionalen Module erhöht zwar den Aufwand für die Erstellung der Umweltbilanz, zugleich wird die Umweltbilanz jedoch aufgrund der zusätzlichen Absicherung der Untersuchungsergebnisse höheren Ansprüchen gerecht.

Die Ergebnisse umweltrelevanter Bewertungen sind in hohem Maße von der angewandten Methode zur Wirkungsabschätzung abhängig. In der Wirkungsabschätzung einer Umweltbilanz findet eine Verknüpfung von Sachverhalten mit ökologieorientierten, häufig subjektiven Wertmaßstäben statt. Diese Verknüpfung stellt vielfach den Schwachpunkt einer Umweltbilanz dar, weil die angewandten Wertmaßstäbe nur sehr schwierig kommunizierbar sind. Eine wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse wird erschwert, was unter Umständen zu einer falschen Entscheidungsgrundlage planerischen Handelns führen kann.
Mit dem Ziel, die Ergebnisse einer umweltrelevanten Bewertung unabhängig von der verwendeten Methode zur Wirkungsabschätzung zu machen, wurde das in dieser Arbeit vorgestellte Methodenkonzept entwickelt. Erreicht wird diese Zielsetzung mit der gleichzeitigen Anwendung mehrerer, aus der Literatur bekannter und allgemein akzeptierter Wirkungsabschätzungen, welche die Wirkungen anthropogenen Handelns auf die Umwelt mit Hilfe von verschiedenen Kennzahlen bzw. mit einem komplexen Wirkungsabschätzungsprofil beschreiben. Die auf Kennzahlen beruhenden Wirkungsabschätzungen verzichten aufgrund des

integralen Ansatzes auf Transparenz in der methodischen Vorgehensweise zu Gunsten einer vereinfachten Darstellung komplexer Gegebenheiten, welche z.B. durch eine geeignete Datenverdichtung erfolgen kann. Die Wirkungsabschätzung mit Wirkungsprofil liefert dagegen einen Vektor verschiedener Wirkungen z.B. in den Kategorien Human-, Ökotoxizität, globale Erwärmung, Versauerung, Eutrophierung, Bildung von Photooxidantien oder stratosphärischer Ozonabbau als Ergebnis, ohne eine abschließende Gewichtung der Wirkungen untereinander durchzuführen.
Der im neu entwickelten Methodenkonzept umgesetzte Methodenpluralismus verhindert eine eingeschränkte subjektive Sichtweise, da methodisch bedingte Einflüsse auf die Ergebnisse umweltrelevanter Bewertungen vereinfacht herausgearbeitet werden können. Das Methodenkonzept besticht durch eine hohe Transparenz in der Vorgehensweise und objektive, nachvollziehbare Ergebnisse sowie ableitbaren Handlungsempfehlungen.

Neu an dem Methodenkonzept zur Umweltbilanzierung ist die erstmals durchgeführte Verknüpfung der Vorgaben der Norm EN ISO 14040 ff. „Ökobilanzen“ mit auf Kennzahlen beruhenden Wirkungsabschätzungen, mit den Grundlagen der Modellierung zur Ergänzung von Sachbilanzdaten, mit der angewendeten Szenarientechnik zur Prognostik sowie mit der Berücksichtigung von Daten- und Methodik-Unsicherheiten. Die vorliegende Arbeit stellt folglich einen umfassenden Leitfaden für die Ausarbeitung von Umweltbilanzen dar.

Die Leistungsfähigkeit und die Grenzen des hier vorgestellten Methodenkonzeptes zur Umweltbilanzierung werden an den verfahrenstechnischen Prozessen der kommunalen Abwasserreinigung aufgezeigt. Zu diesem Zweck wird die Betriebsphase einer kommunalen Kläranlage modelliert, wobei die Auslegung allein auf einer Massen- und Energiebilanzierung stationärer Prozesse sowie auf der Berücksichtigung stöchiometrischer Beziehungen beruht. Die Daten der Sachbilanz werden mit Hilfe der im Konzept festgelegten Methoden zur Wirkungsabschätzung bewertet, um die umweltrelevanten Optimierungspotenziale der herkömmlichen kommunalen Kläranlagentechnik unter Berücksichtigung vorhandener Unsicherheiten ermitteln zu können. In Szenarien werden über den prognostischen Einsatz der Methode grundlegende Entwicklungsrichtungen der kommunalen Abwasserreinigung aufgezeigt, indem potenzielle Auswirkungen neuer Techniken abgeschätzt werden.

Mit dem Methodenkonzept zur Umweltbilanzierung konnte der energieintensive Sauerstoffeintrag in die Belebung sowie die Klärschlammentsorgung als bereits bekannte Schwachstelle

der kommunalen Abwasserreinigung bestätigt werden. Die aufgezeigten hohen umweltrelevanten Wirkungen der Inhaltsstoffe des Klärschlamms, welche vor allem humantoxisch und ökotoxisch wirken können, sprechen deutlich gegen eine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlamms und die damit verbundene Rückführung der Schadstoffe in die menschliche Nahrungskette.

Die Auswertung der Umweltbilanz kommunaler Kläranlagentechnik zeigt, dass die in Deutschland favorisierte Reinigung von kommunalen Abwässern vor allem auf eine Reduzierung der Abwasserinhaltsstoffe mit versauernden und eutrophierenden Wirkungen ausgerichtet ist. Durch die im kommunalen Abwasser vorhandenen hohen Konzentrationen an Mikroverunreinigungen wie z.B. Pestiziden, Medikamentenrückständen, endokrin-wirkende Industriechemikalien und anderen Xenobiotika, welche voraussichtlich in Zukunft durch eine Anreicherung in natürlichen Stoffkreisläufen ins Zentrum der Betrachtungen gerückt werden, werden an die kommunale Abwassertechnik neue Anforderungen gestellt. Können die Problemstoffe nicht durch energetisch günstige selektive Trenntechniken entfernt werden, bleiben die Membranverfahren ein wenn auch energieintensives Mittel der Wahl. In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz verschiedener Membranmodule in kommunalen Kläranlagen mit Hilfe der Szenarientechnik modelliert. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass in der kommunalen Abwasserreinigung vor allem der Einsatz von im Dead-End Modus betriebenen Ultrafiltrationsmembranen aus umweltrelevanter Sicht erfolgsversprechend und auch notwendig erscheint.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Untersuchung stellt sich generell die Frage, ob eine Leistungsbewertung kommunaler Kläranlagen anhand der herkömmlichen Parameter BSB_5, Stickstoff und Phosphor in Zukunft noch den Aufgabenschwerpunkt kommunaler Klärtechnik widerspiegelt. Die Überwachung der Abwassereinleitung kann zwar auch zukünftig zum großen Teil stoffbezogen durchgeführt werden, jedoch werden zusätzlich Mikroverunreinigungen und hygienische Parameter einen wichtigen Stellenwert einnehmen. Hier gilt es, zur Ergänzung der Überwachungsmessungen effektbezogene Untersuchungen z.B. mit Hilfe von Biotestsystemen durchzuführen.

Mit der Anwendung auf die kommunale Kläranlagentechnik wird die Praxistauglichkeit des zunächst theoretisch entwickelten Methodenkonzeptes zur Umweltbilanzierung nachgewiesen. Die Anwendung der Umweltbilanz auf die kommunale Kläranlagentechnik erlaubt die Analyse aktueller umweltrelevanter Schwachstellen und gibt Hinweise auf zukünftige Aufgabenstellungen im Bereich der Abwasserbehandlung.