

# I. Inhaltsverzeichnis

<b>II. Abbildungsverzeichnis</b>	<b>II-1</b>
<b>III. Tabellenverzeichnis</b>	<b>III-1</b>
<b>IV. Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>III-1</b>
<b>1. Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1-1</b>
<b>2. Umweltbelastung durch endokrin wirksame Stoffe</b>	<b>2-1</b>
2.1. Endokrin wirksame Substanzen in der Umwelt	2-1
2.1.1. <i>Begriffsbestimmung</i>	2-1
2.1.2. <i>Klassifizierung endokrin wirksamer Substanzen</i>	2-3
2.1.3. <i>Physikalisch-chemische Eigenschaften von endokrin wirksamen Substanzen</i>	2-12
2.2. Nachweis endokrin wirksamer Substanzen	2-14
2.2.1. <i>Chemische Spurenanalytik</i>	2-15
2.2.2. <i>Biologische Wirtstests</i>	2-18
2.3. Vorkommen von endokrin wirksamen Substanzen in aquatischen Systemen	2-21
2.3.1. <i>Vorkommen in Oberflächengewässern</i>	2-21
2.3.2. <i>Vorkommen in Kläranlagenzu- und abläufen</i>	2-21
2.3.3. <i>Estrogene Gesamtaktivität in Abläufen von kommunalen Kläranlagen</i>	2-25
2.3.4. <i>Estrogen wirksame Substanzen in anderen Umweltmedien</i>	2-28
2.4. Maßnahmen zur Minderung der Umweltbelastung mit endokrin wirksamen Substanzen	2-29
2.5. Literatur	2-30
<b>3. Membrantechnik in der Abwasserbehandlung</b>	<b>3-1</b>
3.1. Membranfiltration als Trennprozess	3-1
3.2. Einsatzkonzepte der Membrantechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung	3-5
3.3. Motivation zur Umsetzung der Membrantechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung	3-7
3.4. Umsetzung der Membrantechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung	3-8
3.4.1. <i>Realisierte Anlagen in Deutschland und der Schweiz für die kommunale Abwasserbehandlung</i>	3-12
3.5. Wirtschaftlichkeit der Membrantechnik in der Abwasserbehandlung	3-21
3.5.1. <i>Wirtschaftlichkeit von Membranbelebungsanlagen</i>	3-21
3.5.2. <i>Gesamtkostenvergleich von Membranbelebungsanlagen und konventioneller Technik</i>	3-29
3.6. Wirtschaftlichkeit von Membrananlagen zur Ertüchtigung konventioneller Anlagen	3-30
3.6.1. <i>Ausbau „Membranbelebungsanlage“</i>	3-31
3.6.2. <i>Ausbau „Ablauffiltration mit Ultrafiltration“</i>	3-35
3.6.3. <i>Ausbau „Ablauffiltration mit Nanofiltration“</i>	3-37
3.6.4. <i>Kostenvergleich</i>	3-39
3.7. Leistungsmindernde Faktoren bei der Membranfiltration	3-41
3.8. Literatur	3-45
<b>4. Verhalten von endokrin wirksamen Substanzen in Abwasserreinigungsanlagen</b>	<b>4-1</b>
4.1. Phasenverteilung endokrin wirksamer Substanzen	4-1
4.1.1. <i>Natürliche und synthetische Estrogene</i>	4-2

4.1.2. <i>Xenoestrogene</i>	4-3
4.2. <b>Biologische Abbaubarkeit</b>	4-7
4.2.1. <i>Natürliche und synthetische Estrogene</i>	4-7
4.2.2. <i>Xenoestrogene</i>	4-8
4.3. <b>Bilanzierung des Verhaltens von EDCs in kommunalen Kläranlagen</b>	4-16
4.3.1. <i>Reinigungsleistung von konventionellen Belebtschlammanlagen</i>	4-16
4.3.2. <i>Vergleichende Untersuchungen mit Membranbelebungsanlagen</i>	4-21
4.4. <b>Messprogramm auf der Kläranlage Aachen-Eilendorf</b>	4-24
4.4.1. <i>Anlagenbeschreibung und Versuchsdurchführung</i>	4-24
4.4.2. <i>Ergebnisse und Diskussion</i>	4-27
4.5. <b>Literatur</b>	4-33
<b>5. Verhalten endokrin wirksamer Substanzen in Behandlungsanlagen für Deponiesickerwasser</b>	<b>5-1</b>
5.1. <b>Grundlagen der Behandlung von Deponiesickerwasser</b>	5-1
5.1.1. <i>Abfallentsorgung und Deponiesickerwasser</i>	5-1
5.1.2. <i>Bildung von Deponiesickerwasser</i>	5-2
5.1.3. <i>Eigenschaften von Deponiesickerwasser</i>	5-3
5.2. <b>Behandlungskonzepte für Deponiesickerwasser</b>	5-4
5.2.1. <i>Biologische Behandlung</i>	5-8
5.2.2. <i>Adsorption</i>	5-6
5.2.3. <i>Chemische Oxidation</i>	5-7
5.2.4. <i>Membranverfahren</i>	5-7
5.2.5. <i>Konzentratentsorgung</i>	5-8
5.3. <b>Spurensubstanzen im Deponiesickerwasser</b>	5-9
5.4. <b>Großtechnische Behandlungsanlagen für Deponiesickerwasser</b>	5-10
5.4.1. <i>Behandlungsanlage für Deponiesickerwasser in Alsdorf Warden</i>	5-10
5.4.2. <i>Deponiesickerwasserbehandlungsanlage Berg</i>	5-16
5.4.3. <i>Aufbereitung und Messung der Proben</i>	5-18
5.5. <b>Ergebnisse der Untersuchungen an der Anlage Alsdorf-Warden</b>	5-19
5.5.1. <i>Allgemeine Betriebsparameter der Anlage Alsdorf-Warden</i>	5-19
5.5.2. <i>Verhalten von Nonylphenol in der Anlage Alsdorf-Warden</i>	5-20
5.5.3. <i>Verhalten von Bisphenol A in der Anlage Alsdorf-Warden</i>	5-25
5.5.4. <i>Vergleich mit Ergebnissen der Untersuchung mit biologischen Wirtstests</i>	5-31
5.5.5. <i>Weitergehende Untersuchung des Belebtschlammes der Anlage Alsdorf-Warden</i>	5-31
5.6. <b>Ergebnisse der Untersuchungen an der Anlage Berg</b>	5-35
5.7. <b>Zusammenfassung und Bewertung</b>	5-37
5.8. <b>Literatur</b>	5-38
<b>6. Modellierung und Simulation der Filtrationsleistung in Membranbioreaktoren</b>	<b>6-1</b>
6.1. <b>Grundlagen der Modellierung leistungsbestimmender Prozesse bei der Membranfiltration</b>	6-1
6.2. <b>Modellierung des Stofftransportes durch Membranen</b>	6-3
6.2.1. <i>Porenmodell</i>	6-4
6.2.2. <i>Diffusionsmodelle / Deckschichtkontrollierter Stoffaustausch</i>	6-5
6.2.3. <i>Hydrodynamische Modelle</i>	6-6
6.2.4. <i>Erweiterte Diffusionsmodelle</i>	6-6
6.2.5. <i>Ablagerungsmodelle</i>	6-7
6.2.6. <i>Einflussfaktoren auf die Filtrationsleistung von Membranbioreaktoren</i>	6-7
6.3. <b>Modellierungsansatz für ein getauchtes Kapillarmodul</b>	6-8
6.3.1. <i>Idealisierungen und Annahmen zur Beschreibung der Geometrie</i>	6-9
6.4. <b>Modellierung der Luftblasen-Überströmung</b>	6-12

6.5.	Das Serienwiderstandsmodell und triebkraftmindernde Faktoren	6-14
6.5.1.	<i>Modellierung der Permeabilitätsentwicklung</i>	6-15
6.5.2.	<i>Widerstandswerte aus Literaturangaben</i>	6-23
6.5.3.	<i>Analyse der Simulationseignung des Modells</i>	6-24
6.6.	Fallstudie I: Permeabilitätsentwicklung auf der Kläranlage Rödigen	6-26
6.6.1.	<i>Betrachtung der Permeabilitätsentwicklung auf der langen Zeitskala</i>	6-26
6.6.2.	<i>Permeabilitätsbeeinflussende Faktoren</i>	6-28
6.7.	Simulationsergebnisse in der Fallstudie I – Kläranlage Rödigen	6-29
6.7.1.	<i>Simulation von Filtrationsstraße II</i>	6-29
6.7.2.	<i>Simulation von Filtrationsstraße I (alte Membran)</i>	6-31
6.7.3.	<i>Simulation von Filtrationsstraße I (neue Membran)</i>	6-32
6.8.	Simulation mit dynamischer Parameteranpassung	6-34
6.9.	Betrachtung der Vorgänge auf den kurzen Zeitskalen auf der Anlage Rödigen	6-37
6.9.1.	<i>Intensivmessphasen</i>	6-38
6.9.2.	<i>Betrachtung des Permeabilitätsverlaufs in Rückspülzyklen</i>	6-38
6.10.	Fallstudie II: Simulation der Permeabilitätsentwicklung auf der Pilotanlage Beverwijk	6-44
6.11.	Fallstudie III: Permeabilitätsentwicklung auf der Pilotanlage Aachen-Eilendorf	6-46
6.12.	Zusammenfassung und Bewertung	6-48
6.13.	Literatur	6-50
<b>7.</b>	<b>Integrierte Modellierung und Simulation von Membranbelebungsanlagen</b>	<b>7-1</b>
7.1.	Belebtschlamm-Modelle – Activated Sludge Models (ASM) 1-3	7-2
7.1.1.	<i>ASM 1-3</i>	7-2
7.2.	Programmierzuge zur dynamischen Prozesssimulation	7-9
7.2.1.	<i>Die Entwicklungs- und Simulationsumgebung MATLAB / Simulink</i>	7-9
7.3.	Modellierung eines Membranbioreaktors in Matlab / Simulink	7-11
7.3.1.	<i>Aufbau und Funktion des Simulationswerkzeugs SIMBRa</i>	7-11
7.3.2.	<i>Übergeordnete Oberfläche zur Prozessdarstellung und Simulationsüberwachung</i>	7-13
7.3.3.	<i>Flow-Sheet</i>	7-13
7.3.4.	<i>Subsystems, Blocks</i>	7-14
7.3.5.	<i>Matlab-Skripte und s-functions</i>	7-15
7.4.	Modellierung der Einzelkomponenten des MBR und Implementation einer Beispielanlage	7-15
7.4.1.	<i>Zulauf</i>	7-15
7.4.2.	<i>Bioreaktor</i>	7-15
7.4.3.	<i>Belüftungsstrategie</i>	7-17
7.4.4.	<i>Kenngrößenberechnung MBR</i>	7-17
7.4.5.	<i>Implementation und Simulation der Membranstufe</i>	7-17
7.4.6.	<i>Modellierung eines Rohrmoduls</i>	7-18
7.4.7.	<i>Füllstand / Füllvolumen</i>	7-21
7.4.8.	<i>Rezirkulation / Überschussschlammabzug</i>	7-22
7.5.	Simulation der Membranbelebungsanlage Rödigen	7-22
7.5.1.	<i>Darstellung der Anlage in einem SIMBRa Modell</i>	7-23
7.5.2.	<i>Simulationsergebnisse und Bewertung</i>	7-24
7.6.	Die Sickerwasserbehandlungsanlage Aisdorf-Warden	7-28
7.6.1.	<i>Membranbiologie</i>	7-28
7.6.2.	<i>Mischung</i>	7-29
7.6.3.	<i>Membranstufe</i>	7-30
7.6.4.	<i>Zudosierung von Methanol</i>	7-30
7.6.5.	<i>Modellierungskonzept für den Belebtschlamm</i>	7-31
7.6.6.	<i>Darstellung der Simulationsergebnisse</i>	7-31

<b>7.7. Simulationsstudien zum Verhalten von Bisphenol A in einem MBR zur Behandlung von Deponiesickerwasser</b>	<b>7-33</b>
7.7.1. <i>Erweiterung des ASM zur Berücksichtigung von Bisphenol A</i>	7-33
7.7.2. <i>Ermittlung der Parameter aus Literaturwerten</i>	7-34
7.7.3. <i>Erweiterung des BPA-Modells um Adsorption</i>	7-35
7.7.4. <i>Modellkalibrierung und Simulationsergebnisse für Bisphenol A</i>	7-36
7.7.5. <i>Sensitivitätsanalysen mit dem Modell zur BPA-Darstellung</i>	7-40
<b>7.8. Zusammenfassung und Fazit der integrativen Modellierung</b>	<b>7-42</b>
<b>7.9. Literatur</b>	<b>7-44</b>
<b>8. Alternative Verfahren zum Rückhalt von Spurenschadstoffen in der Abwasserbehandlung, Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>8-1</b>
<b>8.1. Membranverfahren zum Rückhalt organischer Spurensubstanzen</b>	<b>8-1</b>
8.1.1. <i>Entfernung von Steroidhormonen mit Nanofiltrationsmembranen</i>	8-2
8.1.2. <i>Entfernung von Xenoestrogenen mit Nanofiltrationsmembranen</i>	8-2
<b>8.2. Andere Verfahren zur Elimination von Spurenschadstoffen aus Abwasser</b>	<b>8-3</b>
8.2.1. <i>Oxidative Verfahren</i>	8-3
8.2.2. <i>Photolyseverfahren</i>	8-4
8.2.3. <i>Adsorption an Aktivkohle</i>	8-5
8.2.4. <i>Adsorption an andere Stoffe</i>	8-5
<b>8.3. Vergleichende Untersuchungen im Pilotmaßstab</b>	<b>8-6</b>
8.3.1. <i>Demonstrationsanlage für Wasserrecycling-Technologie</i>	8-6
8.3.2. <i>Membranverfahren in der Demonstrationsanlage</i>	8-7
8.3.3. <i>Zudosierung, Probenahme und Analyse von Steroidhormonen</i>	8-8
8.3.4. <i>Ergebnisse und Diskussion</i>	8-8
<b>8.4. Zusammenfassung und Fazit der gesamten Dissertation</b>	<b>8-11</b>
<b>8.5. Literatur</b>	<b>8-15</b>
<b>9. Executive Summary</b>	<b>9-1</b>
<b>10. Anhang</b>	<b>10-1</b>
10.1. <i>Anhang zu Kapitel 6</i>	10-1
10.2. <i>Anhang zu Kapitel 7</i>	10-2
10.2.1. <i>Modellgleichung und Parameter im ASM3</i>	10-2
10.2.2. <i>Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Systemkonfigurationen</i>	10-9

## II. Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1:</b> Direkte und indirekte Einflussmöglichkeiten von Fremdstoffen auf das endokrine System /ATV, 1999/.....	2-2
<b>Abbildung 2.2:</b> Wirkung endokriner Stoffe /Weber und Coors, 2001/.....	2-3
<b>Abbildung 2.3:</b> Klassifizierung endokriner wirksamer Stoffe /Weber et al. 2001/.....	2-4
<b>Abbildung 2.4:</b> Strukturformel von Estradiol /Bay. Landesamt für Wasserwirtschaft, 1997/.....	2-4
<b>Abbildung 2.5:</b> Strukturformel von Estron /Bay. Landesamt für Wasserwirtschaft, 1997/.....	2-5
<b>Abbildung 2.6:</b> Strukturformel von $17\alpha$ -Ethinylestradiol.....	2-5
<b>Abbildung 2.7:</b> Schematische Darstellung zum Metabolismus von Pharmaka /ATV, 1999/.....	2-7
<b>Abbildung 2.8:</b> Pharmaka und endokrin wirksame Verbindungen /ATV, 1999/.....	2-7
<b>Abbildung 2.9:</b> Nonylphenolverbindungen /Ahel, 1994/.....	2-9
<b>Abbildung 2.10:</b> Strukturformel von Bisphenol A.....	2-10
<b>Abbildung 2.11:</b> Nachweis von Xenoestrogenen (NP, BPA) aus Belebtschlamm und Klärschlamm /nach Meesters, 2002/.....	2-15
<b>Abbildung 2.12:</b> Chromatogramme (A) im „Total Ion Count“ TIC-Modus, (B) mit den Massenspuren $m/z$ 107,121 und 135 für 4-Nonylphenol sowie 213 und 270 für Bisphenol A, (C) der Standardlösung mit derivatisiertem 4-NP und Bisphenol A (acetyliert) /Meesters, 2002/.....	2-17
<b>Abbildung 2.13:</b> Chemischer Nachweis von natürlichen und synthetischen Steroidhormonen aus Kläranlagenabläufen /nach Weber, 2003/.....	2-18
<b>Abbildung 2.14:</b> Prinzip der biologischen Wirktests mit Reporterorganen /Weber und Coors, 2001/.....	2-19
<b>Abbildung 2.15:</b> Dosis-Wirkungsbeziehung bei biologischen Wirktests /Weber und Coors, 2001/.....	2-20
<b>Abbildung 2.16:</b> Estrogen wirksame Substanzen in Abläufen von Kläranlagen /Spengler, 1999/.....	2-25
<b>Abbildung 2.17:</b> Estradiol-Equivalenzfaktoren /Körner, 2000/.....	2-26
<b>Abbildung 2.18:</b> Molare Konzentrationen und Estradiolequivalenzkonzentrationen /Nach Körner, 2000/.....	2-27
<b>Abbildung 2.19:</b> Anteile einzelner Substanzen an der estrogenen Gesamtaktivität.....	2-27
<b>Abbildung 3.1:</b> Abbildung Trennprinzip bei Membranprozessen /Melin et al., 2004/.....	3-2
<b>Abbildung 3.2:</b> Druckgetriebene Membranverfahren /Melin et al., 2004/.....	3-3
<b>Abbildung 3.3:</b> Dead-End- und Cross-Flow-Filtration /Melin, 2000/.....	3-4
<b>Abbildung 3.4:</b> Betriebsweise bei getauchten Membranen /Melin et al., 2004/.....	3-4
<b>Abbildung 3.5:</b> Einsatzkonzepte für die Membrantechnik in der kommunalen Abwasserbehandlung /Melin et al., 2001/.....	3-5
<b>Abbildung 3.6:</b> MBR Industrie in Deutschland /Melin, 2004c/.....	3-10
<b>Abbildung 3.7:</b> Kläranlage Rödigen /Mohne, 2001/.....	3-13
<b>Abbildung 3.8:</b> Prinzipskizze der Kläranlage Nordkanal /Engelhardt, 2003/.....	3-15
<b>Abbildung 3.9:</b> Vergleich der Investitionskosten für die Anlage Nordkanal /Engelhardt et al., 2001/.....	3-22
<b>Abbildung 3.10:</b> Zeitliche Entwicklung des spezifischen Membranpreises.....	3-23
<b>Abbildung 3.11:</b> Modulpreis in Abhängigkeit des Membranflächenbedarfs.....	3-23
<b>Abbildung 3.12:</b> Spezifischer Permeatfluss bei hydraulischen Lastschwankungen /Melin et al., 2001/.....	3-24
<b>Abbildung 3.13:</b> Mischwasserzufluss, Trockenwetterzufluss und ihr Verhältnis bei der Auslegung von Membranbelebungsanlagen.....	3-25
<b>Abbildung 3.14:</b> Energieverbrauch im Jahr 2001 für die Kläranlage /Engelhardt et al., 2001/.....	3-26
<b>Abbildung 3.15:</b> Spezifischer Energieverbrauch der realisierten Anlagen.....	3-27
<b>Abbildung 3.16:</b> Spezifischer Energieverbrauch einzelner Aggregate auf der KA Markranstädt /Stein, 2003/.....	3-27

<b>Abbildung 3.17:</b> Vergleich der spezifischen Membrankosten /Melin et al., 2001/ .....	3-29
<b>Abbildung 3.18:</b> Zusammenhang von spezifischem Energieverbrauch und Fluss.....	3-30
<b>Abbildung 3.19:</b> Erforderliche jährliche Rücklagen in Abhängigkeit vom Membranpreis für verschiedene Membranstandzeiten .....	3-32
<b>Abbildung 3.20:</b> Jährliche Energiekosten in Bezug auf unterschiedliche Kostenbasen.....	3-34
<b>Abbildung 3.21:</b> Aufteilung des Energieverbrauchs auf einzelne Verbrauchsstellen .....	3-34
<b>Abbildung 3.22:</b> Nanofiltrationsanlage Méry-sur-Oise /Beros, 2001/ .....	3-38
<b>Abbildung 3.23:</b> Betriebskostenvergleich der Ausbauszenarien .....	3-40
<b>Abbildung 3.24:</b> Spezifische Kosten und jährliche Kapitalkosten aus der Investition .....	3-40
<b>Abbildung 3.25:</b> MBR-Gesamtkosten in Abhängigkeit von Auslegungfluss und Membranstandzeit.....	3-41
<b>Abbildung 4.1:</b> Bindungsstudien mit NP und BPA and Huminsäuren /Vinken et al., 2001/ .....	4-5
<b>Abbildung 4.2:</b> Verteilungsgleichgewichte von BPA (links) und NP (rechts) mit DOM (Huminsäuren aus Torf) /Vinken et al., 2001/ .....	4-5
<b>Abbildung 4.3:</b> Abbau von Estradiol und Ethinylestradiol in Belebtschlamm /Weber, 2004/ .....	4-7
<b>Abbildung 4.4:</b> Biotransformation von Nonylphenolverbindungen /Ahel et al., 1994/ .....	4-9
<b>Abbildung 4.5:</b> Bilanzierende Abbauversuche mit 4-n-Nonylphenol in Belebtschlamm /Naasner, 2004/ .....	4-12
<b>Abbildung 4.6:</b> Abbau von Bisphenol A unter Einsatz des Bakterienstammes MV1 /Lobos et al.,1992 / .....	4-15
<b>Abbildung 4.7:</b> Ergebnisse einer Steroidhormon-Stichprobe /Günder, 1999/ .....	4-21
<b>Abbildung 4.8:</b> Ergebnisse einer Xenoestrogen-Stichprobe /Günder, 1999/ .....	4-22
<b>Abbildung 4.9:</b> Fließschema der Kläranlage Aachen-Eilendorf.....	4-25
<b>Abbildung 4.10:</b> Fließbild der MBR-Pilotanlage.....	4-26
<b>Abbildung 4.11:</b> MBR-Pilotanlage und Schema des eingesetzten Membranmoduls.....	4-27
<b>Abbildung 4.12:</b> Ablaufkonzentrationen im Permeat der Membranbelebungsanlage .....	4-28
<b>Abbildung 4.13:</b> Trockensubstanzgehalte in der Membranbelebungsanlage .....	4-28
<b>Abbildung 4.14:</b> NP-Konzentrationen in MBR und ARA der Anlage Aachen-Eilendorf .....	4-29
<b>Abbildung 4.15:</b> BPA-Konzentrationen im MBR und ARA.....	4-30
<b>Abbildung 4.16:</b> Vergleich BPA-Belastung des MBR- und ARA-Belebtschlammes.....	4-31
<b>Abbildung 4.17:</b> NP-/BPA-Konzentration während des Dosierversuches /Lyko et al., 2003/ .....	4-32
<b>Abbildung 5.1:</b> Wasserbilanz in einer Deponie /Melin et al., 2004/ .....	5-2
<b>Abbildung 5.2:</b> Zusammensetzung von Deponiesickerwasser /gemäß Dahm et al., 1994/.....	5-3
<b>Abbildung 5.3:</b> Gesamt-Fließschema der Anlage Alsdorf-Warden mit allen betrachteten Anlagenteilen .....	5-11
<b>Abbildung 5.4:</b> Deponiesickerwasserbehandlungsanlage A mit Membranbioreaktor und Aktivkohleadsorption (GAC).....	5-12
<b>Abbildung 5.5:</b> Ultrafiltration auf der Anlage Alsdorf-Warden.....	5-13
<b>Abbildung 5.6:</b> Vergleich von Rohsickerwasser und Ablauf der A-Kohle Filtration.....	5-14
<b>Abbildung 5.7:</b> Fließbild der Anlage Berg.....	5-18
<b>Abbildung 5.8:</b> CSB-Konzentrationen in der Deponiesickerwasserbehandlungsanlage Alsdorf-Warden .....	5-19
<b>Abbildung 5.9:</b> Nonylphenol-Konzentrationen in Alsdorf-Warden .....	5-21
<b>Abbildung 5.10:</b> Massenbilanz von Nonylphenol in der Anlage Alsdorf-Warden .....	5-21
<b>Abbildung 5.11:</b> Modellergebnisse hinsichtlich des Anteils des NP-Verflüchtigung an der Gesamtelimination im MBR.....	5-24
<b>Abbildung 5.12:</b> Bisphenol A Konzentrationen in verschiedenen Prozessstufen.....	5-25
<b>Abbildung 5.13:</b> Bisphenol A in der Festphase des Belebtschlammes in der Anlage Alsdorf-Warden.....	5-26

<b>Abbildung 5.14:</b> Bisphenol A Bilanz in der Anlage Alsdorf-Warden .....	5-27
<b>Abbildung 5.15:</b> Bisphenol A Konzentrationen in der Anlage Alsdorf-Warden /Lyko et al., 2004/ ...	5-28
<b>Abbildung 5.16:</b> Gerührte Testzelle für Belebtschlammfiltration mit Flachmembranen .....	5-30
<b>Abbildung 5.17:</b> LC-OCD Ergebnis der Flüssigphasenuntersuchung des Belebtschlammes der Anlage Alsdorf-Warden /Rosenberger et al., 2004/.....	5-32
<b>Abbildung 5.18:</b> Chromatogramme der eingesetzten Dextran-Standards .....	5-34
<b>Abbildung 5.19:</b> Chromatogramme der filtrierten Belebtschlamm und Permeatprobe.....	5-34
<b>Abbildung 5.20:</b> Nonylphenol und Bisphenol A Konzentration in der Anlage Berg.....	5-36
<b>Abbildung 5.21:</b> Nonylphenol Massenbilanz in der Anlage Berg.....	5-37
<b>Abbildung 6.1:</b> Lösungs-Diffusions- und Porenmodell /IVT, 2000/.....	6-3
<b>Abbildung 6.2:</b> Ausbildung von Konzentrations- und Geschwindigkeitsprofil an der Membran bei tangentialer Überströmung /Melin et al., 2004/ .....	6-4
<b>Abbildung 6.3:</b> Stoffübergang bzw. erzielbare Permeatflussleistung an der Membran in Abhängigkeit von der Molekül- bzw. Partikelgröße im Feed (bei konstantem transmembranen Druck) .....	6-5
<b>Abbildung 6.4:</b> Druckverhältnisse an einem Kapillarmodul /Günder, 1999/ .....	6-10
<b>Abbildung 6.5:</b> Hexagonaler Bereich um eine Kapillare in einem Membranmodul .....	6-11
<b>Abbildung 6.6:</b> Querschnitt eines Kapillarmoduls.....	6-11
<b>Abbildung 6.7:</b> Schematische Darstellung des Slug-Flow /Chang et al., 2000b/.....	6-13
<b>Abbildung 6.8:</b> Prozesse und Reinigungen an der Membran.....	6-14
<b>Abbildung 6.9:</b> Auswirkung des Stoffübergangskoeffizienten $k_p$ auf die erforderliche Triebkraft....	6-20
<b>Abbildung 6.10:</b> Permeabilität als Funktion des Flusses und der Scherrate bei $d_c=1\mu\text{m}$ .....	6-20
<b>Abbildung 6.11:</b> Die Systemwandkonzentration in Abhängigkeit des Stoffübergangskoeffizienten und des flächenspezifischen Permeatflusses (mit $c_p = 15\text{ g/l}$ ).....	6-21
<b>Abbildung 6.12:</b> Der Foulingwiderstand in Abhängigkeit seines Koeffizienten und des kumulierten Permeatflusses.....	6-22
<b>Abbildung 6.13:</b> Transmembrane Druckdifferenz in Abhängigkeit seines Koeffizienten und des kumulierten Permeatflusses .....	6-26
<b>Abbildung 6.14:</b> Die Permeabilitätszyklen auf der Kläranlage Rödigen .....	6-27
<b>Abbildung 6.15:</b> Temperaturabhängigkeit der Viskosität.....	6-28
<b>Abbildung 6.16:</b> Einjähriger Permeabilitätszyklus in Straße II der Anlage Rödigen.....	6-30
<b>Abbildung 6.17:</b> Permeabilitätszyklus in Straße I mit erfolgter Zwischenreinigung .....	6-31
<b>Abbildung 6.18:</b> Simulation des Permeabilitätszyklus in Straße I für die neue Membran .....	6-33
<b>Abbildung 6.19:</b> Simulation des Permeabilitätszyklus in Straße I für die neue Membran .....	6-34
<b>Abbildung 6.20:</b> Modellstruktur mit dynamischer Parameteranpassung .....	6-35
<b>Abbildung 6.21:</b> Mathematische Grundlagen der dynamischen Parameteranpassung .....	6-36
<b>Abbildung 6.22:</b> Simulation auf Grundlage des Modells mit dynamischer Parameteranpassung....	6-36
<b>Abbildung 6.23:</b> Parameterverläufe bei der Simulation mit dynamischer Parameteranpassung... ..	6-37
<b>Abbildung 6.24:</b> Simulation der Permeabilität auf Grundlage einer Wochenganglinie.....	6-38
<b>Abbildung 6.25:</b> Verlauf von Fluss und Arbeitsdruck zwischen zwei Rückspülungen (Straße2) .....	6-39
<b>Abbildung 6.26:</b> Permeabilitätsverlaufs nach einer Rückspülung (Straße 2).....	6-40
<b>Abbildung 6.27:</b> Simulation des zeitlichem Verlaufs der Konzentrationsüberhöhung.....	6-41
<b>Abbildung 6.28:</b> Rückstandsummenkurven (R) für: Membran und Abwasser (links) .....	6-42
<b>Abbildung 6.29:</b> Prinzipieller Verlauf von: $R^{\text{Membran}}$ (oberes Diagramm), $g$ eines Fluids (oberes Diagramm) und dem System Membranpore und Fluidpartikel $R^{\text{Membran}} \cdot g_{\text{Abwasser}}$ (unteres Diagramm).....	6-43
<b>Abbildung 6.30:</b> Betriebsdaten der Pilotanlage „Beverwijk“ und Simulationsergebnisse .....	6-45
<b>Abbildung 6.31:</b> Betriebsdaten der Pilotanlage „Beverwijk“ und Simulationsergebnisse mit Parameternachführung.....	6-46
<b>Abbildung 6.32:</b> Betriebsdaten der Pilotanlage „Eilendorf“ und Simulationsergebnisse .....	6-47

<b>Abbildung 7.1:</b> Stoffwechselwege gemäß ASM 3 /Henze et al., 1999/ .....	7-5
<b>Abbildung 7.2:</b> Fließschema zur Bilanzierung eines Membranbioreaktors .....	7-7
<b>Abbildung 7.3:</b> Stoffstrombilanz der Komponente $X_H$ (heterotrophe Mikroorganismen) .....	7-8
<b>Abbildung 7.4:</b> Strukturgramm des interaktiven Simulationswerkzeugs SiMBRa /Rosen, 2001/.....	7-12
<b>Abbildung 7.5:</b> SiMBRa-Oberfläche zur Prozessdarstellung und Simulationsüberwachung .....	7-13
<b>Abbildung 7.6:</b> Fließschema eines Membranbioreaktors .....	7-14
<b>Abbildung 7.7:</b> Inhalt des Subsystems „DENI“ .....	7-14
<b>Abbildung 7.8:</b> Fließbild KA Rödingen mit Stoffströmen und Konzentrationen .....	7-23
<b>Abbildung 7.9:</b> SiMBRa-Fließbild der Membranbelebungsanlage Rödingen .....	7-24
<b>Abbildung 7.10:</b> Verlauf von Sauerstoffkonzentration und Alkalinität.....	7-25
<b>Abbildung 7.11:</b> Verlauf der Mikroorganismenkonzentrationen.....	7-26
<b>Abbildung 7.12:</b> Trockensubstanzgehalt und COD im Ablauf .....	7-26
<b>Abbildung 7.13:</b> Verlauf Nitratkonzentration und Gesamt-Stickstoff-Reinigungsleistung .....	7-27
<b>Abbildung 7.14:</b> Konzentrationsverlauf und Reinigungsleistung $S_{NH_4}$ (Ammonium) .....	7-27
<b>Abbildung 7.15:</b> Simulink-Fließbild der Membranbiologie in Aisdorf-Warden.....	7-29
<b>Abbildung 7.16:</b> Mischungsblock in der Simulink Implementatierung .....	7-29
<b>Abbildung 7.16a:</b> Simulink-Implementierung der Membranstufe Aisdorf-Warden .....	7-30
<b>Abbildung 7.17:</b> Abhängigkeit der Abbaurate von der BPA-Konzentration.....	7-35
<b>Abbildung 7.18:</b> Einschwingvorgang der BPA-Konzentration [mg/l] in der zweiten Nitrifikation mit dem gelösten Bisphenol links und dem partikulären an Schlamm gebundenen rechts, x-Achse: Zeit [h].	7-36
<b>Abbildung 7.19:</b> Wertepaare $\mu/K_{BPA}$ zu Bisphenol A-Mittelwerten im Jahr 2002 .....	7-37
<b>Abbildung 7.20:</b> Verlauf der Reaktionsrate $r_{BPA}$ bei verschiedenen $K_{BPA}$ Werten.....	7-38
<b>Abbildung 7.21:</b> Modellkalibrierung für die BPA-Messwerte von 2002, 2003 und Mittelwerten.....	7-38
<b>Abbildung 7.22:</b> Simulationsergebnisse für das Jahr 2002 in logarithmischer Darstellung .....	7-39
<b>Abbildung 7.23:</b> Simulationsergebnisse für das Jahr 2003 in logarithmischer Darstellung .....	7-40
<b>Abbildung 7.24:</b> Sensitivitätsanalyse bezüglich der Zulaufkonzentration.....	7-41
<b>Abbildung 7.25:</b> Sensitivitätsanalyse bezüglich des Zulaufvolumenstroms .....	7-41
<b>Abbildung 8.1:</b> Ergebnis des Membranscreenings /Gallenkemper, 2005/ .....	8-3
<b>Abbildung 8.2:</b> Demonstrationsanlage der Umweltbehörde (EPA) Queensland.....	8-6
<b>Abbildung 8.3:</b> Fließschema der Membraneinheiten.....	8-7
<b>Abbildung 8.4:</b> Konzentrationen von TOC und CSB in den Abläufen der verschiedenen Prozessstufen der Demonstrationsanlage in Brisbane/Queensland.....	8-9
<b>Abbildung 8.5:</b> Konzentrationen der Steroidhormone im Bereich der Umkehrosmose und Nanofiltration (Mittelwerte aus fünf Probenahmen).....	8-9
<b>Abbildung 8.6:</b> Konzentrationen der Steroidhormone im Bereich der Mikrofiltration (Mittelwert aus zwei Probenahmen).....	8-10
<b>Abbildung 8.7:</b> Rückhalt der Steroidhormone mit verschiedenen Membranverfahren.....	8-11



### III. Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2.1:</b> Mittlere Molemassen von Nonylphenolverbindungen.....	2-9
<b>Tabelle 2.2:</b> Physikalisch-chemische Eigenschaften von ausgewählten endokrin wirksamen Substanzen /Weber et al., 2004/.....	2-13
<b>Tabelle 2.3:</b> Östrogene in Oberflächengewässern, Gehalt in [ng/l] /Wenzel, 1998/.....	2-21
<b>Tabelle 2.4:</b> Konzentrationen endokrin wirksamer Substanzen in Kläranlagenzu- und -abläufen....	2-21
<b>Tabelle 2.5:</b> Umweltkonzentrationen der Wirkstoffe aus der Literatur und berechnete Konzentrationen im Boden /Pfeiffer, 1998/.....	2-28
<b>Tabelle 2.6:</b> Estrogene und Bisphenol A in Gülle /Wenzel, 1998/.....	2-28
<b>Tabelle 3.1:</b> Reinigungsleistung von Membranbelebungsanlagen im Vergleich zu konventionellen Belebtschlammanlagen /Kraume, 2003/.....	3-8
<b>Tabelle 3.2:</b> Membranbelebungsanlagen in Europa (Stand 2005) /aktualisiert nach Firk, 2003/.....	3-9
<b>Tabelle 3.3:</b> Membranbioreaktoren in der Reinigung von Deponiesickerwasser und Industrieabwasser /ATV, 2002/.....	3-11
<b>Tabelle 3.4:</b> Überblick der betrachteten Kläranlagen.....	3-12
<b>Tabelle 3.5:</b> Technische und betriebswirtschaftliche Kenngrößen Rödigen.....	3-13
<b>Tabelle 3.6:</b> Zulaufcharakteristik und Überwachungswerte der Anlage Rödigen.....	3-14
<b>Tabelle 3.7:</b> Zuflusscharakteristik und Überwachungswerte der Anlage Nordkanal.....	3-14
<b>Tabelle 3.8:</b> Technische und betriebswirtschaftliche Kenngrößen der Anlage Nordkanal.....	3-14
<b>Tabelle 3.9:</b> Technische und betriebswirtschaftliche Kenngrößen der Anlage Knautnaundorf.....	3-16
<b>Tabelle 3.10:</b> Technische und betriebswirtschaftliche Kenngrößen der Anlage Säntis.....	3-16
<b>Tabelle 3.11:</b> Reinigungsleistung der Anlage Säntis.....	3-17
<b>Tabelle 3.12:</b> Technische und betriebswirtschaftliche Kenngrößen der Anlage Schwägälpe.....	3-17
<b>Tabelle 3.13:</b> Reinigungsleistung der Anlage Schwägälpe.....	3-18
<b>Tabelle 3.14:</b> Technische und kaufmännische Kenngrößen der Anlage Markranstädt.....	3-18
<b>Tabelle 3.15:</b> Reinigungsleistung der Anlage Markranstädt.....	3-19
<b>Tabelle 3.16:</b> Reinigungsleistung der Anlage Monheim.....	3-19
<b>Tabelle 3.17:</b> Technische und kaufmännische Kenngrößen der Anlage Monheim.....	3-19
<b>Tabelle 3.18:</b> Überwachungswerte der Anlage Markkleeberg.....	3-20
<b>Tabelle 3.19:</b> Technische und kaufmännische Kenngrößen der Anlage Markkleeberg.....	3-20
<b>Tabelle 3.20:</b> Aufteilung des prognostizierten Energieverbrauchs auf Verbrauchsstellen.....	3-35
<b>Tabelle 4.1:</b> Verteilung von Ethinylestradiol an Primär- und Belebtschlamm/Temes et al., 2004/.....	4-2
<b>Tabelle 4.2:</b> Verteilungskoeffizienten $\log K_{oc}$ (Mittelwerte) gemäß /Yamamoto, 2003/.....	4-3
<b>Tabelle 4.3:</b> Kurzbeschreibung des Adsorptionsverhaltens von Bisphenol A.....	4-4
<b>Tabelle 4.4:</b> Löslichkeit von Nonylphenolverbindungen in Wasser (Mittelwerte) /Ahei et al., 1993/.....	4-6
<b>Tabelle 4.5:</b> Abbaubarkeit von Bisphenol A in verschiedenen Umgebungen.....	4-13
<b>Tabelle 4.6:</b> Verhältnis von EDC-Konzentrationen und Wirkschwellen /Johnson et al., 2001/.....	4-16
<b>Tabelle 4.7:</b> Marge der Messergebnisse und Verhältnis der einzelnen Nonylphenolverbindungen gemäß Literaturangaben (k.A.= keine Angaben) /Müller, 2001/.....	4-18
<b>Tabelle 4.8:</b> Konzentrationen von Bisphenol A in Kläranlagen /Busch, 2002/.....	4-19
<b>Tabelle 4.9:</b> Konzentration von Bisphenol A über mehrere aufeinanderfolgende Tage hinweg in einer Kläranlage /Schröder, 2002/.....	4-20
<b>Tabelle 4.10:</b> Ergebnisse vergleichender Untersuchungen von Membranbelebungsanlagen und großtechnischen konventionellen Belebtschlammanlagen.....	4-23

<b>Tabelle 5.1:</b> ... Notwendige Behandlungszeiträume für Deponiesickerwasser /EEA, 2001/.....	5-3
<b>Tabelle 5.2:</b> Grenzwert für Deponiesickerwasser in Deutschland gemäß Abwasserverordnung Anhang 51 /1999/.....	5-4
<b>Tabelle 5.3:</b> Optionen für die Kombinationen von Behandlungstechniken für die Reinigung von Deponiesickerwasser und anfallenden Konzentraten /modifiziert nach Stief,1999/ .....	5-5
<b>Tabelle 5.4:</b> Konzentration von EDCs in Deponiesickerwässern in Österreich /ARCEM, I-50, 2003/ 5-9	5-9
<b>Tabelle 5.5a:</b> Betriebsdaten MBR der Anlage Aisdorf-Warden .....	5-14
<b>Tabelle 5.5b:</b> Betriebsdaten der Bioreaktoren der Anlage Aisdorf-Warden (Jahresmittelwerte gemäß Angaben des Betreibers).....	5-15
<b>Tabelle 5.5c:</b> Betriebsdaten der Umkehrosmose der Anlage Aisdorf-Warden.....	5-15
<b>Tabelle 5.6:</b> Angaben zur Deponiesickerwasserbehandlungsanlage in Berg .....	5-17
<b>Tabelle 5.7:</b> Mittlere Zu- und Ablaufkonzentrationen der Anlage in Aisdorf-Warden für den Zeitraum März bis September 2001 (Angaben des Betreibers).....	5-19
<b>Tabelle 5.8:</b> Mittlere CSB-Verminderung bzw. Rückhaltung durch verschiedene Verfahren in der Anlage Aisdorf-Warden .....	5-20
<b>Tabelle 5.9:</b> Mittlerer Trockensubstanzgehalt und Glühverlust der Belebtschlämme aus der Anlage Aisdorf-Warden.....	5-20
<b>Tabelle 5.10a:</b> Rückhalt von Nonylphenol durch Ultrafiltration in Aisdorf-Warden.....	5-22
<b>Tabelle 5.10b:</b> Rückhalt von Nonylphenol durch Ultrafiltration in Aisdorf-Warden.....	5-22
<b>Tabelle 5.11:</b> Bisphenol A – Rückhalte mit verschiedenen Prozessen .....	5-28
<b>Tabelle 5.12:</b> Vergleich des BPA-Verhaltens in zwei unabhängigen Messreihen.....	5-29
<b>Tabelle 5.13:</b> Verhalten von Bisphenol A im Schlamm und in der Ultrafiltration .....	5-29
<b>Tabelle 5.14:</b> BPA bzw. BPA-d16 bei Testzellenexperiment /Lotharukpong, 2004/.....	5-31
<b>Tabelle 5.15:</b> Eigenschaften des Belebtschlammes (gesamt bzw. flüssige Phase) der Anlage Aisdorf-Warden /Tarnacki et al., 2004b/ .....	5-32
<b>Tabelle 5.16:</b> Ergebnisse der LC-OCD Untersuchung der Flüssigphase des Belebtschlammes aus Aisdorf-Warden.....	5-33
<b>Tabelle 5.17:</b> Allgemeine Betriebsparameter der Anlage Berg (Jahresmittelwerte gemäß Angaben des Betreibers).....	5-35
<b>Tabelle 5.18:</b> Eigenschaften des Belebtschlammes (gesamt bzw. flüssige Phase) der Anlage Berg /Tarnacki et al., 2004b/ .....	5-36
<b>Tabelle 6.1:</b> Konstante bzw. zeitliche Endwerte der Widerstände der Darcy Gleichung /Broeckmann, 2004/.....	6-24
<b>Tabelle 6.2:</b> Verwendete Modellparameter zur Simulation.....	6-25
<b>Tabelle 6.3:</b> Werte der Modellparameter für die Anpassung von Filtrationsstraße II .....	6-31
<b>Tabelle 6.4:</b> Modellparameter für Filtrationsstraße I .....	6-32
<b>Tabelle 6.5:</b> Modellparameter für Beverwijk .....	6-45
<b>Tabelle 6.6:</b> Modellparameter für Eilendorf.....	6-48
<b>Tabelle 7.1:</b> Zu- und Ablaufwerte der Anlage Aisdorf Warden.....	7-28
<b>Tabelle 7.2:</b> Simulationsergebnisse hinsichtlich der ASM3 Parameter der Anlage Aisdorf-Warden 7-33	7-33
<b>Tabelle 7.3:</b> Darstellung des BPA-Abbauprozesses in ASM-Notation .....	7-33
<b>Tabelle 7.4:</b> Angaben zu den Abbauuntersuchungen von BPA /West et al., 2001/ .....	7-34
<b>Tabelle 7.5:</b> Angepasste Modellparameter auf Basis der Daten von West et al. /2001/ .....	7-34
<b>Tabelle 7.6:</b> Komplette Erweiterung des ASM3 für Bisphenol A .....	7-36
<b>Tabelle 7.7:</b> Modellparameter zur Kalibrierung der Datensätze .....	7-39

<b>Tabelle 8.1:</b> Gesamteinschätzung der Effektivität von weitergehenden Behandlungsverfahren hinsichtlich der Wirkung auf endokrin wirksame Substanzen .....	8-13
<b>Tabelle 10.1:</b> Kinetikparameter im ASM3 .....	10-5
<b>Tabelle 10.2:</b> Parameter für die Stöchiometrie und Zusammensetzung der Komponenten im ASM3.....	10-6
<b>Tabelle 10.3:</b> "Matrix"-Darstellung des ASM3 mit Komponenten, Prozessen und Kinetik .....	10-7
<b>Tabelle 10.4:</b> Parameter für die Simulation nach Modellkalibrierung .....	10-8