
DIPLOMARBEIT

Frau
Sarina Reischert

**Betrachtung einer
Kombination aus Rieselstrom-
Bioreaktor-Verfahren und
Membranfiltration zur
weitergehenden
Abwasserbehandlung**

Mittweida, 2011

Fakultät
Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik

DIPLOMARBEIT

Betrachtung einer Kombination aus Rieselstrom- Bioreaktor-Verfahren und Membranfiltration zur weitergehenden Abwasserbehandlung

Autor:
Frau

Sarina Reischert

Studiengang:
Umwelttechnik/Biotechnologie

Seminargruppe:
UT06wB1

Erstprüfer:
Prof. Dr.rer.nat. Petra Radehaus

Zweitprüfer:
Dr. Lutz Haldenwang

Einreichung:
Mittweida, 26.09.2011

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2011

Bibliografische Beschreibung:

Reischert, Sarina:

Betrachtung einer Kombination aus Rieselstrom-Bioreaktor-Verfahren und Membranfiltrationsverfahren zur Weiterentwicklung einer Abwasseranlage, die höhere Reinheitsgrade erreicht. –2011- 16, 84, 27 S. Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Mathematik/Naturwissenschaften/Informatik, Diplomarbeit, 2011

Referat:

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit einer neu zu entwickelnden Technologie im Bereich der Abwasseraufbereitung. Primäres Ziel ist es, die Anforderungen für einen Zusammenschluss zweier eigenständig auf dem Markt existierenden Verfahren zu ergründen. Die beiden Verfahrensstufen werden in Feldversuchen zusammengeführt. Auf deren Grundlage sind ausschlaggebende Verfahrensparameter unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren und zu bewerten. Mit der neuartigen Verfahrenskombination soll zukünftig eine Abwasserbehandlungsanlage entwickelt werden, die im Vergleich zu anderen biologischen Verfahren mit Membranfiltrationsstufe einen geringeren wirtschaftlichen Aufwand aufweist und dennoch sehr hohe Ablaufqualitäten garantiert, die den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Zudem sind derzeitige Marktchancen für die neue Technologie auf industrieller und kommunaler Ebene zu untersuchen.

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei der DAS Environmental Expert GmbH und Herrn Dr. Lutz Haldenwang für das interessante Diplomthema.

Frau Prof. Dr.rer.nat. Petra Radehaus danke ich dafür, dass sie mich durch den Dschungel der Bürokratie geführt und immer ein offenes Ohr für meine Bedürfnisse hatte.

Weiterhin bedanke ich mich bei Kerstin Ilgen, Cornelius Hamann und allen anderen Mitarbeitern der DAS für ihren fachlichen Rat während meiner Diplomarbeitszeit.

Zudem bedanke ich mich bei Gabrielle Huth für die Unterstützung bei der Probeanalytik.

Ein großer Dank gilt meinen Freunden und Bekannten, die mich während dieser aufregenden Zeit moralisch unterstützt haben

Schließlich geht auch ein großes Dankeschön an meine Mutter und meinem Freund für ihren Beistand.

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VIII
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 MOTIVATION	1
1.2 ZIELSETZUNG.....	2
2 GRUNDLAGEN.....	4
2.1 RIESELSTROM-BIOREAKTOR (RR).....	4
2.1.1 Verfahrensbeschreibung und Einordnung	4
2.1.2 Vorteile/Nachteile.....	5
2.1.3 Einsatzbereiche	6
2.2 MEMBRANFILTRATIONSVERFAHREN	7
2.2.1 Filtration	7
2.2.2 Membranfiltration	8
2.2.3 Klassifikation	9
2.2.4 Mikro-/Ultrafiltration (MF/UF)	11
2.2.5 Kenngrößen	14
2.2.6 Membrandeckschichtbildung (fouling) und Membranalterung.....	15
2.3 MEMBRANVERFAHREN ATEC AUTOMATISIERUNGS GMBH	17
2.3.1 Verfahrensbeschreibung und Einordnung	17
2.3.2 Vorteile/Nachteile.....	19
2.3.3 Derzeitige Einsatzbereiche der Membrantechnologie.....	20
3 WEITERGEHENDE ABWASSERBEHANDLUNG.....	21
3.1 BEGRIFFSDEFINITION.....	21
3.1.1 Membranfiltration als Desinfektionsverfahren	22
3.2 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN/ANFORDERUNGEN	23
3.2.1 Abwasserentsorgung	23
3.2.2 Abwasserwiederverwendung.....	24
3.2.3 Zusammenfassung	31
3.3 STAND DER TECHNIK	33
3.4 AUSGEWÄHLTE MARKTVERTRETER	36

3.4.1	Membranbelebungsverfahren VRM [®] -Verfahren	36
3.4.2	BIOMEMBRAT [®] und BIOMEMBRAT [®] -Plus	38
3.5	ANWENDUNGSFÄLLE/EINSATZPOTENTIAL	41
3.5.1	Global	41
3.5.2	Europa	42
3.5.3	Deutschland	42
4	VERFAHRENSKOMBINATION RIESELSTROM-BIOREAKTOR UND MEMBRANFILTRATION	43
4.1	ERWARTUNGEN/HYPOTHESE	43
4.2	ANFORDERUNGEN AN DIE RR-TECHNOLOGIE	45
4.3	ANFORDERUNGEN AN DIE MEMBRANTECHNOLOGIE	45
4.4	GESAMTANFORDERUNGEN AN DIE VK-RR/MA	45
4.5	MÖGLICHE REALISIERUNG DER VERFAHRENSKOMBINATION	46
4.6	MÖGLICHE EINSATZGEBIETE	47
4.6.1	Dezentrale Systeme/Großstädte (Mega-Cities)	47
4.6.2	Industrieabwässer	48
5	VERIFIZIERUNG ANHAND HALBTECHNISCHER VERSUCHE	50
5.1	MATERIAL UND METHODEN	50
5.1.1	Verfahrensbeschreibung der VK-RR/MA	50
5.1.2	Versuch kommunales Abwasser	51
5.1.3	Versuch industrielles Abwasser (Kosmetika)	54
5.1.4	Probenanalytik	57
5.1.5	Küvettestests	58
5.1.6	Laboranalytik	59
5.2	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	60
5.2.1	Messwerte Kommunales Abwasser	60
5.2.2	Messwerte industrielles Abwasser	68
5.2.3	Vergleich MBR mit VK-RR/MA	70
6	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	72
6.1	INVESTITIONSKOSTEN	72
6.1.1	Rieselstrom-Bioreaktor	72
6.1.2	Membrananlage	73
6.2	BETRIEBSKOSTEN	74
6.2.1	Rieselstrom-Bioreaktor	75
6.2.2	Membrananlage	76

6.2.3	Gesamtjahreskosten	76
6.3	WIRTSCHAFTLICHKEITSVERGLEICH.....	77
7	AUSWERTUNG	80
7.1	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG.....	80
7.2	AUSBLICK/EMPFEHLUNGEN.....	81

LITERATUR**ANLAGEN****SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1: ANSICHT RREN.....	6
ABBILDUNG 2: PRINZIP MEMBRANFILTRATION.....	8
ABBILDUNG 3: KOMPONENTENABTRENNUNG UNTERSCHIEDLICHER MEMBRANFILTRATIONEN.....	9
ABBILDUNG 4: IDEALISIERTE DARSTELLUNG DER KONZENTRATIONSREDUZIERUNG.....	10
ABBILDUNG 5: PRINZIP MEMBRANMODULAUFBAU.....	11
ABBILDUNG 6: GRÖßENVERGLEICH MEMBRANPOREN MIT MIKROORGANISMEN.....	11
ABBILDUNG 7: DEAD-END- UND CROSS-FLOW-VERFAHREN.....	12
ABBILDUNG 8: VARIABLEN FÜR WEITERE BERECHNUNGEN.....	14
ABBILDUNG 9: FOULINGMÖGLICHKEITEN.....	16
ABBILDUNG 10: ALTERUNG VON MEMBRANEN (URSACHEN UND FOLGEN).....	17
ABBILDUNG 11: FUNKTIONSPRINZIP TUBE- UND KOMBIFILTER.....	18
ABBILDUNG 12: TESTANLAGE TUBEFILTER ATEC.....	20
ABBILDUNG 13: KONVENTIONELLE KLÄRANLAGE (A), MBR TROCKEN (B), MBR GETAUCHT (C).....	34
ABBILDUNG 14: MBR-PRINZIP DER HUBER VRM [®] -TECHNOLOGIE.....	37
ABBILDUNG 15: BIOMEMBRAT [®] -VERFAHREN.....	40
ABBILDUNG 16: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES BIOMEMBRAT [®] -PLUS-VERFAHRENS.....	40
ABBILDUNG 17: WELTWEITE ENTWICKLUNG KOMMUNALER MBR-ANLAGEN.....	41
ABBILDUNG 18: PRINZIPIELLE VERFAHRENSMÖGLICHKEITEN.....	46
ABBILDUNG 19: VEREINFACHTES FLIEßSCHEMA VK-RR/MA, VERSUCH DRESDEN-KADITZ.....	53
ABBILDUNG 20: VEREINFACHTES FLIEßSCHEMA VK-RR/MA- FA. EMIL KIESSLING GMBH.....	57
ABBILDUNG 21: CSB-ABBAU.....	61
ABBILDUNG 22: RAUMBELASTUNG ZUR ABBAULEISTUNG.....	63
ABBILDUNG 23: NH ₄ -N.....	64
ABBILDUNG 24: PO ₄ -P.....	64
ABBILDUNG 25: TRÜBUNG.....	65
ABBILDUNG 26: TRENNVERHALTEN MEMBRANEN <i>E. COLI</i>	66
ABBILDUNG 27: VERGLEICH ARZNEIMITTELWIRKSTOFFE.....	67
ABBILDUNG 28: CSB-ABBAUGRAD VERSUCH KIESSLING.....	68
ABBILDUNG 29: ORTHOPHOSPHAT; VERSUCH FA. EMIL KIESSLING GMBH.....	70
ABBILDUNG 30: VERGLEICH MBR MIT VK-R/MA CHEMISCHE PARAMETER.....	71
ABBILDUNG 31: VERGLEICH MBR MIT VK-R/MA COLIFORME BAKTERIEN.....	71
ABBILDUNG 32: FLUX UF (TROCKENE UND GETAUCHTE MEMBRANMODULE).....	73
ABBILDUNG 33: INVESTITIONSKOSTEN TROCKEN AUFGESTELLTER MF/UF-ANLAGEN.....	74
ABBILDUNG 34: KOSTENGEGÜBERSTELLUNG RR UND EXTERNE UF-ANLAGE.....	78
ABBILDUNG 35: GEGENÜBERSTELLUNG BETRIEBSKOSTEN RR MIT GETAUCHTER UF-ANLAGE.....	79
ABBILDUNG 36: PRINZIP ROHRMODUL/ROHRMODULTYPEN.....	A-I
ABBILDUNG 37: PRINZIP KAPILLAR-/HOHLFASERMODUL UND -TYPEN.....	A-I

ABBILDUNG 38: PRINZIP/QUERSCHNITT/TYP PLATTENMODUL A-I

ABBILDUNG 39: PRINZIP / WICKELMODUL A-I

ABBILDUNG 40: PRIZIP KISSENMODUL A-I

ABBILDUNG 41: SCHEIBENROHRMODUL DER FA. PALL A-I

ABBILDUNG 42: FLIEßBILD KLÄRANLAGE DRESDEN-KADITZ A-III

ABBILDUNG 43: FLIEßBILD (TUBE-)FILTER ATEC A-III

ABBILDUNG 44: FLIEßBILD RIESELSTROM-BIOREAKTOR DAS A-III

ABBILDUNG 45: GEGENÜBERSTELLUNG MIKROBIOLOGISCHE LABORMESSWERTE A-III

ABBILDUNG 46: SPEZIFISCHER ENGERGIEVERBRAUCH MBR A-IV

TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1: RELEVANTE EINSATZGEBIETE DER MF UND UF	13
TABELLE 2: RECHTLICHER RAHMEN FÜR DIE ABWASSERENTSORGUNG	23
TABELLE 3: LEIT-/GRENZWERTE EU-RL 76/160 EWG	25
TABELLE 4: QUALITÄTSANFORDERUNGEN AN BETRIEBSWASSER FÜR DIE NUTZUNG IN GEBÄUDEN	26
TABELLE 5: ALLGEMEINE RICHTWERTE FÜR TRINKWASSER	27
TABELLE 6: RICHTWERTE FÜR TRINKWASSER IN FLASCHEN ODER BEHÄLTNISSEN	27
TABELLE 7: EINTEILUNG DER BADEGEWÄSSER IN BEWERTUNGSKLASSEN	30
TABELLE 8: ANFORDERUNGEN DER BÄV AN BECKENWASSER MIT BIOLOGISCHER AUFBEREITUNG	30
TABELLE 9: ZUSAMMENFASSUNG GESETZLICHE RAHMENBEDINGUNEN	32
TABELLE 10: GEGENÜBERSTELLUNG PARAMETER TROCKENER UND GETAUCHTER MEMBRANMODULE	34
TABELLE 11: KENNGRÖßEN DER VRM [®] -TECHNOLOGIE	37
TABELLE 12: RÜCKGEHALTENE SCHMUTZFRACHT (BRAUEREIABWASSER PILOTIERUNG).....	38
TABELLE 13: KENNGRÖßEN BIOMEMBRAT [®] -TECHNOLOGIEN	39
TABELLE 14: VERGLEICHSWERTE HERKÖMMLICHE KLÄRANLAGE UND MBR	44
TABELLE 15: VOLUMENSTROMEINSTELLUNG VERSUCH KADITZ-DRESDEN.....	52
TABELLE 16: FLACHMEMBRANSORTIMENT VERSUCH KADITZ-DRESDEN	52
TABELLE 17: VOLUMENSTROMEINSTELLUNG VERSUCH FIRMA EMIL KIESSLING GMBH.....	55
TABELLE 18: ROHRMEMBRANSORTIMEN VERSUCH EMIL KIESSLING GMBH	56
TABELLE 19: VERWEILZEIT IM RR	62
TABELLE 20: GEGENÜBERSTELLUNG RAUMABBAULEISTUNG UND ABBAULEISTUNG RR.....	62
TABELLE 21: RAUMBELASTUNG UND ABBAULEISTUNG RR-GROßANLAGE	63
TABELLE 22: MIKROBIOLOGISCHE BESTIMMUNG KLÄRANLAGE NEU ULM	65
TABELLE 23: VERWEILZEIT IM RR; VERSUCH FA. EMIL KIESSLING GMBH	69
TABELLE 24: RAUMABBAULEISTUNG.....	69
TABELLE 25: GESAMTKOSTEN FÜR DIE MEMBRANANLAGE ATEC	72
TABELLE 26: GESAMTKOSTEN FÜR DEN RR.....	72
TABELLE 27: KENNGRÖßEN UNTERSCHIEDLICHER GRÖßEN UNTER AUFTEILUNG IN KLASSEN	73
TABELLE 28: GESCHÄTZTE INVESTITIONSKOSTEN FÜR UF-ANLAGE	74
TABELLE 29: BETRIEBSKOSTEN RR	75
TABELLE 30: BETRIEBSKOSTEN UF-ANLAGE	76
TABELLE 31: GESAMTJAHRESKOSTEN RR UND UF-ANLAGE.....	77
TABELLE 32: BEGRIFFE IN DER ABWASSERTECHNIK	A-II
TABELLE 33: CHEMISCHE/SONSTIGE PARAMETER IM BEWÄSSERUNGSWASSER.....	A-II
TABELLE 34: MEMBRANBELEBUNGSANLAGEN WELTWEIT	A-II
TABELLE 35: BEHANDELTE ABWASSERMENGEN IN MEMBRANBELEBUNGSANLAGEN WELTWEIT	A-II
TABELLE 36: INDUSTRIELLE EINSATZGEBIETE FÜR MBR-ANLAGEN	A-II
TABELLE 37: MEMBRANBELEBUNGSANLAGEN IN DEUTSCHLAND	A-II

TABELLE 38: WEITERE MARKTVERTRETER MBR.....	A-II
TABELLE 39: LABORWERTE VERSUCH DRESDEN-KADITZ	A-III
TABELLE 40: ANALYSEWERTE VON WESSLING GMBH – VERSUCH DRESDEN KADITZ.....	A-III
TABELLE 41: LABORWERTE VERSUCH - EMIL KIESSLING GMBH	A-III
TABELLE 42: ANALYSEWERTE VON WESSLING GMBH – VERSUCH EMIL KIESSLING GMBH	A-III

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AbwAG	Abwasserabgabengesetz
AbwV	Abwasserverordnung
AFS	abfiltrierbare Stoffe
$a_{i,j}$	feedseitige Konzentration der Komponente i bzw. j
AL	Ablauf
AO	Abgabenordnung
ARR	Ablauf Rieselstrom-Bioreaktor
ATEC	ATEC Automatisierungstechnik GmbH
ATV	abwassertechnische Vereinigung e.V.
AW	Abwasser
$b_{i,j}$	permeatseitige Konzentration der Komponente i bzw. j
BSB	biochemischer Sauerstoffbedarf
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DAS	DAS Environmental Expert GmbH
DI	Destilliert
DIN	deutsches Institut für Normung
DMG	Düngemittelgesetz
DOC	Dissolved Organic Carbon
DP	Druckluftpumpe
DüMV	Düngemittelverordnung
DVGW	deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWA	deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
<i>e.coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EG	europäische Gemeinschaft
EPS	extrazelluläre polymere Substanzen
EU	europäische Union
EÜVOA	Eigenüberwachung von Abwasseranlagen
EU-RL	europäische Richtlinie
EWG	europäische Wirtschaftsgemeinschaft
Fa.	Firma
GK	Güteklasse
GW	Grenzwert
ISO	international organization for standardization
KbE/KBE	koloniebildende Einheit
kD	Kilodalton
KP	Kreislaufpumpe
KomAbwVO	kommunale Abwasserverordnung
LAWA	Bund-/Länder Arbeitsgemeinschaft Wasser
LWG	Landeswassergesetz
M	Membran
MBR	Membranbelebungsreaktor
MF	Mikrofiltration

MPN	most probable number
n.n.	nicht nachweisbar
NF	Nanofiltration
Nges	gesamter Stickstoffanteil
PE	Polyethylen
PES	Polyethersulfon
Pges	gesamte Phosphorverbindungen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
RC	Cellulose
REM	Rasterelektronenmikroskop
RO	Reverse Osmose (Umkehrosmose)
RR	Rieselstrom-Bioreaktor
RSPP	Rückspülpumpe
RV	Reaktorvolumen
SAB	Schlammabsatzbehälter
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
T	Temperatur
TE	Trübungseinheit
TM	Trägermaterial
TN _b	total nitrogen bound
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
UF	Ultrafiltration
UV	Ultraviolett
UV/VIS	Ultraviolett/Visible
V	Versuch
VK-RR/MA	Versuchskombination Rieselstrom-Bioreaktor/ Membranfiltration der ATEC Automatisierungs- technik GmbH
VRM [®]	vacuum-rotation-membran
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
ZL	Zulauf
ZP	Zulaufpumpe
ZRR	Zulauf Rieselstrom-Bioreaktor

1 Einleitung

1.1 Motivation

Wasser ist auf unserer Erde Grundvoraussetzung für jegliches Leben. Die Oberfläche unseres Planeten besteht in etwa zu 72% aus Wasser. Der Süßwasseranteil davon beträgt 2,53% und der davon Trinkbare gerade mal 0,3%. [SCMA2009]

Die Bundesrepublik Deutschland verfügt glücklicher Weise über eigene Süßwasserressourcen. Im Mittel beträgt die nutzbare Süßwassermenge 182 Milliarden m³. Davon werden jährlich etwa 26,4 Milliarden m³ zum Kühlen von Wärmekraftwerken der öffentlichen Energieversorger, 8,9 Milliarden m³ von der Industrie, 0,2 Milliarden m³ von der Landwirtschaft und 5,5 Milliarden m³ von privaten Haushalten genutzt. Der tägliche Wasserbedarf in Deutschland liegt bei 128 Liter pro Einwohner. [SCMA2009]

Durch Klimawandel, Bevölkerungsexplosion und Wasserverschmutzung wird sauberes Wasser zu einem der kostbarsten Güter. In vielen Ländern der Erde dursten Menschen und Tiere. Felder veröden, der Grundwasserspiegel sinkt, oberirdische Gewässer verschwinden und oftmals bleibt ein lang ersehnter Regen aus. Wenn die Bevölkerungsdichte der Erde auf 9 Milliarden Menschen angestiegen ist, wird sich allein in der Landwirtschaft der Wasserbedarf mehr als verdoppeln. In den letzten 50 Jahren hat der Wasserverbrauch weltweit doppelt so schnell zugenommen wie die Bevölkerung, was vor allem am steigenden Wohlstand liegt. Vor allem in Asien wachsen die Ansprüche an Hygiene und Ernährung und somit auch der Bedarf an sauberem Wasser. [SCEV2011]

Der Anspruch auf sauberes Wasser eines jeden Menschen ist seit letztem Jahr durch die Vereinten Nationen zum Menschenrecht erklärt worden. Dieses Recht jedoch bleibt vielen Menschen verwehrt. 884 Millionen Menschen weltweit haben keinen genügenden Zugang zu sauberem Wasser und mehr als 2,6 Milliarden Menschen sind ohne Zugang zu einfachen sanitären Anlagen. An den Folgen der Aufnahme von kontaminiertem Wasser sterben jährlich rund 2 Millionen Menschen, die meisten davon sind Kinder [ARD2010]. Die Wasserknappheit betrifft immer mehr Länder. So sind neben der bekannten Trockenheit in Zentralafrika, mittlerweile auch der Süden und der Norden Afrikas betroffen. Hinzu kommen noch Teile Pakistans, Chinas, Indiens, Australiens und des Westens der Vereinigten Staaten von Amerika. [SCEV2011]

Neben dem Problem der zunehmenden Wasserknappheit weisen immer mehr Wissenschaftler so genannte Umweltstoffe in unserem Ökosystem nach, die sich hormonell bzw. hormonähnlich auf Mensch und Tier auswirken können. Diese endokrin wirksamen Substanzen können das Sexualverhalten von Populationen erheblich verändern. Sie können sogar Zwitterbildungen oder Missbildungen von Geschlechts- und anderen Organen hervorrufen. Die meisten der endokrinen Substanzen werden vom Menschen, vor allem durch die Massenproduktion von Chemikalien, erzeugt. Sie gelangen durch Produkte, Abfälle und Abwässer in die Umwelt. Als besondere

punktueller Eintragsquellen von hormonell wirkenden Substanzen in oberirdische Gewässer sind die kommunalen und industriellen Kläranlagen zu nennen.

Die Tatsache der global zunehmenden Wasserknappheit und die des Wissensstandes über anthropogene Umweltstoffe, die Ökosysteme irreversibel verändern, lässt die Technologien zur Wasser-/Abwasseraufbereitung enorm wichtig werden. Bewusster Umgang mit der Natur sollte das Anliegen jedes einzelnen Menschen sein. Deshalb ist es wichtig, sich für Visionen von einem verantwortungsbewussten Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen einzusetzen, Strategien zu entwickeln und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um in Zukunft maximale Trinkwassereinsparungen und reinere Oberflächengewässer zu gewährleisten. Denn nur so können wir der weltweit zunehmenden Wasserknappheit entgegenwirken und Einträge anthropogener Stoffe in die Umwelt vermindern oder gar stoppen. Wer erkennt, wie existenziell sauberes Wasser für den Fortbestand von Leben ist, der erkennt auch die Wichtigkeit der Wasser-/Abwasserbehandlung. In Hinblick darauf wird in Zukunft die Wasseraufbereitung eine der wichtigsten Aufgabenstellungen der Wissenschaft, Politik und Industrie darstellen, denn: "Wasser ist keine übliche Handelsware, sondern ein ererbtes Gut, das geschützt, verteidigt und entsprechend behandelt werden muss..."¹

1.2 Zielsetzung

Die Diplomarbeit befasst sich mit einer neu zu entwickelnden Technologie im Bereich der Abwasserklärung. Ihr Hauptziel ist es, die wesentlichen Voraussetzungen für einen Zusammenschluss zweier eigenständig auf dem Markt bewährten Verfahren zu ergründen. Beide Techniken, Rieselstrom-Bioreaktor-Verfahren der DAS Environmental Expert GmbH (DAS) und Membranfiltrations-Verfahren der ATEC Automatisierungstechnik GmbH (ATEC) sollen in Kombination miteinander eine hohe Wassergüte erreichen. Im Fokus stehen die Behandlung von Oberflächenwasser und die Aufbereitung von Abwasser aus Kommunen, Industrie, Landwirtschaft und Entsorgungsbetrieben. Es soll ermittelt werden, ob die Verfahrenskombination Rieselstrom-Bioreaktor und Membranfiltration der ATEC Automatisierungstechnik GmbH (VK-RR/MA) die Anforderungen an eine Wasserwiederverwendung erfüllen. Ziel im Rahmen der Diplomarbeit ist es, einen Einblick in den heutigen Stand der Technik sowie in gesetzliche Anforderungen an die Wasserqualität für eine Abwasserwiederverwendung zu geben. Darüber hinaus soll der Bedarf an einer weitergehenden Abwasserbehandlung unter den Gesichtspunkten möglicher Einsatzgebiete in Industrie und Kommune, sowie im Vergleich mit dem Stand der Technik ermittelt werden. Auf Grundlage von Feldversuchen sind Überlegungen anzustellen, welche Anforderungen der Rieselstrom-

¹ Auszug aus den Erwägungsgründen der europäischen Wasserrahmenrichtlinie [BMU2007]

Bioreaktor (RR) und die Membrantechnologie zum optimalen Verfahrensablauf erfüllen müssen. Da die DAS und ATEC vertraglich an ein Förderprojekt gebunden sind, wird speziell auf das Membranverfahren von ATEC eingegangen. Ermittelte Messwerte von Feldversuchen sollen graphisch dargestellt und ausgewertet sowie Betriebs-, Investitionskosten und Wartungsaufwand beider Verfahrensschritte betrachtet werden.

2 Grundlagen

2.1 Rieselstrom-Bioreaktor (RR)

2.1.1 Verfahrensbeschreibung und Einordnung

Das Verfahren des RR gehört zu den aeroben Klärverfahren mit der Leistungsnutzung sessiler Mikroorganismen. Der Reaktor wird nicht eingestaut und beinhaltet ein künstliches Aufwuchsmaterial.

Der Reaktor besteht in der Regel aus Polyethylen und ist bis zu 80% mit speziellen, im Durchmesser etwa 8 mm großen, Kunststoffkügelchen befüllt. Das Abwasser wird von oben über das sehr leichte Trägermaterial ($0,02 \text{ g/cm}^3$) verrieselt. Auf diesem wachsen nach sehr kurzer Anlaufphase, vom Rohwasser abhängige, spezifische Mikroorganismen, welche einen hochaktiven und gleichzeitig dem Milieu angepassten Biofilm bilden. Aufgrund zielgerichteter und kontinuierlicher Belüftung gegen die Fallrichtung des herunterrieselnden Abwassers werden die aeroben Mikroorganismen optimal mit dem für den Metabolismus benötigten Sauerstoff versorgt. Hinzu kommen eine sehr große spezifische Oberfläche des Trägermaterials aufgrund der Kugelform und dessen sehr feinem Oberflächenrelief. Darauf wachsen viele Mikroorganismen, welche leistungsstark die anfallende Schmutzwasserfracht abbauen. Bei schwach bis hinzu stark belasteten Abwässern werden in bestimmten Zeitintervallen Regenerierungen durchgeführt. Dazu wird als erstes der RR vom Reinigungszyklus getrennt, der Ablauf gesperrt und der Ventilator abgeschaltet, während die Kreislaufpumpe weiter betrieben wird. Zusätzlich sorgt ein leistungsstarkes Gebläse für Starkluftspülungen von unten in das Trägerbett. Beides zusammen versetzt die bewachsenen Biofilmträger so in Bewegung, dass sie aneinander reiben und sich überschüssige Biomasse, Schlamm und Feststoffe vom Trägermaterial lösen. Das anfallende, zum großen Teil sehr schlammige Schmutzwassergemisch wird im Schlammabsatzbehälter (SAB) sedimentiert, im Schlammstapelbehälter gesammelt oder direkt als Überschussschlamm zurück in das Vorklärbecken geleitet. Die Regenerierungszyklen sind abhängig von der Wachstumsgeschwindigkeit der Mikroorganismen sowie vom Feststoffgehalt des eintreffenden Schmutzwassers. Je nach Durchlässigkeit des Trägerbettes für Luft und Wasser werden die jeweilig notwendigen Zeitintervalle ermittelt. Regenerierungszyklen sind unumgänglich, um etwaige Verstopfungen des Reaktors weitgehend zu vermeiden und eine konstante Reinigungsleistung zu gewährleisten. In Abbildung 1 sind zwei RRen abgebildet. [DAS2011]

2.1.2 Vorteile/Nachteile

Für den RR ergeben sich folgende Verfahrensvor- und -nachteile [DAS2011]:

Verfahrensvorteile RR:

- es werden biotechnologische Effekte, durch Bauweise, Trägermaterial und optimaler Belüftungsmethodik genutzt
- es wird eine sehr hohe Raumabbauleistung aufgrund sehr kurzer Stoffwechselübergangswege zwischen Mikroorganismen, Sauerstoff und Abwasserinhaltsstoffen erreicht
- es ist eine kompakte modulare Bauweise möglich
- einfache Belüftung mittels Ventilator
- der Reaktor ist korrosionsbeständig (PE)
- die einfache Bauweise des Reaktors
- eine Nachklärung ist bei optimalen Regenerierungszyklen nicht notwendig
- es ist eine zusätzliche Filtrationsleistung durch Trägermaterialschüttung und Biofilm gegeben
- im Vergleich zu herkömmlichen Kläranlagen gibt es nur einen geringen Anfall an Überschussschlamm
- durch Regenerierungsintervalle besteht eine geringe Verstopfungs- und Verschlamungsfahr
- aufgrund der modularen Bauweise ist eine einfache Anlagenerweiterung möglich

Verfahrensspezifische Nachteile:

- Notwendigkeit separater Vorlagen- bzw. Pufferungsbehälter (Vergleichsmäßigung, Pufferung) während des Regenerierens
- eine künstliche Belüftung und Regenerationszeiten sind zwingend nötig
- hoher technischer Aufwand für Regenerierung
- derzeit sind nur oberirdische sowie ebenerdige Aufstellungen möglich
- notwendige Überschussschlammensorgung
- aufgrund seiner Komplexität ist der RR für private Kläranlagen im kleinen Maßstab ungeeignet

2.1.3 Einsatzbereiche

Derzeitige Einsatzgebiete des RRs liegen in der [DAS2011]

- chemischen sowie in der pharmazeutischen Industrie
- Wäscherei- und Textilindustrie
- Nahrungsmittel- und Feinkostindustrie
- Brauerei- und Getränkeindustrie
- Landwirtschaft und Tierkörperbeseitigung
- Energie- und Entsorgungswirtschaft
- kommunalen Abwasserbehandlung



Abbildung 1: Ansicht RRen [Foto: DAS]

2.2 Membranfiltrationsverfahren

2.2.1 Filtration

Vom Filtrationsverfahren wird gesprochen, wenn Partikel einer umgehenden Flüssigkeit durch ein Filtermaterial auf physikalischem Weg separiert werden [UfBW2009].

Werden die zu filternden Komponenten durch Agglomeration und Koagulation in den Zwischenräumen eines Filterbetts festgehalten, handelt es sich um die Tiefenfiltration. Bei dieser Filtrationsmethodik wird ein gewisser Siebeffekt erreicht. Beispiel für eine Tiefenfiltration ist der Kiesfilter [UfBW2009]. Wesentlicher Vorteil der Tiefenfiltrationsmethodik ist, dass bei ausreichender Belüftung biologische Reinigungseffekte mit genutzt werden können. Im Gegensatz zur Tiefenfiltration ist für die Oberflächenfiltration kennzeichnend, dass die ab zu filternden Partikel größer als die Filterporen sind und sich auf dem Filtermaterial eine Deckschicht bildet. Dieser Filterkuchen wird durch die Anwendung geeigneter Verfahren wie Rückspülen und/oder mechanisches Reinigen wieder abgetragen, um die Filtrationsleistung weitgehend wieder herzustellen. Als Beispiel einer Oberflächenfiltration sei die Tuchfiltration genannt. Die Vorteile der Oberflächenfiltration gegenüber der Tiefenfiltration liegen in den geringeren aufzubringenden Investitionskosten und in der Durchbruchsicherheit des Verfahrens. Allerdings kann bei der Oberflächenfiltration kein zusätzlicher biologischer Reinigungseffekt erreicht werden. [DWA2009] [UfBW2009]

Die Realisierung der Komponentenseparierung kann entweder durch drucklose Filter, Filter die aufgrund der Schwerkraft durchströmt werden oder durch Filter mit angelegtem Druck erfolgen. Dabei wird der Druck als Überdruck auf der Seite des Rohwasserstroms oder auf der Filtratseite als Unterdruck angelegt. Beide Möglichkeiten der Druckaufbringung sind in Abbildung 5, Kapitel 2.2.2 dargestellt.

Die Berechnungen in der Filtertechnik beruhen auf dem Ansatz von Darcy. Darcy beschreibt ein poröses Haufwerk, welches von einer eindimensionalen fluiden Strömung durchflossen wird. Dabei setzt er das Verhältnis zwischen aufzubringendem Druck Δp und Filterdicke H gleich dem Produkt aus dynamischer Viskosität η mit dem Quotienten aus mittlerer Filtergeschwindigkeit \bar{v} und Durchlässigkeit B_0 .

$$\frac{\Delta p}{H} = \eta \frac{\bar{v}}{B_0} \quad (1)$$

Die Durchlässigkeit des Filters hängt von vielen Kennwerten des Filterkuchens ab und muss experimentell bestimmt werden [THJÜ2004].

2.2.2 Membranfiltration

Bei dem Membranfiltrationsverfahren handelt es sich, wie bei allen anderen Filtrationsmethoden, um einen rein physikalischen Vorgang, bei dem die partikulären Stoffe aus einem zu filtrierenden Medium abgetrennt werden. Die Filtration beruht dabei ausschließlich auf der Separierung zwischen gesäubertem Wasser (Filtrat/Permeat) und aufkonzentriertem Reststoff (Konzentrat/Retentat). Dies bedeutet, dass alle Teilchen die kleiner sind als die Membranporen durch die Membranoberfläche hindurch passieren. Alle Größeren hingegen werden zurückgehalten. [ISA2007]

Die Membranfiltration ist der Oberflächenfiltration zuzuordnen. In Abbildung 2 wird das Prinzip der Membranfiltration verdeutlicht.

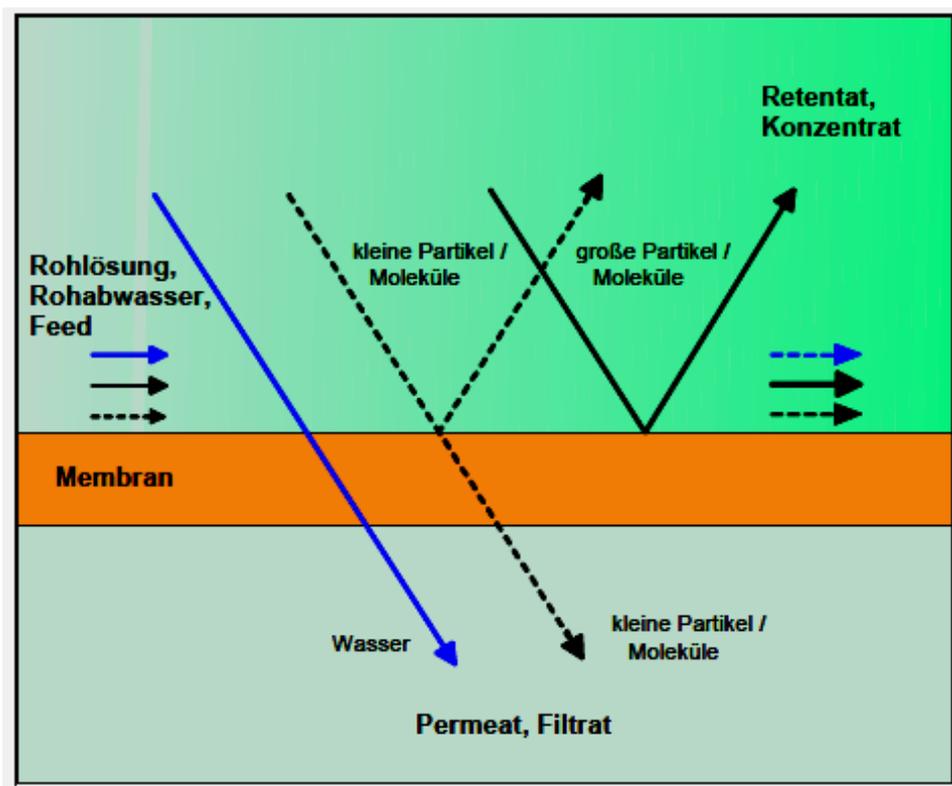


Abbildung 2: Prinzip Membranfiltration

2.2.3 Klassifikation

Die einzelnen Membranverfahren sind nach der Membranporengröße bzw. nach der Größe der abgetrennten Stoffe eingeteilt. Die Abbildung 3 veranschaulicht deutlich den Zusammenhang zwischen Porengrößen verschiedener Membranverfahren und den jeweilig dafür aufzuwendenden Drücken.

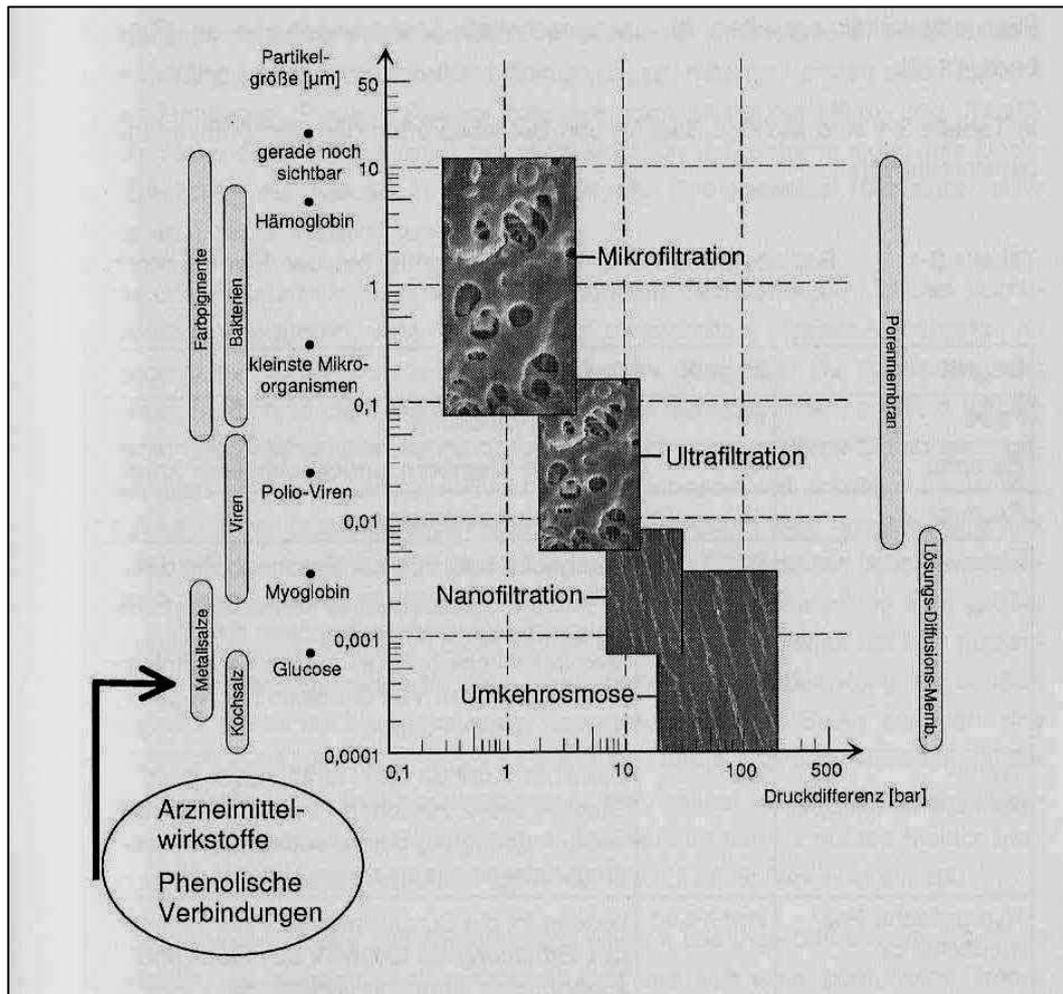


Abbildung 3: Komponentenabtrennung unterschiedlicher Membranfiltrationen [SCCO2007]

Membranmaterialien für den Einsatz in der Abwasseraufbereitung werden hauptsächlich synthetisch hergestellt. Sie bestehen entweder aus organischen Verbindungen wie Cellulose- und Polymere Membranen oder aus anorganischen Verbindungen wie Keramikmembranen. Es gibt auch Membranen (Kompositmembranen) die aus einer Zusammensetzung von verschiedenen Polymeren bestehen. [MNULV2003]

Zu unterscheiden sind „poröse“ und „dichte“ Membranen. Die Abtrennung der Komponenten erfolgt bei „porösen“ Membranen (Mikro-, Ultrafiltration) nach dem Siebeffekt, bei dichten Membranen (Nanofiltration, Umkehrosmose) hingegen aufgrund von Lösungs- und Diffusionsunterschieden. Deshalb werden „poröse“ Membranen oftmals auch als Porenmembranen und „dichte“ als Lösungs-Diffusions-Membranen bezeichnet. [BASV2007]

Die Abbildung 4 verdeutlicht den ausschlaggebenden Unterschied der beiden Membranarten. Deutlich zu erkennen ist, dass an der Oberfläche der Porenmembran eine scharfe Trennung der Komponenten stattfindet und bereits mit Eindringen des Rohwassers in die Membranoberfläche die Komponentenkonzentration des Permeats erreicht wird. Bei den Lösungs-Diffusions-Membranen hingegen findet auch innerhalb der Membran eine Konzentrationsreduzierung der Komponenten statt. [MUNLV2003]

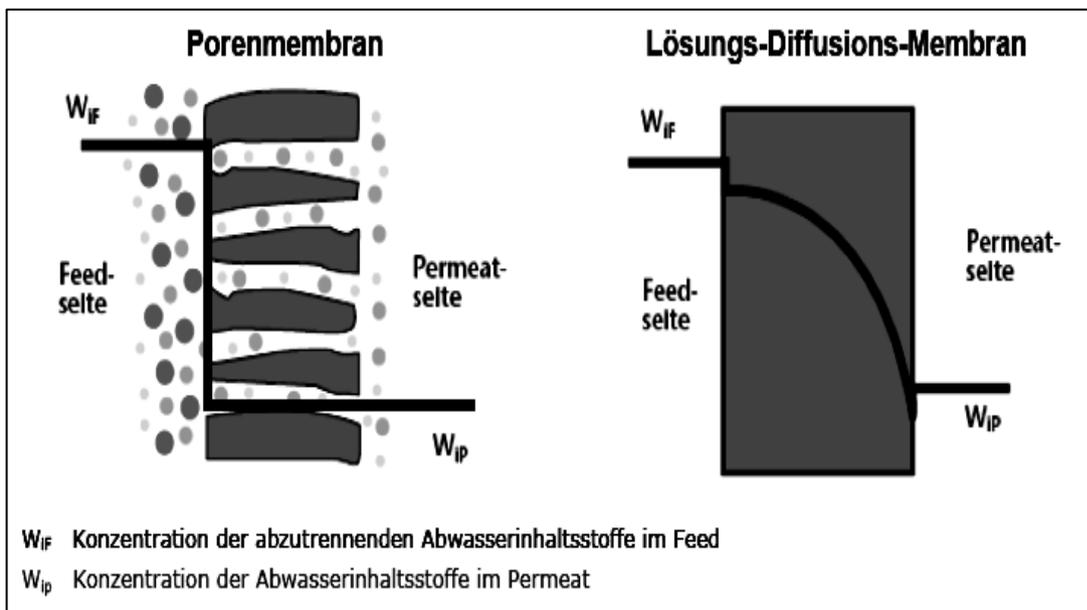


Abbildung 4: Idealierte Darstellung der Konzentrationsreduzierung

Membranen werden in Modulen aufgebaut. Es existieren verschiedene Modulapparaturen wie Wickel-, Platten-, Schlauch-, Rohr- und Kapillarmodule [MNULV2003]. Alle diese Module funktionieren ähnlich wie in Abbildung 5 dargestellt. Das Membranmodul wird in einen Zulaufstrom (Feed), in einen Konzentratstrom (Retentat) und in einen Filtratstrom (Permeat) unterteilt. Einige Beispielbilder zu Membranmodulen sind der Anlage A-I beigefügt.

Zwischen der Feed- und Permeatseite wird ein Druck aufgebracht, der als transmembrane Druckdifferenz oder Transmembrandruck bezeichnet wird [PIJO2006]. Wie in Kapitel 2.2.1 erwähnt, wird je nach Verfahren und Anwendung die benötigte Triebkraft über eine feedseitige Druckerhöhung oder über einen angelegten Unterdruck auf der Permeatseite aufgebracht [VOKL2006].

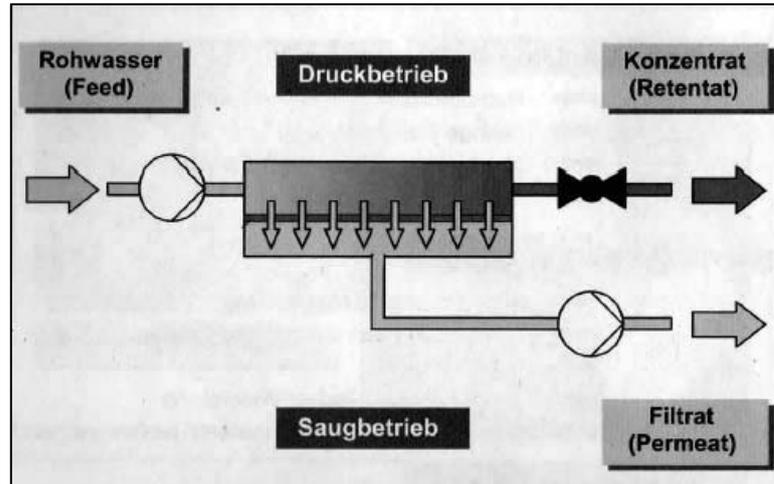


Abbildung 5: Prinzip Membranmodulaufbau [VOKL2006]

2.2.4 Mikro-/Ultrafiltration (MF/UF)

Vorrangig werden in der Abwasseraufbereitung die Mikro- und Ultrafiltrationsverfahren eingesetzt [METH2007]. MF und UF unterscheiden sich nur sehr geringfügig in ihrer Porengröße und der aufzubringenden transmembranen Druckdifferenz (vgl. Abbildung 3). MF-/UF-Membranen sind Porenmembranen und somit erfolgt die Abtrennung der Komponenten durch den Siebeffekt [ISA2007]. Filtrationsmembranen mit einer Porentrennweite von $0,2 \mu\text{m}$ stellen, wie in Abbildung 6 ersichtlich, eine undurchdringliche Barriere für Bakterien dar. Zudem wird ein enormer Anteil an Viren, durch deren Adsorption an Partikeln sowie den gebildeten Filterkuchen zurückgehalten. Typische Membrantrenngrenzen in der Abwasserbehandlung liegen zwischen $0,1$ und $0,4 \mu\text{m}$. [VOKL2006]

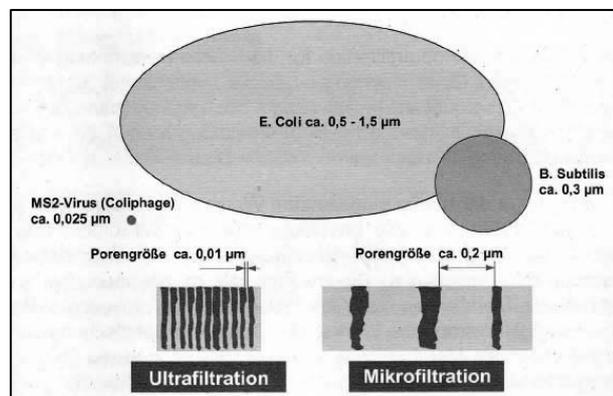


Abbildung 6: Größenvergleich Membranporen mit Mikroorganismen

a) Prozessführung

Grundsätzlich wird bei der MF und UF zwischen einer Prozessführung im Cross-Flow-Betrieb (statische Filtration) und im Dead-End-Betrieb (dynamische Filtration) unterschieden [BASV2007].

Bei beiden Prozessführungen lagern sich nach gewisser Zeit Teilchen auf der Membranoberfläche ab und bilden dort eine Deckschicht. Je mehr die Deckschicht auf der Membranoberfläche wächst, desto mehr nimmt der Permeatfluss ab und somit auch die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Membranen.

Das Cross-Flow-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass das Rohwasser (Feed) permanent parallel an der Membranoberfläche vorbeigeführt wird. Durch das parallele Anströmen werden Scher- und Auftriebskräfte erzeugt. Aufgrund dieser wirkenden Kräfte werden die bereits akkumulierten Partikel an der Membranoberfläche wieder abgetragen und zurück in die Strömung befördert. Somit tritt die Deckschichtbildung verminderter als beim Dead-End-Verfahren auf und es kann eine konstantere Filterleistung gewährleistet werden (vgl. Abbildung 7). Wesentlicher Nachteil des Cross-Flow-Verfahrens ist der hohe Energiebedarf, welcher für die ständige Überströmung aufgebracht werden muss. [MUNLV2003] [UfBW2009]

Wird eine Membranoberfläche senkrecht mit der Rohlösung beschickt handelt es sich um das Dead-End-Verfahren. Die gebildete Deckschicht wird hier durch regelmäßiges Rückspülen der Membran entfernt. [MUNLV2003] [UfBW2009]

Aus der Abbildung 7 sind beide Prozessführungen mit dem dazugehörigen Permeatfluss sowie die Deckschichtbildung in Abhängigkeit von der Zeit ersichtlich.

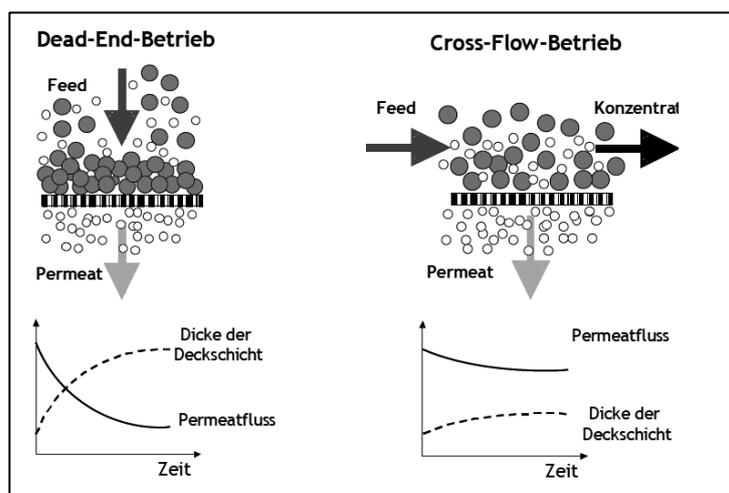


Abbildung 7: Dead-End- und Cross-Flow-Verfahren
[SAFL2009]

c) Vorteile

- geringer Platzbedarf (integrierbar in individuelle Anlagen)
- einfacher modularer Aufbau
- es ist ein rein physikalisches Verfahren. Dadurch bleiben die zurückgehaltenen Komponenten unverändert und es besteht keine Gefahr, dass unerwünschte Nebenprodukte entstehen [VOOL2011]
- laut ATV Merkblatt 205 zählt das Membranfiltrationsverfahren zu den Desinfektionsverfahren, da viele Mikroorganismen, ob lebend, tot oder inaktiv, abgetrennt werden
- vollständiger Feststoffrückhalt (Abwasserinhaltsstoffe; Mikroorganismen) [DOEL2006]

d) Nachteile

- thermische¹, chemische und mechanische Beständigkeit ist nur begrenzt gegeben
- Foulingpotenzial (vgl. Kapitel 2.2.6) [VOOL2011]

2.2.5 Kenngrößen

Die Selektivität, das Rückhaltevermögen und die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Membranen sind für den wirtschaftlichen Einsatz von Membranverfahren sehr entscheidend [METH2007].

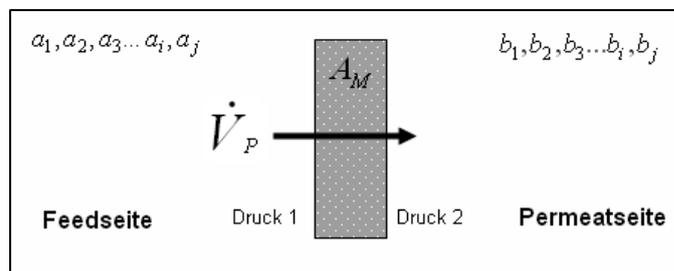


Abbildung 8: Variablen für weitere Berechnungen

a) Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit einer Membran ist der unter bestimmten Betriebsparametern erzielbare membranflächenspezifische Permeatfluss \bar{v}_M . Dieser wird vereinfacht durch das Verhältnis von Permeatvolumenstrom \dot{V}_P und Membranfläche A_M ermittelt. Der Vollständigkeit halber ist der Bezug zu Darcy's Ansatz mit dargestellt.

$$\bar{v}_M = \frac{\dot{V}_P}{A_M} = \frac{B_0}{\eta} \cdot \frac{\Delta p}{H} \quad \left[\frac{l}{m^2 h} \right] \quad (2)$$

¹ bei Polymembranen

b) Selektivität (S)

Die Selektivität beschreibt die Differenzierung zwischen den Komponenten im Stoffgemisch. Dabei werden die Konzentrationsquotienten der zu untersuchenden Stoffe, im Feed und Permeat der Membran, ins Verhältnis gesetzt. Das Ergebnis der Selektivität bewegt sich zwischen 0 und 1.

$$S_{ij}^a = \frac{b_i/b_j}{a_i/a_j} \quad (3.1)$$

Bei Selektivität für binäre Stoffgemische vereinfacht sich die Formel zu:

$$S_{ij}^a = \frac{b_i/1-b_i}{a_i/1-a_i} \quad (3.2)$$

c) Rückhaltevermögen (R_i)

Das Rückhaltevermögen beschreibt den Rückhalt einer ausgewählten Komponente eines Stoffgemisches durch die Membran. Es resultiert aus dem Verhältnis der Konzentrationsverminderung einer Komponente von Feed zu Permeat und Ausgangskonzentration im Feed. [METH2007]

$$R_i = \frac{a_{iF} - a_{iP}}{a_{iF}} = 1 - \frac{a_{iP}}{a_{iF}} \quad (4)$$

2.2.6 Membrandeckschichtbildung (fouling) und Membranalterung

Beim Betrieb von Membranfiltrationsanlagen treten häufig anorganische Ablagerungen (scaling), Partikelanlagerungen (particle fouling), organische Adsorption (organic fouling) und mikrobiologische Adhäsion (biofouling) an der Membran auf, die zu einer Verzapfung bzw. Verblockung führen [FLHA1993]. Die Konsequenzen, die Ablagerungen auf der Membran auf das Leistungsverhalten des Membranverfahrens haben, sind bereits bekannt (vgl. Kapitel 2.2.4).

Mit einer geeigneten Vorbehandlung des Abwassers wie bspw. Organikabbau, können Ablagerungen auf der Membran gezielt reduziert werden. Die störenden Beläge können chemisch (bei anorganischem Belag) oder mechanisch (bei organischen Belag) eliminiert werden [MAKU1992]. Abbildung 8 stellt die vier Möglichkeiten der Membrandeckschichtbildung an der Porenmembran dar.

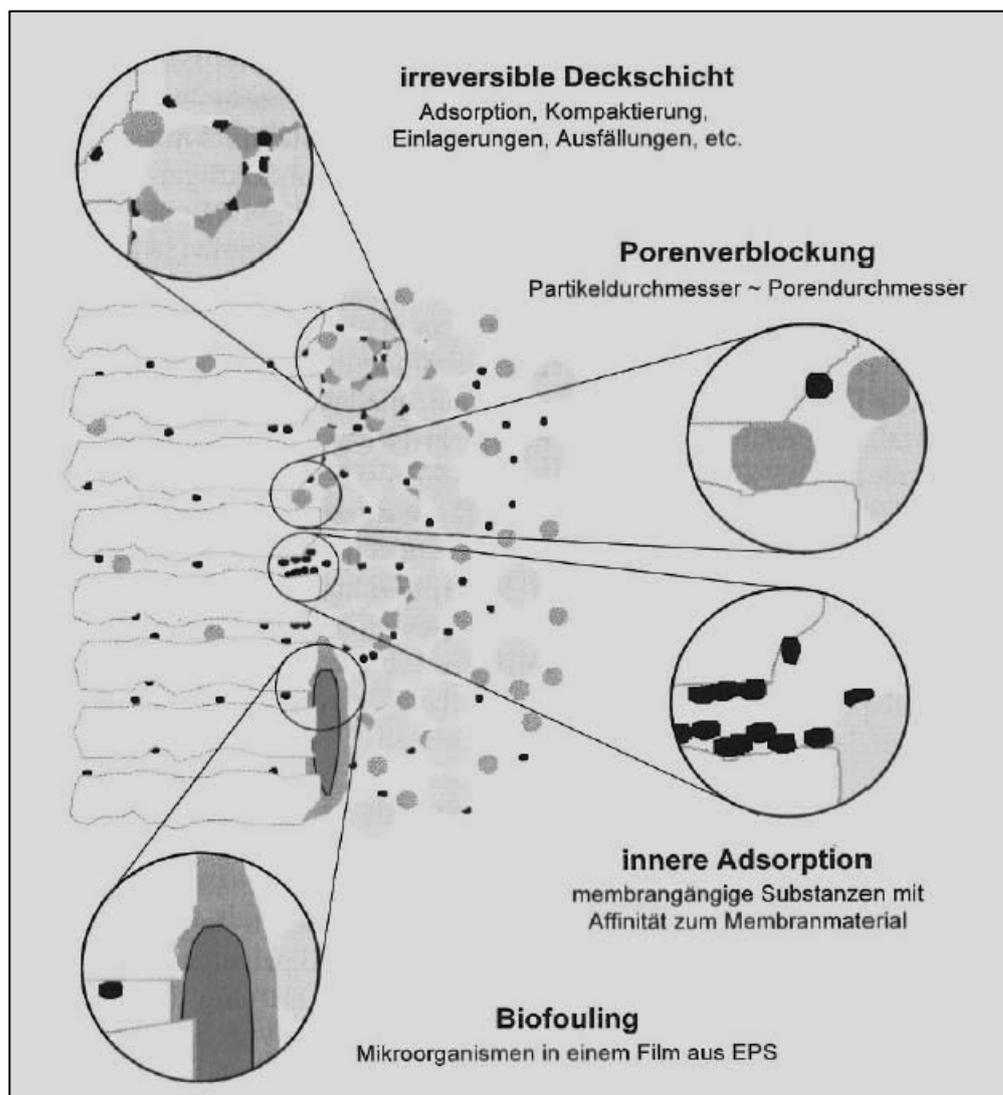


Abbildung 9: Foulingmöglichkeiten [METH2007]

In einem bestimmten Maß können Deckschichten für einen zusätzlichen Filtereffekt gezielt genutzt werden, um so einen höheren Reinheitsgrad des Permeats zu erlangen [MUNLV2003].

Unter Membranalterung ist eine irreversible Veränderung der Membranstruktur zu verstehen, die sich negativ auf die Filterleistung auswirkt. Ursachen hierfür sind permanente mechanische und chemische Einwirkungen auf die Membran. Hervorgerufen werden die Strukturveränderungen durch Auswaschung hydrophiler Membranbestandteile und Chemikalieneinsatz, was eine

Permeabilitätsminderung zur Folge hat. Die Filtrationsleistung, der Bedarf an Reinigungschemikalien und die Membranstandzeit werden im Wesentlichen durch die eingesetzten Elemente der Anlagentechnik und Betriebsweise beeinflusst. Abbildung 9 zeigt die Membranalterung anhand von REM-Aufnahmen.

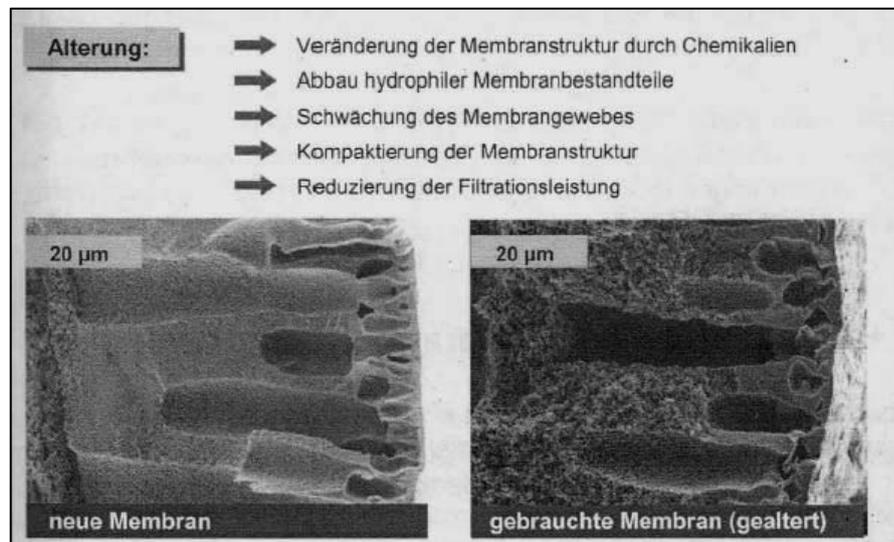


Abbildung 10: Alterung von Membranen (Ursachen und Folgen)

2.3 Membranverfahren ATEC Automatisierungs GmbH

2.3.1 Verfahrensbeschreibung und Einordnung

Bei den Verfahren der ATEC handelt es sich ausschließlich um trocken (extern) aufgestellte Membranverfahren im Cross-Flow-Betrieb (vgl. Kapitel 2.2.4).

Die Membrananlage besteht aus Edelstahl. Die ATEC verfügt über mehrere Anlagenvariationen, bei dem das Grundverfahren immer gleich bleibt. Es werden Flachmembranen, welche um stützende Permeatrohre gewickelt sind (sog. Filterkerzen), im Kombifilter¹ eingesetzt. Diese Membranen filtern von der Außenseite hin zum Inneren. Bei der Variation Tubefilter² werden speziell angefertigte, oder auf dem Markt erhältliche, herkömmliche Rohrmembranen verwendet. Dabei verläuft das Filtern von der Membraninnen- zur Außenseite. Eine bildliche

¹ Spezifische Bezeichnung der ATEC für den Einsatz von Filterkerzen

² Spezifische Bezeichnung der ATEC für den Einsatz von Rohrmembranen

Beschreibung (Abbildung 11) der eingesetzten Membranmodulfunktion, verdeutlicht den Unterschied.

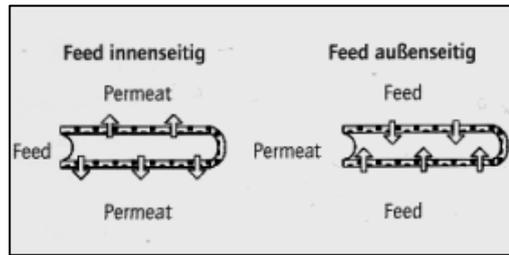


Abbildung 11: Funktionsprinzip Tube- und Kombifilter

Als erstes wird beim ATEC-Membranverfahren das zu behandelnde Wasser von der Zulaufpumpe angesaugt und in den Filterbehälter befördert. Die Zulaufpumpe wird über den Druck (0,8 - 6 bar) im Filterbehälter geregelt und pumpt immer nur soviel Rohflüssigkeit nach, dass der eingestellte Druck im Filterbehälter gehalten wird. Eine offene Entlüftungsleitung vom Filterbehälter zum Schmutzsammelbehälter sorgt während der Befüllung für das Auslüften des Filterbehälters. Nachdem der Behälter mit dem Rohwasser befüllt ist, schließt sich automatisch die Entlüftung und das Rührwerk beginnt zu rotieren. In Folge dessen wird das Rohwasser vom Filterbehälter mit sehr hohen Turbulenzen an die arritierten Membranen transportiert, wo die Separierung der abzutrennenden Komponenten erfolgt. Aufgrund der hohen Strömungsturbulenzen im Feed werden akkumulierende Teilchen wieder von der Membranoberfläche abtragen und mit in den zentralen Filterbehälter gerissen. Die vorherrschende Druckdifferenz zwischen Feed- und Permeatseite (Umgebungsdruck) drückt die zu filtrierende Flüssigkeit durch die Membranen. Das Permeat wird erst in einem Auffangbehälter gesammelt und läuft aus diesem drucklos ab. Dieses Verfahren realisiert bei Einsatz von MF-/UF typische Abtrennungen der Komponenten im Bereich zwischen 0,01 und 0,2 μm .

Beim Tubefilter werden in bestimmten Zeitintervallen, eingestellt je nach Verschmutzungsgrad der Rohlösung, die Membranen rückgespült. Die Rückspülungen der Rohmembranen werden alle 10-20 Minuten vorgenommen. Dazu werden Zulaufpumpe gestoppt und der Ablauf des Permeatsammelbehälters geschlossen. Mittels Luftdruck wird das Permeat durch die Membranen zurück in den Filterbehälter gedrückt und somit die entstandene Deckschicht, von der aktiven Membranoberfläche, abgetragen.

Bei starkem Absenken der Permeabilität, infolge von Aufkonzentrierung im Filterbehälter, müssen die Membranen gereinigt werden. Dazu ist der Anlagenbetrieb auszustellen und der Filterbehälter zu entleeren. Dem folgend wird der Behälter, je nach Beschaffenheit der Rohflüssigkeit, mit saurem oder mit alkalischem Membranreiniger befüllt. Der Reinigungsprozess gleicht dem der Filtrierung. Einziger Unterschied ist, dass die Entlüftungsleitung während des Betriebes offen bleibt. Die Membranfoulants – auf der Membran

deckschichtbildende Komponenten – werden dabei abgetragen und mit in den Membranreinigungstank befördert. Abschließend wird nach erfolgreicher Reinigung der Filterbehälter entleert und erneut mit Schmutzwasser befüllt. [ATEC2011]

2.3.2 Vorteile/Nachteile

Die Membrantechnologie der ATEC besitzt folgende verfahrensspezifische Vor- und Nachteile [ATEC2011]:

Vorteile:

- hohe kontinuierliche Filterleistung pro Membranfläche [m^2/h]
- niedriger Druckaufwand (0,8 – 6 bar)
- zusätzlich, durch Rührorgan, erzeugte turbulente Strömungen in der Membrananlage, bewirken große Scher- und Auftriebskräfte an der Membranoberfläche, welche das Verblocken/Verzopfen der Membranen weitgehend verhindern
- Strömungsgeschwindigkeiten und Druck können unabhängig voneinander geregelt werden
- Höhere Verschleißfestigkeit gegenüber Pumpen, durch Rührorgan bei abrasiven Medien
- das Verfahren eignet sich auch für Abwässer mit extrem hohem Feststoffgehalt aufgrund hoher Turbulenzen im Membranreaktor
- kompakte Bauweise
- sehr hohe Ablaufqualität
- einfacher Austausch der Membranen durch Flügelschrauben

Nachteile:

- Membranverfahren bisher nur als trocken aufgestellte Module erhältlich
- nicht in allen Fällen muss eine hohe Querströmung aufgebracht werden und für solche ist das Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht rentabel
- Entstehender Mehraufwand für die Rührorgane

2.3.3 Derzeitige Einsatzbereiche der Membrantechnologie

Das Membranverfahren der ATEC findet derzeit seinen Einsatz in folgenden Anwendungsgebieten:

- Entfettungsbäder
- Waschanlagenspülwasser
- Autowaschwasser-Recycling
- Textilwaschwasser-Recycling
- Kühlschmieremulsionen
- Schwimmbäder
- Lebensmittelindustrie
- Chemie/Pharma
- Bergbau
- ölverarbeitende Industrie
- Pilotprojekt kommunale Kläranlage Neu Ulm

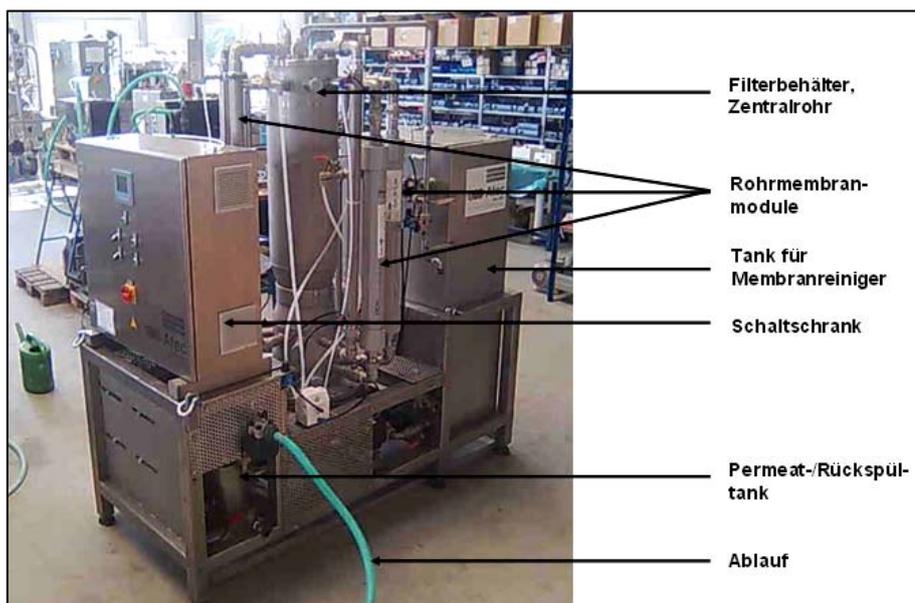


Abbildung 12: Testanlage Tubefilter ATEC

3 Weitergehende Abwasserbehandlung

3.1 Begriffsdefinition

Als weitergehende Abwasserbehandlung wird die Anwendung von Verfahren bzw. Verfahrenskombinationen verstanden, die in ihrer Reinigungswirkung über die der herkömmlichen Abwasserreinigung hinausgehen. Durch die weitergehende Abwasserbehandlung werden insbesondere solche Stoffkomponenten, bis auf geringe Restkonzentrationen, aus dem Abwasser entfernt, die im Ablauf mechanisch-biologischer Kläranlagen noch enthalten sind. Der Begriff weitergehende Abwasserbehandlung sagt jedoch nichts über die Art (mechanisch, biologisch, chemisch, physikalisch) und über die Reihenfolge der miteinander verbundenen Verfahren aus. [ATV1998] [UfBW2009]

Aufgabe einer weitergehenden Behandlung ist es, folgende Inhaltsstoffe aus dem Abwasser zu reduzieren [UfBW2009]

- biologisch abbaubare Restverschmutzungen, um den Sauerstoffhaushalt eines Gewässers zu entlasten
- biologisch schwer abbaubare Stoffe, um die Trink- und Betriebswasseraufbereitung zu entlasten; auch zur Vermeidung von Anreicherungen dieser Komponenten in der Nahrungsmittelkette, dienend dem Schutze der Bevölkerung
- Nährstoffe (Stickstoff, Phosphat), vorrangig um das Algenwachstum im Gewässer zu reduzieren
- Krankheitserreger; um übliche Toleranzwerte für eine Freibadwasserqualität einzuhalten
- Giftstoffe; zur Vermeidung einer Anreicherung dieser, in der Nahrungsmittelkette oder im Trinkwasser, dienend dem indirekten/direkten Gefahrenschutz der Bevölkerung
- Salze, um die Trink- und Betriebswasseraufbereitung zu entlasten
- Radioaktive Nuklide; zur Vermeidung einer Anreicherung dieser in der Nahrungsmittelkette/im Trinkwasser, dienend dem indirekten/direkten Gefahrenschutz der Bevölkerung

Im Rahmen der schriftlichen Arbeit wird die weitere Verfahrensmöglichkeit einer weitergehenden Abwasserbehandlung, zur Reduzierung von Stoffen nach der biologischen Stufe, auf die Membranfiltration begrenzt. Die Membranfiltration zählt zum Abwasserdesinfektionsverfahren. Eine Abwasserdesinfektion ist notwendig, für die Wasserwiederverwendung des gereinigten Abwassers, um Personen, die mit solchem arbeiten und etwaige Verbraucher zu schützen. Die Desinfektion wird im ATV Merkblatt 205 als „Behandlung von Abwasser ... zum Vermindern der Aktivität von Krankheitserregern unter einen vorgegebenen Wert“ definiert. Die Begriffe Entkeimung und Hygienisierung gelten als unspezifisch und sollten nicht mehr verwendet werden. Ziel der Abwasserdesinfektion ist die Entfernung, Abtötung oder Inaktivierung von

Krankheitserregern, so dass eine Gesundheitsgefährdung von Personen ausgeschlossen werden kann. Die Entscheidung für eine Desinfizierung ist nach der Beschaffenheit des Abwassers, nach der Art der Krankheitserreger im Abwasser sowie nach dem Verwendungszweck zu treffen. Ausschlaggebend ist dabei die Charakteristik der suspendierten, gelösten organischen, oxidierbaren Stoffe, pH-Wert, Temperatur, Färbung und Transmission. [ATV1998]

Begriffsdefinitionen, die im abwassertechnischen Bereich oft auftauchen sind in Anlage A-I tabellarisch zusammengefasst.

3.1.1 Membranfiltration als Desinfektionsverfahren

Membranverfahren werden bereits vielseitig für eine Desinfektion bei der Aufbereitung von Trink- und Deponiesickerwasser eingesetzt. Eine Desinfektion ist laut ATV Merkblatt 205 schon im Bereich der MF bzw. UF mit einer Porengröße von 0,2 µm ausreichend. Die Desinfizierung wird dadurch bewirkt, dass Keime und Wurmeier an der Membran abgeschieden werden. Durch die Deckschichtausbildung auf der Membranoberfläche wird dieser Effekt noch zusätzlich verstärkt. Auch wird ein Großteil an Viren mit kleinerem Durchmesser als 0,2 µm aus dem Abwasser abgetrennt, da diese meist an größere Partikel gebunden sind. Das Membranverfahren hält auch tote und inaktive Mikroorganismen zurück. [ATV1998]

Vor- und Nachteile der Membranfiltrationstechnologie sowie deren Einsatzgebiete sind dem Kapitel 2.2.4 zu entnehmen.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen/Anforderungen

3.2.1 Abwasserentsorgung

Das Wasserrecht untergliedert sich in Rechtsebenen. Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über die rechtlichen Ebenen mit ihren wichtigsten gesetzlichen Grundlagen.

Tabelle 2: Rechtlicher Rahmen für die Abwasserentsorgung

Rechtsebene	wasserrechtliche Grundlage
Recht der Europäischen Union	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Richtlinie 2000/60/EG Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik ➤ EG-Kommunalabwasser-Richtlinie 91/271/EWG ➤ EG-Badegewässerrichtlinie 2006/7/EG ➤ EG-Klärschlammrichtlinie 86/278/EWG ➤ EG-Verbrennungsrichtlinie 2000/76/EG (für die thermische Klärschlammbehandlung von Bedeutung)
Bundesrecht	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Wasserhaushaltsgesetz (WHG) ➤ Abwasserabgabengesetz (AbwAG) ➤ Abwasserverordnung (AbwV) ➤ Abgabenordnung (AO)
Länderrecht	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Landeswassergesetz (LWG) ➤ Gemeindeordnungen ➤ Kommunalabgabengesetzen ➤ kommunale Gemeinschaftsarbeit/Zweckverbandsgesetze
ergänzend zu den Ländergesetzen können gelten:	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Landesverordnung über die Eigenüberwachung von Abwasseranlagen (EÜVOA) ➤ Landesverordnung über die Beseitigung von kommunalem Abwasser (KomAbwVO)

Die Wasserpolitik wird im Rahmen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) koordiniert. Ziel der Arbeitsgemeinschaft ist es, „länderübergreifende und gemeinschaftliche wasserwirtschaftliche und wasserrechtliche Fragestellungen zu erörtern, gemeinsame Lösungen zu erarbeiten und Empfehlungen zur Umsetzung zu initiieren“¹.

¹ <http://www.lawa.de>

Es gelten neben den Gesetzen technische Regeln zur Bemessung, zum Bau und Betrieb abwassertechnischer Anlagen. Diese sind in europäischen Normen und DINs sowie in Arbeits- und Merkblättern des DWA-Regelwerks zu finden. Nach deren Veröffentlichung gelten sie als allgemein anerkannte Regeln der Technik. Beispiele für relevante Normen und Regeln für die Abwasserentsorgung in ländlichen Gebieten sind in der Anlage A-II zu finden. [TUK2010]

3.2.2 Abwasserwiederverwendung

„Nach § 18 WHG ist Abwasser so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Gereinigtes Abwasser soll nach Möglichkeit wieder verwendet werden, wobei im Verlauf der Wiederverwendung die Belastungen der Umwelt auf ein Minimum zu begrenzen sind. Bei der Wiederverwendung des gereinigten Abwassers sind allerdings je nach Verwendungszweck bzw. benötigter Qualität unterschiedliche Vorgaben zu beachten“ [TECTRA2010]

An die weitergehende Abwasseraufbereitung werden je nach Endzweck des Wassers unterschiedliche Rahmenbedingungen bzw. Anforderungen gestellt. Die Wesentlichsten sind nachfolgend dargestellt.

a) Betriebswasser

Alle zum gewerblichen, industriellen, landwirtschaftlichen oder zum ähnlichen Zwecke dienende Wässer sind laut [DIN4046] als Betriebswasser definiert. Dazu gehören auch Wässer, welche keiner Trinkqualität entsprechen und im Haushalt sowie im Gewerbe genutzt werden. Betriebswasser wird auch oftmals als Brauch- oder Nutzwasser bezeichnet. Vor allem in der Industrie kann aufbereitetes Betriebswasser sehr gut zum Einsatz kommen. Auch in manchen Um- oder Neubauten privater Haushalte werden inzwischen zwei getrennte Wasserversorgungen, eine Trink- und eine Nutzwasserversorgung, verlegt. Durch die Abwasserwiederverwendung als Nutzwasser, kann viel Frischwasser eingespart werden. Zu beachten ist jedoch, dass der Gebrauch von Betriebswasser im häuslichen Bereich (Toilettenspülung, Waschmaschine etc.) nicht als gesundheitlich unbedenklich eingestuft ist. In Betriebswasseranlagen finden Parasiten, Bakterien und Keime einen optimalen Nährboden. Durch gebildete Aerosole bei der Betriebswassernutzung könnten Krankheitserreger in den menschlichen Körper gelangen. [STSC2011]

In Europa gibt es bisher keine Richtlinie für die Wiederverwendung von Abwasser [COPE2004]. Auch innerhalb Deutschlands gibt es bis heute noch keine gesetzlichen Mindestanforderungen an die Betriebswasserqualität. Aus diesem Grund werden von den Behörden die Werte der EU Badegewässer-Richtlinie (76/160 EWG) empfohlen und als Maßstab für eine gesundheitsunbedenkliche Abwasserwiederverwendung herangezogen. In Tabelle 3 sind die Qualitätsziele für die Verwendung von Betriebswasser aufgeführt [TUM2001].

Tabelle 3: Leit-/Grenzwerte EU-RL 76/160 EWG [TUM2001]

Parameter	Leitwert	Grenzwert
gesamtcolliforme Bakterien in 100 ml	< 500	10.000
fäkalcolliforme Bakterien in 100 ml	< 100	2.000
<i>Streptococcus faecalis</i> in 100 ml	< 100	-
Salmonellen in 1.000 ml	-	0
Darmviren in 10 l	-	0
CSB	< 20 mg/l	
BSB ₅	< 3 mg/l	

b) Nutzung in Gebäuden

Bei Anforderungen an die Betriebswasserqualität für eine Wiederverwendung von anfallendem Grauwasser innerhalb von Gebäuden kann sich auf das „Merkblatt Betriebswassernutzung in Gebäuden“ der Senatsverwaltung für Bauen, Wohnen und Verkehr, Berlin bezogen werden. In Tabelle 4 sind dessen Anforderungen dargestellt.

Die Betriebswassernutzung im Haushalt unterliegt keinem Wasserrecht, da weder in ein Gewässer eingeleitet noch in den Boden versickert wird. Es handelt sich hierbei ausschließlich um eine Kreislaufführung.

In vielen Bundesländern wird für eine Grauwassernutzung grundsätzlich keine Erlaubnis oder Genehmigung gefordert. Die Aufbereitungsanlagen zur Betriebswassernutzung können jedoch dem kommunalen Satzungsrecht der Wasserver- oder -entsorger und der zuständigen Gesundheitsbehörde unterliegen. Von Kommune zu Kommune kann dies ganz unterschiedlich gehandhabt werden. In manchen Landkreisen kann zusätzlich die untere Wasserbehörde für die Grauwassernutzung zuständig sein, wie bspw. in Sachsen und Nordrhein-Westfalen. Um Probleme mit der zuständigen Gesundheitsbehörde zu vermeiden, wird empfohlen vor Einbau einer Grauwassernutzungsanlage sich mit der Behörde auseinanderzusetzen. [TUM2001]

Tabelle 4: Qualitätsanforderungen an Betriebswasser für die Nutzung in Gebäuden [TUM2001]

Qualitätsziele	Beurteilungskriterien / Begründung
hygienisch/mikrobiologisch unbedenklich	gesamtcolliforme Bakterien ¹⁾ < 100/ml fäkalkolliforme Bakterien ¹⁾ < 10/ml Pseudomonas aeruginosa ²⁾ < 1/ml
niedriger BSB ₅	< 5 mg/l, um sicherzugehen, dass das Grauwasser weitgehend gereinigt ist
farblos und klar	UV-Transmission 254 nm in 1 cm Küvette: mind. 60%
sauerstoffreich	> 50% Sättigung (für die Lagerfähigkeit des Betriebswassers)
nahezu schwebstofffrei, geruchlos und nicht fäulnisfähig innerhalb von 5 Tagen	für die Garantie der Funktionsfähigkeit der Armaturen, sodass die Nutzer keinen Komfortverlust erleiden

¹⁾ Analyse entsprechend EU-Richtlinie 76/160/EWG

²⁾ Analyse in Anlehnung der TrinkwV 2001

c) Nutzung für Maschinen/Anlagen

Benötigte Betriebswasserqualitäten für den Einsatz an Maschinen/Anlagen, bspw. zur Kühlung von Aggregaten, legt der Anlagenbetreiber fest. Viele Industriebetriebe bereiten ihr Abwasser auf und leiten es wieder in ihren Fertigungsprozess zurück. Dadurch können sie viel Frischwasser und damit verbundene Kosten einsparen. Zudem zeigt das Unternehmen ein sehr umweltfreundliches Verhalten, welches das Image der Firma anhebt. Bei Wasseraufbereitung für eine Wiederverwendung im Betriebsprozess ist darauf zu achten, dass das Wasser auf die Lebensdauer der Industrieanlage keinen störenden Einfluss nimmt [ENDO2011].

Auch werden Ansprüche an die Abwasserqualität in Bezug auf die Bewässerungstechnik gestellt. Korrosiv wirkende und unlösliche Stoffe sollten aus dem Abwasser eliminiert werden, um Leitungsverstopfungen und Geräteverschleiß zu verhindern [COPE2004].

d) Nutzung in der Getränke- und Lebensmittelindustrie

Für den Sektor der Lebensmittel- bzw. Getränkeindustrie gelten die Anforderungen der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001). Trinkwasser ist laut DIN 2000 Wasser, welches zum Trinken, Kochen, Zubereiten von Lebensmittel, zur Körperpflege und -reinigung vom Menschen genutzt wird [LIRA2004]. Wenn Wasser in irgendeiner Weise mit dem menschlichen Körper in Kontakt tritt, muss es die Qualitätsanforderungen der TrinkwV einhalten. Diese Qualitätsanforderungen gelten auch für die Reinigung von Gegenständen, welche dauerhaft mit dem Menschenkörper oder Lebensmitteln in Kontakt kommen. Laut § 3b TrinkwV müssen Lebensmittel- bzw. Getränkebetriebe für die Herstellung, Behandlung, Konservierung und Inverkehrbringung ihrer Produkte oder Substanzen, welche für den Menschengebrauch

bestimmt sind, die Anforderungen der TrinkwV gewährleisten. Dies gilt auch für die Reinigung von Gegenständen und Anlagen, die unmittelbar mit Lebensmitteln in Berührung kommen könnten [LIRA2004] [TrinkwV2001]. Trinkwasser hat nach der TrinkwV keimfrei, genusstauglich und rein zu sein. Das Wasser ist zudem in der EG 178/2002 als Lebensmittel definiert und somit tragen die Lebensmittel- bzw. Getränkebetriebe die Verantwortung für die Einhaltung der Lebensmittelqualitätsanforderungen. Ebenso sind die Bestimmungen der Lebensmittelhygieneverordnung nach EG 852/2004 zu erfüllen. Der Verantwortungsbereich für die Einhaltung der TrinkwV durch den Wasserversorger (Gemeinde, Kommune) geht grundsätzlich bis zur Grundstücksgrenze und somit fällt die gesamte Verantwortung ab Grundstücksgrenze auf den Unternehmer. Das heißt, dass der Unternehmer alle Verantwortung für Gebäudeinstallationen und für die Wassergüte an Entnahmepunkten trägt. [BOSA2006]

Die Tabelle 5 zeigt allgemeine mikrobiologische Grenzwerte für den menschlichen Gebrauch auf. Die Grenzwerte für Trinkwasser, welches in Flaschen oder sonstigen Behältnissen abgefüllt wird sind in Tabelle 6 dargestellt. [TrinkwV2001]

Tabelle 5: Allgemeine Richtwerte für Trinkwasser [TrinkwV2001]

Parameter	Grenzwert
<i>Escherichia coli</i>	0/100 ml
Enterococcen	0/100 ml
coliforme Bakterien	0/100 ml

Tabelle 6: Richtwerte für Trinkwasser, in Flaschen oder Behältnissen abgefüllt

Parameter	Grenzwert
<i>Escherichia coli</i>	0/250 ml
Enterococcen	0/250 ml
coliforme Bakterien	0/250 ml
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	0/250 ml
Koloniezahl bei 22 °C	100/ml
Koloniezahl bei 36 °C	20/ml

e) Nutzung zur Bewässerung

Für die Bewässerung mit Abwasser sind Aspekte der Hygiene, des Boden-, Pflanzen- und Grundwasserschutzes zu beachten. Zudem sind technischen Gegebenheiten sowie Akzeptanzanforderungen der Bevölkerung (geruchs- und farbfreies Abwasser) zu berücksichtigen.

Die Art des Kontaktes zwischen Mensch und Abwasser spielt bei der Festlegung der Grenzwerte für Bewässerungswasser eine wesentliche Rolle. Je nach potentieller Gefährdung sind die Grenzwerte unterschiedlich definiert. Nur so kann die menschliche Gesundheit geschützt werden. Um den Gesundheitsschutz generell zu gewährleisten, müssen die

Grenzwerte für pathogene Keime (Wurmeier, Viren, Bakterien) und toxische Stoffe streng eingehalten werden. Es gibt unterschiedliche Kontaktmöglichkeiten von Bewässerungswasser und Menschen, die zu betrachten sind. Ein direkter Kontakt durch die Aufnahme über die Haut oder Atemwege besteht bspw. bei Landwirten oder Parkbesuchern. Die Möglichkeit eines indirekten Kontaktes besteht über Nahrungsaufnahme, aufgrund von mit Abwasser bewässertem Obst oder Gemüse. [COPE2004]

Auch um den Boden zu schützen ist eine bestimmte Qualität für die Bewässerung mit gereinigtem Abwasser einzuhalten. Zum Beispiel kann der Boden durch natriumhaltiges Bewässerungswasser versalzen. Dies würde die Wasserleitfähigkeit verringern und zu Ertragseinbußen bei der Ernte führen. Weiter können Schwermetalle in den Boden gelangen und sich dort anreichern. Die notwendigen Anforderungen an das Bewässerungswasser richten sich stark nach:

- der Art des Bodens (Gefüge, Körnung, Durchlässigkeit, besonderer Salzgehalt und chemische Zusammensetzung)
- der Art des Klimas (Aridität, Menge und Verteilung der Niederschläge, Luftfeuchtigkeit, Wind)
- der Pflanzenart (Nährstoffgehalt)
- dem Bewässerungsverfahren (Beregnung, Unterflurbewässerung, Bewässerungsintervalle und -intensität)

Abwasserinhaltsstoffe können sich positiv oder negativ auf Pflanzen auswirken. So sind Calcium und Phosphor wertvolle Nährstoffe. Der Bedarf an Nährstoffen ist sehr abhängig von der Pflanzenart und ändert sich stark in den Phasen des Wachstums der Pflanze. Durch Nährstoffe, die das Abwasser enthält, können Ernteerträge der Pflanzen gesteigert bzw. Düngemittleinsätze eingespart werden. Allerdings sind neben den Nährstoffen auch Substanzen im Abwasser, die sich negativ auf das Wachstum der Pflanze auswirken und die Pflanzen schädigen können. Die Wasseraufnahme der Pflanze wird durch einen zu hohen Salzgehalt gehemmt. Die Art der Pflanze ist sehr entscheidend für die erforderliche Bewässerungswasserqualität, da Pflanzenarten ganz unterschiedlich auf Salzgehalt und Nährstoffmengen reagieren.

Wird die Feldkapazität des Bodens überschritten kann aufbereitetes Abwasser ins Grundwasser gelangen. Dann gelten Bestimmungen zum Grundwasserschutz.

Die Grenzwerte/Leitwerte für die Kriterien Schwermetalle, Spurenelemente, Pflanzennährstoffe (Kationen), Salze (Anionen) und weiterer Parameter für Bewässerungswasser sind in Anlage A-II zu finden.

Dabei sei angemerkt, dass die jährliche Zusatzwassermenge mit mindestens 200 mm¹ auf gleicher Fläche einzusetzen ist [TLL2004]. Die empfohlenen biologischen Grenzwerte sind aus der Zusammenfassung dieses Kapitels oder ebenfalls aus der Anlage A-II zu entnehmen [DIN19650].

f) Einleitung in Badegewässer/Nutzung als Schwimm- bzw. Badewasser

Anforderungen an die Badegewässerqualität sind in der EG-Badegewässerrichtlinie (76/160/EWG) vorgeschrieben. Die Qualität des Wassers sollte möglichst der des Trinkwassers entsprechen, um eine Gesundheitsgefährdung auszuschließen [WIHA2000]. Über die Bestimmung der mikrobiologischen Parameter gesamtcoliforme Bakterien, fäkalcoliforme Bakterien, *Streptococcus faecalis* und Salmonellen erfolgt die Kontrolle der Badegewässerqualität. Die eigentlich harmlosen Bakterien *Escherichia coli* und intestinale Enterococci sind Indikatoren für Fäkalverunreinigungen. Diese Bakterien gelangen über das Abwasser in die Gewässer und sind ein Indiz für Verunreinigungen durch Warmblüterfäkalien. Haupteintragsquellen solcher Fäkalbakterien sind Menschen und Wasservögel. Anhand dieser Parameter wird die Wasserqualität eingestuft. Die Qualitätsbestimmung der Oberflächengewässer erfolgt nach EU-RL 2006/7/EG über mehrere Jahre hinweg. Bisher erfolgte eine Einordnung der Grenzwerte nach der alten EG-Richtlinie (vgl. Tabelle 3). Ab Ende des Jahres 2011 soll überall in Deutschland die Einordnung nach der neuen EU-RL (2006/7/EG), in Tabelle 7 ersichtlich, vorgenommen werden und ab 2015 wird die Badegewässerrichtlinie 76/160/EWG gänzlich in allen EU-Ländern durch die Neue ersetzt. Zukünftig werden die beiden mikrobiologischen Parameter *Escherichia coli* und Darmenterococci sowie eine Sichtkontrolle für die Beurteilung der Badegewässerqualität herangezogen [BMU2007] [EUWRRL2006].

Da die EU-RL noch nicht überall in Länderrecht umgesetzt worden ist und die Gesundheit eines jeden Badegastes gewährleistet sein muss, gilt für Schwimmbäder und -teiche innerhalb Deutschlands die Schwimmbecken- bzw. Badewasserverordnung. Zudem sind die Anforderungen der Regeln der Technik, festgelegt in der DIN 19643, Teil 1: „Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser“, zu beachten. Die Grenz-/Leitwerte sollten unbedingt beachtet werden, da diese auch beim Vorwurf eines schuldhaften Verhaltens, nach einer Schädigung des Badbenutzers durch gesundheitsschädliche Ingredienzien oder Krankheitserreger im Badewasser, herangezogen werden. In diesem Fall bekommt die DIN einen gesetzlich geregelten Charakter und wird bei den zuständigen Gesundheitsämtern als eine vorweggenommene Ausführungsbestimmung zu dem Bundesseuchengesetz § 11 gesehen. Zudem wurde die DIN 19643 an die Hygieneanforderungen der Schwimm- und Badebecken-

¹ 1 mm = 1 l/m² [MÖMO2011]

wasserverordnung (vgl. Tabelle 8) angepasst und erhält somit wiederum Regelungscharakter. [WIHA2000] [DIN19643]

Tabelle 7: Einteilung der Badegewässer in Bewertungsklassen [EUWRRL2006]

Gewässerart	Parameter	Einheit	Hervorragende Wasserqualität	Gute Wasserqualität	Ausreichende Wasserqualität
Binnengewässer	<i>Escherichia coli</i>	KbE/ 100 ml	500 ¹⁾	1000 ¹⁾	900 ²⁾
	Intestinale Enterococcen	KbE/ 100 ml	200 ¹⁾	400 ¹⁾	330 ²⁾
Küsten- gewässer	<i>Escherichia coli</i>	KbE/ 100 ml	250 ¹⁾	500 ¹⁾	500 ²⁾
	Intestinale Enterococcen	KbE/ 100 ml	100 ¹⁾	200 ¹⁾	185 ²⁾

¹⁾ Beurteilung nach Perzentilwert 95

²⁾ Beurteilung nach Perzentilwert 90

Tabelle 8: Anforderungen der Bäderverordnung an Beckenwasser mit biologischer Aufbereitung [BäV2001]

Parameter	Mindestanforderung
<i>Escherichia coli</i>	≤ 100/100 ml
Enterococcen	≤ 50/100 ml
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	≤ 10/100 ml
<i>Staphylococcus aureus</i>	n.n. ¹⁾
Salmonellen	n.n. ¹⁾
<i>Cryptosporidien-Oozysten</i>	n.n. ¹⁾
Sichttiefe	≥ 2 m
Pges	≤ 10 µg/l

¹⁾ nicht nachweisbar

3.2.3 Zusammenfassung

Neben den in diesem Kapitel angeführten Leit- und Grenzwerten sind in Deutschland technische Regelungen (DVGW-Regelwerke), das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) sowie Lebensmittelhygieneverordnung, BBodSchG, BBodSchV, das Düngemittelgesetz (DMG) und die Düngemittelverordnung (DüMV) von den Betriebswassernutzern mit zu berücksichtigen.

Auf nächster Seite werden alle im vorhergehenden Kapitel behandelten rechtlichen Rahmenbedingungen für die mikrobiologischen Parameter tabellarisch zusammengefasst. Es sei an dieser Stelle dringlich darauf hingewiesen, dass neben den hier aufgeführten mikrobiologischen Parametern noch weitere Anforderungen, je nach Art der Wiederverwendung des Abwassers, einzuhalten sind.

Tabelle 9: Zusammenfassung gesetzliche Rahmenbedingungen für die mikrobiologischen Kenngrößen

Abwasserwiederverwendung	Gesamtcoliforme in 100 ml		Fäkalcoliforme <i>E. coli</i> in 100 ml		Streptococcus faecalis bzw. intestinale Enterococci in 100 ml		<i>Pseudomonas aeruginosa</i> in 100 ml		Salmonellen in 1000 ml		Kolonzahl 20°C KBE/ml	Kolonzahl 36°C KBE/ml	Färbung m ⁻¹
	LW	GW	LW	GW	LW	GW	LW	GW	LW	GW			
Badegewässer-Betriebswasser													
EU-Badegewässer-Richtlinie 76/160 EWG ¹⁾ (Gültigkeit für alle EU-Nationen noch bis Ende 2014) (eig. Empfehlung an Brauchwasserqualität)	500 (60)	10.000 (65)	100 (60)	2.000 (65)	100 (60)*	-	-	-	-	0 (65)	-	-	-
EU-Badegewässer-Richtlinie 2006/77/EG Binnengewässer (Bewertung anhand von Bewertungsklassen) Gültigkeit in Deutschland ab Ende 2011 GK1 "Ausgezeichnete Qualität" GK2 "Gute Qualität" GK3 "Ausreichende Qualität"	-	-	-	600 (65) 1000 (65) 900 (60)	-	200 (65) 400 (65) 300 (60) 300 (60)	-	-	-	-	-	-	-
Bade-/Schwimmbadwasser ²⁾ (BaV)	-	-	-	100	-	50	-	10	-	0/100 ml	-	-	-
DIN 19643-1 (1997) Zur Vermischung oxidierender Desinfektionsmittel	-	-	0	-	-	-	0	-	-	-	20	20	0,4
Bewässerungswasser³⁾													
DIN 19650													
EK 1 (Trinkwasser) und Gewächshaus- ohne Einschränkung	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
EK 2 Freiland- und Gewächshauskulturen für den Rohverzehr...	-	-	≤ 200	-	≤ 100	-	-	-	-	-	-	-	-
EK 3 nicht zum Verzehr bestimmte Gewächshauskulturen Freilandkulturen für den Rohverzehr bis Fruchtansatz bzw. Gemüse...	-	-	≤ 2.000	-	≤ 400	-	-	-	-	-	-	-	-
EK 4 (10-fache Menge sollte nicht Überschritten werden) Abwasser, welches min. eine biologische Reinigungsstufe durchfließen hat	-	-	> 2.000	-	> 400	-	-	-	-	-	-	-	-
Grauwasserrecycling													
Wiederverwendung in Gebäuden ⁴⁾ (Merklblatt Betriebswassernutzung in Gebäuden", Senatsverwaltung Berlin)	10.000	-	1.000	-	-	-	100	-	-	-	-	-	-
FBR Hinweisblatt H 201 Grauwasserrecycling (2004) Toilettenpulver, Wäscheabwässer	10.000	-	1.000	-	-	100	-	-	-	-	-	-	-
Trinkwasser (Getränke-/Lebensmittelindustrie)													
Trinkwasserverordnung 2001; für Abfüllwasser in Flaschen und Behältnissen	-	0	-	0	-	0	-	0	-	-	100 Zapfhahn 20 unentziehbar aufbereitender 1000 bei Wasserversorgungs- anlagen (§§)	100	0,5
EU-Richtlinie 98/83/EG (1998) "Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch" für Abfüllwasser in Flaschen und Behältnissen	-	0	-	0	-	0	-	-	-	-	100/ml bei 22°C	20/ml bei 37°C	keine anomalen Veränderungen

¹⁾Streptococcus

²⁾Darmrein: 0 in 10 l nach PU

³⁾Staphylococcus aureus; Salmonellen und Cryptosporidien-Oozysten dürfen nicht nachweisbar sein Sichttiefe: ≥ 2 m; Papes.: ≤ 10 µg/l

⁴⁾Soweit es für die Sicherung der Gesundheit von Mensch und Tier erforderlich ist, ist eine Untersuchung des vorgesehenen Bewässerungswassers

auf potentielle infektiöse Parasiten in einem Liter sowie auf Darmnematoden vorzunehmen

⁵⁾O₂-Sättigung: > 50%; UV-Transmission 254 in 1 cm Klvette: mind. 60 %; BSB₅: < 5 mg/l

Die Angabe in Klammern gibt den Perzentilwert an! (für EU 2006/77/EG val. Anhang)

3.3 Stand der Technik

Die MBR-Technologie wurde schon in den 70er Jahren entwickelt, jedoch kommt sie erst während des letzten Jahrzehnts in der Abwasseraufbereitung zur Anwendung. Zu Beginn der MBR-Technologie wurden insbesondere Membranfiltrationen im Cross-Flow-Verfahren nach dem Belebungsbecken durchgeführt. Dieses trocken (extern) aufgestellte Membranverfahren ist sehr energieintensiv, was die Technologie unattraktiv macht (vgl. Kapitel 6.3). Deshalb gewann die MBR-Technik erst in den 90er Jahren, mit dem Einsatz von getauchten Membranmodulen, stark an Bedeutung.

MBR-Anlagen sind eine Verfahrenskombination aus biologischer Abwasserreinigung und Membranverfahren. Dabei kann die biologische Stufe unter aeroben und anaeroben Bedingungen betrieben werden. Gewöhnlich werden aerobe MBR-Verfahren zur Behandlung von kommunalem Abwasser und anaerobe zur Industrieabwasserbehandlung mit höheren organischen Schmutzfrachten verwendet. Wie in Abbildung 13 dargestellt, unterscheidet sich der Anlagenaufbau des MBRs gegenüber einer konventionellen Kläranlage hauptsächlich durch die Biomasseabtrennung. Bei der konventionellen Kläranlage wird die Biomasse über ein Sedimentationsbecken (A) entfernt. Im Gegensatz dazu findet beim MBR-Verfahren die Biomasseabtrennung über Membranen statt. Es können trocken aufgestellte Membranverfahren (B) im Cross-Flow-Betrieb oder getauchte Module (C) im Dead-End-Betrieb zum Einsatz kommen. Die Betriebsweisen „Cross-Flow“ und „Dead-End“ sind im Kapitel 2.2.4 ausführlich erklärt. Bei Anwendung trocken aufgestellter Membranmodule wird der Belebtschlamm mit einem feedseitigen Druck über die Membranen befördert, was zu hohen spezifischen Permeatflüssen führt. Die direkt in das Belebtschlammbecken, oder alternativ in Filterkammern getauchten Membranmodule, meist Hohlfaser- oder Plattenmodule, erzeugen die treibende Kraft für die Überströmung der Membranen entweder mittels Pumpe oder durch den hydrostatischen Druck der Wassersäule im Belebungsbecken. Charakteristische Parameter für die MBR-Technologie mit trocken aufgestellten Membranmodulen sind in Tabelle 10 den Getauchten gegenübergestellt. [MEUM2011]

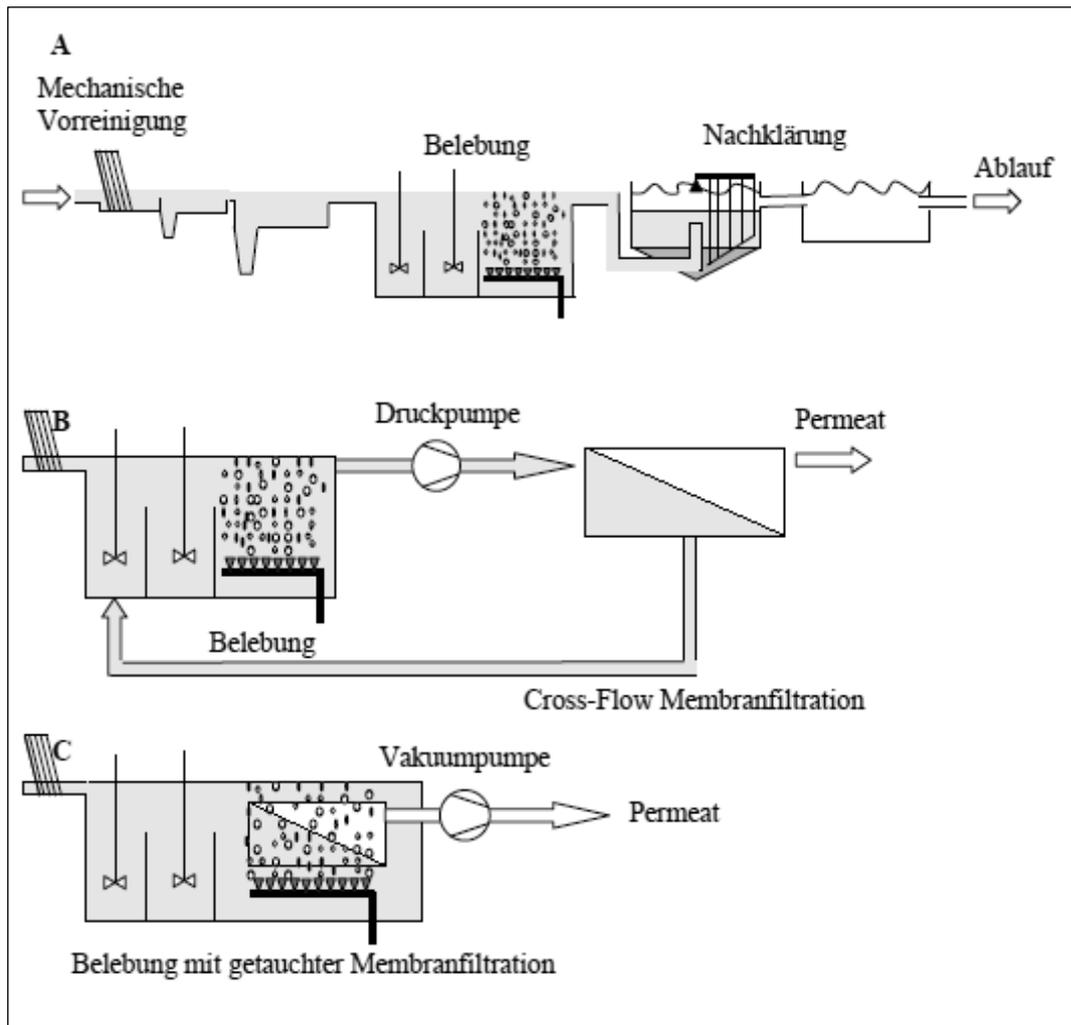


Abbildung 13: konventionelle Kläranlage (A), MBR trocken (B), MBR getaucht (C)

Tabelle 10: Gegenüberstellung Parameter trockener und getauchter Membranmodule

Prozessparameter	Trocken aufgestellte Membranmodule	Getauchte Membranmodule
Transmembrandruck	0,5 – 5 bar	0,1 – 0,5 bar
Überströmgeschwindigkeit	2 – 5 m/s	gering (Gasliftprinzip)
Permeatfluss	40 – 120 l/m ² h	10 – 60 l/m ² h
Energieaufwand	2 – 10 kWh/m ³	0,2 – 0,8 kWh/m ³
Membranfläche	niedrig	hoch

Die Membrananlagen stellen eine erhöhte Anforderung an die Abwassergüte. Um diese zu erreichen werden zur mechanischen Vorbehandlung feinere Rechen und Siebe als bei konventionellen Verfahren verwendet. Vor allem Haare aus sanitärem Abwasser lassen die Membranen verstopfen, was den Membranbetrieb erheblich nachteilig beeinflusst. Wie bereits in Kapitel 2.2.4 erläutert liegen die Porengrößen der in der Abwassertechnik eingesetzten

Membranen im Bereich zwischen 0,1 und 0,4 μm , was eine Abtrennung von Bakterien und Feststoffpartikeln sowie Viren gewährleistet. [MEUM2011]

Die eigentliche Abwasseraufbereitung im MBR findet, wie bei den herkömmlichen Kläranlagen, aufgrund von Stoffwechselprozessen in der biologischen Stufe statt. Von Bedeutung sind dabei eine ausreichende Durchmischung und die Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen. Zur vollständigen Stickstoffeliminierung wird ein Teil des Reaktors anoxisch betrieben. Dazu erfolgt die biologische Reinigung in zwei Verfahrensstufen. Zuerst werden unter Lufteintrag im Belebungsbecken die Stickstoffverbindungen zu Nitrat umgewandelt. Dem folgend wird im Denitrifikationsbecken das Nitrat unter anoxischen Bedingungen zu Nitrit und anschließend zu gasförmigem Stickstoff umgesetzt. Es existieren auch MBR-Anlagen, wie bspw. in Waldmössingen, bei denen das Denitrifikationsbecken vor dem Belebungsbecken geschaltet ist. [MEUM2011]

a) Vorteile des Membranbelebungsverfahrens im Vergleich zur konventionellen Kläranlage

- es wird eine wesentlich bessere Wasserqualität im Ablauf erreicht und damit eignet sich das Wasser zur Mehrfachnutzung [MUNLV2003] [HUBER2010]
- durch Biomasserückhalt hoher Trockenmassegehalt von bis zu 20 g/l und dadurch verbesserte Abbauraten der Schadstofffracht. Typische TM-Konzentrationen von MBRen sind 8-12 g/l und bei konventionellen Kläranlagen (5-6 g/l) [MEUM2011]
- hohe Biomassekonzentration führt zur Verringerung des Nährstoff/Mikroorganismen-Verhältnisses und damit wird auch die hydraulische Verweilzeit herabgesetzt, was zu höherem Durchfluss führt [MEUM2011]
- gute Nährstoffelimination [MEUM2011]
- weniger Überschussschlamm und dadurch geringere Entsorgungskosten [MEUM2011]
- resistent gegen größere Konzentrationsschwankungen im Zulauf [MEUM2011]
- Nachklärbecken werden nicht mehr benötigt und dadurch wird viel Platz eingespart [MUNLV2003]
- kleinere Belebungsbecken durch Aufkonzentrierung der Biomasse [HUBER2010]
- Ablaufqualität wird nicht durch Bläh-, Schwimmschlamm und Schaumbildung beeinflusst [MUNLV2003]
- Anlagen können modular weiterentwickelt werden [MUNLV2003]

b) Nachteile des Membranbelebungsverfahrens im Vergleich zur konventionellen Kläranlage

- es fallen mehr Aufwand und Kosten für die Wartung, Membranreinigung, Energie, Investition und für den Betrieb der Anlage an und somit ist die MBR-Technologie nur wenig wirtschaftlich [MEUM2011]
- es besteht Potential zur Wiederverkeimung des aufbereiteten Wassers bei hoher Konzentration an gelösten organischen Stoffen
- hohe Anforderungen an die mechanische Vorreinigung [ZIRA2011]

- wenige Betriebserfahrungen [ZIRA2011]
- keine sicheren Aussagen zur Lebensdauer der Membranen [ZIRA2011]
- zum Teil sehr große Verblockungs- bzw. Verzopfungsgefahr der Membranen und somit werden hohe Anforderungen an die mechanische Vorreinigung gestellt [ZIRA2011]
- großes Foulingpotenzial der Membranen [MEUM2011]
- beim Austausch defekter Membranen treten oftmals Schwierigkeiten auf bspw. ist es häufig problematisch überhaupt die defekte Membran in einem komplexen Modul zu finden
- Effizienzsteigerung der Reinigungsleistung über Konzentrationserhöhung der Biomasse ist begrenzt durch ansteigenden Belüftungsaufwand [WEST2007]
- durch geringeres Gesamtvolumen treten bei höheren Stoßbelastungen, erhöhte Konzentrationsspitzen (vor allem bei Stickstoffparametern) im Ablauf auf, da bei kleinerem Beckenvolumen auch die Effekte Durchmischung und Ausgleich abnehmen [DOEL2006]

3.4 Ausgewählte Marktvertreter

Hier werden die Verfahren zweier ausgewählter Marktvertreter aufgeführt. Diese marktführenden Unternehmen und weitere Marktvertreter sind in Anlage A-II, Tabelle 39, zusammengestellt.

3.4.1 Membranbelebungsverfahren VRM[®]-Verfahren

Inzwischen wird das Vacuum-Rotation-Membran-Verfahren (VRM[®]) von HUBER in vier kommunalen Kläranlagen, einer industriellen Abwasserreinigungsanlage zur Stärkeaufbereitung und in Pilotierung zur Klarfiltration von Brauereiabwasser eingesetzt. Dieses Verfahren ist an über 30 MBR-Anlagen erprobt worden. Das VRM-Verfahren ist ein Dead-End-Verfahren mit Cross-Flow-Belüftung. [HUBER2010] [OHKL2006]

Die Huber Technologie ist im Prinzip eine rotierende Plattenmembran-Einheit. Diese wird direkt in das Belebungsbecken einer Kläranlage oder in eine separate Filterkammer als getauchtes Modul eingebaut (vgl. Kapitel 3.3, Abbildung 13 C). Die Technologie besteht aus einer Hohlwelle in der die UF-Module in einem definierten Abstand angeordnet sind. Das von Mikroorganismen aufbereitete Abwasser wird mittels Pumpe durch die Membranen, mit einer Porengröße von 150 kD, gesaugt und gelangt über einen Permeatsammler in den Ablauf. Ohne geeignete Maßnahmen, die einer Deckschichtbildung entgegenwirken, würde die Permeabilität in kürzester Zeit nicht mehr gegeben sein. Die Deckschichtbildung wird reduziert, indem eine Querströmung durch gezielten Lufteintrag an der rotierenden Membranoberfläche erzeugt wird. Zum Erlangen einer intensiveren Membransäuberung wird ein Puls-/Pausenbetrieb genutzt, d.h. die Anlagenrotation wird in regelmäßigen Abständen unterbrochen und die einzelnen VRM[®]-Membranplatten des oben befindlichen Segments zentral mit Luft angeströmt. Die hohen

Turbulenzen an der Membranoberfläche bewirken, dass der aufkonzentrierte Belebtschlamm aus den Plattenzwischenräumen eliminiert und die Membranen gesäubert werden. Durch den zentralen Lufteintrag kann beim Spülluftgebläse auf kleinere Druckluftstufen zurückgegriffen werden, was sich auf Investitions- und Betriebskosten positiv auswirkt. Die Kombination Puls-Pausenbetrieb und sequenzielle Reinigung erzielen eine intensive Membranreinigung bei hoher hydraulischer Permeabilität. Mit diesem deckschichtkontrollierten Verfahren kann eine periodische Rückspülung sowie chemische Reinigung fast vollständig entfallen. Es erfolgt nur eine halbjährliche Desinfektion gegen durchgewachsene Biofilme und permeatseitige Wiederverkeimungen. [HUBER2010] [OHKL2006]

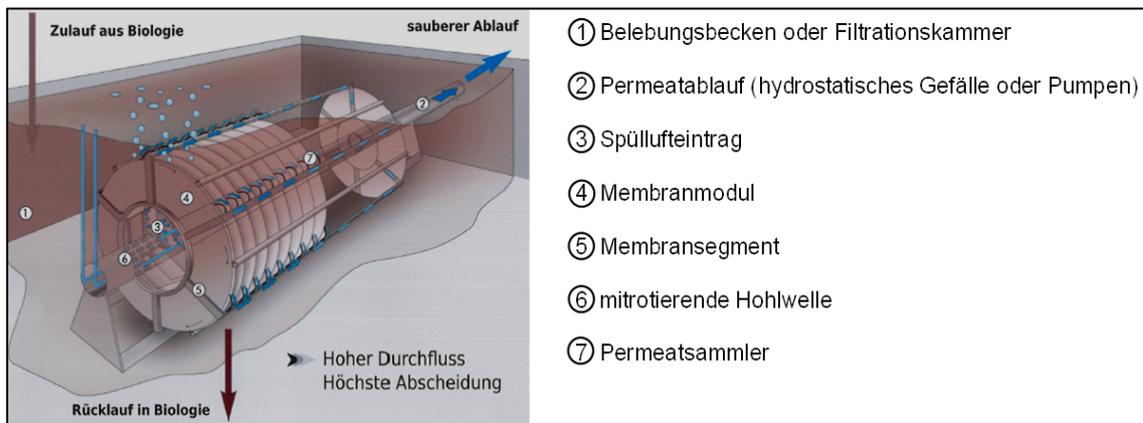


Abbildung 14: MBR-Prinzip der HUBER VRM®-Technologie

Bei Bedarf kann die VRM®-Einheit auch in Containern installiert werden, was eine komplette Klärsystemerweiterung ohne zusätzliche Errichtung von Gebäuden ermöglicht. Die VRM®-Systeme von HUBER gibt es in den Baugrößen VRM® 20 und VRM® 30. In Tabelle 11 sind einige Kenngrößen der VRM®-Anlage dargestellt. [OHKL2006]

Tabelle 11: Kenngrößen der VRM®-Technologie

Kenngrößen	VRM® 20	VRM® 30	Einheit
Durchmesser	2,0	3,0	m
Rotationseinheit			
Membranfläche	bis 900	bis 2.880	m ²
max. Durchfluss	24,3	77,8	m ³ /h
max. Permeatfluss	30	30	l/m ² * h
transmembrane Druckdifferenz	< 250	< 250	mbar
Porentrenngrenze	< 0,1	< 0,1	µm
Trockensubstanz	12-16	12-16	g/l
Vorbehandlung Lochsiebung	< 3	< 3	mm

Mit einer Porentrenngrenze von etwa 38 nm werden alle Feststoffpartikel, Bakterien und fast alle Viren vom Wasser separiert, sodass eine Wiederverwendung als Betriebswasser möglich ist. Die Tabelle 12 gibt Auskunft über den erreichten Schmutzfrachtrückhalt. [HUBER2010]

Tabelle 12: Rückgehaltene Schmutzfracht (Brauereiabwasser Pilotierung) [OHKL2006]

Parameter	Zulauf	Ablauf	Einheit
AFS	6,8	0	g/l
CSB	5.600	40	mg/l
NH ₄ -N	3,7	0,32	mg/l
Pges.	104	3,8	mg/l

a) Verfahrensspezifische Vorteile

- keine Rückspülungen der Membranen notwendig
- selten chemische Reinigungen notwendig
- geringer Energieaufwand

b) Verfahrensspezifische Nachteile

- schwieriger Membranaustausch und -wartung (getauchtes Modul)
- große Membranfläche wird benötigt

3.4.2 BIOMEMBRAT[®] und BIOMEMBRAT[®]-Plus

Der BIOMEMBRAT[®] der Wehrle Umwelt GmbH besteht aus einem Bioreaktor für die aerobe Anwendung und aus trocken aufgestellten Rohrmembranen (vgl. Abbildung 15). Die Porengrößen der eingesetzten Rohrmembranen entsprechen dabei der MF/UF (vgl. Kapitel 2.2.4). Als Referenz kann die Technologie 125 großtechnische Einsätze weltweit vorweisen und gilt als marktführend bei MBREn mit trocken aufgestellten Membranen. Das eingesetzte Membranverfahren ist dem Cross-Flow-Verfahren zu zuordnen.

Der aus dem belüfteten Bioreaktor anfallende Belebtschlamm wird mit einer definierten Strömungsgeschwindigkeit in die extern aufgestellten, parallel geschalteten Rohrmembranmodule befördert. Aufgrund des Druckverlustes im Membranmodul entsteht ein Förderdruck, der das gereinigte Abwasser in den Ablauf befördert. Je nach Belastung des anfallenden Abwassers werden unterschiedliche Membran- und Modulkonfigurationen sowie unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten und Lufteintragspfade eingesetzt.

Das Verfahren eignet sich für die Behandlung von schwach bis stark belasteten Abwässern aus diversen Industriesektoren und zur Aufbereitung im kommunalen Bereich. Weiterhin findet diese Technologie ihren Einsatz in der Aufbereitung von Deponiesickerwasser, in der Grundwasser-

sanierung sowie in der Schwarz- und Grauwasseraufbereitung von Schiffsabwässern. Auch Abwässer aus der Sonderabfallentsorgung sowie aus Gastronomie, Hotels und Berghütten können mit dem BIOMEMBRAT[®]-Verfahren behandelt werden.

Die nachfolgende Tabelle 13 stellt den spezifischen Energieverbrauch, die Filterleistung und die benötigte Membranfläche für die externe Membrananlage des BIOMEMBRAT[®]s für die Behandlung von unterschiedlich stark belasteten Abwässern dar.

Tabelle 13: Kenngrößen BIOMEMBRAT[®]-Technologien

	BIOMEMBRAT [®]	BIOMEMBRAT [®] LE	BIOMEMBRAT [®] - Airlift
Abwasser	hoch belastet	mittelstark belastet	schwach belastet
Membran	Rohrmembran	Rohrmembran	Rohrmembran
Membrantrenngrenze	UF	MF/UF	MF/UF
spezifischer Energieverbrauch [kWh/m ³]	2,5 - 6	0,9 - 2	0,5 - 1,5
Filterleistung [l/m ² * h]	70 - 180	40 - 70	30 - 50
Membranfläche [m ² je 100 m ³ Abwasser am Tag]	25 - 60	60 - 100	80 - 150
Feststoffkonzentration in der Belebung [g/l]	15 - 35	8 - 15	8 - 15
membran- flächenspezifische Anschlussleistung [W/m ²]	200 - 1000	40 - 200	20 - 80

Für Direkteinleiter mit sehr hohen Einleitanforderungen und für Unternehmen, die im Vorfeld eine Wasserwiederverwendung planen, wurde die BIOMEMBRAT[®]-Plus-Technologie von der Wehrle Umwelt GmbH entwickelt. Der BIOMEMBRAT[®]-Plus wird unter anderem für die Aufbereitung von Deponiesickerwasser (Rems-Murr-Kreis) eingesetzt. Die BIOMEMBRAT[®]-Plus-Technologie ist eine Weiterentwicklung ihres herkömmlichen Verfahrens, welches eine Nanofiltrationsanlage mit einer physikalisch-chemischen Verfahrensstufe kombiniert, um die anfallenden Konzentrate zu behandeln. Die Anreicherung von schwer abbaubaren Ingredienzien im Konzentrat steigert oftmals die Wirtschaftlichkeit von physikalisch-chemischen Nachbehandlungen. Die Aufbereitung des Konzentrats erfolgt entweder durch chemische Oxidation oder durch Aktivkohleadsorption. Nach der Behandlung wird das Konzentrat wieder in die biologische Stufe zurückgeführt (vgl. Abbildung 16). [WEUM2011]

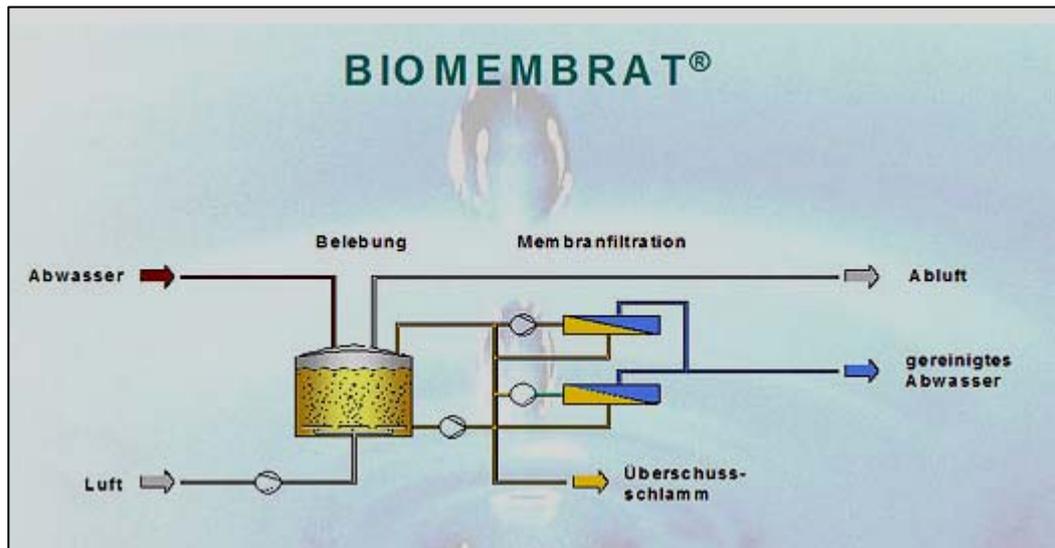


Abbildung 15: BIOMEMBRAT®-Verfahren [WEUM2011]

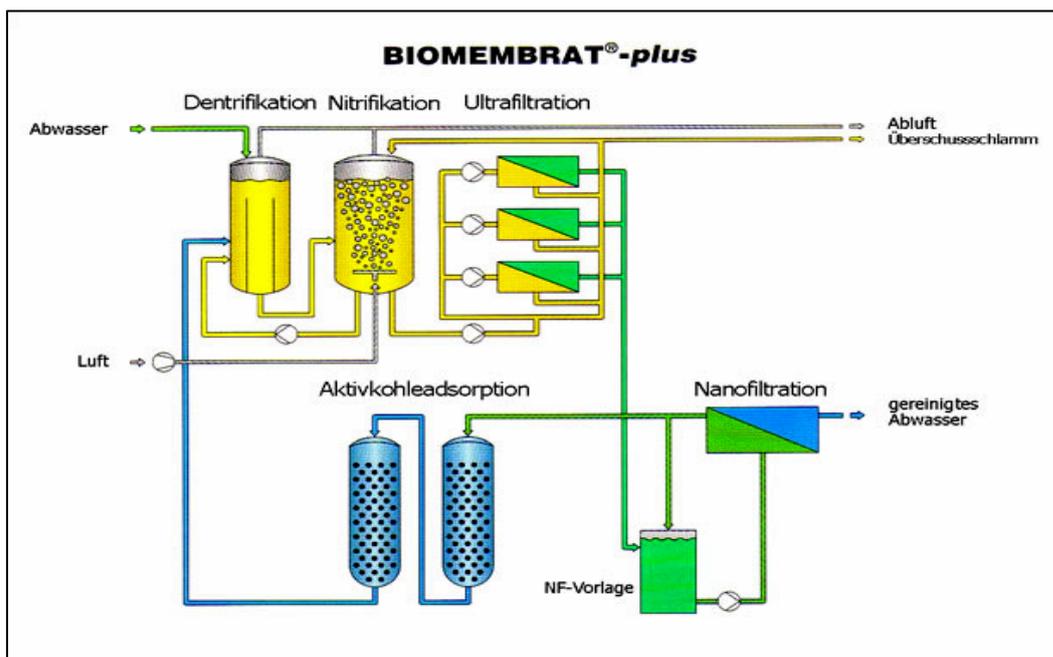


Abbildung 16: Schematische Darstellung des BIOMEMBRAT®-PLUS-Verfahrens [WEUM2011]

a) Verfahrenstechnische Vorteile

- einfacher Membranaustausch und einfache Wartung der Membrananlage
- kleinere Membranflächen
- höherer Durchsatz

b) Verfahrenstechnische Nachteile

- hoher Energieaufwand für die Querströmung
- höherer Platzbedarf im Vergleich mit MBR mit getauchtem Membranmodul

3.5 Anwendungsfälle/Einsatzpotential

3.5.1 Global

Es werden international in etwa 900 Membranbelebungsanlagen für die Abwasseraufbereitung eingesetzt. Dabei sind Asien und Nordamerika mit der meisten Anzahl an Membranbelebungsanlagen Vorreiter. In Anlage A-II, Tabelle 34, ist eine detaillierte Verteilung nach der Anlagenanzahl dargestellt. Die Anzahl der Membrananwendungen in der kommunalen Abwasserbehandlung hat sich innerhalb der letzten Jahre weltweit verdoppelt. Zurückzuführen ist dies, auf den drastisch ansteigenden Einsatz der Membrantechnik, welche einen geringen Platzbedarf, eine kompakte modulare Bauweise und feststofffreie Abläufe verspricht. Zu erkennen ist außerdem, dass in Amerika hauptsächlich die Hohlfaser- und in Asien die Plattenmembranen eingesetzt werden.

In Abbildung 17 wird die globale Entwicklung der Anlagenzahlen sowie -kapazitäten für die Jahre 1999-2007 graphisch dargestellt. Auffallend ist, dass die MBR-Anlagen mit Hohlfasermodulen eine höhere Kapazität aufweisen als die mit Plattenmodulen. [PIJO2008]

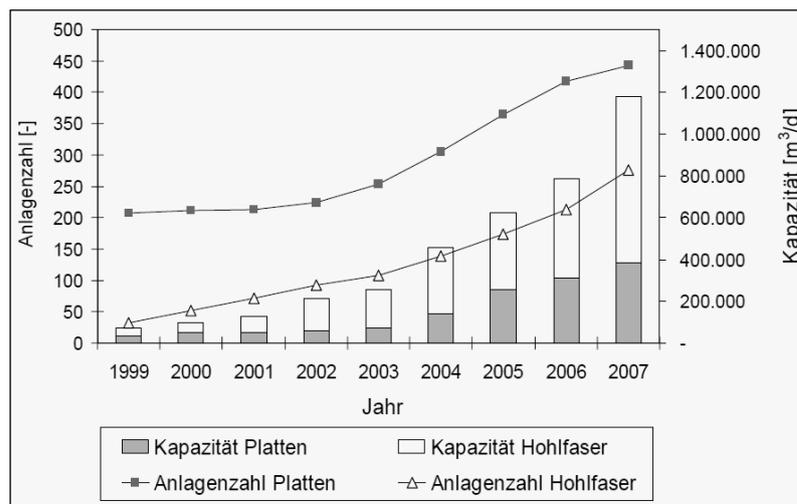


Abbildung 17: Weltweite Entwicklung kommunaler MBR-Anlagen [PIJO2008]

3.5.2 Europa

Vorreiter beim Einsatz kommunaler Membranbelebungsanlagen in Europa sind Deutschland und Großbritannien. Es werden allein in Deutschland Anlagen mit einer Kapazität von mehr als 80.000 m³/d betrieben. Ausschließlich Großbritannien übertrifft diese Kapazität mit 88.000 m³/d. In Europa betreiben neben Deutschland und Großbritannien noch hauptsächlich Italien, Spanien und Frankreich kommunale MBR-Anlagen. Insgesamt werden bisher in Europa etwa 169 Stück betrieben. „Zu den größten europäischen Membranbelebungsanlagen hinsichtlich der hydraulischen Kapazität zählen das Gruppenklärwerk Nordkanal in Deutschland mit einer maximalen Kapazität von etwa 45.000 m³/d und der MBR Brescia in Italien mit einer maximalen Kapazität von etwa 42.000 m³/d. Die erste europäische kommunale Membranbelebungsanlage wurde im Jahre 1998 in England (Porlock) in Betrieb genommen.“ [PIJO2008] MBR-Anlagen gewinnen auch in der industriellen Anwendung immer mehr an Bedeutung und so bietet sich ein weites Spektrum für deren Einsatzbereich. Tabellen 36 und 39, in Anlage A-II, geben einen allgemeinen Überblick über die Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten. [PIJO2007]

3.5.3 Deutschland

In erster Linie wird innerhalb der kommunalen Abwasserreinigung die integrierte Anordnung der getauchten Membranstufe, in Kombination mit Belebungsbecken, als Membranbelebungsverfahren angewandt. Für einzelne Filtrationsbecken entstanden höhere technische Aufwendungen für Rezirkulationspumpen. Erfahrungsberichte der vergangenen Jahre zeigen, dass sich immer mehr betriebliche sowie kostenmäßige Vorteile entwickeln. Durch die vorliegenden Betriebserfahrungen sind Randbedingungen für den Einsatz der Membrantechnik weiter verbessert worden. Im Jahre 2008 sind, laut Johannes Pinnekamp, 19 Membranbelebungsanlagen im kommunalen Einsatz bekannt. In Anlage A-II, Tabelle 37, werden diese Membranbelebungsanlagen aufgeführt. Zunehmend werden mittlerweile MBRen auch auf Schiffskläranlagen angewendet. [PIJO2008]

Bei Membranbelebungsverfahren im kommunalen Bereich beschränkt sich der Einsatz bisher ausschließlich auf MF- und UF-Anlagen im Niederdruckbetrieb. Diese dienen vorrangig dem Rückhalt von Mikroorganismen und Partikeln, was die Wasserqualität im Ablauf wesentlich verbessert. Im Kapitel 3.4 werden derzeitige eingesetzte Technologien nomierter Marktvertreter vorgestellt.

4 Verfahrenskombination Rieselstrom-Bioreaktor und Membranfiltration

Die VK-RR/MA wird von der DAS in Kooperation mit der ATEC umgesetzt.

Das Innenleben des RRs wird von sessilen Mikroorganismen bewohnt, die sich hauptsächlich auf dem Trägermaterial befinden. Das Trägermaterial und der auf ihm gebildete Biofilm wirken sehr gut als Filter vor der Membranstufe. Des Weiteren treten die festsitzenden Mikroorganismen nicht in Kontakt mit den eingesetzten Membranen. Dies ist ein wesentlicher Vorteil, da die Extrazellulären Polymeren Substanzen (EPS) größtenteils von der Membran ferngehalten werden. Die EPS sind makromolekulare Stoffwechselprodukte – Huminsäure, Proteine, Kohlenhydrate – der Mikroorganismen, die den Biofilm bilden. Somit wird das Fouling auf der Membran stark eingedämmt und es sinken Chemikalieneinsatz und Anzahl der Reinigungsintervalle für die Membranreinigung. Deshalb bietet sich dieses Verfahren sehr gut für eine Kombination mit nachgeschalteter Membranfiltrationsstufe an. Weitere Verfahrensmerkmale, die die Vorschaltung des RRs befürworten sind dem Kapitel 2.1.2 zu entnehmen. Anforderungen, die an den RR für die Verfahrenskombination zu stellen sind, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit zusammengetragen.

Die ATEC realisiert ihr Cross-Flow-Membranverfahren indem sie mittels Zulaufpumpe und Rührorgan das Wasser über die Membranen befördert. Dadurch werden, wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, große Turbulenzen erzeugt, die einem Membranfouling entgegenwirken. Weitere nennenswerte Vorteile des ATEC-Verfahrens sind im Kapitel 2.3.2 aufgeführt und dort zu entnehmen. Anforderungen an das Verfahren für die neue Verfahrenskombination werden in den nachfolgenden Kapiteln deutlich.

4.1 Erwartungen/Hypothese

Es ist anzunehmen, dass die VK-RR/MA mindestens genauso leistungsfähig und betriebssicher ist, wie es derzeitige MBR zeigen. Sicherlich werden sich auch verfahrensspezifische Vorteile der Kombination in den Versuchsergebnissen wieder zu finden sein.

Da das Abwasser im Ablauf des RRs bereits sehr sauber und damit weitgehend partikelfrei ist, wird die Membran mit sehr gut vorbehandeltem Wasser beschickt, was, verglichen mit den MBR des Standes der Technik (vgl. Kapitel 3.3) heutzutage, zu längeren Standzeiten der Membranen führt. In folgender Tabelle 14 sind Ablaufwerte verschiedener Parameter von herkömmlichen Kläranlagen mit denen von MBR gegenübergestellt. In Anbetracht, dass es sich bei der VK-RR/MA auch um eine biologische Stufe mit erweiterter Membranstufe handelt, sind Ablaufwerte der neuen Verfahrenskombination ähnlich denen des MBR zu erwarten.

Tabelle 14: Vergleichswerte herkömmliche Kläranlage und MBR [DOEL2006]

Parameter	konventionelle Belebungsanlage	MBR
AFS [mg/l]	5-20	< 1
CSB [mg/l]	40-50	< 30
NH ₄ -N [mg/l]	1,0	1,0
Nges. [mg/l]	10	10
Pges. [mg/l]	1,0	0,5
Gesamtcoliforme [KbE/100 ml]	> 10 ⁶	< 100

Die Membranfiltration bietet die Möglichkeit zur gezielten Keimreduzierung im Abwasser. Die Minimierung der Keime wird aus seuchenhygienischer Sicht zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen. Dabei spielen Krankheitserreger die fäkal-oral übertragen werden eine überwiegende Rolle. Mit der VK-RR/MA kann prognostiziert werden, dass alle Bakterien, Parasiten und Viren soweit aus dem Abwasser entfernt werden, dass die Hygienestandards der neuen EU-Badegewässerrichtlinie 2006/7/EG eingehalten werden. Somit ist das Ablaufwasser sowohl für eine Direkteinleitung in Badegewässer als auch für eine Wiederverwendung geeignet. Zudem ist anzunehmen, dass das behandelte Abwasser alle mikrobiologischen Anforderungen an die Bewässerungswasserqualität ab Eignungsklasse 2 erfüllt (vgl. Kapitel 3.2.3 Tabelle 9 oder Anlage A-II DIN 19650) und dass die Leitwerte für Grauwasserrecycling ebenso eingehalten werden. Ein weiter Vorteil der VK-RR/MA liegt im geringen Platzbedarf. Aus diesem Grund stellt sie eine umweltfreundliche Kompaktlösung für dezentrale Abwasserprobleme (vgl. Kapitel 4.6.1) und für Unternehmen dar, die einer Wasserwiederverwendung entgegenstreben oder spezifische Ablaufwerte einhalten müssen, um in einleiten zu dürfen.

Nachteilig aufzuführen ist, dass wie andere MBR-Verfahren auch, die VK-RR/MA erst nach einer mechanischen Vorbehandlung sinnvoll ist. Dies bedeutet, dass grobe Abwasserinhaltsstoffe (z.B. Ohrenstäbchen, Folienreste usw.) vorher aus dem Abwasser entfernt werden müssen, um eine Verstopfung im RR bzw. dessen Tellersprenkelsystem auszuschließen. Weiter ist der RR das tragende Glied in der Verfahrensverkettung. Aus diesem Grund muss er immer einen stabilen Betrieb mit kontinuierlichem Ablauf gewährleisten. Denn wird die Membrananlage nicht genügend mit Wasser beschickt, besteht Gefahr, dass die Membrantechnologie bzw. deren Bauteile/Bauteilgruppen beschädigt werden. Pumpen und Rührorgan könnten heißlaufen oder die Membranen austrocknen, was deren Zerstörung zur Folge hätte. Auch werden die im Wasser gelösten organischen Verbindungen (DOC), welche nicht von der Mikrobiologie abgebaut werden, im Permeat der Membran wieder zu finden sein. Somit liegt die Schlussfolgerung nahe, dass noch weitere Reinigungsstufen (NF/RO) für spezielle Anwendungsfälle unumgänglich sind.

An beide Technologien müssen bestimmte Anforderungen gestellt werden, damit die vorher dargestellten Erwartungen an die VK-RR/MA erfüllt werden.

4.2 Anforderungen an die RR-Technologie

Die Erwartungen an die Verfahrenskombination können nur mit einer gut funktionierenden Biologie realisiert werden. Demzufolge muss dem RR-Verfahren eine besondere Bedeutung zugeschrieben werden. Zusätzlich den hier angeführten, sind im Kapitel 4.4 weitere Anforderungen sowohl an die biologische Stufe als auch an die Membrantechnik vorzufinden.

Anforderungen sind wie folgt an den RR zu stellen:

- große Raumabbauleistung von organischen Schmutzfrachten (CSB, BSB)
- Abbau von Stickstoff- und Phosphatverbindungen
- Rückhalt von feinen Partikeln (z.B. Haare, Fasern, Papierreste usw.)
- Abbau/Rückhalt von Membranfoulants (z.B. Proteine und Kohlenhydrate, Huminsäure)
- einfache Regenerierung des Trägermaterials

4.3 Anforderungen an die Membrantechnologie

In Anlehnung an der Literatur werden folgende maßgebliche Anforderungen an die eingesetzte Membrananlage bzw. an deren Bauteile aufgeführt [VOKL2006] [DVGW W 213-5].

Im Folgenden sind die Erfordernisse an die Membrantechnologie aufgeführt:

- gute Benetzbarkeit der Membranen mit Wasser (Hydrophilität)
- geringes Foulingpotential
- Membranmaterial möglichst porös mit enger Porengrößenverteilung
- keine Fehlstellen im Membranmaterial
- einfache Realisierung der Rückspülbarkeit sowie Reinigung der Membranen
- einfache Austauschmöglichkeit der Membranen
- sehr gute Filterleistung

4.4 Gesamtanforderungen an die VK-RR/MA

Abgeleitete Überlegungen aus den Kapiteln 4.1-4.3 ergeben folgende Anforderungen an die VK-RR/MA.

Die Kombination muss in erster Linie eine hohe Raumabbauleistung erbringen. Sie muss dem hydraulischen Druck des ankommenden Schmutzwassers standhalten. Generell gilt, dass beide Anlagenteile sowie die Anlagenperipherie einen qualitativ hochwertigen Standard erfüllen müssen, um Wartungs- und Reparaturkosten niedrig zu halten und eine lange Lebensdauer

garantieren zu können. Damit einher geht die Forderung nach hoher chemischer und mechanischer Standfestigkeit der verbauten Elemente. Alle Bauteile sollten für die Wartung frei zugänglich und leicht zu montieren sein. Dort wo benötigt sind Probenahmekugelhähne anzubringen.

Für die Betriebssicherheit der VK-RR/MA sind beide Anlagenteile verantwortlich. Ein integrierter elektronischer Sicherheitskreislauf, der die beiden Anlagenkomponenten getrennt voneinander im benötigten Umfang überwacht und steuert, böte dabei eine Kontrollinstanz. Das Not-Aus-System ist ein unverzichtbarer Anbau, da es schnell reagiert und Kollateralschäden vermeidet. Um im Fall der Havarie reagieren zu können, muss ein Reserveabwasserbehälter dem Membrananlagenzulauf vorgeschaltet sein um die Beschädigung von Bauteilen zu vermeiden.

Um ökologische Prinzipien zu erfüllen, werden für alle Anlagenbestandteile nach Möglichkeit recyclebare Materialien gefordert. Die (Transport-) Wege zwischen den einzelnen Hauptkomponenten der Anlage sind kurz zu halten, um Materialeinsatz für die Anlagenperipherie zu sparen und die Störanfälligkeit zu senken. Der Einsatz von Chemikalien für die Membranreinigung und der energetische Aufwand zum Betreiben der Anlage ist zu minimieren. Die Kombination muss effizient arbeiten und daher beide Komponenten dementsprechend aufeinander abgestimmt sein. So müssen die Volumenströme aneinander angepasst und hohe Packungsdichten im RR (Trägerbett) und Membrananlage (Haufwerk) gewährleistet werden.

4.5 Mögliche Realisierung der Verfahrenskombination

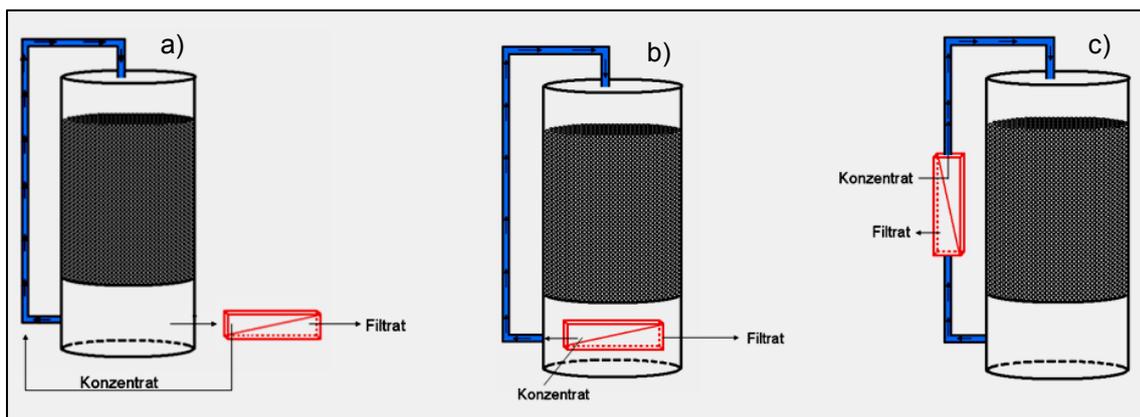


Abbildung 18: Prinzipskizze Verfahrensmöglichkeiten

Die Abbildung 18 skizziert grob mögliche Aufbauvarianten VK-RR/MA. Die Verfahrenskombination b) fällt bei Anwendung des Membranverfahrens der ATEC heraus, da es sich bei diesem Verfahren ausschließlich um ein trocken aufgestelltes System handelt. Auch wird das Verfahrensmodell c) nur schwer mit dem Verfahren der ATEC zu realisieren sein, da die bisher

kennen gelernten Anlagen zu sperrig für eine Integration im Kreislauf des RR sind. Zudem müsste für den Austausch von defekten Membranen die komplette VK-RR/MA stillgelegt werden.

Das zweistufige Model a) scheint für die Realisierung am geeignetsten, da zum einen der Membranaustausch unabhängig vom Betrieb des RRs erfolgen kann und zum anderen bei Havarie einer der beiden Verfahrensstufen, die Andere davon relativ unberührt bleibt. Umbauten und Revisionsarbeiten sind demzufolge bei geringer Betriebsbeeinträchtigung leichter umsetzbar.

4.6 Mögliche Einsatzgebiete

Werden, wie in Kapitel 4.1 erwartet, die Grenz-/Leitwerte von der VK-RR/MA eingehalten, ergeben sich für die Technologie nachfolgend aufgeführte Anwendungsmöglichkeiten.

4.6.1 Dezentrale Systeme/Großstädte (Mega-Cities¹)

Schon vor 10 Jahren wurde, im Abschlussbericht für „Integrierte Ver- und Entsorgungssysteme für urbane Gebiete“, das herkömmliche Abwasserentsorgungssystem mit Schwemmkanalisation in Frage gestellt. In deren Instandhaltung, Ausbau, sowie Sanierung von Abwasserkanälen werden Milliarden Euros investiert, obwohl dieses System offenbar nicht mehr zeitgemäß ist. Weltweit werden Alternativen zu diesem traditionellen Konzept gesucht. Als alternativen Lösungsansatz zur Schwemmkanalisation mit anschließender, zentraler Abwasserreinigung wird die dezentrale Abwasserentsorgung genannt. Dazu soll die Abwasserbehandlung in kleineren Kläranlagen für Wohnsiedlungen, Ortsteile oder in privatisierten Kleinanlagen für Wohnblöcke stattfinden. [TUM2001]

Schnelle Entstehungen von Mega-Cities und starker Industrieausbau, wie es in den Schwellenländern (z.B. in Südamerika und Asien) der Fall ist, schaffen Abwasserprobleme, die es zu lösen gilt [SCEV2011]. Eine Realisierung ähnlicher (Abwasser-) Installationen und -kanäle, wie in den Industriestaaten vorhanden, ist in einem kurzen Zeitraum nicht möglich und aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten auch nicht finanzierbar [TUM2001]. In Peking werden laut Vertreter deren Stadtverwaltung mittlerweile keine Wohnblocksbauten mehr ohne eigene Wasserkreislaufführung genehmigt [FRFR2006]. Auf längerfristige Sicht werden ähnliche

¹ Mega-Cities entstehen durch Landflucht. Für den massiven Bevölkerungsanstieg stehen meist nicht genügend Wohnraum und Versorgungsgüter zur Verfügung.

Probleme auch in den Entwicklungsländern erwartet, wo bisher nur notdürftige Kanalisationssysteme und keine Kläranlagen vorhanden sind [SCEV2011].

Eine kompakte Lösung, was die neuartige VK-RR/MA verspricht, könnte dabei eine interessante Schlüsselrolle spielen.

4.6.2 Industrieabwässer

Im Industriesektor ist ein zunehmender Wasserbedarf zu verzeichnen. Dadurch entstehen erhebliche Mehrkosten für die Unternehmen. Dies hat zur Folge, dass zunehmend nach Abwasseraufbereitungsverfahren gesucht wird, welche das anfallende Schmutzwasser soweit aufbereiten, dass es wieder im Betriebsprozess eingesetzt werden kann. Ein anderer interessanter Gedanke ist, dass Unternehmen, die ihr aufbereitetes Abwasser nicht nutzen können, es anderen potentiellen Nutzern zur Verfügung stellen [RUWE2006].

Heutzutage werden sehr erfolgreich MBR-Anlagen für Betriebswassergewinnung aus Abwasser eingesetzt. Diese sind auch als zukünftiger Anwendungsbereich für die VK-RR/MA zu betrachten. Nachfolgend sind diese aufgeführt [RUWE2006]:

- Prozesswasser für die Papierindustrie [RUWE2006]
- Bewässerungswasser für landwirtschaftliche Nutzflächen [RUWE2006]
- Betriebswasser für die Stahlindustrie [RUWE2006]
- Kühlwasser [VDMA2010]
- Reinigung [VDMA2010]
- Löschwasser [VDMA2010]

Im Allgemeinen können alle Abwässer, die im 52-seitigen Anhang der Abwasserverordnung zu finden sind, soweit aufbereitet werden, dass sie mehrfach genutzt werden können. Das heißt, es wird ein breites Anwendungsfeld für die neue Technologie bereitstehen. Dementsprechend müssen immer wieder intelligente, situationsbedingte Lösungsmöglichkeiten gefunden und die VK-RR/MA dem Einsatzfall entsprechend angepasst werden. Selbst wenn das Abwasser aus der gleichen Industriebranche stammt, sind spezifische Gegebenheiten mit zu berücksichtigen. Herkunft und Endzweck des Abwassers sind primäre Kriterien, die bei der Lösungsfindung für eine Wasserwiederverwendung unter Augenschein genommen werden müssen. Praktische Pilotversuche bei in Aussicht stehenden Kunden, werden immer notwendig sein, um Rückschlüsse auf die Eignung von Parametereinstellungen der VK-RR/MA und gewünschte Reinigungsleistung ziehen zu können. Zudem sind die benötigten Aufbereitungsstufen im Zusammenhang mit dem Kostenaufwand zu sehen. Ethische Gesichtspunkte werden sicherlich auch bei der Abwasserwiederverwendung eine ausschlaggebende Rolle spielen. So werden Abwässer, die bspw. aus havarierten Atomkraftwerken oder aus Deponien anfallen, für eine

Wiederverwendung prinzipiell ungeeignet sein. Im Gegensatz dazu werden sich biologisch gut abbaubare Abwässer für die VK-RR/MA eignen.

Kann anhand praktischer Langzeitversuche festgestellt werden, dass die VK-RR/MA eine hohe Betriebsstabilität und einen geringen Chemikalienbedarf zeigt, werden alle Anforderungen an ein umweltfreundliches Abwasserbehandlungsverfahren erfüllt. In diesem Fall ist die Aufbereitung von Industriebabwässern, für die betriebsinterne Mehrfachnutzung oder für die Bereitstellung an Fremdnutzern, als zukünftiges Anwendungsgebiet für die neuartige Verfahrenskombination zu sehen.

5 Verifizierung anhand halbtechnischer Versuche

5.1 Material und Methoden

5.1.1 Verfahrensbeschreibung der VK-RR/MA

Die Arten des Betriebes sind unterteilt in Stand-by, Anfahren, Betrieb, Regenerierung RR und Membranreinigung.

Im Stand-by/betriebsbereiten Modus stehen alle Pumpen (Zulauf, Kreislauf) und Rührer, sowie Ventilator/Gebälse, still. Liegen keine Fehler der Aggregate vor, ist die VK-RR/MA nach dem Anschalten betriebsbereit.

Nach einer Anfahrzeit unter reduzierter Drehzahl der Pumpen, gehen beide Anlagen in den Normalbetrieb über. Das Abwasser wird unter eingestellten Betriebsparametern in den RR gepumpt und über das Trägermaterial verrieselt. Eine detaillierte Verfahrensbeschreibung des RRs ist dem Kapitel 2.1.1 zu entnehmen. Das Abwasser verlässt den Reaktor drucklos und wird im Ablauf-Reservebehälter gesammelt. Vom Ablauf-Reservebehälter ausgehend wird das biologisch aufbereitete Wasser von einer luftdruckbetriebenen Pumpe angesaugt und in die Membrananlage befördert. An der aktiven Membranschicht werden die nicht von der Mikrobiologie abgebauten Komponenten wie Partikel, Kolloide und Makromoleküle auf physikalischem Wege vom Wasser abgetrennt (vgl. Kapitel 2.3.1). Das Permeat wird während der Versuchsphasen in den Kanalisationsschacht der kommunalen Kläranlage Dresden-Kaditz bzw. der Firma Emil Kiessling GmbH abgelassen. Das Rententat wird in einem Tank gesammelt und von der ATEC entsorgt.

Um überschüssige inaktive Biomasse aus dem Reaktor zu entfernen, sind Regenerierungen notwendig (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Regenerierungen erfolgen beim Versuch mit kommunalem Abwasser vor und nach der Versuchsperiode und beim Versuch mit industriellem Abwasser während den Versuchsphasen.

Die Reinigung der Membranen (vgl. Kapitel 2.3.1) erfolgt mit saurem Membranreiniger (Zitronensäure). Eine Rückspülung der Membranen im Tubefilter wird alle 20 Minuten durchgeführt. Rückspülungen der Membranen sind beim Kombifilter nicht vorgesehen. Es erfolgte während allen Versuchsperioden kein Austauschen der Membranen.

Bei der VK-RR/MA im industriellen Sektor ist der Betrieb beider Anlagen vollautomatisch über eine SPS gesteuert.

5.1.2 Versuch kommunales Abwasser

a) Kläranlage Dresden-Kaditz

Im Mischsystem der Kläranlage fallen Abwässer aus privaten Haushalten, aus Industrie und Krankenhaus, sowie Straßenabwässer an. Die kommunale Kläranlage behandelt derzeit Abwässer von rund 740.000 Einwohnern aus Dresden, Pirna und Heidenau. [STDD2011]

Das sich ansammelnde Abwasser durchfließt zunächst die mechanische Reinigung der Kläranlage. Dabei passiert das Abwasser als erstes den Grob- und Feinrechen, um von allen großen und sperrigen Stücken befreit zu werden. Daraufhin wird das zu reinigende Abwasser in die Kammern des Sandfangs befördert. In diesen wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers rapide verringert, so dass sich Sande, Kiese und Steine absetzen. Anschließend wird das Schmutzwasser durch das Mischwasserpumpwerk in die höher gelegene Vorklärung gepumpt. Im Vorklärbecken sind kaum noch Fließgeschwindigkeiten des Wassers vorhanden und kleine Abwasserteilchen sedimentieren durch das Schwerkraftprinzip. Die Vorklärbecken verfügen über Doppellängsräumer, welche in bestimmten Zeitabständen ihre Becken abfahren. Ein Räumerschiff dieser Maschine schiebt den auf den Boden angereicherten Schlamm in einen Bodentrichter und ein Anderer den Schwimmschlamm in eine Abzugsrinne. An dieser Stelle ist die mechanische Abwasserbehandlung abgeschlossen. Das vom Schlamm abgetrennte Abwasser gelangt nun in die biologische Reinigungsstufe. Die biologische Reinigungsstufe untergliedert sich in die Verfahrensschritte Denitrifikation und Nitrifikation, wobei die Denitrifikation der Nitrifikation vorgeschaltet ist. Die Rührwerke in den Becken sorgen für Homogenität und eine ständige Vorwärtsbewegung des Wassers. Da die Mikroorganismen für die Nitrifikation gelösten Sauerstoff benötigen, sind an der Beckensohle des Belebungsbeckens Lüftungsgitter angebracht. Durch diese Lüftungsgitter wird Druckluft in das Abwasser gepresst und somit die Versorgung mit dem benötigten gelösten Sauerstoff gewährleistet. Die Dosierstation regelt durch die Zugabe von Kalk den pH-Wert im Belebungsbecken. Des Weiteren werden dort, die für die Denitrifikanten benötigten Kohlenstoffverbindungen, in Form von Ethanol bereitgestellt. Die im Schmutzwasser enthaltenen Phosphate werden mit Einsatz von Eisensalzen chemisch aus dem zu behandelnden Abwasser entfernt. Dabei wird das Fällungsmittel einmal vor und nach dem Belebungsbecken hinzu gegeben. Die Phosphatflocken sedimentieren letztendlich im Nachklärbecken, zusammen mit dem entstandenen Belebtschlamm. [STDD2011]

Ein Fließschema der kommunalen Kläranlage Dresden-Kaditz ist der Anlage A-III beigelegt.

b) Abwasser

Das Abwasser für den Versuch wurde dem Vorklärbecken der Kläranlage nach Abschluss der mechanischen Reinigung entnommen (siehe oben). Der genaue Durchlauf des RR-Prozesses ist Kapitel 2.1.1 und der Membrananlage aus Kapitel 2.3.1 zu entnehmen. Für diesen Versuch

kommt der Kombifilter der ATEC zur Anwendung. Nach allen Reinigungsschritten wurde das Wasser wieder der Vorklärung zurückgeführt.

c) Betriebseinstellungen und Materialien

An der RR-Versuchsanlage (Durchmesser: 0,60 m; Höhe: 2,5 m; Volumen_{BRUTTO}: 0,71 m³) sind folgende Betriebsparameter für die gesamte Versuchsperiode eingestellt:

- kontinuierliche Luftzufuhr
- kontinuierlicher Betrieb
- Kreislaufvolumenstrom von 2,5 m³/h

Der Zulaufvolumenstrom variiert je nach Versuchsphase. In Tabelle 15 sind die gewählten Einstellungen für den Volumenstrom im Zulauf des RRs der einzelnen Versuche dargestellt.

Tabelle 15: VolumenstromEinstellung Versuch Kaditz-Dresden

Datum/Uhrzeit	Versuch	Zulaufvolumenstrom [l/h]
27.04.11/ 14.30 – 17.30	1 (schwache Belastung)	115
28.04.11/ 09.00 – 12.00	2 (mittelstarke Belastung)	185
28.04.11/ 13.30 – 16.30	3 (starke Belastung)	235

Es wurden 3 Flachmembranen der Firma MICRODYN-NADIR GmbH für den Kombifilter der ATEC verwendet. Die Filterfläche der jeweilig integrierten Flachmembranen beträgt je Filterkerze 0,05 m². Folgende Materialien und Porentrenngrenzen der eingesetzten Flachmembranen sind gewählt worden.

Tabelle 16: Flachmembransortiment Versuch Kaditz-Dresden

Membran	Material	Trenngrenze	Code (MICRODYN-NADIR GmbH)
MF	Polyvinylidenfluorid (PVDF)	0,2 µm	MV020 T
UF	Polyethersulfon (PES)	150 kDa	UP150 P
UF	Cellulose (RC)	30 kDa	UC030 T

Für den Membranreaktor sind die Betriebsparameter für die Versuchsperioden wie folgt eingestellt:

- Zulaufpumpe: 0,8 - 0,9 bar (angepasst an den Durchlaufvolumenstrom des RRs)
- kontinuierliche Rührgeschwindigkeit

d) Versuchsdurchführung

Seit Ende März 2011 ist die RR-Versuchsanlage im kontinuierlichen Betrieb. Die Versuchsanlage der ATEC wurde täglich zu Versuchsbeginn hinter die RR-Versuchsanlage geschaltet.

Die Modifikation für den Betrieb der Kombination aus beiden Anlagen für den Versuch wird anhand des folgenden Fließschemas (Abbildung 19) erklärt. Vollständige Fließschemen der einzelnen Anlagen der VK-RR/MA sind der Anlage A-III zu entnehmen. Die Versuchsanlage RR verfügt über keine SPS und somit werden die Betriebsparameter manuell eingestellt. Im Gegensatz dazu wird die Membrananlage über eine SPS gesteuert.

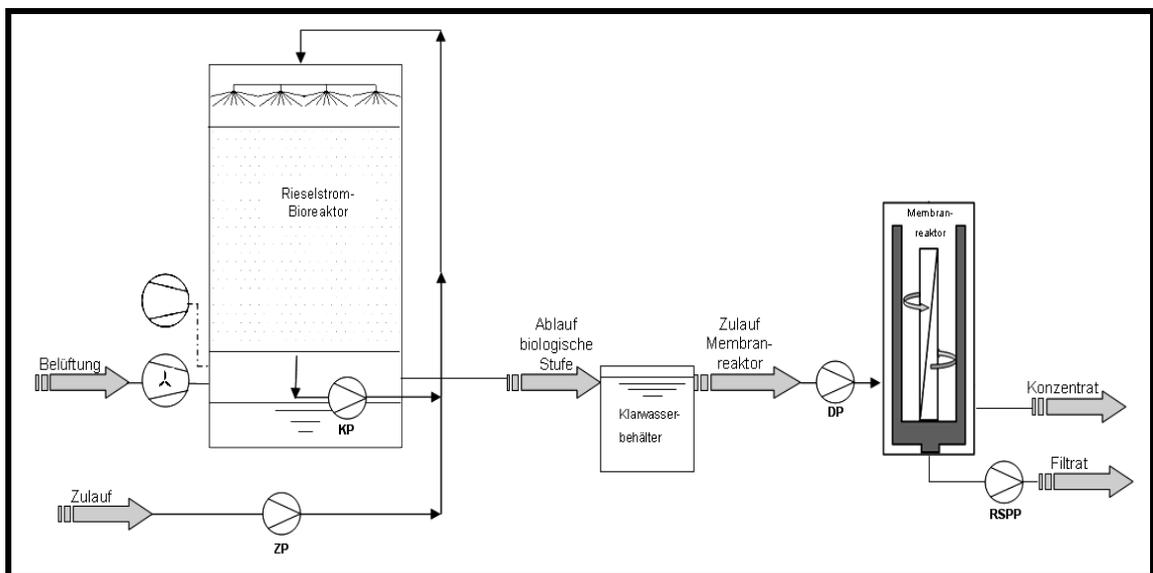


Abbildung 19: Vereinfachtes Fließschema VK-RR/MA, Versuch Dresden-Kaditz

e) Probenahme

Die Abwasserprobenahme erfolgte im Zu- und Ablauf des RRs als Mischprobe. Dazu wurden jeweils pro Versuch 7-8 Proben innerhalb von 2,5 Stunden genommen und in einem Behälter gesammelt.

Eine Probe des Trägermaterials erfolgte täglich. Zu diesem Zweck wurde das Probenahmerohr mit leichten Drehbewegungen in das Trägerbett eingeführt und wieder herausgezogen. Das nun im Rohr befindliche Trägermaterial wurde mit Hilfe eines Stößels in einen Behälter umgefüllt.

Die Permeatprobenahme an der Membrananlage erfolgte täglich als Absolutprobe eine halbe Stunde vor Versuchsende.

Für die mikrobiologischen Analysen wurden die Mischproben vom RR, sowie die Einzelproben des Permeats in keimfreie dunkle 1 Liter Glasflaschen abgefüllt.

5.1.3 Versuch industrielles Abwasser (Kosmetika)

a) Emil Kiessling GmbH

Die Firma aus Georgensmünd ist ein Kosmetikunternehmen, welches Haar- und Körperpflegeprodukte sowie Sonnenschutzmittel für Discounter und Drogeriemarktketten herstellt. Das Unternehmen verfügt über eine eigene Abwasserbehandlungsanlage zur Reduzierung der, bei Produktherstellung anfallenden, CSB-Fracht. Diese Prozesswasserbehandlung ist notwendig, um Schadstoffeinheiten zu reduzieren und die damit einhergehenden hohen Entsorgungskosten der kommunalen Kläranlage einzusparen. Also wird das Abwasser einer chemisch-physikalischen Vorbehandlung unterzogen und anschließend über die drei parallel geschalteten RRen befördert.

Das sanitäre Abwasser und ein Teil vom Regenwasser werden direkt in die kommunale Kläranlage eingeleitet. Die Abwasserfracht aus Produktion, Küche und ein Regenwasseranteil gelangt über einen frei fließenden Kanal in den 10 m³ großen Sammelschacht. Von dort aus wird das Schmutzwasser in zwei Arbeitsbecken (1 x 50 m³; 1 x 300 m³) gepumpt. Der Sammelschacht und die Arbeitsbecken sind jeweils mit einer Umwälzpumpe ausgestattet, um Ablagerungen an Beckenboden und -wand weitgehend zu vermeiden. Nach dem Arbeitsbecken gelangt das Abwasser in die chemisch-physikalische Vorbehandlung. Der dafür vorgesehene Behälter hat ein Fassungsvermögen von 6,5 m³ und in ihm erfolgt die Emulsionsspaltung, durch Zugabe von Eisen(III)Chlorid und Kalkmilch bis zur pH-Wert-Einstellung auf 8,5. Das nun gefällte Abwasser fließt weiter in den Flockungsbehälter. Es wird ein anionisches Flüssigpolymer unter Rühren, mittels Rührwerk, beigemengt. Dadurch werden voluminöse und schnell absetzbare Flocken gewonnen. Das geflockte Abwasser wird mittels Pumpen in das Druckentspannungsflotationsbecken befördert. Durch eine fein verteilte Lufteinspeisung flotieren die Flocken an die Wasseroberfläche. Mittels Flotaträumer werden die aufschwimmenden Flocken vom klaren Abwasser getrennt. Die Flocken gelangen in einen Schlammschacht und werden anschließend in die SAB gepumpt. Dort wird Kalk als Dickungsmittel unter Rühren zugegeben, bevor der Schlamm die Kammerfilterpresse durchläuft. Schließlich fließt das vorbehandelte Wasser vom Flotationsbecken in das Auslaufbecken. Das vorbehandelte Abwasser wird in drei parallel geschalteten RRen weiter behandelt, bevor es in die kommunale Kläranlage eingeleitet wird. Für die Nährstoffversorgung der aeroben Mikroorganismen werden Ammoniumsulfat und Natriumhydrogenphosphat hinzudosiert. [KIES2011]

b) Abwasser – Versuch mit Ablauf nach der biologischen Stufe

Durch die chemisch-physikalische Vorbehandlungsstufe wird die CSB-Konzentration von 5.000 - 50.000 mg/l auf rund 3.000 mg/l gesenkt. Nach der biologischen Reinigung liegt die Konzentration im Ablauf zwischen 400-1.000 mg/l. Mit diesem Abwasser wird der Tubefilter der ATEC beschickt. Nach allen Reinigungsschritten fließt das Wasser aus dem Vorlagenbehälter in den Regenwasserschacht.

An den Versuchstagen erzeugte das Unternehmen folgendes Produktsortiment:

- Shampoo
- Sonnencreme/-milch
- Oxidizer
- Haarspray
- Haarfarbe

Das Produktionsabwasser, welches bei der Haarfarbenherstellung anfällt wird verdampft. Ausschließlich das dabei anfallende Kondenswasser erreicht das Auslaufbecken. Auch fällt Drainagewasser der Kammerfilterpresse von der Schlammbehandlung an. [KIES2011]

c) Betriebseinstellungen und Materialien

Es sind für die RR-Großanlage (Durchmesser: 3 m; Höhe: 8 m; Volumen_{BRUTTO}: 56,6 m³) folgende Betriebsparameter für alle Versuche eingestellt [DAS2011]:

- kontinuierliche Luftzufuhr
- kontinuierlicher Betrieb
- Kreislaufvolumenstrom von 50 m³/h

Je nach Versuchstag variierte der Zulaufvolumenstrom. Die getroffenen Volumenstrom-einstellungen für die jeweiligen Versuche sind in Tabelle 17 festgehalten.

Tabelle 17: VolumenstromEinstellung Versuch Firma Emil Kiessling GmbH

Datum	Versuch	Zulaufvolumenstrom pro RR [m ³ /h]
27/28.06.11	3 (starke Belastung)	1,85
29.06.11	1 (schwache Belastung)	0,9
30.06.11	2 (mittelstarke Belastung)	1,1

Zu Beginn der Versuchsperiode gab es Regenerierungsprobleme bei einem der RRen. Unbeabsichtigt wurde der Volumenzulaufstrom für V3 eingestellt. Dieser wurde beibehalten und nur die Reihenfolge der Versuchsdurchführung geändert. Demzufolge wurde mit V3 begonnen, dem anschließend erfolgte V1 und dann V2.

Am ersten Versuchstag regenerierten alle Bioreaktoren. Jeweils einer morgens (RR1: 7:30 Uhr), einer mittags (RR2: 11:30 Uhr) und einer abends (RR3: 17:00 Uhr). Ab Mittag des zweiten Versuchstages wurden die Einstellungen der Regenerierungsintervalle von 24 h auf 48 h geändert. Demnach erfolgte eine Regenerierung erst wieder am dritten Versuchstag mit RR3.

Es sind drei Rohrmembranen, die speziell für das Tubefilterverfahren der ATEC gefertigt wurden, eingesetzt worden. Die Fläche der jeweilig integrierten Rohrmembranen beträgt für M1 ca. 0,5 m², für M2 und M3 jeweils 0,95 m². Für den Versuch wurde folgendes Rohrmembransortiment ausgewählt:

Tabelle 18: Rohrmembransortiment Versuch Emil Kiessling GmbH

Membran	Material	Trenngrenze
MF	Keramik	0,2 µm
UF	Polyethersulfon (PES)	250 kDa
UF	Polyethersulfon (PES)	100 kDa

Für den Membranreaktor sind die Betriebsparameter wie folgt eingestellt:

- Zulaufpumpe: 0,93 bar
- kontinuierliche Rührgeschwindigkeit
- Rückspülungsintervall von 20 Minuten

d) Versuchsdurchführung

Die RR-Großanlage ist seit zwei Jahren im Betrieb. An Arbeitstagen wird die Anlage mit kontinuierlichem Zulauf betrieben. Die Membranfiltrationsanlage, ein Tubefilter der ATEC, wurde an allen vier Versuchstagen während dem Normalbetrieb der Bioreaktoren zugeschaltet. Der Tubefilter wurde in der Halle der Fa. Emil Kiessling aufgebaut und betrieben. Mittels einer Druckluftmembranpumpe wurde die Membrananlage mit Ablaufmischwasser der RRen, aus der Reservewasserkammer, beschickt. Am Ende jeden Versuchstages wird der Membranreaktor abgeschaltet.

Die Modifikation für den Betrieb der Kombination aus der RR-Großanlage und Membranfiltrationsversuchsanlage für den Versuch wird im folgenden Fließschema (Abbildung 20) erklärt. Vollständiges Fließschema der Membranfiltrationsversuchsanlage von ATEC der Anlage A-III zu entnehmen.

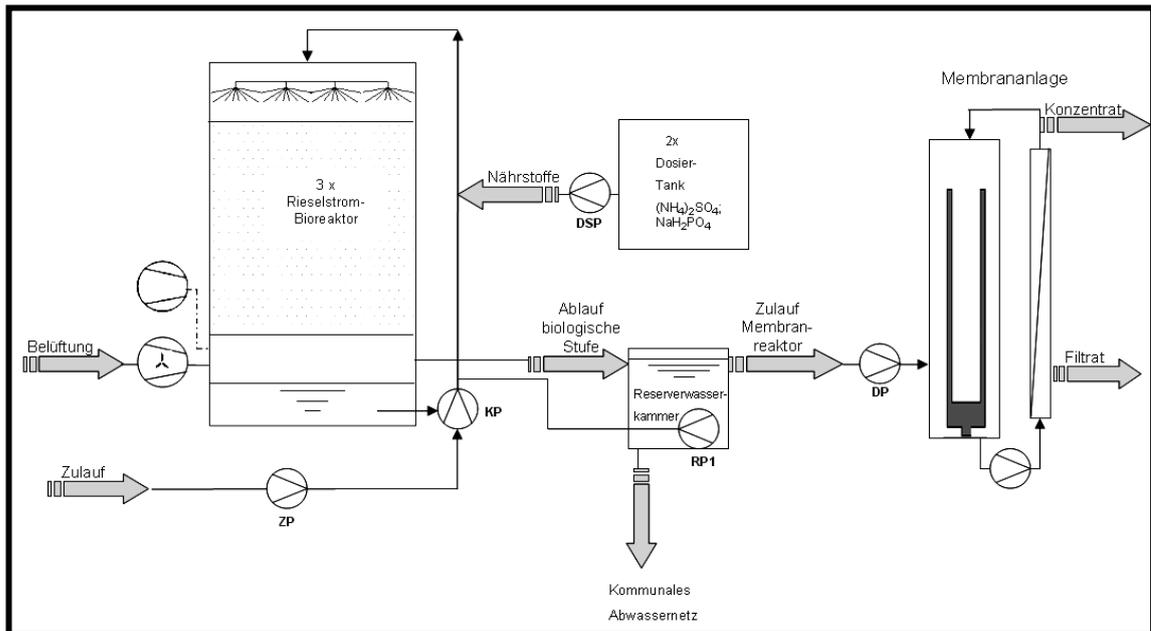


Abbildung 20: Vereinfachtes Fließschema VK-RR/MA, Versuch Fa. Emil Kiessling GmbH

e) Probenahme

Die Abwasserprobenahmen erfolgten im Zu- und Ablauf des RRs als Mischprobe. Für V1 und V3 wurden innerhalb von sieben Stunden (V1) und innerhalb von acht Stunden (V3), alle halbe Stunde je eine 350 ml Probe im Zu- und Ablauf genommen und jeweils in einem Behälter gesammelt. Bei V2 erfolgte die Mischprobenzubereitung binnen vier Stunden. Hier wurden 500 ml nach jeder halben Stunde genommen und in einem Behälter gesammelt.

Die Probenahme des Permeats (1 Liter) wurden täglich als Einzelproben, eine halbe Stunde vor Versuchsschluss entnommen.

Eine Probe des Trägermaterials erfolgte während der Befüllung des SAB täglich nach der Regenerierung.

Für die mikrobiologische Analysen wurden die Mischproben der RRen, sowie die Einzelproben des Permeats in keimfreie dunkle 1 Liter Glasflaschen abgefüllt.

5.1.4 Probenanalytik

Für die Probenanalytik zur Bestimmung der mikrobiologischen Parameter, der Arzneimittelwirkstoffe, Tenside und schwerflüchtigen lipophilen Stoffe ist die Fa. WESSLING Laboratorien GmbH, Moritzburger Weg 67 in 01109 Dresden beauftragt. Alle weiteren Analysen werden im Labor der DAS durchgeführt. Soweit nicht anders angegeben sind alle Messwerte die das firmeninterne Labor ermittelt in der Einheit mg/l angegeben.

5.1.5 Küvettentests

Die Firma MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG konzipiert anerkannte Küvettentests auf Grundlage von DIN-Methoden. Es sind Küvettentestverfahren zur CSB-, Gesamtstickstoff-, Nitrat- und Nitritbestimmung entwickelt und für diverse Messbereiche auf dem Markt erhältlich [MN2011]. Die Auswahl des Küvettentests ist im Wesentlichen abhängig vom Messbereich in dem die Versuchsergebnisse erwartungsgemäß liegen. Dazu wird die Konzentration des zu analysierenden Parameters herangezogen. Die Probenanalytik erfolgte wie vom Hersteller vorgeschrieben. Auch wurden Gerätetechniken (Photometer: Nanocolor®300D, Thermostat: Nanocolor Vario kompakt) für die Probenanalytik vom genannten Hersteller verwendet.

a) CSB-Wert

In Gegenwart von Kaliumdichromatlösung als Oxidationsmittel und Silbersulfat als Katalysator reagieren alle oxidierbaren Inhaltsstoffe. Mit Hilfe von Quecksilbersulfat wird Chlorid maskiert. Der CSB wird durch den Verbrauch von Kaliumdichromat ermittelt. Beim Oxidationsprozess wird das sechswertige Chrom zum Dreiwertigen reduziert. Resultat ist ein Farbumschlag der Lösung von gelb auf grün. Gemessen wird das gebildete dreiwertige Chrom mittels Photometer ($\lambda = 620 \text{ nm}$). Das ermittelte Messergebnis ist äquivalent zum chemischen Sauerstoffbedarf. [MN2011] [WAWI2011]

b) TN_b

Alle organischen und anorganischen Stickstoffverbindungen werden in einer alkalischen Lösung oxidativ aufgeschlossen. Der nasschemische Aufschluss erfolgt mit Peroxodisulfat. Dabei werden alle Stickstoffverbindungen zu Nitrat oxidiert. Nach Zugabe von 2,6-Dimethylphenol in einer Schwefelsäure-Phosphorsäure-Mischung, kann die Nitratkonzentration als 4-Nitro-2,6-Dimethylphenol photometrisch ($\lambda = 365 \text{ nm}$) gemessen werden. [MN2011]

c) NO_2^- -N

Sulfanilamid und N-(1-Naphthyl)-ethylendiamin reagieren mit Nitrit zu einem rotvioletten Azofarbstoff, welcher per Licht-Absorption ($\lambda = 540 \text{ nm}$) gemessen wird. [MN2011]

d) NO_3^- -N

In einer Schwefelsäure-Phosphorsäure-Mischung reagieren die Nitrationen mit 2,6-Dimethylphenol. Die Nitratkonzentration kann aufgrund des entstandenen 4-Nitro-2,6-Dimethylphenol mit Spektralphotometer ($\lambda = 365 \text{ nm}$) bestimmt werden. [MN2011]

5.1.6 Laboranalytik

a) NH_4-N

In Gegenwart von Kaliumtetraiodomercurat(II), auch als Nessler Reagenz bezeichnet, bildet Ammoniak einen rotbraunen Farbkomplex, das Diquecksilberimidoxid-Dihydrat. Das Ausfällen von Härtebildnern und Eisenionen wird durch die Verwendung von Kaliumnatriumtartrat (Reagenz A) vermieden. Die Intensität des entstandenen Farbkomplexes kann nun mit Lichtabsorptionsmessung ermittelt werden. [MERCK2011] [LIEL2011]

Für die Bestimmung des Ammoniumstickstoffs liegen "ausgewählte Methoden der Analytik" zugrunde. [DAS2011] Zur Ammoniumstickstoffbestimmung wurde in Korrelation der Konzentration und des Messbereichs zuerst eine Verdünnung (1:10) ermittelt. Zur Analyse der Proben wurden 5 ml Probenmaterial in einem 50 ml Kölbchen pipettiert und dieser daraufhin bis zur Hälfte mit DI-Wasser aufgefüllt. Dazu wurden 1 ml Reagenz A und 1 ml Nessler-Reagenz, Fertiglösung der Fa. Merck KGaA, gegeben. Das Kölbchen wurde bis zum Messstrich mit DI-Wasser aufgefüllt, anschließend verschlossen und geschüttelt. Nach einer Wartezeit von 15 Minuten konnte die Konzentration des Ammoniumstickstoffs mittels UV/VIS Spektralphotometer (Dr. Hach Lange CADAS 100-3) bei $\lambda = 425$ nm gegenüber von DI-Wasser bestimmt werden.

b) PO_4-P

Die Phosphatbestimmung beruht auf der Reaktion der Orthophosphationen in stark schwefelsaurer Lösung mit den als Reagenz zugesetzten Molybdat- und Antimonionen. Zuerst entsteht aus Ammoniumheptamolybdat, bei einem pH-Wert < 1 Isopolymolybdänsäure. Mit Ionen des Orthophosphats reagiert die Isopolymolybdänsäure zur Phosphormolybdänsäure. Die Antimonionen fördern diese Säurebildung. Dabei werden die vier Sauerstoffatome des Orthophosphats durch vier (Mo_3O_{10}) -Gruppen ersetzt. Das Phosphormolybdänblau entsteht durch Reduzierung der Phosphormolybdänsäure. Die Bestimmung vom Orthophosphat erfolgt über die photometrische Messung des Phosphormolybdänblaus. [GEKA2004]

Das Orthophosphat wird nach dem Phosphormolybdänblau-Verfahren nach DIN EN ISO 6878 ermittelt. Dazu wurde der Verdünnungsfaktor (1:10) in Abhängigkeit von der erwarteten Konzentration und des Messbereichs ermittelt. Im Folgenden wird in einem 50 ml Messkölbchen 5 ml vom Probenmaterial hinein pipettiert und bis zur Hälfte mit DI-Wasser aufgefüllt. Anschließend werden 1 ml Ascorbinsäure (10%ig) und 2 ml Molybdatlösung (Herstellung vgl. Anlage A-III) dazu gegeben. Das Kölbchen wird verschlossen und gut geschüttelt. Nach 15 minütiger Wartezeit folgt abschließend die Probemessung im UV/VIS Spektralphotometer (Dr. Hach Lange CADAS 100-3) bei $\lambda = 880$ nm gegenüber der analog angesetzte Nullprobe.

c) BSB₅-Wert

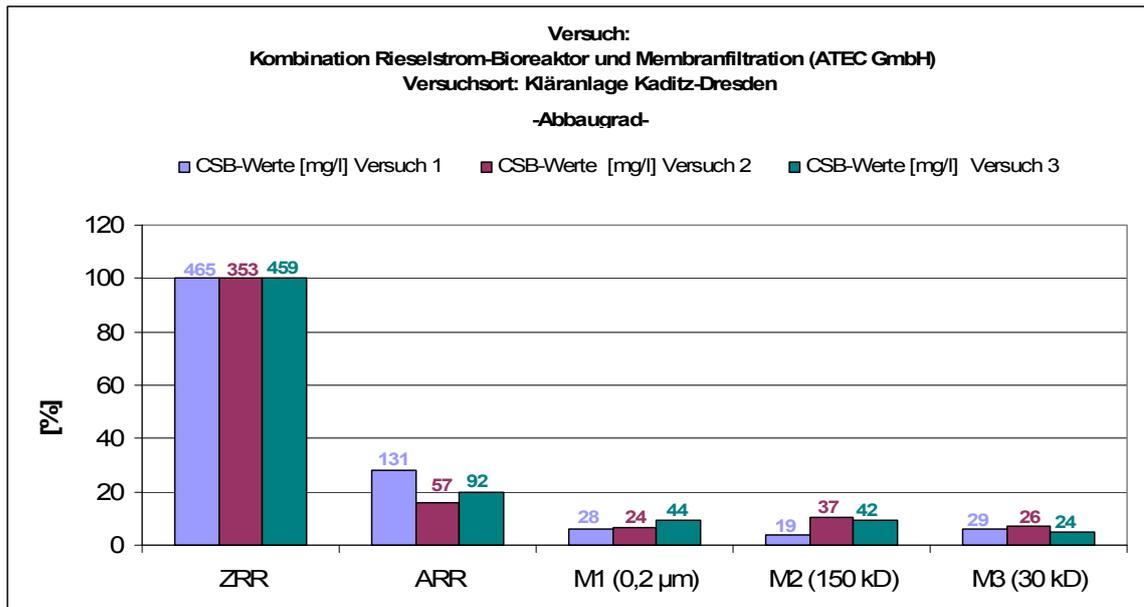
Aktive heterotrophe Mikroorganismen metabolisieren Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid. Das Kohlenstoffdioxid absorbiert an den Natriumhydroxidplättchen. Dadurch nimmt der Druck in den Inkubationsflaschen proportional zur Sauerstoffzehrung der Mikroorganismen ab. Der biochemische Sauerstoffbedarf wird somit indirekt über den entstandenen Unterdruck ermittelt. Die biochemische Sauerstoffzehrung wird respirometrisch mit dem OxiTop-Verfahren bestimmt. Je nach erwarteter BSB-Konzentration wird der Messbereich ermittelt. Eine gute abbaubare organische Schmutzfracht entspricht etwa 70-80% vom CSB. Daraus resultiert der Messbereich für den BSB. Im Ablauf des RRs ist der BSB weitgehend abgebaut und entspricht nur noch 10-20% vom CSB. Je nach zu erwartender BSB-Konzentration erfolgt die Zugabe der benötigten Menge an Probenmaterialvolumen sowie der Reagenzien.

Hier wurde ein Messbereich von 200 mg/l BSB ermittelt. Mit Hilfe des Überlaufkolbens (250 ml) wurde das Probenmaterial in eine gasdichte, dunkle Inkubationsflasche gefüllt. Zu dem sind jeweils 7 Tropfen N-Allylthioharnstoff hinzu gegeben worden, sowie ein Magnetrührstäbchen. Der Gummiköcher wurde mit zwei Natriumhydroxidplättchen befüllt und in den Flaschenhals eingesetzt. Anschließend wurde der OxiTop-Infrarot-Messkopf auf die Flasche geschraubt. Die Inkubationsflaschen wurden in das OxiTop-Controll-System eingelesen und anschließend die Messung der mikrobiologischen Sauerstoffzehrung gestartet. Die Proben inkubierten für 5 Tage bei 20 °C in der Thermobox. Nach den fünf Inkubationstagen konnte der BSB₅ am OxiTop-Controll-System direkt abgelesen werden.

5.2 Ergebnisse und Diskussion

5.2.1 Messwerte Kommunales Abwasser

Der Versuch verlief plangemäß wie in Kapitel 5.1.2 dargestellt. Die RR-Versuchsanlage und alle Membranen liefen im Zeitraum der kompletten Versuchsperiode zufrieden stellend durch. Wie die Ergebnisse (vgl. Anhang A-IV) und nachfolgende Abbildung 21 zeigen, werden die CSB-Werte bereits zu 78% allein durch die biologische Stufe reduziert. Auch die Membranen holen im Schnitt noch mal über die Hälfte an CSB aus dem Ablaufwasser des RRs. Insgesamt eliminiert die Kombination RR mit M1 den CSB-Gehalt auf durchschnittlich 7,52%, mit M2 auf 7,68% und mit M3 auf 6,18%. Somit ist festzustellen, dass der CSB-Reduzierung durch die Membranen nur unwesentlich voneinander abweichen, obwohl die Membrantrenngrenzen sehr unterschiedlich sind. Dieser Tatsache liegt die Molekülgröße der organischen Verbindungen zu Grunde, die so klein sind, dass sie sowohl durch Porenweiten der MF- als auch UF-Membranen hindurch gleiten.

**Abbildung 21: CSB-Abbau**

Bei Betrachtung der Einzelversuche ist festzustellen, dass die ankommende CSB-Konzentration der Zuläufe V1 und V3 in etwa gleich groß sind, während der von V2, eine geringere CSB-Konzentration mit sich bringt. In folgender Abbildung 21 werden die CSB-Werte sowie erreichte CSB-Abbaugrade der Versuche dargestellt. Eigentlich sollte bei geringerem Zulaufvolumenstrom ein höherer CSB-Abbaugrad erreicht werden, da die Verweilzeit (vgl. Tabelle 19) im RR bei geringerem Zulaufvolumenstrom länger ist und die Mikroorganismen somit mehr Zeit für die Metabolisierung der Kohlenstoffverbindungen haben. Zu erkennen ist jedoch, dass bei V1 ein geringerer CSB-Abbaugrad erreicht wird als bei V2 und V3.

Die Verweilzeit (τ) kann mit der Formel 5 berechnet werden.

$$\tau = \frac{V_W}{\dot{V}_{ZL}} = \frac{V_{WRR}}{\dot{V}_{ZL}} \quad (5)$$

V_W Wasservolumen

\dot{V}_{ZL} Zulaufvolumenstrom

V_{WRR} Wasservolumen (RR - Trägerbett)

In folgender Tabelle sind die Verweilzeiten ausgerechnet. Bei der Berechnung wird von 100 Liter Reaktorbruttovolumen ausgegangen¹.

¹ Persönliche Mitteilung Dr. Lutz Haldenwang

Tabelle 19: Verweilzeit im RR

Versuch	Verweilzeit [min]
1	52
2	32
3	26

Die Raumbelastung und Abbauleistung lässt sich für den RR mit folgender Formel berechnen:
[WAWI2010]

$$B_R = \frac{p_{S,ZL} * \dot{V}_{ZL}}{V_R} \quad (6)$$

B_R Raumbelastung

$p_{S,ZL}$ Konzentration der organischen Belastung im Zulauf

\dot{V}_{ZL} Zulaufvolumenstrom [m³/d]

V_R Reaktorvolumen

Tabelle 20: Gegenüberstellung Raumabbauleistung und Abbauleistung RR

Versuch	\dot{V}_{ZL}	CSB _{ZL}	CSB _{AL}	Δ CSB	Raumbelastung	Abbauleistung
	[l/h]	[mg/l]	[mg/l]	[mg/l]	[kg CSB/d * m ³ RV]	[kg CSB/d * m ³ RV]
1	115	465	131	334	3,0	2,1
2	185	353	57	296	3,7	3,1
3	235	459	92	367	6,0	4,8

Aus folgendem Verhältnis einer (Standard-) Großanlage mit dem der Versuchsanlage kann der Faktor ermittelt werden, um auf die Raumbelastung und Abbauleistung im Großmaßstab umzurechnen. Ausgegangen wird dabei von einer Befüllung der Großanlage mit Trägermaterial von 70% und der Versuchsanlage von 60%.

$$\frac{V_{RRGA}}{V_{RRVA}} = \frac{V_{RRGA} * 70\%}{V_{RRVA} * 60\%} \quad (7)$$

V_{RRGA} Reaktorvolumen Großanlage

V_{RRVA} Reaktorvolumen Versuchsanlage

Der Faktor beträgt für diese Versuchsanlage 1,2 und somit ergeben sich folgende Werte für eine übliche RR-Großanlage.

Tabelle 21: Raumbelastung und Abbauleistung RR-Großanlage

Versuch	Raumbelastung [kg CSB/d * m ³ RV]	Abbauleistung [kg CSB/d * m ³ RV]
1	3,6	2,6
2	4,4	3,7
3	7,2	5,8

Die Abbildung 22 zeigt eine Gegenüberstellung der Raumbelastung und der Abbauleistung des RRs für das Jahr 2010. Diese sind als Referenzwerte zu betrachten und werden zum Vergleich mit den Versuchswerten aus diesem Jahr herangezogen. Zu erkennen ist, dass die CSB-Abbauleistung im V2 und V3, im Vergleich zu Versuch V1, besonders gut erwirkt wird. Die Trendlinie in Abbildung 22 beschreibt, mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8859 den positiv linearen Zusammenhang von Abbauleistung der Mikroorganismen und Raumbelastung. Anders ausgedrückt hängt die Abbauleistung zu circa 89% von der Raumbelastung, und damit von der ankommenden Schmutzfracht ab. In etwa 11% fallen auf nicht erfasste Einflüsse (wie z.B. pH, T). Zudem ist gut zu erkennen, dass die Streuung mit Erhöhung des Zulaufvolumenstroms zunimmt.

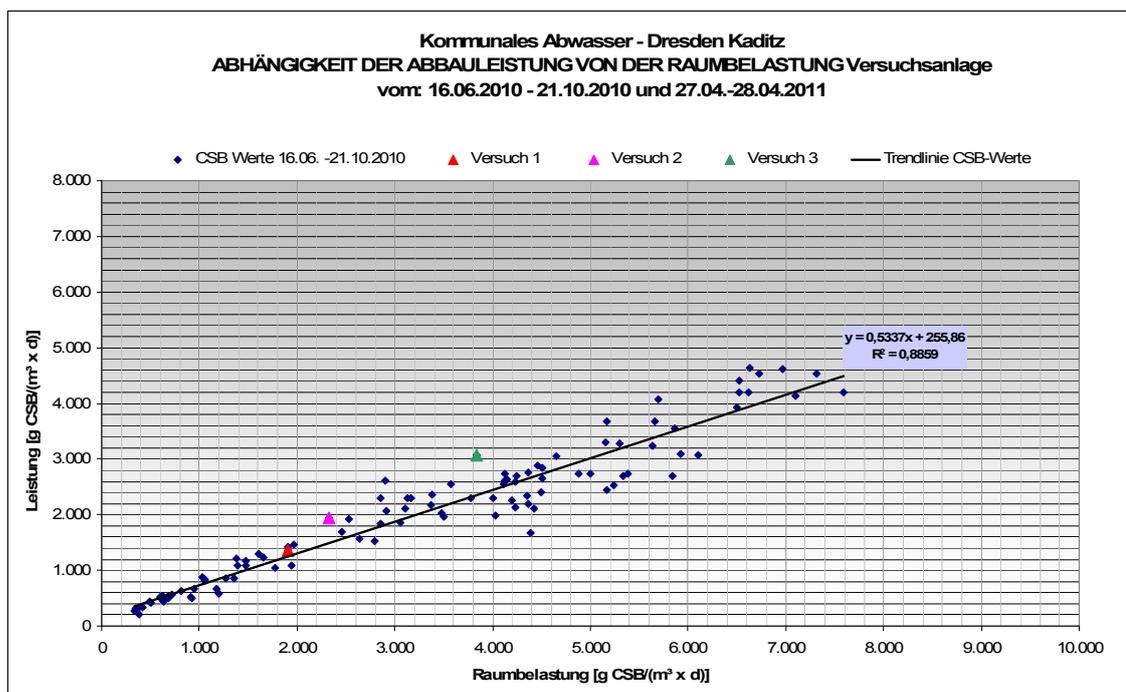


Abbildung 22: Raumbelastung zur Abbauleistung

Die Absolutwerte der einzelnen Versuche zeigen, dass bei V1 der RR aufgrund des geringeren Durchsatzes mehr Ammoniumstickstoff abgebaut wird als bei V2 und V3. (vgl. Abbildung 23). Das geringfügige Rückhaltvermögen der Membranen bzgl. des Ammoniumstickstoffs ist durch dessen kleine Molekülgröße zu erklären. Es kann die Membranen nahezu widerstandslos passieren. Ähnlich verhält es sich mit dem Orthophosphat (vgl. Abbildung 24), nur dass die Messunterschiede zwischen den Versuchen untereinander noch geringer sind.

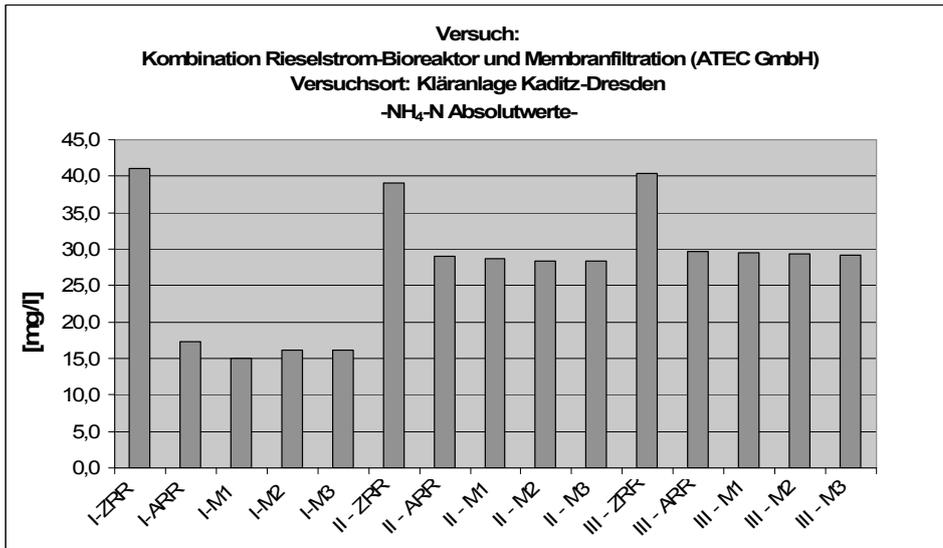


Abbildung 23: NH₄-N

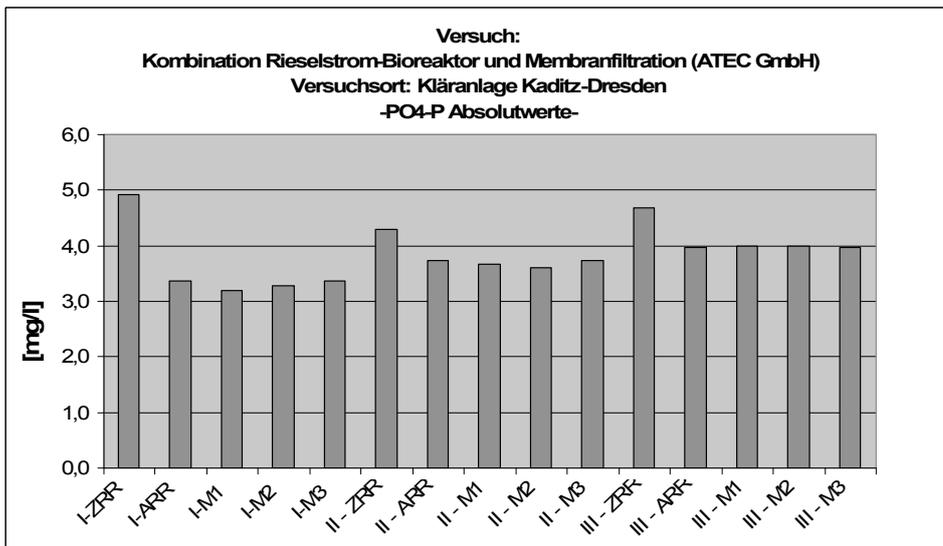


Abbildung 24: PO₄-P

Ein wesentlicher Unterschied kann bei der Trübung festgestellt werden. Wie in Abbildung 25 dargestellt, nimmt die Trübung im ARR mit der Durchflusserhöhung zu. Die Membranen reduzieren die Trübung noch mal um mehr als die Hälfte des Wertes vom ARR und sie bleibt konstant unter 10 TE.

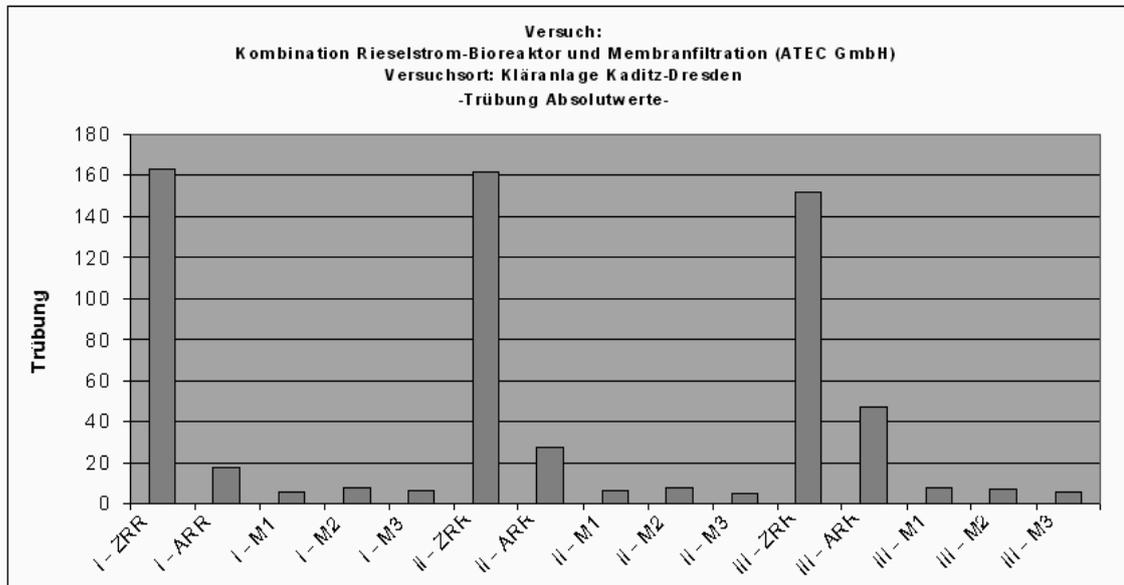


Abbildung 25: Trübung

Leider sind die Analysewerte des gewählten Labors (Fa. WESSLING Laboratorien GmbH) aus verschiedenen Gründen nicht zuverlässig. Zum einen sind sie nicht plausibel und zum anderen nicht präzise genug, um eine Aussage treffen zu können (vgl. Anlage IV). Um der Vollständigkeit halber dennoch mikrobiologische Parameter in dieser Arbeit mit zu betrachten, werden von der ATEC zur Verfügung gestellte Messwerte herangezogen (vgl. Tabelle 22). Diese Werte wurden außerhalb des Rahmens dieser Diplomarbeit bei Membranversuchen mit derselben Membranversuchsanlage und den gleichen Membranen, wie beim Versuch mit kommunalem Abwasser verwendet (vgl. Kapitel 5.1.2 Tabelle 16), auf der Kläranlage Neu Ulm gewonnen.

Tabelle 22: Mikrobiologische Bestimmung Kläranlage Neu Ulm

Membran	Perzentil	Koloniezahl (22°C)	Koloniezahl (36°C)	e.coli	coliforme Bakterien	Enterokokken
		[KBE/ml]	[KBE/ml]	[KBE/100 ml]	[KBE/100 ml]	[KBE/100 ml]
ZL	-	7600	11000	5600	34500	-
MV020 T	-	1700	3100	2300	11800	-
UP150 P	-	3	17	13	78	-
UC030 T	-	7	9	16	77	-

Im Diagramm in Anlage IV sind alle mikrobiologische Analysewerte graphisch dargestellt. Zudem sind dort die Grenzwerte der EU-RL 2006/7/EG und der EU-RL 76/160/EWG (vgl. Kapitel 3.2.3) abgebildet. Leider wurden keine Analysen für Enterokokken vorgenommen, sodass nur die Grenz-/Leitwerte der EU-RL ersichtlich sind.

Um die Wichtung der Werte für *Escherichia coli* zu verdeutlichen, sind die Analysewerte in Abbildung 26 mit den Grenzwerten der EU-RL 2006/7/EG dargestellt. Unerwarteter Weise lässt sich entnehmen, dass die Membran (MV020 T) mit einer Porentrenngrenze von 0,2 µm die Grenzwerte nicht einhält. Gründe dafür können sein:

- kein optimaler Anlagenbetrieb
- Fehler in der Probenahme/-analytik
- Wiederverkeimung des Permeats
- Keimbildung auf der Membran seitens des Permeats
- verkeimter Probenahmezapfhahn/-schlauch

Im Gegensatz dazu liegen die Laborwerte für *e.coli* bei Membran (UP150 P) und (UC030 T) beiderseits weit unterhalb der Grenzwerte.

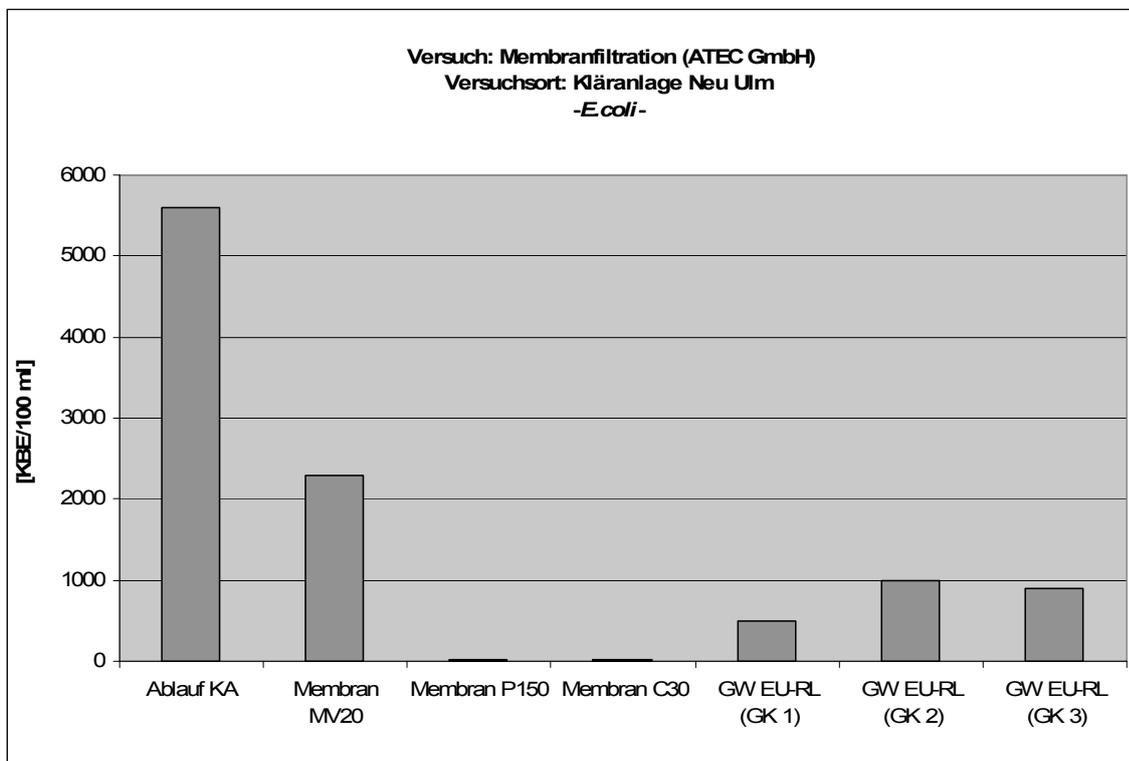


Abbildung 26: Trennverhalten Membranen *e.coli*

Die Abbildung 27 stellt den mittleren Rückhaltegrad ausgewählter Arzneimittelwirkstoffe dar. Bei Diclofenac, Carbamazepin, Atenolol, Metrolol und Clarithromycin können keine nennenswerten Reduzierungen, weder durch den RR noch durch die Membranen, verzeichnet werden. Messungen in derart kleinen Messbereichen (µg/l) sind fehlerbehaftet und so sind auch die minimalen Abweichungen der Probenanalysen zu erklären.

Bei allen drei Versuchen, kann Sulfanmethoxazol auf unter $0,2 \mu\text{g/l}$, allein durch die Mikrobiologie im RR gesenkt werden. Die größte Reduzierung ist im Versuch 1, mit dem geringsten Zulaufvolumenstrom, festzustellen. Das Ergebnis zeigt eine Verminderung von mehr als 80% Sulfanmethoxazol. Bezafibrat kann im V1 um 44,1% und V2 um 23,8% aus dem Abwasser, durch die biologische Stufe, verringert werden. Bei V3 wird kein Bezafibrat extrahiert. Bis auf V3, bei dem die Analysenwerte gleich sind, kann Ibuprofen im V1 mit 63,2% am meisten im RR reduziert werden. Die Messwerte für V2 zeigen kaum Unterschiede. In V3 findet kaum eine Reduzierung der Arzneimittelstoffe statt.

Anzunehmen ist, dass die Arzneimittelstoffe Sulfanmethoxazol, Bezafibrat und Ibuprofen im Gegensatz zu allen anderen, eher vom Biofilm bzw. von den Mikroorganismen aufgenommen werden. Auffällig ist, dass mit steigendem Zulaufvolumenstrom weniger an Konzentration der Arzneimittelstoffe eliminiert werden können. Zu vermuten ist, dass generell mit steigendem Durchfluss auch die Arzneimittelwirkstoffe mehr durch das mikrobiologisch behaftete Trägerbett gespült werden.

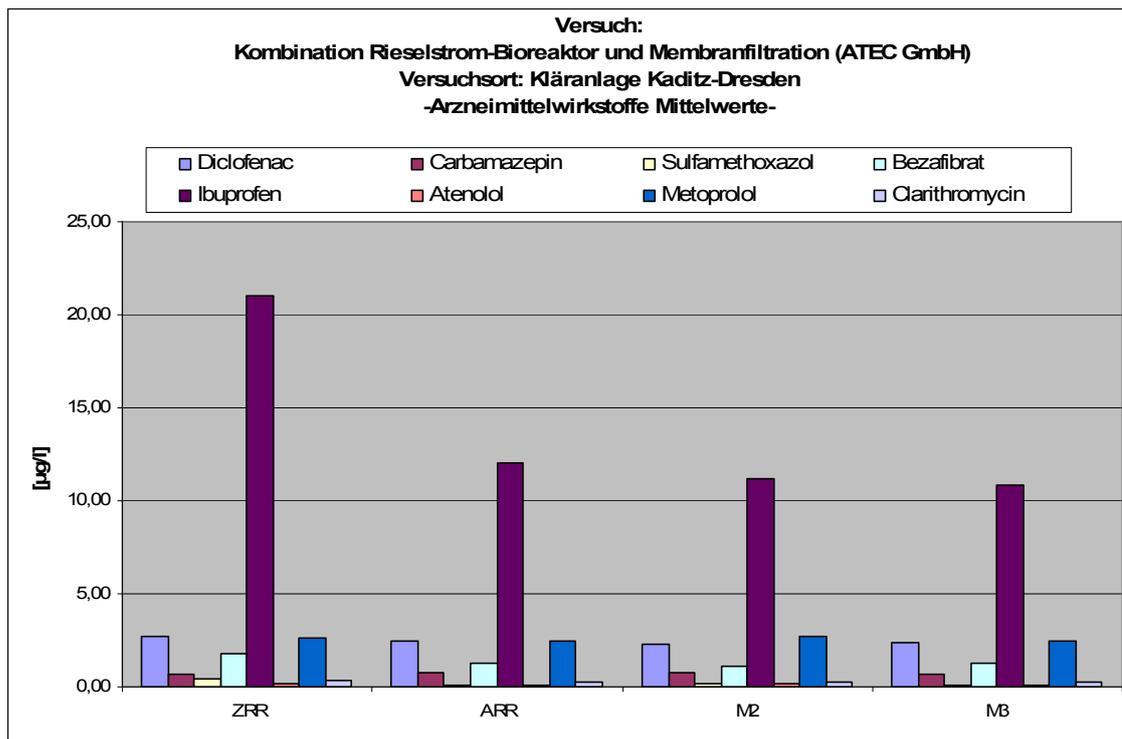


Abbildung 27: Vergleich Arzneimittelwirkstoffe

5.2.2 Messwerte industrielles Abwasser

Zu Beginn verlaufen alle Membranen sehr zufriedenstellend. Jedoch am Anfang des V1 (29.06.11) trübte sich sehr das Permeat bei M1 (0,2 µm). Dies führte zu der Schlussfolgerung, dass diese defekt sei. Aus diesem Grund werden alle weiteren für M1 geplanten Analysen auf M3 (100 kD) übertragen. Der Analysenplan liegt der Anlage A-III bei.

Die Ergebnisse des ARR zeigen, dass er im Mittel die CSB-Fracht zu 81% abbaut. Der BSB₅-Anteil, also die organische Schmutzfracht im Zulauf, entspricht durchschnittlich 65% vom CSB. Zum Teil senken die Membranen durch Partikelrückhalt den CSB-Wert noch etwas ab. Die folgende Grafik (vgl. Abbildung 28) illustriert die erreichten CSB-Abbaugrade während der gesamten Versuchsperiode. Die Abhängigkeit von Zulaufvolumenstrom und CSB-Reduzierung ist sehr gut bei M2 und M3 im Diagramm zu erkennen, was mit der Verweilzeit des Abwassers im RR zusammenhängt. Dabei nimmt der CSB-Abbaugrad mit steigender Strömung ab und die CSB-Konzentration in den Abläufen der Membranen zu. Auffällig ist, dass im V1 die Membranen wesentlich mehr CSB zurückhalten konnten. Zudem ist, wie in den Messergebnissen des Versuches mit kommunalem Abwasser, der Trend wieder zu erkennen, dass beim ARR mit niedrigem Zulaufvolumenstrom (V1) ein geringerer CSB-Abbaugrad erreicht wird. Zudem ist festzustellen, dass die Wasserqualität zwischen ARR und Permeaten, bis auf V1, sich nur unwesentlich voneinander unterscheiden.

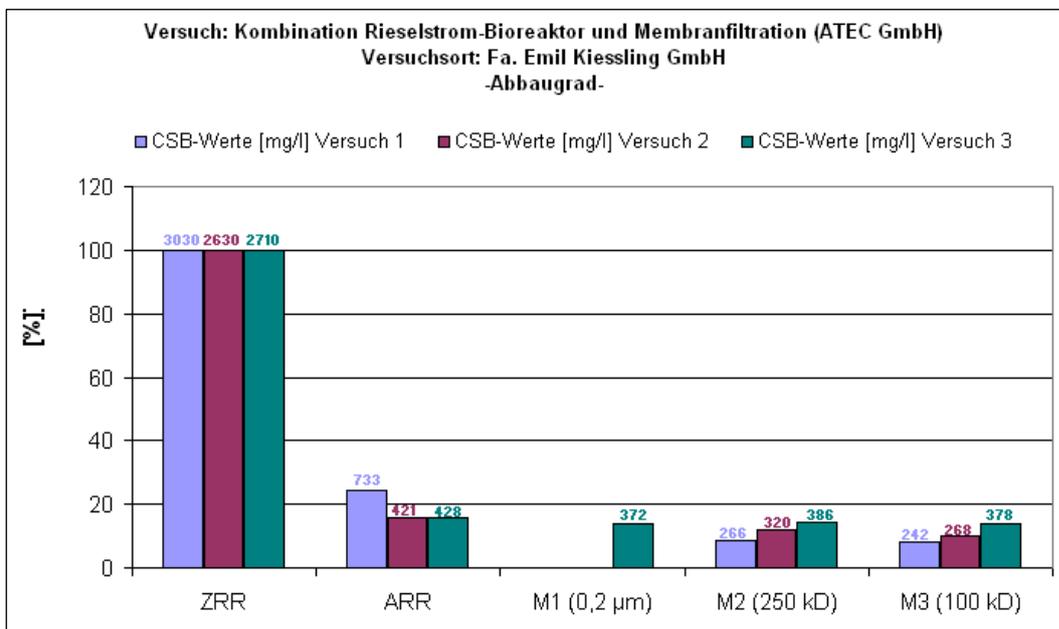


Abbildung 28: CSB-Abbaugrad Versuch Kiessling

Die Verweilzeit kann nach der Formel 5, in Kapitel 5.4.1 dargestellt, berechnet werden. Es wird von einem Wasservolumen im RR-Trägerbett von 8 m³ ausgegangen¹. Für die Verweilzeit ergeben sich somit folgende, gering abweichende, Werte

Tabelle 23: Verweilzeit im RR; Versuch Fa. Emil Kiessling GmbH

Versuch	Verweilzeit [h]
3	4,32
1	8,89
2	7,27

Die BSB-Werte aller Membranen können leider nicht ausgewertet werden, da der BSB₅ für die Permeate der Membranen erst zu spät angesetzt (2 Wochen nach Versuchsdurchführung) und zudem im Kühlschrank aufbewahrt wurden. Während der Aufbewahrungszeit hat vermutlich eine Verkeimung des Permeats stattgefunden, sodass eine Auswertung nicht mehr der Realität entspräche. Auch die Trübung wurde leider erst nach den Versuchen viel später im Labor gemessen. Da die Werte im Vergleich zum Versuch mit kommunalem Abwasser, hier doch sehr hoch ausfallen (vgl. Anhang Kiessling), kann auf eine starke Veränderung des Probenwassers bis zum Tag der Probenanalytik geschlossen werden. Aus dem Grund entfällt eine graphische Darstellung. Ebenso entfällt die Grafik für Ammoniumstickstoff, die wenigen Messwerte streuen zu sehr, um eine Aussage treffen zu können. Wie erwartet ist jedoch zu erkennen, dass der Ammoniumstickstoffgehalt, welcher im Ablauf des RRs vorliegt, auch fast vollständig in den Permeaten der Membranen wieder zu finden ist.

Die errechnete Raumabbauleistung basiert auf der Formel 6, welche in Kapitel 5.2.1 aufgeführt ist. Die Ergebnisse zeigen, dass mit höherer CSB-Fracht, die Raumabbauleistung steigt.

Tabelle 24: Raumabbauleistung

Versuch	\dot{V}_{ZL} [l/h]	CSB _{ZL} [mg/l]	CSB _{AL} [mg/l]	Δ CSB [mg/l]	Raumbelastung [kg CSB/d * m ³ RV]	Abbauleistung [kg CSB/d * m ³ RV]
3	1850	3030	733	2297	3,4	2,6
1	900	2630	421	2209	1,4	1,2
2	1100	2710	428	2282	1,8	1,5

Die nachfolgend graphisch dargestellten Absolutwerte zeigen, dass unerwarteter Weise der Messwert vom Probenwasser des Ablaufs der RRen (V2) im Vergleich zu den beiden anderen Versuchen sehr hoch ausfällt, was nicht plausibel erscheint. Es ist davon auszugehen, dass hier

¹ Persönliche Mitteilung Dr. Lutz Haldenwang

ein Messfehler bei der Probenanalytik (II-ARR) vorliegt. Bei V1 und V3 halten die Membranen nur im sehr geringen Maße das Orthophosphat zurück.

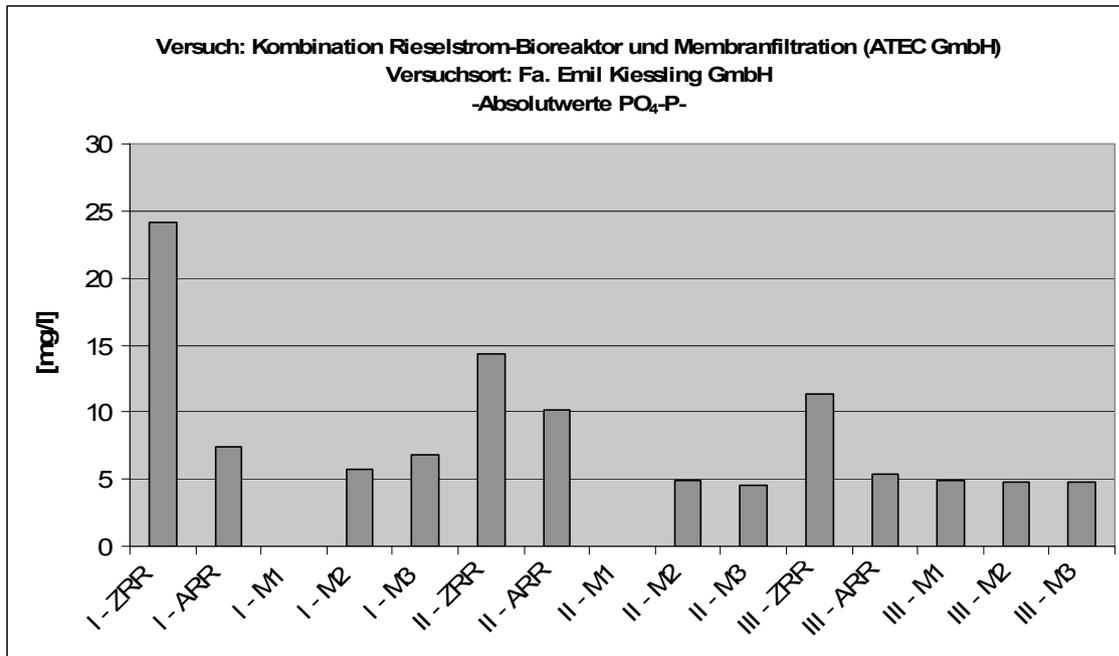


Abbildung 29: Orthophosphat; Versuch Fa. Emil Kiessling GmbH

5.2.3 Vergleich MBR mit VK-RR/MA

Für den Verfahrensvergleich wird sich auf Werte in Anlage A-IV (für VK-RR/MA) und auf Tabelle 14 aus Kapitel 4.1 (für MBR-Verfahren) bezogen. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen graphische Gegenüberstellungen im Säulendiagramm.

Am meisten wird die CSB-Konzentration mit der UF-Membran (UC 030 T) reduziert, während die beiden anderen getesteten Membranen den Wert vom Membranbelebungsreaktor nicht erreichen. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass Kohlenstoffverbindungen besser zurückgehalten werden, je kleiner die Porentrenngrenze der Membran ist.

Der NH₄-N Gehalt im Permeat ist bei allen drei Versuchen der VK-RR/MA gleich und liegt bei 26,7 mg/l. Das MBR-Verfahren reduziert den Ammoniumstickstoff deutlich besser als die VK-RR/MA. Der Grund dafür ist der zusätzlichen biologischen Verfahrensstufe Denitrifikation sowie in der aufkonzentrierten Biomasse im Belebungsbecken zu zuschreiben. Zu erkennen ist auch, dass der gesamte Phosphorgehalt (Pges) der Membranbelebungsanlage geringer ist als bei der VK-RR/MA. Die VK-RR/MA erzielt mit allen drei unterschiedlichen Membranen ähnliche hohe Werte von etwa durchschnittlich 4,4 mg/l für Pges.

Die Ursache für die bessere Pges-Eliminierung beim MBR-Verfahren liegt wieder zum Teil in der Biomasseaufkonzentrierung, jedoch vorrangig in der vor die Membranstufe geschalteten Phosphatfällung.

Im Bezug auf die mikrobiologischen Parameter ist zu erkennen, dass die VK-RR/MA mit eingesetzten UF-Membranen die niedrigeren KbE-Werte der coliformen Bakterien erzielt (vgl. Abbildung 31). Je feiner die Porenengrenze ist, desto weniger KbE sind im Permeat der Membranstufe vorzufinden. Der KbE-Wert der Gesamtcoliformen, den die VK-RR/MA mit MF-Membran erzielt, liegt mit 11.800 KbE/100 ml weit außerhalb des Skalenbereichs und wird im Diagramm nicht dargestellt. Ausschließlich die VK-RR/MA mit UF-Membranen erbringen dem MBR-Verfahren ähnlich gute Werte. Die Angabe ist in der Literatur für den MBR mit < 100 KbE/100 ml angegeben und nur als angenommener maximaler Wert zu betrachten. Es ist davon auszugehen das MBR mit Membranen gleicher Porenweiten auch gleiche Ergebniswerte liefern.

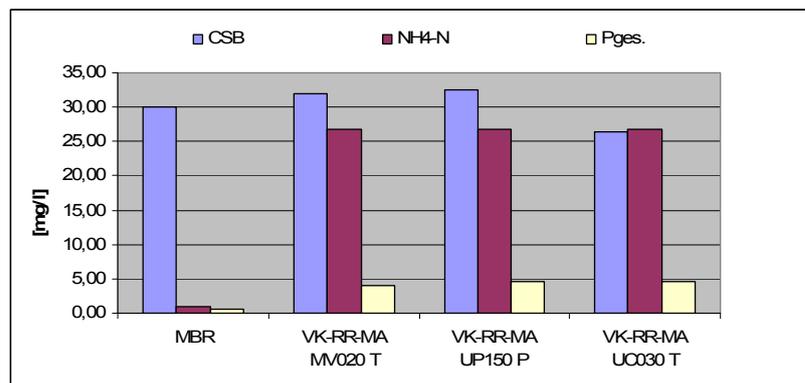


Abbildung 30: Vergleich MBR mit VK-R/MA chemische Parameter

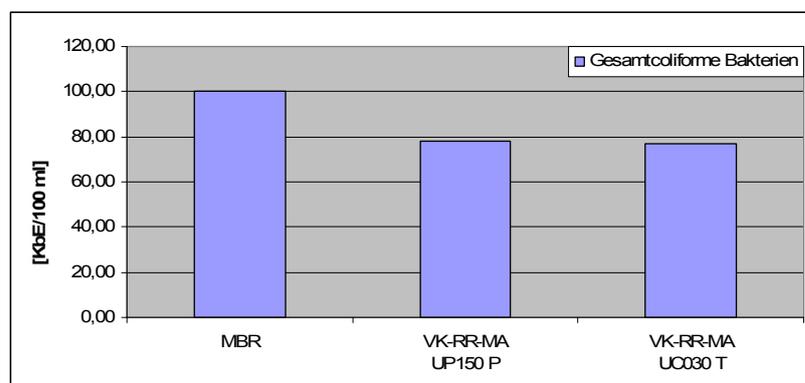


Abbildung 31: Vergleich MBR mit VK-R/MA coliforme Bakterien

6 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit der ausgewählten VK-RR/MA betrachtet. Dafür ist es unumgänglich, die anfallenden Kosten richtig abzuschätzen. Notwendig für eine erste Kostenabschätzung ist, die Kosten des RRs und der Membranfiltrationsanlage zuerst getrennt voneinander zu betrachten, um eine Veränderung wirtschaftlicher Rahmenbedingungen zu einem späteren Zeitpunkt leichter erfassen zu können. Für die Membrananlage liegen vom Hersteller keine Kenndaten für die Kostenbetrachtung vor. Derartige Daten werden firmenintern vertraulich behandelt und variieren je nach Anwendungsfall. Aus diesem Grund basiert die Kostenabschätzung der Membrantechnologie ausschließlich auf Kenndaten aus der Literatur.

Für die VK-RR/MA setzen sich Gesamtkosten für den Betrieb aus folgender Kostenaufschlüsselung zusammen:

Tabelle 25: Gesamtkosten für die Membrananlage ATEC

Erstinvestitionskosten:	Anlagenperipherie, Membranmodule
Betriebskosten:	Membranersatz-, Energie-, Wartungs-, Membranreinigungs-, Konzentratentsorgungs-, Personal- und Versicherungskosten

Tabelle 26: Gesamtkosten für den RR

Erstinvestitionskosten:	Anlagenperipherie, Trägermaterial, Erdarbeiten
Betriebskosten:	Energie-, Nährstoff-, Wartungs-, Personal-, Überschussschlamm Entsorgungs- und Versicherungskosten

6.1 Investitionskosten

Unter Investitionskosten werden die Kosten, die für den Bau einer Anlage nötig sind verstanden. Nach der Kapazitätsmethode sinken die spezifischen Investitionskosten mit der Kapazitätssteigerung einer Anlage. [METH2007]

6.1.1 Rieselstrom-Bioreaktor

In der folgenden Tabelle werden die Investitionskosten für zwei unterschiedliche Reaktorgrößen aufgelistet. Die Investitionskosten setzen sich aus Preisen für die Vorklärung, für die Misch- und Ausgleichsbehälter, Reservebehälter und für die RR-Anlage zusammen. Die Investitionskosten für Erdarbeiten werden hier nicht mit berücksichtigt, da der RR oberirdisch aufgestellt wird. Die komplette Anlage inklusive Lieferung, Aufbau und Inbetriebnahme ist im Preis enthalten. [DAS2011]

Tabelle 27: Kenngrößen unterschiedlicher Größen unter Aufteilung in Klassen [DAS2011]

Klasse	Anlagentyp	Volumen (netto) [m ³]	Kapazität [EW]	\dot{V}_{ZL} (bezogen auf Kapazität) [m ³ /h]	\dot{V}_{ZL} (gerundet) [m ³ /h]	Gesamtkosten [€]
I	mittlere Anlage	26	1.000	8,4	10	187.000,00
II	Großanlage	56	2.000	16,8	20	201.300,00

6.1.2 Membrananlage

Die Ermittlung der Investitionskosten der UF-Anlage wird über die Anlagenkapazität und der damit anfallenden spezifischen Kosten abgeschätzt (vgl. Abbildung 33 [LIP2007]).

Im Gegensatz zu den getauchten MBR-Anlagen entfallen hier die Kosten für eine Belüftungsapparatur. Bestehende Mehrkosten für das Rührwerk sind mit zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden diese jedoch nicht mit in die Kostenschätzung einbezogen. Es werden die Kosten trocken aufgestellter UF-Anlagen für die Trinkwasseraufbereitung sowie der kommunalen Abwasserbehandlung, in Bezug auf die Filtrationsleistung, herangezogen. Im Diagramm der Abbildung 32 sind erreichte Filterleistungen gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Flux der Membrantechnologie ATEC, nach dem RR, eher dem der Wasserversorgung ähnelt, als dem der üblichen getauchten Membrananlagen in der Abwasseraufbereitung. Die Filtrationskenngrößen für das Diagramm, wurden der Fachzeitschrift „energie| wasser-praxis“ und dem der VRM-Technologie (vgl. Kapitel 3.4.1) entnommen [HEAN2008].

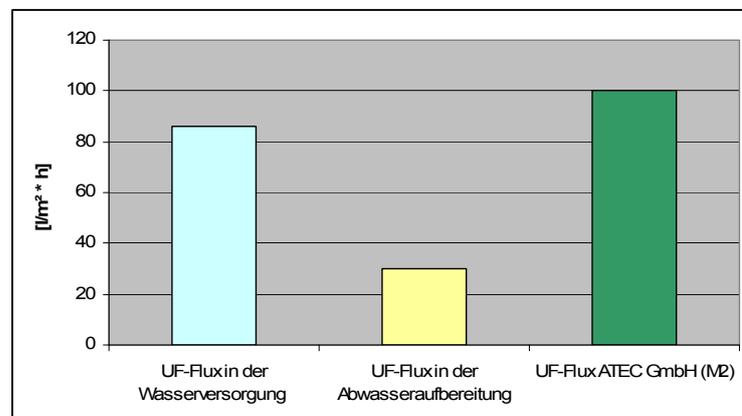


Abbildung 32: Flux UF (trockene und getauchte Membranmodule)

Da der erreichbare Flux, nach dem RR, ähnlich dem der UF-Anlagen der Wasserversorgung ist, werden die Investitionskosten, für solche UF-Anlagen, zur Kostenabschätzung herangezogen. In der Abbildung 33 werden die spezifischen Investitionskosten von MF/UF-Anlagenkapazitäten, in der Wasserversorgung, gegenübergestellt und in Tabelle 28 Investitionskosten der UF-Anlage für zwei Größenklassen ermittelt.

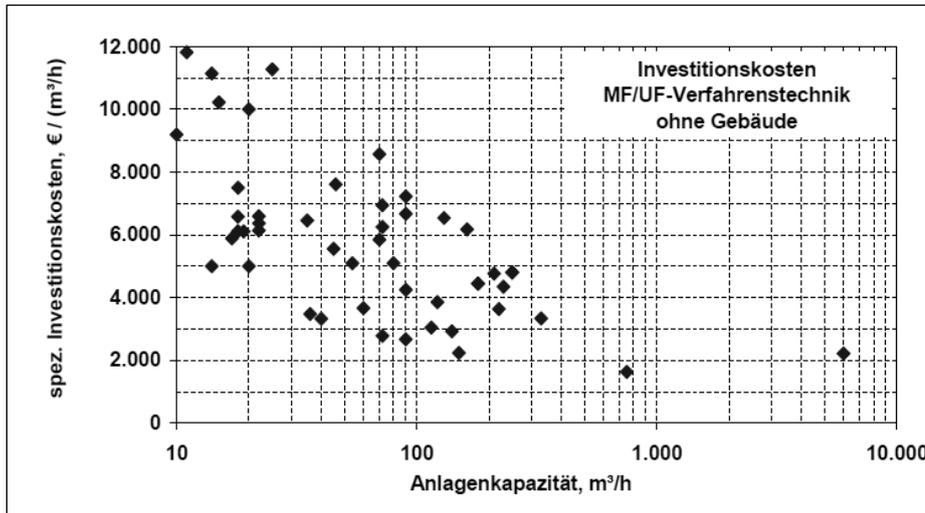


Abbildung 33: Investitionskosten trocken aufgestellter MF/UF-Anlagen

Tabelle 28: Geschätzte Investitionskosten für UF-Anlage

	Klasse I	Klasse II
Anlagenkapazität [m ³ /h]	10	20
spezifische Investitionskosten [€/m ³ /h]	11.000	6.500
Investitionskosten [€]	110.000	130.000

6.2 Betriebskosten

Um die Wirtschaftlichkeit der VK-RR/MA zu betrachten müssen, neben den Investitionskosten, fixe und variable Betriebskosten der jeweiligen Anlagen untersucht werden. Die Kostenaufwendungen für die Versicherung beider Anlagen bleiben in dieser Arbeit unberücksichtigt.

Unter Fixkosten werden all die Kosten verstanden, welche immer in gleichen Zeitabständen und zu gleichen Beträgen anfallen, unabhängig davon ob die Anlage in Betrieb ist oder nicht.

Variable Kosten sind solche Kosten, die direkt mit dem Betrieb der Anlage verbunden sind. Diese sind bspw. Betriebsstoffe, Energiebedarf, Chemikalien und anfallende Reststoffentsorgungskosten.

Unabhängig davon ob das Kapital für den Anlagenbau vorhanden ist oder ein Darlehen aufgenommen werden muss, ist es zu marktüblichen Bedingungen als Kredit anzusehen. Dies bedeutet, dass die Verzinsung, die Kapitaltilgung sowie die Anlagenabschreibung mit zu berücksichtigen sind. Der jährliche Kapitalaufwand ist mit folgender Formel zu berechnen:

$$K = \frac{q^n (q-1)}{q^n - 1} * I \quad \text{und} \quad q = 1 + z \quad (8)$$

K	jährliche Kapitalkosten
n	Abschreibungszeitraum
I	Investitionskosten
z	Zinssatz

Es werden ein Zinssatz von 8% und eine Abschreibungsdauer von 10 Jahren für die Kapitalberechnung beider Anlagen angenommen [METH2007]. Die Energiekosten werden mit einem Strompreis von 0,20 €/kWh berechnet.

6.2.1 Rieselstrom-Bioreaktor

Die tägliche Betreuung beträgt im Mittel 30 Minuten am Tag, unabhängig von der Baugröße des RRs, dies entspricht 180 h/a. Es fallen Energieaufwendungen für den Betrieb der Anlage wie bspw. Pumpen, Gebläse an. Hinzu kommen Überschussschlammentsorgungskosten. [DAS2011]

Tabelle 29: Betriebskosten RR

Kosten	Klasse I [€/a]	Klasse II [€/a]
<u>fixe Kosten</u>		
Kapitalkosten	27.868,51	29.999,64
Personalkosten ¹	2.928,65	2.928,65
<u>variable Kosten</u>		
Energie (Ventilator, Pumpen) ²	7.000,00	8.800,00
Entsorgungskosten ²	2.980,00	5.856,00

¹ Tarifrecht, Tarifregister des Freistaats Sachsen

² [DAS] interne Unterlagen

6.2.2 Membrananlage

Chemikalien für die Membranreinigung sind mit 1,1 €/m²*a kalkuliert und die Membranersatzkosten mit 8 €/m²*a, bei Annahme einer Membranstandzeit von 10 Jahren [SCWI2009]. Der Personalaufwand wird mit einer Stunde pro Werktag angesetzt [LIP12003], was einen Aufwand von 303 h, für das Jahr 2012 im Freistaat Sachsen, entspricht. Die benötigte Membranfläche wird je nach Durchsatz des RRs berechnet. Dazu ist die Kenngröße 35,5 m² je 100 m³ Abwasser am Tag, durch Interpolation des Messbereichs für die Filterleistung der UF-Anlage des BIOMEMBRAT[®], heranzuziehen. Die Auswahl erfolgt auf Grundlage der Tabelle 13 (siehe Kapitel 3.4.2) und Abbildung 33. In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass die Filterleistung der Membrananlage ATEC in etwa 100 l/m²h entspricht und liegt somit im Bereich zwischen 70 und 180 des BIOMEMBRAT[®]en. Dies entspricht einer Anlagenkapazität des RRs mit 10 m³/h einer einzusetzenden Membranfläche von 85,2 m² und bei der Kapazität 20 m³/h von 170,4 m². Auch die Ermittlung des spezifischen Energiebedarfes ist, in Anlehnung an den BIOMEMBRAT[®] (vgl. Kapitel 3.4.2) erfolgt. Der spezifische Energiebedarf liegt für die UF-Anlage des BIOMEMBRAT[®] zwischen 2,5 und 6 kWh/m³. Für die UF-Anlage mit trocken aufgestelltem Membranmodul wird der spezifische Energiebedarf mit 3,5 kWh/m³ veranschlagt.

Tabelle 30: Betriebskosten UF-Anlage

Kosten	Klasse I Gesamt [€/a]	Klasse II Gesamt [€/a]
<u>fixe Kosten</u>		
Kapitalkosten	16.393,24	19.373,83
Personalkosten	4.929,81	4.929,81
<u>variable Kosten</u>		
Energieaufwand	61.320,00	122.640,00
Chemikalien	90,42	187,44
Membranersatz	681,60	1.363,20

6.2.3 Gesamtjahreskosten

Der gesamte Jahresaufwand für den RR mit einer trocken aufgestellten Membrananlage ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Gesamtjahreskosten RR und UF-Anlage

	Klasse I	Klasse II
Investitionskosten	297.000,00 €	331.300,00 €
Betriebskosten		
fixe Kosten	52.120,21 €/a	57.231,93 €/a
variable Kosten	72.072,02 €/a	138.846,64 €/a
Gesamt	124.192,23 €/a	196.078,57 €/a
Kosten pro Abwassermenge	<u>1,42 €/m³</u>	<u>1,12 €/m³</u>

6.3 Wirtschaftlichkeitsvergleich

Der Wirtschaftlichkeitsbegriff steht stets in Verbindung mit der Technik. Eine einheitliche Definierung des Maßstabs von Wirtschaftlichkeit in Technik und Wirtschaft, gibt es für den Begriff jedoch nicht [PIJO2006]. Ob eine andere Verfahrenskombination wirtschaftlicher ist als die VK-RR/MA kann nur beurteilt werden, wenn ein anderes Verfahren vergleichbare Reinigungsleistung erbringt und der jährliche Kostenaufwand niedriger ist.

a) Kosten VK-RR/MA

Die prozentualen Investitions- und jährlichen Betriebskosten können der Abbildung 34 entnommen werden. Bei Vergleich des Investitionsaufwandes kann festgestellt werden, dass die Membrananlage rund 40% und der RR 60%, unabhängig von der Anlagenkapazität, ausmachen. Anhand der Betriebskosten ist zu entnehmen, dass die Fixkosten beider Anlagen sowie die variablen Kosten des RRs, mit steigender Anlagenkapazität, prozentual abnehmen. Die UF-Anlage weist einen fast gleich hohen Anteil an Fixkosten wie der des RRs auf, bei einer Anlagenkapazität von 20 m³/h. Den größten Anteil der variablen Kosten nimmt definitiv die trocken aufgestellte Membrananlage, aufgrund des sehr hohen Energiebedarfs für den Cross-Flow-Prozess, ein. Die variablen Kosten der trockenen aufgestellten Membrananlage belaufen sich hier auf 50-62%.

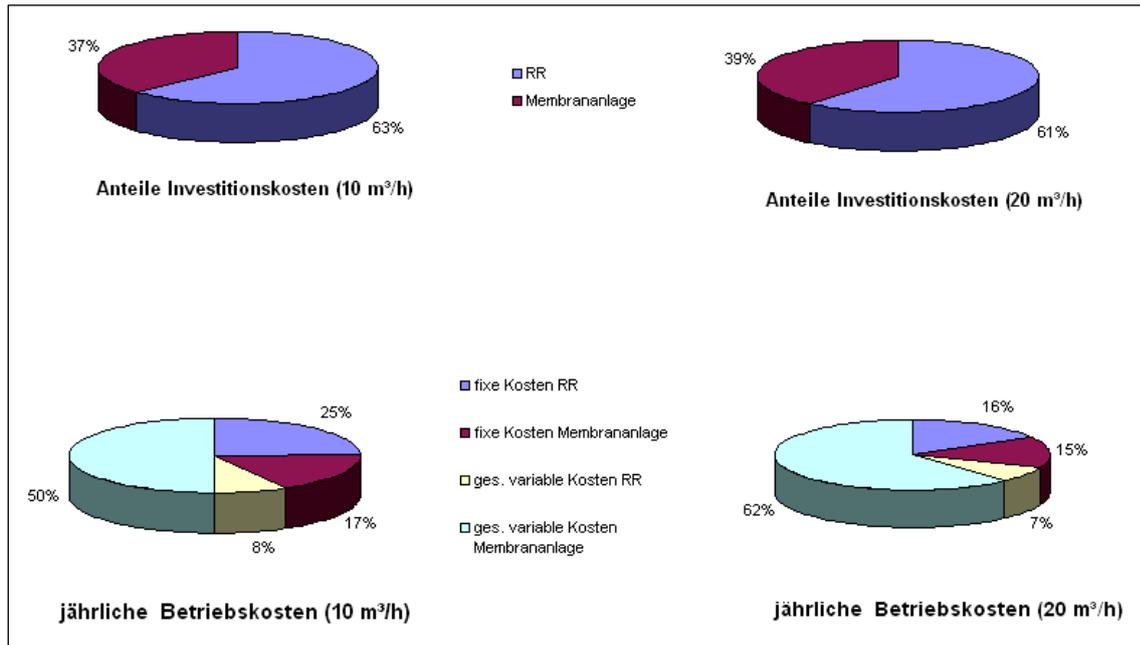


Abbildung 34: Kostengegenüberstellung RR und externe UF-Anlage

Der Flux der UF-Anlage entspricht, nach dem RR, in etwa dem Dreifachen der MBR-Anlage. Eine hohe Filterleistung bei geringer benötigter Membranfläche trägt wesentlich zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bei.

b) Vergleich MBR mit getauchtem Modul (Stand der Technik)

Im Abschlussbericht „Untersuchungen zur Einsetzbarkeit des Membranbelebungsverfahrens auf der Kläranlage des Abwasserverbandes Hommerich“ [PIJO2007] werden die spezifischen Betriebskosten für ein konventionelles Verfahren zwischen 0,2 - 0,22 €/m³ Abwasser angegeben und die des MBRs mit 0,24 - 0,25 €/m³ veranschlagt. Die Kosten sind immer abhängig von der Anlagenkapazität. Je höher diese ist, desto geringer werden die spezifischen Betriebskosten. Die berechneten Kosten von 1,42 €/m³ (Anlagenkapazität: 10 m³/h) und 1,12 €/m³ (Anlagenkapazität: 20 m³/h) unterstreichen diese Aussage. Im Vergleich der spezifischen Kosten für die VK-RR/MA mit dem MBR, getauchtes Membranmodul, fallen sehr hoch aus, was daran liegt, dass die Kosten für MBR vermutlich in einem größeren Anlagenmaßstab berechnet worden sind. Primäres Argument ist, dass kein hoher transmembraner Druck für das getauchte Membranmodul aufgebracht werden muss, da die hydrostatische Wassersäule genutzt wird, welche von der Beckentiefe abhängig ist. Dadurch fallen geringere Energiekosten für das getauchte Membranmodul an. Dies bestätigt auch die folgende Abbildung 35. Hier sind die Ergebnisse der Berechnung des Energiebedarfs (Cross-Flow-Belüftung, zusätzlicher Energiebedarf, Permeatextraktion) für ein getauchtes Modul dargestellt. Die Berechnungsgrößen für den spezifischen Energieverbrauch der getauchten Membrananlagen basieren auf der Literaturquelle [SCWI2009], die als Anlage in A-III beigefügt ist. In Abbildung ist eindeutig ersichtlich, dass die variablen Kosten der getauchten Membrananlage einen geringeren Anteil

der Betriebskosten darstellen. Im Vergleich mit trocken aufgestellten Membrananlagen (vgl. Abbildung 34) machen die variablen Kosten für das Membranmodul nur noch 23-32% anstatt der 50-62% aus.

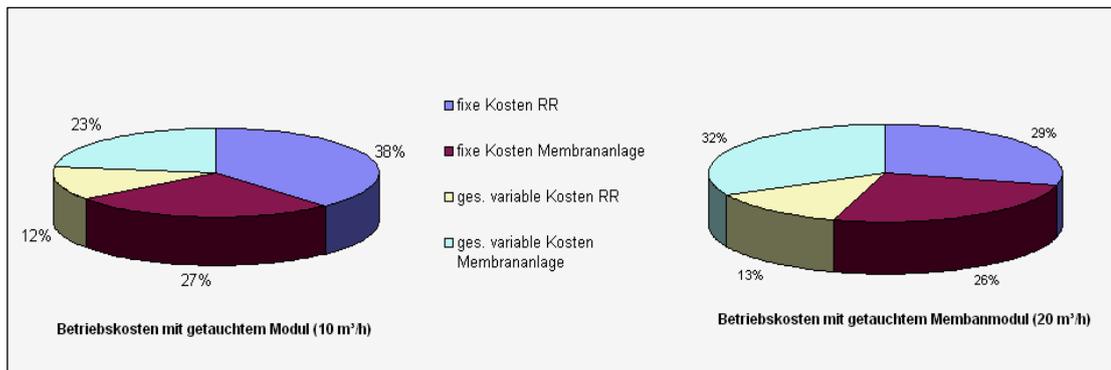


Abbildung 35: Gegenüberstellung Betriebskosten RR mit getauchter UF-Anlage

Bei dem in der VK-RR/MA verwendeten Membranverfahren der ATEC, wird ein niedrigerer Transmembrandruck aufgebracht, da der Rührer eine hohe Querströmung des Wassers erzeugt und diese zusätzlich das Abwasser auf die Membranen drückt. Allerdings muss der Energieverbrauch des Rührers mit in den spezifischen Energiekosten betrachtet werden. Dies kann dazu führen, dass ein höherer Energieaufwand für dieses Verfahren aufgebracht werden muss. Wirtschaftliche Vorteile für das trocken aufgestellte Verfahren sind, dass die Wartungsarbeiten und der Membranaustausch einfacher von statten gehen. Es werden dazu keine Hilfsmaschinen, z.B. Kran, benötigt. Zudem lässt sich eine defekte Membran einfacher, in einem extern aufgestellten Membranmodul, lokalisieren. Eine geringere Membranfläche wird zu weniger Membranersatz- und Membranreinigungskosten führen. Zudem wird bei Beschickung der Membrananlage mit partikelarmen Abwasser vom ARR, die Membranstandzeit erheblich erhöht, was nur anhand von Langzeitversuchen festzustellen ist. Dies führt zu geringerem Wartungsaufwand und steigert somit die Wirtschaftlichkeit der gesamten Verfahrenskombination. Nachteilig sind der zusätzliche Platzbedarf den die Membrananlage benötigt sowie evtl. Gebäudekosten anzuführen.

Wird das aufbereitete Wasser wieder verwendet erhöht sich die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage, da zum einen Frischwasser eingespart und zum anderen Abwasserentsorgungskosten verringert werden. Die Kosteneinsparungen sind dann den Aufbereitungskosten entgegen zu rechnen.

7 Auswertung

7.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Eingeleitet wird die schriftliche Arbeit mit der Verfahrensbeschreibung beider eingesetzten Technologien und anschließend werden wesentliche Grundlagen der MF/UF-Anlagen sowie deren Einsatzgebiete betrachtet.

Die Arbeit liefert einen Einblick in die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die direkte und indirekte Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser. Im Fokus stehen dabei Grenz- und Leitwerte der mikrobiologischen Parameter, welche bei Wassermehrfachnutzung in bestimmten Anwendungsfällen eingehalten werden müssen. Grenz- und Leitwerte stehen in enger Korrelation mit dem geplanten Einsatz des behandelten Abwassers und variieren dem entsprechend stark.

Es wird einen Einblick in den heutigen Stand der Technik über Verfahrenskombinationen von biologischer- und Membranstufe gegeben. Zu dem werden Anwendungsfälle solcher MBR-Anlagen aufgeführt. Heraus stellt sich, dass die meisten eingesetzten Verfahrenskombinationen aus Belebungsbecken mit integrierter Membraneinheit bestehen, da der energetische Aufwand, für Cross-Flow-Prozesse trockener aufgestellter Membranverfahren, wesentlich höher ist.

Zudem wurde der Einsatzbedarf für MBR-Verfahren ermittelt. Das Anwendungsgebiet für MBR-Anlagen ist weit gefächert. Die meisten Industrieunternehmen sind daran interessiert Frischwasser- und Abwasserentsorgungskosten einzusparen und zudem ihr ökologisches Bewusstsein auch nach außen hin zu unterstreichen. Mittlerweile steht ökologisches und ökonomisches Handeln in vielen Unternehmen als Leitsatz. Auch für die Kommunen sind MBR-Anlagen von Bedeutung, da bestimmte Anforderungen je nach Einzugsgebiet des fließenden Oberflächengewässers für Kläranlagen einzuhalten sind. Demzufolge werden bereits Membrananlagen zur Ertüchtigung von Kläranlagen eingesetzt. Weiter findet ein Umdenken in der Siedlungswasserwirtschaft in Deutschland statt, bei dem das Kanalschwemmsystem stark in Frage gestellt wird. Zu diesem System werden derzeit nach Alternativen gesucht. Im vordergründigen Interesse steht dabei das Abwasser dezentral zu behandeln.

Die durchgeführten Feldversuche wurden qualitativ analysiert und anhand der Messergebnisse sind Überlegungen zur VK-RR/MA angestellt worden. Aufgrund der sehr kurzen Versuchsperioden konnten nur sehr wenige Messwerte gewonnen werden, mit denen eine Aussage nur bedingt möglich ist. Eine Aussage über die Verfahrensstabilität beider Anlagen in Kombination miteinander ist nur auf Grundlage von Langzeitversuchen möglich. Die Auswertung der Messergebnisse zeigen, dass die MF/UF nur unwesentlich CSB und Nährstoffe zurückhalten und somit als weitergehende Behandlungen nach dem RR nicht geeignet sind. Lediglich eine

Verbesserung in Bezug auf die mikrobiologischen Parameter konnte anhand, von der ATEC ausgehändigten Messergebnissen, festgestellt werden.

Wird die wirtschaftliche Situation beider Anlagen betrachtet, ist festzustellen, dass trocken aufgestellte Membranverfahren immer mehr Energie benötigen als Getauchte. Somit werden die MBR-Anlagen mit getauchten Membraneinheiten auch immer preiswerter sein, als die VK-RR/MA. Auch benötigt das getauchte MBR-Verfahren weniger Platz, da die meisten Membrananlagen im biologischen Aufbereitungsbecken mit integriert sind. Die einfache Handhabung bei Wartungsarbeiten und Membranaustausch ist ein klarer Vorteil beim trocken aufgestellten Membranverfahren. Der RR liefert schon weitgehend partikelfreies Wasser, was die Membranen sehr entlastet, jedoch kann in ihm keine Biomasseaufkonzentrierung erfolgen, da es sich um ein nicht eingestautes Verfahren handelt.

Ein Ausblick und eine Handlungsempfehlung für die Technologie ist im folgenden Kapitel zu finden.

7.2 Ausblick/Empfehlungen

Im Jahr 2005 hatten MBR bereits einen Marktwert von US \$ 217 Millionen mit einem durchschnittlichen Anstieg von 10% pro Jahr. Dies stellt ein schnelleres Wachstum als bei jeder anderen „Advanced Water Technology“ und als bei anderen Einsatzgebieten der Membrantechnologie dar.“ [MEUM2011]

Einen interessanten Ansatzpunkt der VK-RR/MA gibt die Membrantechnologie, indem überlegt wird die Abwärme des Rührorgans an kälteren (Winter-) Tagen der Mikrobiologie zu zuführen, um so die Umgebung für eine optimale mikrobiologische Abbauleistung an witterungsbedingt ungünstigen Tagen im RR zu schaffen. Das wäre ein neuartiger Vorteil im Vergleich mit anderen Membranbelevungsverfahren, denn laut Franz-Bernd Frechen nimmt mit dem Absenken der Temperatur die EPS-Produktion der Mikroorganismen zu und deren Abbauleistung ab. [FRFR2006] Somit nehmen Reinigungsintervalle und der dazu benötigte Chemikalieneinsatz bei MBR-Verfahren zu. Bei der VK-RR/MA könnte damit voraussichtlich das ganze Jahr über eine gute Raumabbauleistung im RR, wenige Reinigungsintervalle sowie ein geringer Chemikalienverbrauch bei der Membranreinigung gewährleistet werden.

Bei weiteren Versuchsreihen für die Verfahrenskombination sollten Untersuchungen mit wesentlich höheren Durchflussgeschwindigkeiten angestellt werden (wenigstens 100 m³/h). Die Filterleistung des ATEC Verfahrens ist, nach dem Ablauf des RRs, in etwa dreimal höher als bei MBR-Anlagen mit getauchten Modulen und besitzt somit Reserven, die ausgeschöpft werden sollten. Stellte man dem Membranverfahren die voll aufnehmbare Abwassermenge zur Verfügung, hätte das positive Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit der VK-RR/MA, da mehr

Abwasser pro Stunde behandelt werden kann und sich somit die Aufbereitungskosten pro Quadratmeter Abwasser senken lassen. Zudem bildet sich bei höherem Durchfluss eine höhere Deckschicht auf der Membran aus. Dadurch werden mehr Partikel mit kleinerer Porenweite, als die der eingesetzten Membran, zurückgehalten, was die Ablaufqualität steigert. In diesem Rahmen ist die Erstellung einer Messreihe, die das Zusammenspiel von Filterleistung und Deckschichtausprägung widerspiegelt, für spezifische Membrantypen/-verfahren von großem Interesse. Hierin liegt ein noch unzureichend erforschter Faktor, der zusätzlich qualitätssteigerndes Potenzial verspricht, ohne die Anschaffungs-/Betriebskosten der Anlage im Wesentlichen zu steigern. Im Vergleich zu MBR-Verfahren, kann der RR alleine nicht mit den Vorteilen, die eine Aufkonzentrierung von Biomasse mit sich bringen, mithalten. Im Gegenteil, eine zu hohe Schlammkonzentration würde zu einer Verminderung der Abbauleistung sowie zu einem Verstopfen des RRs führen und muss deshalb in regelmäßigen Regenerierungszyklen aus dem Trägerbett geholt werden.

Weiter ist erstrebenswert zu überlegen, wie die Energiekosten gesenkt werden können z.B. durch Integration eines Membranmoduls in den RR, um die erzeugte Pumpleistung für den Kreislaufprozess des RRs auch für die Membranfiltration auszuschöpfen. Abbildung 16 c) in Kapitel 4.5 zeigt eine besondere Anlagenvariation, die hohe Energieeffizienz verspricht. Damit wäre allerdings der Komfort der handlichen, schnellen Möglichkeit des Auswechselns der Membran verloren. Weiterhin bleibt anzumerken, dass die eingesetzten MF/UF-Membranen lediglich grobe Partikel und Mikroorganismen zurückhalten, was im Bezug auf die erreichte Abwasserqualität in Zusammenhang mit den hohen errechneten Betriebskosten, indiskutabel für einen Einsatz, ist. Aus diesem Grund sollten Untersuchungen mit feineren Porentrennweiten im Bereich der NF/RO unternommen werden. Interessant wäre es, wenn es gelänge endokrine Substanzen aus dem Abwasser zu eliminieren. In diesem Fall hätte die VK-RR/MA großes Einsatzpotential bei der Aufbereitung von Krankenhaus-, Chemie- und Pharmazeutikerabwässern. Zudem würde sich dann die VK-RR/MA als Vorbehandlungsstufe vor der Trinkwasseraufbereitungsanlage, welche das Wasser aus oberirdischen Gewässern gewinnt, eignen.

Im Weiteren sollte eine Wirtschaftlichkeitsanalyse mit konkreten Kenndaten der Membrananlage der ATEC durchgeführt werden, um die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in dieser Arbeit ergänzend zu erweitern. Wird die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in dieser Arbeit durch eine umfangreichere Wirtschaftsanalyse bestätigt, ist die VK-RR/MA als unwirtschaftlich einzustufen, da der Preis pro Quadratmeter Abwassermenge im Vergleich mit herkömmlichen Kläranlagen und MBR-Anlagen viel zu hoch ist. Wird als Neuling ein Marktanteil erschlossen, ist vorerst das Image der Firma irrelevant. Von großer Bedeutung hingegen ist die Wirtschaftsfähigkeit des abzusetzenden Produkts. Um auf den Markt bestehen zu können muss bei der VK-RR/MA jedes Einsparpotential genutzt werden.

Wie auch bei MBR-Verfahren werden, für bestimmte Anforderungen, je nach Verwendungszweck des gereinigten Wassers, evtl. weitere Reinigungsstufen nötig sein, um diesen gerecht zu werden. Größter Marktmitstreiter, der BIOMEMBRAT® der Wehrle Umwelt GmbH, arbeitet aktiv mit Hochschulen zusammen und sie betreiben seit 1970 Forschung in diesem Gebiet. Hier ist das Zusammenspiel zwischen den einzusetzenden Reinigungsstufen schon sehr gut umgesetzt. Allerdings könnte die VK-RR/MA in besonderen Einsatzfällen als Alternative zum BIOMEMBRAT® konkurrenzfähig bleiben.

Es wird auch in Zukunft weiterhin ein verstärktes Bestreben nach Forschungsförderung für den Abwasseraufbereitungssektor geben. Einerseits steht eine Verbesserung der Abwassersituation in Deutschland in Aussicht, aber vor allem ist technologisches know-how – made in germany – der wichtigste Exportrohstoff Deutschlands. Deutschland gilt bereits als weltweit führend im Bereich der Wasser-/Abwasseraufbereitungstechnologien. Wichtig ist, dass Wasser einen fairen Preis bekommt und somit auch dessen Aufbereitung einen höheren Stellenwert einnimmt. Dazu müssen allerdings zuerst die entsprechenden politischen Rahmenbedingungen geschaffen werden. Staatliche Subventionen sind immer eine Möglichkeit den Forschungsdrang zu finanzieren und Unternehmen einen Anreiz zu geben, Investitionen in neue, erfolgsversprechende, strukturierte Projekte umzusetzen.

Zur firmeninternen Weiterentwicklung der Verfahrenskombination werden weitere Versuche mit Membrantechnologien zur Durchführung empfohlen, um „know how“ durch eigene praktische Erfahrungen zu erlangen. Um dies zu erleichtern kann das eingeholte Angebot der TAMI Deutschland GmbH genutzt werden. Die Versuchsperioden sollten zukünftig wesentlich länger angesetzt werden, um genügend repräsentative Messwerte zu bekommen. Zudem können nur durch Langzeitversuche konkrete Aussagen zur Verfahrensstabilität beider Verfahren in Kombination getroffen und Optimierungsmöglichkeiten an den jeweiligen Anlagen erkannt werden. Bei zukünftigen Versuchsplanungen sollte ein Analytiklabor gewählt werden, bei dem die Qualität der Analysenbestimmung bekannt ist. Denn diese Werte sind das Fundament für weitere Überlegungen und Handlungen, zudem können dadurch aufwendige Versuchswiederholungen und die damit verbundenen Aufwendungskosten vermieden werden. Für die Versuche, die während dieser Arbeit durchgeführt wurden, ist dies nicht berücksichtigt worden, die vom Analytiklabor gelieferten Werte sind nicht vertrauenswürdig und wurden somit weitgehend bei der Auswertung nicht mit berücksichtigt. Der Vollständigkeit halber sind die Analytikwerte in der Anlage A-III der Arbeit mit beigefügt.

Der Einsatz von Membranen in der kommunalen Abwasserreinigung beschränkt sich in Deutschland derzeit auf öffentliche Förderprojekte. Denn auch wenn in den letzten Jahren die Investitionskosten der Membranverfahren gesunken sind, machen sie doch noch weiterhin einen großen Anteil der Gesamtinvestitionskosten aus. Dies ist auch das Hauptargument, neben den höheren Betriebskosten, warum Membrantechniken, bei Anlagenerweiterungen bzw. Neuanlagenbauten, von vornherein ausgeschlossen werden. [PIJO2008]

Der größte Absatzmarkt wird in den Schwellen- und Entwicklungsländern für die Wasser-/Abwasseraufbereitung erwartet, da die Bevölkerung sowie Infrastruktur schnell wachsen und sanitäre Einrichtungen sowie Abwasseraufbereitungsanlagen nicht bzw. nur unzureichend vorhanden sind. Hier gilt es schnellstmöglich Anlagenkonzepte zu erproben und marktreif auszubauen um den zu erwartenden Konjunkturschwung zu nutzen. Besonders sind z.Z. Projekte in Ungarn interessant, die zum einen vom logistischen Standpunkt noch leicht zu erreichen sind und zum anderen „der Wasserschutz und das Projektgeschäft“ in diesem Land durch EU geförderte Ausschreibungen unterstützt wird [FINZ2011]. Mit steigenden Erwartungen an die Qualität des Abwassers bis hin zur Trinkwasserqualität wird sich das energetisch effektivste, kostenfaktisch günstigste und qualitativ hochwertigste Verfahren durchsetzen. Da eine derartig komplexe Aufgabenstellung nur schwer von einem einzelnen Unternehmen ohne umfangreiche verfahrensspezifische Kenntnisse bewältigt werden kann, böte ein Forschungsprojekt in Ungarn eine großartige Möglichkeit das Wissen um eine membrangestützte biologische Abwasserbehandlung weiter zu vertiefen und gegeben falls sich mit anderen Institutionen, die das gleiche Ziel verfolgen zusammen zu schließen.

LITERATUR

- [ARD2010] Roth, Thomas, WDR New York, Tagesschau vom 28.07.2010; <http://www.tagesschau.de/ausland/wasser134.html>; verfügbar am 05.07.2011, 13:00
- [ATEC2011] interne Unterlagen, persönliche Mitteilungen Herr Enderle, <http://www.atec-nu.de>, verfügbar am 01.08.2011/16:12
- [ATV1998] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., ATV-DVWK-Regelwerk: Merkblatt 205: Desinfektion von biologisch gereinigtem Abwasser, Hennef, Eigenverlag, 1998
- [BASV2007] Baumgarten; Sven: Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Doktorarbeit: Membranbioreaktoren zur industriellen Abwasserreinigung, Bad Neuenahr-Ahrweiler, Eigenverlag, 2007
- [BäV2001] Regierungsrat des Kantons Aargau: Verordnung über die öffentlichen Bäder, Aargau, 2001
- [BMU2007] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit http://www.bmu.de/gewaesserschutz/fb/gewaesserschutzpolitik_d_eu_int/doc/3063.php, verfügbar am 20.02.2011/9:00
- [BOSA2006] Botterbrodt, Sabine, Arbeitsgemeinschaft Getreideforschung e.V.: Power Point Präsentation: Anforderungen an die Prozesswasserqualität, Detmold, 2006
- [COPE2004] Cornel, Peter und Weber, Babara: Unterrichtsmaterial TU Darmstadt Erzeugung von Bewässerungswasser durch eine chemisch physikalische Abwasserbehandlung, Darmstadt, Eigenverlag, 2004
- [DAS2011] Firmeninterne Unterlagen, persönliche Mitteilungen
- [DIN19643] Deutsches Institut für Normung e.V.: Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser, Beuth Verlag, Berlin, 1997

- [DIN19650] Deutsches Institut für Normung e.V.: Hygienisch-mikrobiologische Klassifizierung und Anwendung von Bewässerungswasser, Beuth Verlag, Berlin, 1999
- [DIN4046] Deutsches Institut für Normung e.V.: Wasserversorgung, Begriffe Technische Regeln des DVGW, Beuth Verlag, Berlin, 1983
- [DOEL2006] Dorgeloh, Elmar: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Membrantechnik in der Abwasserwirtschaft, Eigenverlag, Hennef, 2006
- [DWA2009] Bauhaus-Universität (Weimar) Arbeitsgruppe Weiterbildendes Studium Wasser und Umwelt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Industrieabwasserbehandlung: Rechtliche Grundlagen, Verfahrenstechnik, Abwasserbehandlung ausgewählter Industriebranchen, Produktionsintegrierter Umweltschutz, Weimar, Universitätsverlag Weimar, 2009
- [ENDO2011] ENGINEERING DOBERSEK GmbH Anlagenbau
<http://www.ed-mg.de/Prozesswasser-Abwasser.112.0.html>, verfügbar am 05.06.2011/ 12:00
- [EUFA2011] Europäischer Fachverband für Desinfektoren
<http://www.effdev.eu/Kurzseminar-Fl.ae.chendesinfektion.htm>, verfügbar am 25.07.2011/9:30
- [EUWRRL2006] Europäisches Parlament: Richtlinie 2006/7/EG über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung und zur Aufhebung der Richtlinie 76/160/EWG, Beuth Verlag, Berlin, 2006
- [FINZ2011] [http://www.finanzen.net/ausblick/SW_Umwelttechnik_StoiserWolschner], verfügbar am 05.09.2011/20:09
- [FLHA1993] Flemming, Hans-Curt, Marquardt Kurt (Herg.): Entsorgung organisch / anorganisch hoch belasteter Abwässer aus Müllentsorgungsanlagen: „Biofouling auf Membranen bei der Aufbereitung hochbelasteter Wässer, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1993

- [FRFR2006] Frechen, Franz-Bernd: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V (DWA).: Membrantechnik in der Abwasserwirtschaft, Eigenverlag, Hennef, 2006
- [GEKA2004] Gerstenberg, Karen: Vorlesungsmaterial: Möglichkeiten zur Spezialanalyse für das Element Phosphor in Wässern und wässrigen Extrakten, Eigenverlag, Freiberg, 2004
- [HEAN2008] Herber, Andre, Müller Uwe, Baldauf, Günther: Fachzeitschrift 5/2008: DVGW energie| wasser-praxis: Ultrafiltration zur Partikelentfernung aus angereichertem Grundwasser, Seite 24
- [HUBER2010] Messematerial IFAT 2010, München
<http://www.huber.de>, verfügbar am 20.07.2011/10:05
- [KIES2011] Emil Kiessling GmbH, persönliche Mitteilungen
- [LIEL2011] Dr. Dokuzovic, Lickl, Eleonore (Herg.): Kolorimetrie – Photometrie
<http://www.lickl.net/doku/photo>, verfügbar am 25.06.2011/15:00
- [LIPI2003] Lipp, Pia: Technologiezentrum Wasser Karlsruhe: Vortrag vom 13.11.03: Langzeitverhalten von Membranen: Forum Wasseraufbereitung, Mühlheim/Ruhr, 2003
- [LIPI2007] Lipp, Pia: Technologiezentrum Wasser Karlsruhe: Vortrag vom 23.10.07: Membrananlagen in Deutschland -derzeitiger Stand: DVGW-Forum Wasseraufbereitung, Mühlheim/Ruhr, 2007
- [LIRA2004] Ließfeld, Rainer, Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V.: Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) im Überblick; Eigenverlag, Bonn, 2004
- [MAKU1992] Marquardt; Kurt: Rein- und Reinstwasseraufbereitung: Verfahren zur Rein- und Reinstwasseraufbereitung, Expert Verlag, Renningen, 1992
- [MERCK2011] Merck KGaA, Darmstadt: Sicherheitsdatenblatt Stand vom 28.07.2006: Nessler's Reagenz A zur Stickstoffbestimmung
http://www.merck-chemicals.de/nesslers-reagenz-a/MDA_CHEM-109011/p_jBWb.s1LX0QAAAEWc9UfVhTI?attachments=MSDS, verfügbar am 02.09.2011/9:36

- [METH2007] Merlin, Thomas; Rautenbach, Robert: Membranverfahren: Grundlagen der Modul und Anlagenauslegung, 3.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2007
- [MEUM2011] Metzger, Ulrich-Matthias; Fritz H. Frimmel (Herg.): Schriftenreihe des Lehrstuhls für Wasserchemie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT): Band 52: Extrazelluläre polymere Substanzen aus Biofilmen- Aufklärung von Strukturen und ihr Einfluss auf die Foulingbildung in Membranbioreaktoren, Eigenverlag, Karlsruhe, 2011
- [MN2011] MACHEREY-NAGEL GmbH & Co. KG: Küvettentests: CSB/TN_b/NO₂⁻/NO₃⁻: Beipackzettel, Dürren, 2011
- [MÖMO2011] Möhler, Monika Lehr- und Versuchsanstalt Gartenbau Erfurt: 35. Bundessteinobstseminar in Ahrweiler
[http://www.obstbau.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/03FEA02404BDD419C125771B0023BA0B/\\$FILE/M%C3%B6hlerPrakt_Bew_Steuerung_09.pdf](http://www.obstbau.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/03FEA02404BDD419C125771B0023BA0B/$FILE/M%C3%B6hlerPrakt_Bew_Steuerung_09.pdf), verfügbar am 18.06.2011/11:22
- [MUNLV2003] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Abwasserreinigung mit Membrantechnik - Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich, Eigenverlag, Düsseldorf, 2003
- [OHKL2006] Ohlrogge, Klaus, Ebert Katrin: Membranen: Grundlagen, Verfahren und industrielle Anwendungen, WILEY-VCH Verlag, Weinheim, 2006
- [PIJO2006] Pinnekamp, Johannes, Friedrich, H: Membrantechnik für die Abwasserreinigung Band 1, Schriftreihe Siedlungswasser- und Siedlungsabfallwirtschaft Nordrhein-Westfalen, Aachen, FiW Verlag, 2006
- [PIJO2007] Pinnekamp Johannes, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen; Abschlussbericht: Untersuchungen zur Einsetzbarkeit des Membranbelebungsverfahrens auf der Kläranlage des Abwasserverbandes Hommerich, 2007

- [PIJO2008] Pinnekamp Johannes, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen; Kurzbericht zum Forschungsvorhaben: Begleitprojekt zu FuE-Vorhaben im Bereich der Membrantechnik in Nordrhein-Westfalen (FEMem), Eigenverlag, Aachen, 2008
- [RUWE2006] Dipl.-Ing. Rupprich, Microdyn-Nadir GmbH, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): Membrantechnik in der Abwasserwirtschaft, Eigenverlag, Wiesbaden, 2006
- [SAFL2009] Saravia, Florencia,,: Disseration: Entfernung von organischen Spurenstoffen und Untersuchung von Foulingprozessen in getauchten Membranen und Hybridverfahren, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Wasserchemie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut der Universität Karlsruhe (TH) Band 49, Eigenverlag, Karlsruhe, 2009
- [SCCO2007] Corinna Schrader: Verfahrenstechnische Möglichkeiten zur Entfernung von organischen Spurenstoffen aus kommunalen Abwasser, Oldenbourg Industrieverlag GmbH, München, 2007
- [SCEV2011] Schmidt, Eva, phoenix: Wasser – Mangel im Überfluss: Sendung vom 09.08.2011/00:30
- [SCMA2009] Schur, Marina: Der Wasserversorgungsvertrag, Berlin; Duncker & Humblot Verlag GmbH, 2009
- [SCWI2009] Schier, Wernfried, Frechen, Franz-Bernd, Universität Kassel: DWA-Wasserwirtschafts-Kurz N/2 kommunale Abwasserbehandlung vom 7.-9.10.2009: Leistung und Kosten des Membranbelebungsverfahrens, Kassel, 2009
- [STSC2011] Stadt Schwalbach am Taunus: Information zum Thema Brauchwasseranlagen (Regenwassernutzung),
<http://www.wasserversorgung-main-taunus.de/pdf/Brauchwasseranlagen.pdf>, verfügbar am 10.06.2011/8:30
- [STDD2011] Stadtentwässerung Dresden GmbH, interne Unterlagen, Broschüre
<http://www.stadtentwaesserung-dresden.de>, verfügbar am 20.06.2011/11:10

- [THJÜ2004] Jüdt, Thomas, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg: Diplomarbeit: Verfahrenstechnische Untersuchung einer Anlage zur dezentralen Abwasseraufbereitung, Eigenverlag, Hamburg-Bergedorf, 2004
- [TLL2004] Dr. habil. Albrecht, Martin, Dr. Pfleger Ingrid, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 3. Auflage, Eigenverlag, Jena, 2004
- [TrinkwV2001] Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21.05.2001, <http://www.dvgw.de/fileadmin/dvgw/wasser/recht/trinkwvo.pdf>, verfügbar am 15.06.2011/10:00
- [TUK2010] Schmitt, Hansen, Valerius, Technische Universität Kaiserslautern: Handlungsempfehlungen für eine moderne Abwasserwirtschaft: Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Eigenverlag, Schlussbericht, 2010
- [TUM2001] Wilderer; Peter. A.; Paris; Stefania; Technische Universität München; Integrierte Ver- und Entsorgungssysteme für urbane Gebiete; Abschlussbericht, Eigenverlag, Garching; 2001
- [UfBW2009] Universität für Bodenkultur Wien, Stand 01/2009 http://www.wau.boku.ac.at/fileadmin/_/H81/H811/Skripten/811352/811352_09_SO.pdf, verfügbar am 21.06.2011/13:00
- [VDMA2010] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer e.V (VDMA): VDMA-Einheitsblatt Entwurf 24651: Verfahren zur Wasserwiederverwendung, Auswahlkriterien, Einsatzbereiche, Beuth Verlag, 2010
- [VOKL2006] Dr.-Ing. Voßenkaul; Klaus, DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.: Membrantechnik in der Abwasserwirtschaft, Eigenverlag, Aachen, 2006
- [VOOL2011] Universität Oldenburg: Vorlesungsmaterial http://www.gmehling.chemie.uni-oldenburg.de/download/Vorlesung_SS08/Grundoperationen/Grundoperationen4.pdf; verfügbar am 29.08.2011/9:05

- [WAWI2010] <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/r/raumbelastung.htm>;
verfügbar am 20.12.2010/13:00
- [WAWI2011] <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/c/csb.htm>, verfügbar am
03.07.2011/10:13
- [WEST2007] Weiss, Stefan, Technische Universität Berlin: Disseration: Potential von
Membranbioreaktoren zur Entfernung von polaren persistenten
Spurenstoffen aus Kommunalabwasser; Papierflieger Verlag, Berlin,
2007
- [WEUM2011] Wehrle Umwelt GmbH
<http://www.wehrle-umwelt.com>, verfügbar am 25.07.2011/10:45
- [WIHA2000] Willmitzer, Hartmut
<http://www.waterquality.de/hydrobio.hw/1ANF.HTM#11>, verfügbar am
20.06.2011/14:35
- [ZIRA2011] Zimmer, Ralf; Stein, Simone; Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH:
Poster: Leistungsfähigkeit des Membranbelebungsverfahrens am
Beispiel der Kläranlage Markranstädt
http://www.ufz.de/data/Poster_054530.pdf, verfügbar am
12.07.2011/8:45

ANLAGEN

TEIL 1, GRUNDLAGEN.....	A-I
TEIL 2, WEITERGEHENDE ABWASSERBEHANDLUNG.....	A-II
TEIL 3, VERIFIZIERUNG HALBTECHNISCHER VERSUCHE.....	A-III
TEIL 4, WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG.....	A-IV

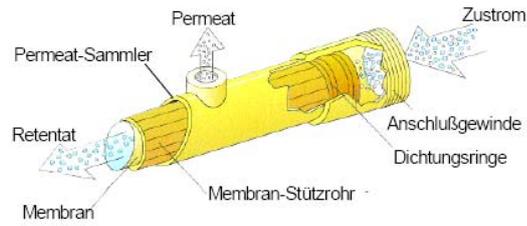


Abbildung 36: Prinzip Rohrmodul/Rohrmodultypen [MUNLV2003]

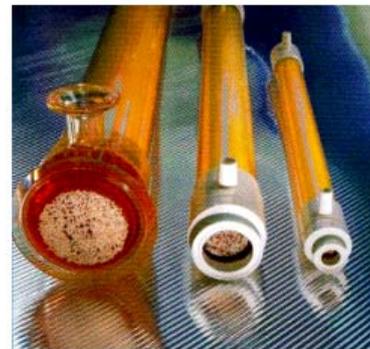
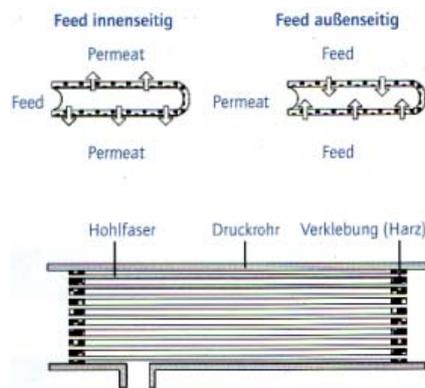


Abbildung 37: Prinzip Kapillar-/Hohlfaserm modul und -typen [MUNLV2003]

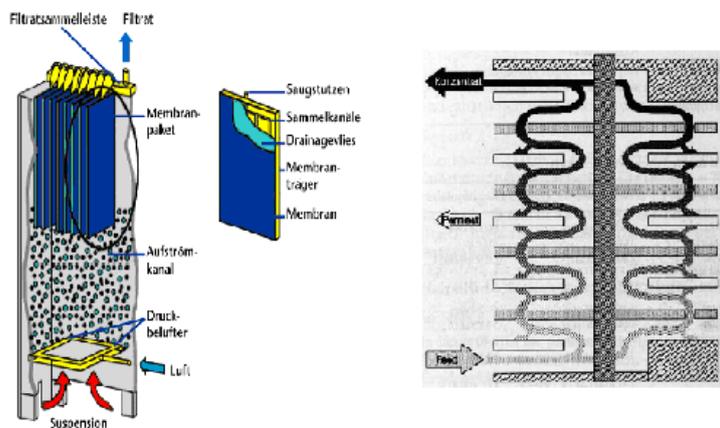


Abbildung 38: Prinzip/Querschnitt/Typ Plattenmodul [MUNLV2003] [Foto: Kubota-Plattenmodul]

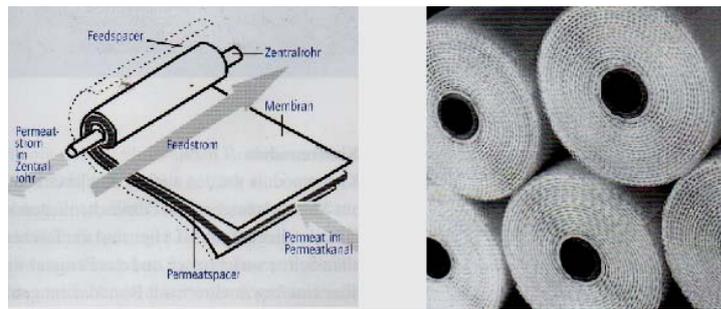


Abbildung 39: Prinzip / Wickelmodul [MUNLV2003] [Foto: NADIR FILTRATION GmbH]

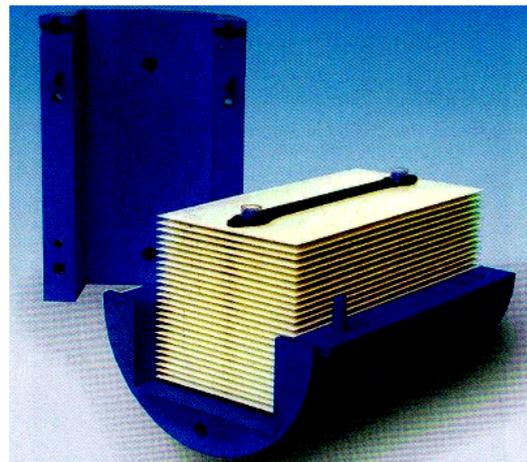
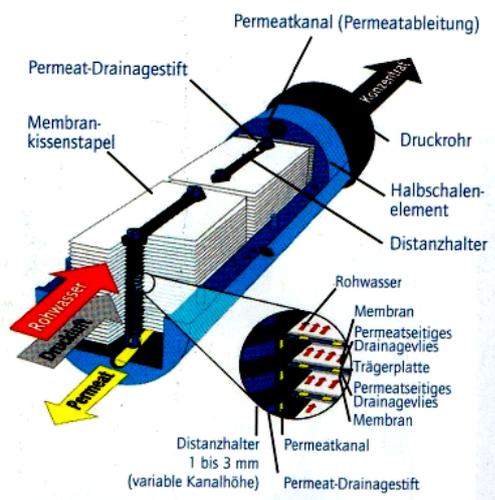


Abbildung 40: Prinzip Kissenmodul [MUNLV2003] [Foto: ROCHEM UF SYSTEME GmbH]

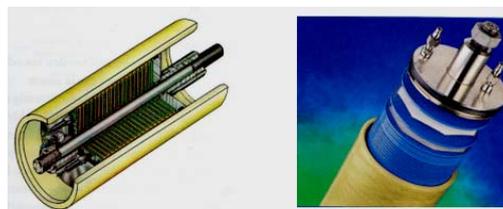


Abbildung 41: Scheibenrohrmodul der Fa. PALL [MUNLV2003]

Tabelle 32: Begriffe in der Abwassertechnik

Begriff	Definition
Abwasser	„Abwasser ist das durch Gebrauch verunreinigte Wasser, welches unbehandelt zu keinem Verwendungszweck mehr genutzt werden kann.“ [VDMA2010]
Biofilm	„Gefahr der mikrobiellen induzierten Korrosion, Quelle für Keime und damit für mögliche Endotoxinbildung, Quelle für hygienisch und/oder gesundheitlich bedenkliche Keime. Indikationen auf einen Biofilm sind: Zunehmende Anzahl koloniebildender Einheiten und/oder Pilze (z.B. Bestimmung mittels Eintauchnährböden; schleimiger Belag auf der Oberfläche, Fäulnisgeruch).“ [VDMA2010]
Brauch- /Betriebswasser	„Je nach technischem Verwendungszweck unterscheiden aufbereitetes Rohwasser; kein Trinkwasser.“ [VDMA2010]
Braunwasser	Schwarzwasser ohne Gelbwasser [TUM; 2001]
Desinfektion	Reduktion von 10^5 KbE [EUFA2011]
Eigenwasser	„Wasser, das von dem betreffenden Unternehmen selbst gefördert wird und das in der Regel keine Trinkwasserqualität aufweist.“ [VDMA2010]
Frischwasser	Wasser, das weniger als 1000 mg/l gelöste Substanzen enthält
Gelbwasser	Urin bspw. aus Urinsepararionstoiletten mit oder ohne Spülwasser [TUM; 2001]
Grauwasser (DIN EN 12056-1)	„Als Grauwasser wird ein fäkalienfreies, gering verschmutztes Abwasser bezeichnet. Dieses Schmutzwasser stammt aus Bade-, Duschwannen, Handwaschbecken, Waschmaschinen und hoch belasteten Küchen.“ [VDMA2010]
Grenzwert	Grenzwerte sind in Gesetzen und Verordnungen politisch festgelegte Höchstkonzentrationen. [UBA2009]
Grundwasser	„Durch Versickerung in den Boden gelangtes, sowie aus aufsteigenden Gesteinsschmelzen frei gewordenes, Hohlräume der lockeren Erde und des anstehenden Gesteins füllendes, Wasser.“ [VDMA2010]
Häusliches Schmutzwasser (DIN EN 1085)	„Im Prinzip ist häusliches Abwasser Grau- und Schmutzwasser, denn aus allen in Küchen-, Waschmaschinen-, Wasch- Toilettenräumen und aus gleichartigen Benutzungsräumen anfallende Abwässer sind nach DIN EN 1085 häusliches Schutzwasser.“ [VDMA2010]
Kreislaufwasser	„Wasser, welches nach Nutzung gesammelt und je nach Belastung und Schmutzfracht so aufbereitet wird, dass es einer erneuten oder weiteren Nutzung zugeführt werden kann. Durch den Einsatz von Kreislaufwasser verringern sich der Rohwasserbedarf und die Abwassermenge.“ [VDMA2010]

Kühlwasser	„Brauchwasser, welches ausschließlich zu Kühlzwecken eingesetzt wird.“ [VDMA2010]
Leitwerte	Leitwerte (Eingreif, Besorgniswerte) warnen frühzeitig vor Schädigungsmöglichkeiten an Gesundheit, Intaktheit und Stabilität von Systemen. [UBA2009]
Oberflächenwasser	„Im Gegensatz zum Grundwasser, Wasser aus natürlichen oder künstlichen oberirdischen Gewässern, z.B. Wasser aus Flüssen, Seen oder Talsperren.“ [VDMA2010]
Pathogene Keime	„Gesundheitliche Gefährdungen, u.a. Legionellen, coliforme Keime, Pseudomonaden. Die Bestimmung derartiger Keime ist in Abhängigkeit von der Art der Wiederverwendung und bei Verdacht durch geeignete Labors vornehmen zu lassen.“ [VDMA2010]
Prozess-/Produktionswasser	„Brauchwasser, welches zu Produktionszwecken eingesetzt wird, z.B. Waschwasser, Wasser zu Mischzwecken o.ä.“ [VDMA2010]
Regenwasser	„Niederschlagswasser, das aus Dach- und Straßenabläufen anfällt.“ [VDMA2010]
Rohwasser	„Wasser vor der Aufbereitung.“ [VDMA2010]
Sanitärwasser	„Wasser, das im Sanitärbereich eingesetzt werden kann, das jedoch keine Trinkwasserqualität aufweisen muss.“ [VDMA2010]
Schwarzwasser (ISO 6107-7)	Toilettenabwasser aus privaten Haushalten, welches ausschließlich nur mit Urin und Fäkalien belastet ist, wird als Schwarzwasser bezeichnet. Demzufolge ist Schwarzwasser das häusliche Abwasser ohne Grauanteil [TUM; 2001]
Stadtwasser	„In der Regel von einem externen Versorgungsunternehmen zugeliefertes Wasser mit Trinkwasserqualität.“ [VDMA2010]
Trinkwasser	„Das für den menschlichen Genuss und Gebrauch geeignete Wasser.“ [VDMA2010]
Trübung	„Gefahr der Ablagerung, Gefahr der Korrosion.“ [VDMA2010]
Verweilzeit	„Wasservolumen in m ³ durch Ablauf Abwasser in m ³ /h.“ [VDMA2010]

„**Technische Regeln zu Bemessung, Bau und Betrieb abwassertechnischer Anlagen** finden sich in europäischen EN-Normen, DIN-Normen sowie in den Arbeits- und Merkblättern des DWA-Regelwerks. Mit ihrer Veröffentlichung werden sie zu allgemein anerkannten Regeln der Technik. Relevante Normen und Regeln für die Abwasserentsorgung in ländlichen Gebieten sind z. B.:

- DIN EN 476: Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserkanäle und -leitungen für Schwerkraftentwässerungssysteme
- DIN EN 752: Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden
- DIN EN 1091: Unterdruckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden
- DIN EN 1671: Druckentwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden
- DIN EN 12255: Kläranlagen
- DIN EN 12566: Kleinkläranlagen bis zu 50 EW
- ATV-A 128, April 1992: Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen
- ATV-A 200, Mai 1997: Grundsätze für die Abwasserentsorgung in ländlich strukturierten Gebieten
- DWA-A 100, Dezember 2006: Leitlinien der integralen Siedlungsentwässerung
- DWA-A 201, August 2005: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen
- DWA-A 262, März 2006: Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen mit gepflanzten Bodenfiltern zur biologischen Reinigung kommunalen Abwassers
- ATV-DVWK-A 131, Mai 2000: Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen
- DWA-M 153, August 2007: Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser
- BWK M3, April 2001: Ableitung immissionsorientierter Anforderungen an Misch- und Niederschlagswassereinleitungen unter Berücksichtigung örtlicher Verhältnisse
- etc.“ [TUK2010]

Tabelle 33: Toleranzbereiche für chemische und sonstige Parameter im Bewässerungswasser [TLL2004]

Inhaltsstoff	Maßeinheit	Toleranzbereiche
<u>Schwermetalle und Spurenelemente:</u>		
Blei	µg/l	≤ 100
Cadmium	µg/l	≤ 4 ¹⁾
Chrom	µg/l	≤ 100
Eisen	µg/l	≤ 1 500
Kupfer	µg/l	≤ 100
Mangan	µg/l	≤ 1 500
Nickel	µg/l	≤ 40
Quecksilber	µg/l	≤ 0,5
Zink	µg/l	≤ 300
<u>Pflanzennährstoffe:</u>		
Kalium	mg/l	≤ 200 ²⁾
Natrium	mg/l	≤ 100 ³⁾
<u>Salze:</u>		
Chlorid	mg/l	≤ 250 ⁴⁾ / 500
Nitrat	mg/l	≤ 300 ²⁾
Sulfat	mg/l	≤ 1200
<u>Weitere Kennwerte:</u>		
pH-Wert		5,0 bis 9,5
Wasserhärte	° dH	30 ⁵⁾ / 60
Leitfähigkeit	µS/cm	2000 ⁴⁾ / 3000

¹⁾ bei 150 mm Zusatzwasser pro Jahr in Folge

²⁾ gegebenenfalls in der Nährstoffbilanz berücksichtigen

³⁾ bei ständiger Beregnung sollte der Boden auf eventuelle Na-Anreicherung untersucht werden
als Orientierung für Fruchtarten mit geringer bis mittlerer Salzverträglichkeit

⁵⁾ Wasserhärte > 30 bis 50: sehr hart

Wasserhärte > 50: außergewöhnlich hart

Hygienisch-mikrobiologische Klassifizierung und Anwendung von Bewässerungswasser

(DIN 19650, 1999)

Eignungs- klasse	Anwendung	Fäkalstrep- tokokken Koloniezahl/ 100 ml (nach TrinkwV bzw. Bade- gewässer- richtlinie ¹⁾)	E. coli Koloniezahl/ 100 ml (nach TrinkwV [bzw. Bade- gewässer- richtlinie ¹⁾)	Salmonellen/ 1000 ml (nach DIN 38414- 13)	potentielle infektiöse Stadien von Mensch- und Haustier- Parasiten ²⁾ in 1000 ml
1 (Trink- wasser)	alle Gewächshaus- und Freilandkulturen ohne Einschränkung	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
2 ³⁾	Freiland- und Gewächshauskulturen für den Rohverzehr, Schulsportplätze, öffentliche Parkanlagen	≤ 100 ⁴⁾	≤ 200 ⁴⁾	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
3 ³⁾	nicht zum Verzehr bestimmte Gewächshauskulturen Freilandkulturen für den Rohverzehr bis Fruchtansatz bzw. Gemüse bis 2 Wochen vor der Ernte Obst und Gemüse zur Konservierung Grünland bzw. Grünfütterpflanzen bis 2 Wochen vor dem Schnitt oder der Beweidung alle anderen Freilandkulturen ohne Einschränkung sonstige Sportplätze ⁵⁾	≤ 400	≤ 2000	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar
4 ^{3), 5)}	Wein- und Obstkulturen zum Frostschutz Forstkulturen, Polterplätze und Feuchtbiotope Zuckerrüben, Stärkekartoffeln, Ölfrüchte und Nichtnahrungspflanzen zur industriellen Verarbeitung und Saatgut bis 2 Wochen vor der Ernte Getreide bis zur Milchreife (nicht zum Rohverzehr) Futter zur Konservierung bis 2 Wochen vor der Ernte	Abwasser, das mindestens eine biologische Reinigungsstufe durchlaufen hat			für Darm-Nematoden keine Standardempfehlung möglich für Stadien von Taenia: nicht nachweisbar
<p>¹⁾ Mikrobiologische Untersuchungen nach den für Badegewässer üblichen Verfahren</p> <p>²⁾ Soweit dies für die Sicherung der Gesundheit von Mensch und Tier erforderlich ist, kann eine Untersuchung des vorgesehenen Bewässerungswassers auf Darm-Nematoden (Ascaris- und Trichuris-Arten sowie Hakenwürmer) und/oder Bandwurm-Lebensstadien (insbesondere Taenia) nach WHO-Empfehlung angeordnet werden.</p> <p>³⁾ Wenn durch das Bewässerungsverfahren eine Benetzung der zum Verzehr geeigneten Teile der Ernteprodukte ausgeschlossen ist, entfällt eine Einschränkung nach hygienisch-mikrobiologischen Eignungsklassen.</p> <p>⁴⁾ Richtwert, der analog der TrinkwV § 2 Abs.3 so weit unterschritten werden sollte, „wie dies nach dem Stand der Technik mit vertretbarem Aufwand unter Berücksichtigung der Umstände des Einzelfalles möglich ist“.</p> <p>⁵⁾ Bei der Beregnung muss durch Schutzmaßnahmen sichergestellt werden, dass Personal und Öffentlichkeit keinen Schaden nehmen.</p>					

Tabelle 34: Membranbelebungsanlagen weltweit [PIJO2008]

Region	Plattenmodul	Hohlfasermodule	Summe
Afrika	12	3	15
Nordamerika	98	198	296
Asien	241	45	286
Australien	18	5	23
Europa	113	56	169
Südamerika	3	5	8
Gesamt	485	312	797

Tabelle 35: Behandelte Abwassermengen in Membranbelebungsanlagen weltweit [PIJO2008]

Region	Behandelte Abwassermenge nach Membrantyp [m ³ /d]		Summe in [m ³ /d]	Beh. Abwassermenge [m ³ /d je Anlage]
	Plattenmodul	Hohlfasermodule		
Afrika	1.082	28.239	29.321	1.955
Nordamerika	123.452	368.980	492.432	1.664
Asien	159.509	108.132	267.641	936
Australien	13.919	30.931	44.850	1.950
Europa	164.357	259.175	423.532	2.506
Südamerika	703	3.370	4.073	509
Gesamt	463.022	798.827	1.261.849	1.583

Anmerkung zur Berechnung des Perzentil-Wertes der EU-RL 2006/7/EG

- (^a) „Letzter Bewertungszeitraum“ bezeichnet die letzten vier Badesaisons oder gegebenenfalls den in Artikel 4 Absatz 2 oder in Artikel 4 Absatz 4 angegebenen Zeitraum.
- (^b) Auf der Grundlage einer Bestimmung der Perzentil-Werte der \log_{10} -Normalwahrscheinlichkeitsdichtefunktion mikrobiologischer Daten des jeweiligen Badegewässers wird der Perzentil-Wert wie folgt abgeleitet:
- i) Ausgangswert ist der \log_{10} -Wert aller Bakterienwerte in der zu bewertenden Datensequenz. (Wird ein Nullwert ermittelt, so wird stattdessen der \log_{10} -Wert der unteren Nachweisgrenze der verwendeten Analyseverfahren zugrunde gelegt.)
 - ii) Es wird das arithmetische Mittel der \log_{10} -Werte (μ) berechnet.
 - iii) Es wird die Standardabweichung der \log_{10} -Werte (σ) berechnet.
- Der obere 90-Perzentil-Wert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Daten wird aus folgender Gleichung abgeleitet: oberer 90-Perzentil-Wert = Antilog ($\mu + 1,282 \sigma$).
- Der obere 95-Perzentil-Wert der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Daten wird aus folgender Gleichung abgeleitet: oberer 95-Perzentil-Wert = Antilog ($\mu + 1,65 \sigma$).
- (^c) „Schlechter“ bedeutet höhere Konzentrationen, ausgedrückt in cfu/100 ml.
- (^d) „Besser“ bedeutet niedrigere Konzentrationen, ausgedrückt in cfu/100 ml.

Tabelle 36: Industrielle Einsatzgebiete für MBR-Anlagen [PIJO2008]

Betreiber	Ort	Durchsatz [m³/h]	Eingesetzte Membranoberfläche [m²]	Jahr der Inbetriebnahme	Branche
Krostitzer Malzwerke GmbH	Krostitz (Deutschland)	4,2	240	1998	Brauerei
Degussa GmbH	Trostberg (Deutschland)	10	1.440	2001	Chemie-Industrieabwasser
Eigenbetrieb Abfallwirtschaft des Landkreises	Flechtdorf (Deutschland)	40	1.600	2004	Deponiesickerwasser
Kreiskrankenhaus Waldbröl	Waldbröl (Deutschland)	10	1.600	2007	Krankenhausabwasser
Sandoz Pharmaceuticals	Kundl/Tirol (Österreich)	25	1.440	1999/2002	Pharmazeutische Abwässer
SARIA Bioindustries	Bayet (Frankreich)	40-50	1.800	2000	Schlachtabfälle
Sandoz Pharmaceuticals GmbH	Barcelona (Spanien)	20	1.440	2003	Pharmazeutische Abwässer
Sobelgra	Antwerpen (Belgien)	80-100	8.000	2004	Industrieabwasser
Galvanik Collini	Hohenems (Österreich)	40	2.560	2006	Industrieabwasser

Tabelle 37: Membranbelebungsanlagen in Deutschland [PIJO2008]

Ort	Mittlere Kapazität [m³/d]	Modultyp	Jahr der Inbetriebnahme
Rödingen	3.168	Hohlfaser	1999
Erlangen	190	Platte	1999
Markranstädt	4.320	Hohlfaser	2000
Linslerhof	20	Hohlfaser	2000
Knautnaundorf	442	Platte	2002
Monheim	1.820	Hohlfaser	2003
Simmerath	624	Hohlfaser	2003
Nordkanal	16.656	Hohlfaser	2004
Waldmössingen	2.160	Hohlfaser	2004
Merklingen	240	Platte	2004
Richtheim	96	Platte	2004
Seelscheid	8.544	Platte	2004
Eitorf	6.700	Platte	2005
Woffelsbach	7.100	Platte	2005
Xanten	400	Platte	2005
Konzen	14.100	Platte	2006
Piene	138	Platte	2006
Glessen	6.980	Hohlfaser	2007
Bronn	720	Hohlfaser	2007

Tabelle 39: Weitere Marktvertreter MBR

Firma (Niederlassung)	Einsatzbereich	Referenzen- anzahl	Verfahren Biologie	Membranmodul	Membran- typen	Betriebs- weise	Vorteile	Quelle
			Kombination MBR					
Wehrle Umwelt GmbH (Baden-Württemberg)	kommunale AW Industrieabwässer Deponiesickerwasser Abwässer aus Sondermüllanlagen Grundwassersämerung Schiffsabwässer Abwässer aus Gastronomie, Hotels, Bergütten	125	SBR	Rohrmembran	MF / UF / NF	Cross-flow	- " niedrige Investitions- und Betriebskosten sowie geringe Reststoffentsorgungskosten - prozessstabiles Verfahren - geringer Flächenbedarf für die Membraninstallation "	http://www.wehrle-umwelt.com Firmenbrochure, 2010
Beirhof Filtration und Anlagentechnik GmbH und Co. KG (Baden-Württemberg)	Deponiesickerwasser kommunales Abwasser industrielles Abwasser	180	SBR aerob anaerob	Rohrmembran	UF	Cross-flow	- "keine Verstopfung der Rohrmembranen - hohe Permeatleistungen bis 180 l/m ² h - geringe Membranesatzkosten - geringer Platzbedarf - einfache Reinigung dank externer Technologie - einfache Installation und - optimale Betriebsüberwachung - einfache Instandhaltung und	http://www.beirhof.com Firmenbrochure, 2010
HUBER TECHNOLOGIE (Bayern)	kommunales AW, häusliches AW, textilindustrie, Fleischindustrie	30	SBR	Plattenmodul	UF (150 kDa)	Dead-End	- keine Rückspülungen - seltende chemische Reinigungen - geringer Energieaufwand	http://www.huber.de/de.html Firmenbrochure, 2010
ENVIRO FALK AG (Schweiz, Kanton St. Gallen)	Industrieabwässer, Deponiesickerwasser, Abwasser von Schrottplätzen und Spänelager, Abwasser aus Müllverbrennung,	30 Sickerwasser- anlagen	aerob anaerob	Rohr-/Platten- /Wickelmodul	MF/UF/NF/ RO	Dead-End	-	http://www.envirochemie.com/ Firmenbrochure 2010

Firma (Niederlassung)	Einsatzbereich	Referenzen- anzahl	Verfahren Biologie	Membranmodul	Membran- typen	Betriebs- weise	Vorteile	Quelle
			Kombination MBR					
VA TECH WABAG GmbH (Österreich, Wien)	Abwasserwiederverwendung kommunal (Bewässerungswasser) Abwasserwiederverwendung Industriebereich Trinkwasser aus Abwasser	20	SBR	Hohlfasermodul	MF/UF/ NF/RO	Dead-End	<ul style="list-style-type: none"> - gesicherte Direktimleitung in sensible Vorfluter - erhöhte Betriebssicherheit auch bei hydraulischen Leistungsänderungen, - schnelle und effektive Nachrüstung, - gesicherte Einhaltung, verschärfter gesetzlicher Auflagen, " - Abwasserwiederverwendung - Abwasserentsorgung gemäß den Anforderungen an den Stand der Technik, - modularer Aufbau, - störungsfreier Betrieb durch Redundanzen 	http://www.webag.com/Main/Vabag/VabagOerman/home.asp http://www.webag.com/Main/Vabag/VabagOerman/home.asp Firmenbrochure, 2010
CFM Systems AG (Saarland)	Bewässerung Kühl- und Löschwasser Springbrunnen, Zierteiche und Wasserspiele kommunale Abwasserreinigung	-	SBR	Plattenmodul	-	-	<ul style="list-style-type: none"> - " Im Unterschied zu anderen getauchten Membransystemen kann die keramische Flachmembran kontinuierlich regeneriert werden - stabiler Langzeitbetrieb - hochwertige Regenerierung der Membran" 	http://www.cfm-systems.com Firmenbrochure, 2010
KOCH MEMBRANE SYSTEMS (Nordrhein-Westfalen)	Bewässerungswasser, Abwasserwiederverwendung industrielle Abwasserreinigung kommunale Abwasserreinigung	-	SBR	Rohrmodul, Hohlfasermodul	MF/UF/ NF/RO	Dead-End	<ul style="list-style-type: none"> - "hohe Reinigungsqualität und geringer Reinigungsaufwand, - geringer Energiebedarf, - kostengünstige Anlagekomponenten, - einfache Erfüchtigung herkömmlicher Kläranlagen" 	http://www.kochmembrane.com/de.html Firmenbrochure, 2010

Firma (Niederlassung)	Einsatzbereich	Referenzen- anzahl	Verfahren Biologie	Membranmodul	Membran- typen	Betriebs- weise	Vorteile	Quelle
			Kombination MBR					
PALL Water Prozessing GmbH	industrielle und kommunale Abwasseraufbereitung, Abwasserwiederverwendung, Bewässerungswasser, Grundwasseranreicherung	-	SBR aerob anaerob	Hohlfasermodule	MF/UF	Dead-End	- einzigartige Modulkonstruktion, - kein Verstopfen der Hohlfasern - hohe Betriebssicherheit, - "unabhängig vom Betrieb der Kläranlage - minimaler Überwachungsaufwand - Stabiler Anlagenbetrieb - Modular erweiterbares System"	http://www.pall.com/water.asp
Rochem UF SYSTEME GmbH (Hamburg)	kommunale Abwasserbehandlung, industrielle Abwasserbehandlung	-	aerob SBR	Kissenmodul, Scheiben-Rohrmodul,	MF/UF/ NF/RO	Dead-End	-	http://www.rochem.de/
Martin Systems AG (Thüringen)	kommunale Abwasseraufbereitung Kleinkläranlagen, Schiffskläranlagen	1.000	SBR	Plattenmodul	UF	Dead-End	- Robustheit - zuverlässiger Betrieb - als Vorbehandlung für Umkehrosmose	http://martin-systems.de
Kubota Membrane Europe Ltd. (London)	kommunale Abwasserbehandlung	-	SBR	Plattenmodul	MF	Dead End	- einfache Struktur - einfache Reinigung - einfache Wartung - einfaches Auswechseln der Plattenmembran	Firmenbroschüre, 2010 http://www.kubota-mbr.com
MICRODYN-NADIR GmbH (Hessen)	Pilotversuche (chem. Industrie, kommunale Abwasserbehandlung)	-	SBR	Plattenmodul	MF/UF	Dead-End	- "Umweltfreundliche Betriebsweise - unempfindlich gegenüber Verzöpfung/Verblockung - "auch rückspülbar mit Chemikalien - hohe Packungsdichte - geringer Energiebedarf"	Firmenbroschüre, 2010 http://www.microdyn-nadir.de

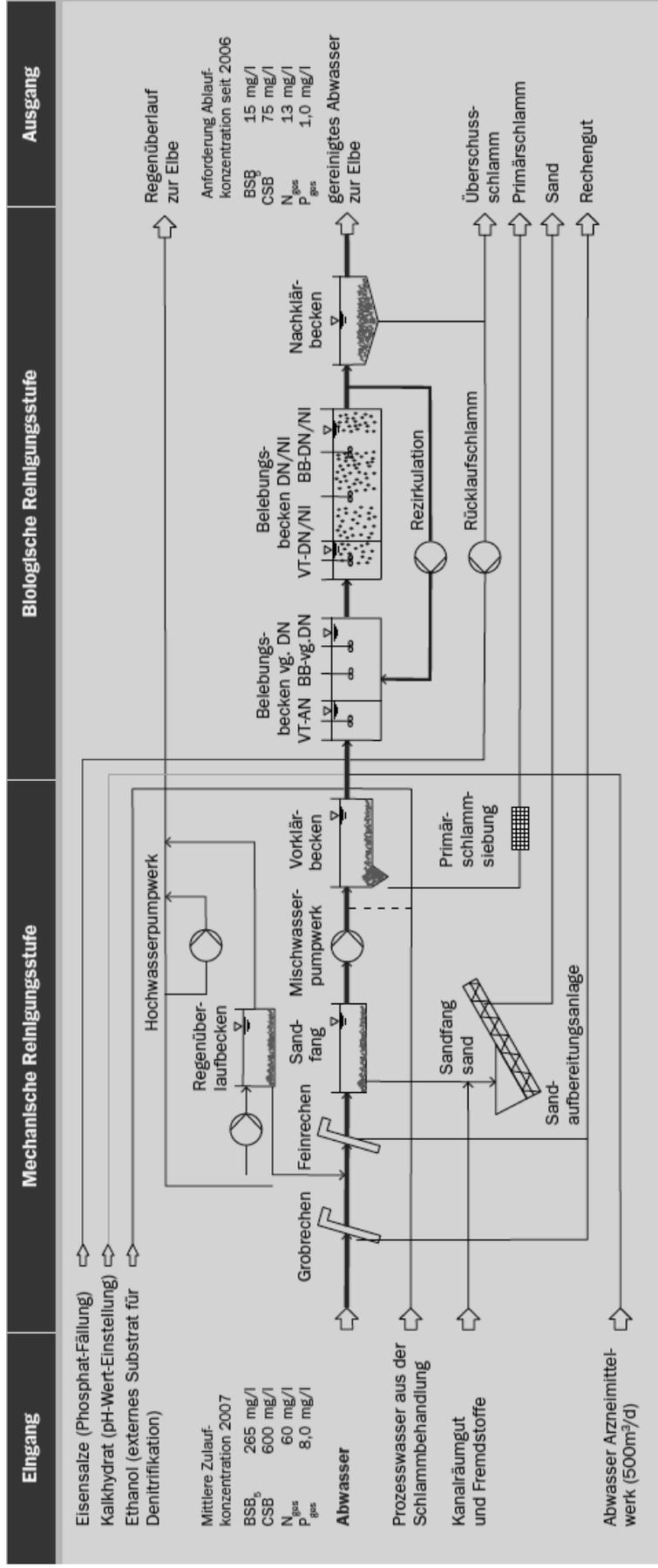


Abbildung 42: Fließbild Kläranlage Dresden-Kaditz

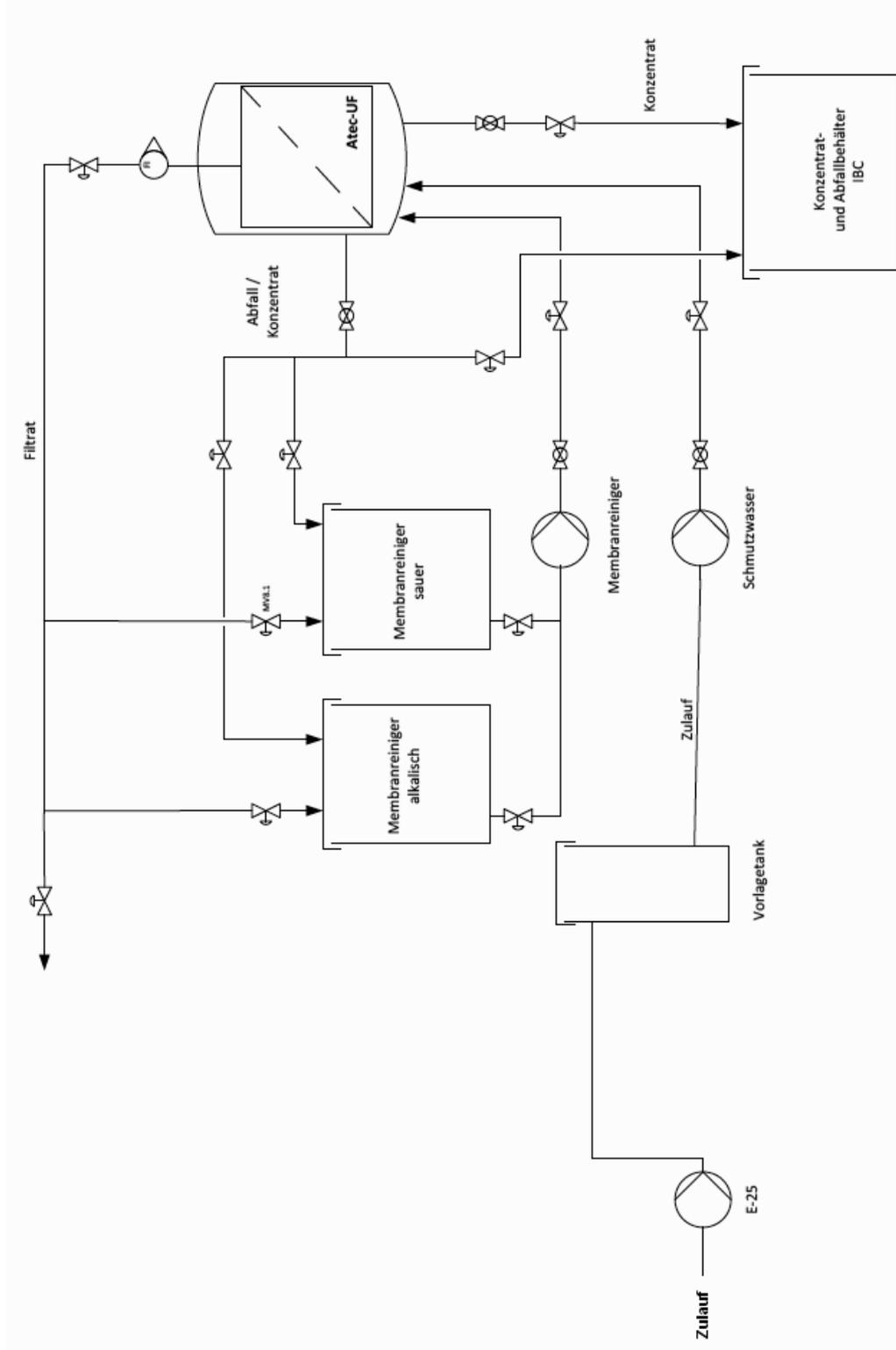


Abbildung 43: Fließbild (Tube-)Filter ATEC [ATEC2011]

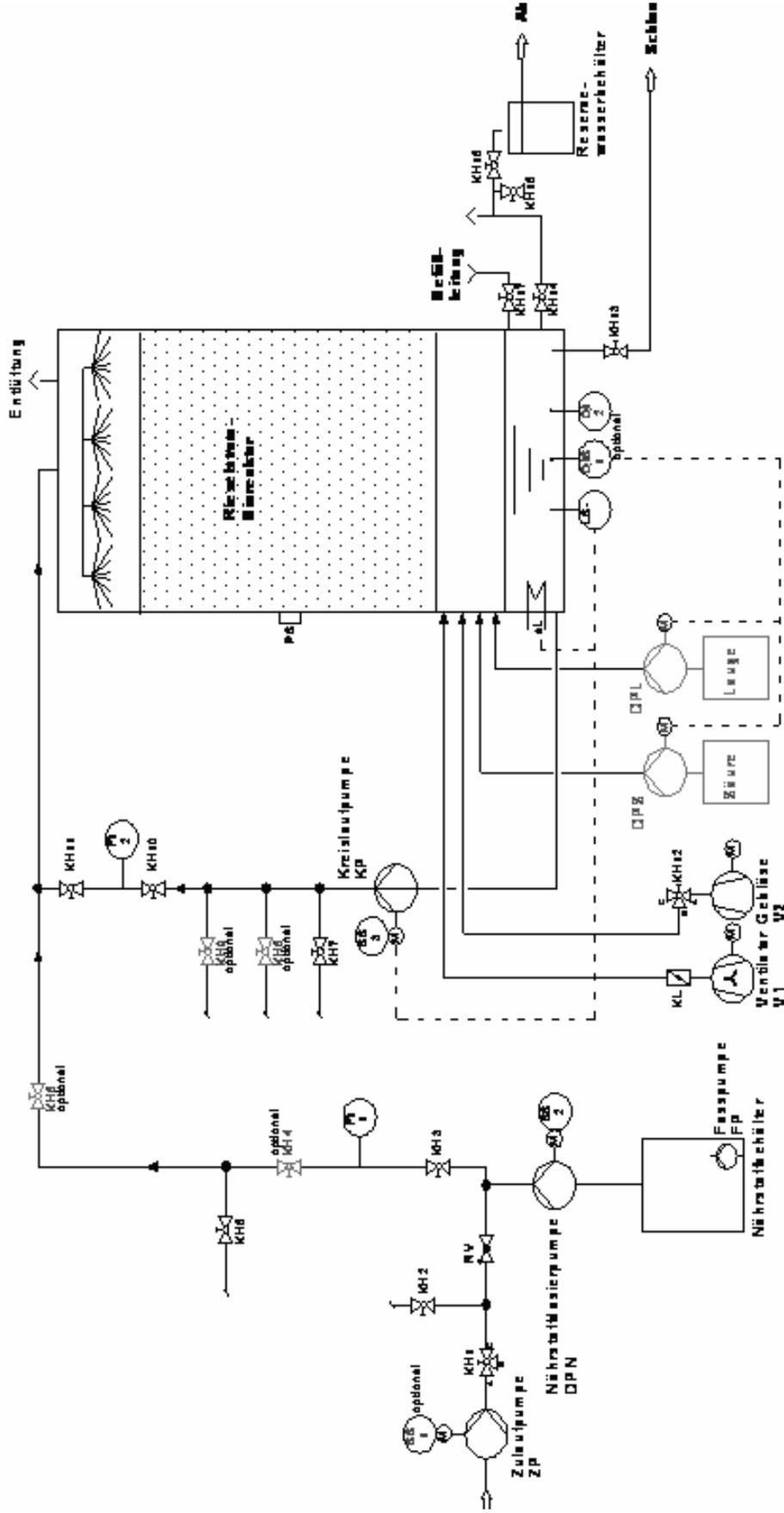


Abbildung 44: Fließbild Rieselstrom-Bioreaktor DAS [DAS2011]

ANALYSEN MRR KIESSLING/ 27.06. – 01. 07. 2011

Bezeichnungen der Proben in BLAU

A. Untersuchungen zur Reduzierung der mikrobiologischen Belastung

	Gesamt - Keimzahl	Coliforme Keime	Escherichia coli	Enterokokken
<u>I. Ablauf RR schwach belastet</u>				
Zulauf RR	X	-	-	- I - ZRR
Ablauf RR	X	-	-	- I - ARR
Zulauf Membran	X	-	-	- I - MW
Membran 0,2 µ	X	-	-	- I - M2
Membran 150T D	X	-	-	- I - M3
Membran 30T D	X	-	-	- II - ZRR
<u>II. Ablauf RR mittelstark belastet</u>				
Zulauf RR	X	X	-	- II - ARR
Ablauf RR	X	X	-	- II - MW
Zulauf Membran	X	X	-	- II - M2
Membran 0,2 µ	X	-	-	- II - M3
Membran 150T D	X	-	-	- III - ZRR
Membran 30T D	X	-	-	- III - ARR
<u>III. Ablauf RR stark belastet</u>				
Zulauf RR	X	X	X	X III - MW
Ablauf RR	X	X	X	X III - M2
Zulauf Membran	X	X	X	X III - M3
Membran 0,2 µ	X	X	X	-
Membran 150T D	X	X	X	-
Membran 30T D	X	X	-	-

B. Untersuchungen zur Reduzierung biologisch schwer abbaubarer Spurenstoffe

	Silikonöl	Andere
<u>I. Ablauf RR schwach belastet</u>		
Zulauf RR	X	I - ZRR
Ablauf RR	X	I - ARR
Zulauf Membran	X	I - MW
Membran 0,2 µ	X	I - M2
Membran 150T D	-	I - M3
Membran 30T D	-	-
<u>II. Ablauf RR mittelstark belastet</u>		
Zulauf RR	X	II - ZRR
Ablauf RR	X	II - ARR
Zulauf Membran	X	II - MW
Membran 0,2 µ	X	II - M2
Membran 150T D	X	II - M3
Membran 30T D	-	-
<u>III. Ablauf RR stark belastet</u>		
Zulauf RR	X	III - ZRR
Ablauf RR	X	III - ARR
Zulauf Membran	X	III - MW
Membran 0,2 µ	X	III - M2
Membran 150T D	X	III - M3
Membran 30T D	X	-

* Carbamazepin/ Diclofenac/ Sulfamethoxazol/
Bezafibrat/ Clofibinsäure/ Ibuprofen/
Aerolol/ Mecloprolol/ Sotalol/
Trimethoprim/ Phenazone/ Propyphenazon

Jc. Routineuntersuchungen

	Organische Fracht (1)	BSB (2)	Stickstoff Bilanz(3)	Phosphor (4)	Feststoffe (5)
<u>I. Ablauf RR schwach belastet</u>					
Zulauf RR	X	X	X	X	X I - ZRR
Ablauf RR					
Zulauf Membran	X	X	X	X	X I - ARR
Membran 0,2 µ	X	-	X	X	- I - M1
Membran 150T D	X	-	-	-	- I - M2
Membran 30T D	X	-	-	-	- I - M3
<u>II. Ablauf RR mittelstark belastet</u>					
Zulauf RR	X	X	X	X	X II - ZRR
Ablauf RR					
Zulauf Membran	X	X	X	X	X II - ARR
Membran 0,2 µ	X	-	X	X	- II - M1
Membran 150T D	X	-	X	X	- II - M2
Membran 30T D	X	-	-	-	- II - M3
<u>III. Ablauf RR stark belastet</u>					
Zulauf RR	X	X	X	X	X III - ZRR
Ablauf RR					
Zulauf Membran	X	X	X	X	X III - ARR
Membran 0,2 µ	X	-	X	X	- III - M1
Membran 150T D	X	-	X	X	- III - M2
Membran 30T D	X	-	-	-	- III - M3

1 - CSB und/oder TOC

2 - BSB

3 - NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, N_T (Bei den Abläufen der Membranen reicht N_T aus)4 - PO₄-P_{tot}

5 - Absetzbare Stoffe, Abfärbbare Stoffe, Trübung, Färbung

Bei der Auswahl der Methoden für Trübung u. a. bitte das übliche Herangehen bei „Mehrfachnutzung“ beachten.

Auszug aus der Prüfanweisung FB 7.3 – OX der DAS für die Bestimmung von Phosphorverbindungen nach DIN 38405**Molybdat-Reagenzlösung**

Ansatz: 13 g Hexaammoniumheptamolybdat $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ in 100 ml H_2O
300 ml H_2SO_4 Lösung II unter Kühlung zufügen

0,35 g Kaliumantimon (III) oxitartrat $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$ mit 0,5 H_2O in 100 ml H_2O lösen und langsam zu der sauren Molybdatlösung zufügen und durchmischen

Aufbewahrung: dunkel

Haltbarkeit: mind. 2 Monate

Tabelle 40: Laborwerte Versuch Dresden-Kaditz [DAS2011]

Unternehmen: DAS-Versuchsanlage Dresden Kaditz/Kläranlage/Vorklärbecken
 Verantwortlicher Mitarbeiter: L. Haldenwang
 Telefonnummer:
 E-Mail Adresse:



Protokoll Analysenwerte

Proben- bezeichn.	pH	Leitf [µS/cm]	Ext. 254nm	Trüb.	Färbung 620 / 524 / 436nm	TNb [mg/l]	NH ₄ -N [mg/l]	NO ₃ -N [mg/l]	NO ₂ -N [mg/l]	PO ₄ -P [mg/l]	P-ges. [mg/l]	CSB [mg/l]	AAS [ml/l]	abfiltr. Stoffe mg/l	Bemerkungen/ Besonderheiten
Zulauf RR	7,51	1466	1,98	163	27,8 / 33,6 / 43,2	43	41,0	1,4	0,1	4,9	7,7	465	1,1	213	
Ablauf RR ZL															
Membran I-ARR	7,37	1297	0,293	17,5	2 / 2,82 / 4,72	30	17,3	13,8	1,9	3,4	4,0	131	<0,1	85	
Membran 0,2 µm	7,46	1281	0,166	5,58	0,52 / 0,92 / 2,16	21	15,0		2,1	3,2	4,0	28			
Membran 150T D	7,46	1302	0,173	7,37	0,48 / 0,9 / 2,16		16,2			3,3	5,5	19			
Membran 30T D	7,39	1294	0,165	5,96	0,56 / 0,92 / 2,1		16,2			3,4	4,5	29			
Zulauf RR	7,85	1450	1,72	162	19 / 23,2 / 31	43	39,0	3,5	0,1	4,3	7,5	363	0,3	132	
Ablauf RR ZL															
Membran II-ARR	7,75	1369	0,404	27,3	3,16 / 4,34 / 6,72	33,5	29,0	3,3	0,9	3,7	4,7	57	<0,1	7	
Membran 0,2 µm	7,81	1363	0,17	6,35	0,54 / 1,0 / 2,24	32,5	28,6		0,7	3,7	4,1	24			
Membran 150T D	7,8	1358	0,168	7,71	0,8 / 1,22 / 2,38	37	28,4		0,8	3,6	4,1	37			
Membran 30T D	7,76	1372	0,158	5,2	0,42 / 0,82 / 1,96		28,3			3,7	4,6	26			
Zulauf RR	7,7	1385	1,95	152	22 / 26,6 / 35,4	42,2	40,4	1,7	0,1	4,7	7,5	459	3,4	146,6	
Ablauf RR ZL															
Membran III-ARR	7,6	1330	0,531	46,8	4,6 / 6,08 / 9,06	32,4	29,7	2,4	0,3	4,0	4,9	92	<0,1	16	
Membran 0,2 µm	7,72	1315	0,194	7,24	0,72 / 1,26 / 2,7	32,6	29,5		0,5	4,0	4,0	44			
Membran 150T D	7,67	1311	0,178	6,6	0,58 / 1,06 / 2,42	32,2	29,4		0,5	4,0	4,3	42			
Membran 30T D	7,67	1322	0,161	5,58	0,56 / 0,98 / 2,3	32,3	29,1		0,5	4,0	4,7	24			

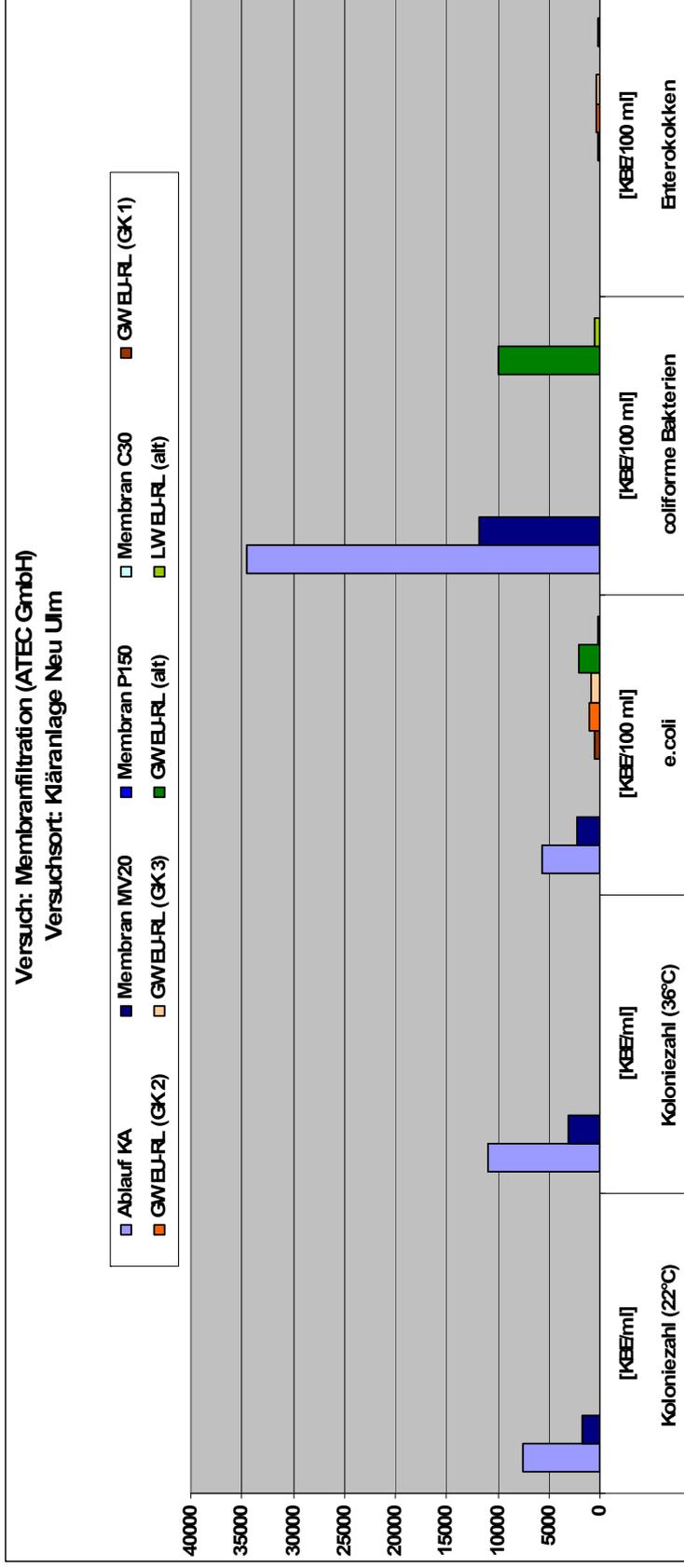


Abbildung 45: Gegenüberstellung mikrobiologische Labormesswerte mit den Grenzwerten EU-RL 2006/7/EG und EU-RL

Tabelle 41: Analysewerte von Wessling GmbH – Versuch Dresden Kaditz [DAS2011]

Auftrag		MRR Kaditz										
Probennummer	Eingang	Proben- bezeichnung	Koloniezahl bei 20°C		Koloniezahl bei 36°C AF		Coliforme Keime	Escherichia coli	Enterokokken	Pseudomonas aeruginosa		
			KBE/ml	W/E	KBE/ml	W/E					KBE/100 ml	W/E
11-046022-01	28.04.2011	I - ZRR	1,1 · 10 ⁶	7	7,1 · 10 ⁶	6	>2.420.000	>2.420.000	1,1 · 10 ⁶	6	2,9 · 10 ⁶	3
11-046022-02	28.04.2011	I - ARR	3,7 · 10 ⁶	5	1,9 · 10 ⁶	5	166.000	29.000	2,2 · 10 ⁶	3	2,2 · 10 ⁶	3
11-046022-03	28.04.2011	I - M1	1,0 · 10 ⁶	5	9,3 · 10 ⁶	4	>242.000	2.380	19		0	
11-046022-04	28.04.2011	I - M2	2,5 · 10 ⁶	5	2,5 · 10 ⁶	5	>242.000	8.160	121		0	
11-046072-01	28.04.2011	II - ZRR	3,7 · 10 ⁶	5	8,0 · 10 ⁶	6	>2.420.000	>2.420.000				
11-046072-02	28.04.2011	II - ARR	5,7 · 10 ⁶	5	4,6 · 10 ⁶	5	411.000	81.000				
11-046072-03	28.04.2011	II - M1	2,0 · 10 ⁶	3	1,4 · 10 ⁶	3	2.010	140				
11-046072-04	28.04.2011	II - M2	1,3 · 10 ⁶	5	2,0 · 10 ⁶	5	387.000	75.000				
11-046072-05	28.04.2011	II - M3		80		30	0	0				
11-046076-01	28.04.2011	III - ZRR	5,9 · 10 ⁶	6	6,2 · 10 ⁶	6	>2.420.000	>2.420.000	1,5 · 10 ⁶	6	7,1 · 10 ⁶	3
11-046076-02	28.04.2011	III - ARR	4,0 · 10 ⁶	6	3,8 · 10 ⁶	6	1.986.000	548.000	1,6 · 10 ⁶	5	3,7 · 10 ⁶	3
11-046076-03	28.04.2011	III - M1	1,4 · 10 ⁶	4	2,5 · 10 ⁶	4	19.860	2.910	29		0	
11-046076-04	28.04.2011	III - M3		10		<10	0	0	0		0	

Tabelle 43: Laborwerte Versuch - Emil Kiessling GmbH [DAS2011]

Unternehmen: DAS-Versuchsanlage Dresden MRR Kiessling 27.06. - 30.06.2011
 Verantwortlicher Mitarbeiter: L. Haldenwang
 Telefonnummer:
 E-Mail Adresse:



Die Probenanalytik wurde am 04.07.11 durchgeführt

Protokoll Analysenwerte

Proben- bezeichn.	pH	Leitf [mS/cm]	Ext. 254nm	Trüb.	Färbung 620 / 524 / 436nm	TNb [mg/l]	NH ₄ -N [mg/l]	NO ₃ -N [mg/l]	NO ₂ -N [mg/l]	PO ₄ -P [mg/l]	P-ges. [mg/l]	BSB ₅ mg/l	CSB [mg/l]	TOC [mg/l]	AAS [ml/l]	abfiltr. Stoffe mg/l	Bemerkungen/ Besonderheiten
Zulauf RR	6,94	4,68	1,8	296	10/12/18	120	119	1,3	0,06	24,2	28	1976	3030	820	0,5	45,5	
Ablauf RR ZL																	
Membran 0,2 µm	7,42	4,01	1,49	147	19,2/23,2/29	29	28	0,8	0,02	7,4	12,22	84,5	733	87	<0,1	6,75	
Membran 150T D	7,25	4,01	0,48	88,7	2,3,2/5,4	40	35			5,7			266	68			
Membran 100T D	7,31	4,02	0,32	29,4	0,8/1,6/3,4		31,7			6,8			242	71			
Zulauf RR	7,06	4,39	1,9	225	14/22/30	133	126			14,4			1694	2630	7,15	1,8	175,2
Ablauf RR ZL																	
Membran 0,2 µm	7,51	3,89	0,44	247	7,8/8,6/10,6	70	62,9			10,1			149	421	243	<0,1	36,75
Membran 150T D	7,62	3,83	0,48	111	1,8/3,2/5	60	51,2			4,9				320	83		
Membran 100T D	7,68	3,86	0,38	7,22	1,2/3,6	57	57,2			4,5			81,7	268	77,5		
Zulauf RR	6,46	4,4	1,5	238	12/20/36	62	61,4	0,9		11,4	11,74	1807	2710	694,5	2,2	27	
Ablauf RR ZL																	
Membran 0,2 µm	6,88	3,89	0,71	215	5,6/8,6/11,6	5	2,7	0,8		5,4	13,75	113	428	119	<0,1	35	
Membran 150T D	6,89	3,85	0,4	22	2,2/3/5	14	3,95			4,95		148	372	92			
Membran 100T D	7,01	3,83	0,32	29,4	1,8/2,8/4,4	10	3,00			4,75		101	386	114			
Membran 100T D	7,03	3,87	0,35	36,9	1,6/2,4/4,2	4	2,1			4,8		138	378	112			

Tabelle 44: Analysewerte von Wessling GmbH – Versuch Emil Kiessling GmbH [DAS2011]

Auftrag		MRR Kiessling													
Probennummer	Einheit	Matrix	11-068888-01	11-068888-02	11-068888-04	11-068888-05	11-068901-01	11-068901-02	11-068901-03	11-068901-04	11-068910-01	11-068910-02	11-068910-03	11-068910-04	11-068910-05
Probenbezeichnung			Ablauf RR schwach belastet LZRR	Ablauf RR schwach belastet LARR	Ablauf RR schwach belastet LM2	Ablauf RR schwach belastet LM3	Ablauf RR mittelstark belastet ILZRR	Ablauf RR mittelstark belastet ILARR	Ablauf RR mittelstark belastet ILM1	Ablauf RR mittelstark belastet ILM2	Ablauf RR stark belastet III-ZRR	Ablauf RR stark belastet III-ARR	Ablauf RR stark belastet III-M1	Ablauf RR stark belastet III-M2	Ablauf RR stark belastet III-M3
Koloniezahl bei 20°C			7,1 · 10 ⁶	1,9 · 10 ⁶	>1,0 · 10 ⁴	8,3 · 10 ³	9,6 · 10 ⁶	7,4 · 10 ⁶	8,0 · 10 ⁶	1,1 · 10 ⁷	1,3 · 10 ⁷	3,7 · 10 ⁶	6,8 · 10 ⁶	3,3 · 10 ⁵	1,4 · 10 ⁶
Koloniezahl bei 36°C AF			8,6 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁷	>1,0 · 10 ⁴	6,3 · 10 ³	9,6 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁷	9,6 · 10 ⁶	1,2 · 10 ⁷	1,2 · 10 ⁷	9,2 · 10 ⁶	8,1 · 10 ⁶	2,3 · 10 ⁵	1,2 · 10 ⁶
Coliforme Keime							>2,420.000	>2,420.000	>2,420		>2,420.000	>2,420.000	<10	<10	<10
Escherichia coli							<1.000	<1.000	0		>24.200	30	<10	<10	<10
Enterokokken							2,2 · 10 ⁴	5,6 · 10 ³	1	2	2,0 · 10 ⁵	8,0 · 10 ³	0	0	0
Legionellen /100 ml											n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Legionellen /ml											n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Probennummer			11-068928-01	11-068928-02	11-068928-03		11-068929-01	11-068929-02	11-068929-03	11-068929-04	11-068930-01	11-068930-02	11-068930-03	11-068930-04	11-068930-05
Probenbezeichnung			Ablauf RR schwach belastet LZRR	Ablauf RR schwach belastet LARR	Ablauf RR schwach belastet LMT		Ablauf RR mittelstark belastet ILZRR	Ablauf RR mittelstark belastet ILARR	Ablauf RR mittelstark belastet ILM1	Ablauf RR mittelstark belastet ILM2	Ablauf RR stark belastet III-ZRR	Ablauf RR stark belastet III-ARR	Ablauf RR stark belastet III-M1	Ablauf RR stark belastet III-M2	Ablauf RR stark belastet III-M3
Lipophile Stoffe, schwerflüchtig	mg/l	W/E	13,5	<5	<5		16,6	<5	7,7	<5	24,4	<5	<5	<5	<5
Tenside, anionisch (MBAS)	mg/l	W/E	6	0,05	0,04		6	0,21	0,13	0,09	2	0,32	0,1	0,11	0,04
Tenside, kationisch (DBAS)	mg/l	W/E	5	<1	<1		<1	<1	<1	<1	15	15	3	1	5

Kostenanteile membranspezifischer Verbraucher		
	spez. Verbrauch	spez. Kosten
Crossflow- Belüftung	0,20 - 0,75 kWh/m ³	
Permeatextraktion/ Rezirkulationen	0,08 - 0,15 kWh/m ³	
zus. Energiebedarf Druckbelüftung	0,08 - 0,10 kWh/m ³	
Chemikalien		0,2 - 1,1 €/m ² *a)
Membranersatz	5 bis 10 Jahre	40 - 80 €/m ²

Annahmen: 13 Ct/kWh; Q = 90 m³/(EW*a); 1,5 m²_{Mem}/EW; Flux im Betrieb 15 L/(m²*h)

Abbildung 46: Spezifischer Energieverbrauch MBR [SCWI2009]

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Dresden, den 23.09.2011

Sarina Reischert