

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben:

„Entwicklung und Erprobung eines “low cost“ Membranmoduls zur Biomasseabtrennung beim Belebungsverfahren - Phase II -“

Projekt-Nr.: 19898/02 (010023)


für die



Gelsenkirchen, den 06.03.2008

Dipl.-Biol. Ulrich Brüß
(Projektleiter)

Projektleitung

Projektleitung	Bearbeiter
 <p>A3 Water Solutions GmbH Magdeburger Straße 16 a 45881 Gelsenkirchen</p>	<p>Dipl.-Biol. U. Brüß, Dipl.-Ing. C.Charwath Dipl.-Ing. M. Wolf</p>

Projektpartner

Partner	Bearbeiter
 <p>Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Pinnekamp Mies-van-der-Rohe-Str. 1 52074 Aachen Tel.: 0241 80 25207 Fax: 0241 80 22285 Email: isa@isa.rwth-aachen.de www.isa.rwth-aachen.de</p>	<p>Dr.-Ing. S. Köster, Dipl.-Ing. S. Baumgarten, Dipl.-Ing. D. Tacke</p>
 <p>Technische Universität Berlin Prof. Dr.-Ing. M. Kraume Straße des 17. Juni 135 Skr.: MA 5-7 10623 Berlin</p>	<p>Dipl.-Ing. H. Prieske</p>

Inhalt

1	Rückblick auf die Projektphase I	14
2	Veranlassung	18
3	Ziele	19
4	Arbeitsprogramm und Projektablauf	20
5	Anlagenbeschreibung	24
5.1	Beschreibung des labortechnischen A3-Modulteststandes.....	24
5.2	Beschreibung des halbtechnischen Modulteststandes des ISA	24
5.3	Beschreibung der halbtechnischen A3-MBR-Pilotanlage.....	26
5.4	Beschreibung der großtechnischen MBR-Containeranlage LINEG.....	31
5.5	Membrantestzelle.....	32
5.6	2D-Modell eines Schlaufenreaktors.....	33
6	Entwicklung und Erprobung von Betriebskonzepten für das Filtrationsmodul	38
6.1	Untersuchung von Betriebskonzepten	38
6.1.1	Hydraulische Leistungsfähigkeit und Permeabilitätsentwicklung der Module im flussgeregelten Betrieb.....	39
6.1.2	Hydraulische Leistungsfähigkeit und Permeabilitätsentwicklung der Module im druckgeregelten Betrieb	44
6.1.3	Einsatz von Zusatzstoffen zur Verbesserung der Filtrierbarkeit des Wasser-Schlamm-Gemisches	51
6.1.4	Einfluss der Vorreinigung auf den Zulaufbetrieb am Beispiel der MBR-Containeranlage Xanten.....	52
6.1.5	Belüftungsstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs.....	53
6.2	Untersuchung von Reinigungskonzepten	56
6.3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Betriebskonzepte für das Filtrationsmodul.....	59
6.3.1	Ergebnisse der Betriebsphasen	59
6.3.2	Schlussfolgerungen.....	61
7	Experimentelle Strömungsuntersuchungen	62
7.1	Strömungsuntersuchungen mittels optischer Beobachtung	62
7.2	Strömungsuntersuchungen mittels Acoustic Doppler Velocimetry	67

7.2.1	Beschreibung des Messverfahrens	69
7.2.2	Durchgeführte Untersuchungen	75
7.2.3	Ergebnisse	75
7.2.3.1	Untersuchung der Strömungsbeeinflussung durch die Belüftungsintensität.....	76
7.2.3.2	Variation der Belüftungseinheit.....	83
7.2.3.3	Einfluss der Modulposition im Reaktor auf die Durchströmung des Moduls.....	89
7.2.3.4	Strömung im Abströmbereich des Reaktors	96
7.2.3.5	Einfluss der Viskosität von belebtem Schlamm auf die Strömung.....	98
7.3	Schlussfolgerungen.....	103
8	Numerische Strömungssimulation	106
8.1	Untersuchung der Zirkulationsströmung	107
8.2	Untersuchungen zum Einfluss der Querströmung auf die Filtrationsleistung	119
8.3	Untersuchung des Blasenauftiegs zwischen den Platten	124
8.4	Mathematische Modellierung der Zirkulationsströmung.....	127
9	Umsetzung der Untersuchungsergebnisse in der Modulproduktion	133
9.1	Modulfertigung	133
9.2	Modulkonstruktion	134
9.3	Modulgeometrie	135
10	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.....	135
10.1	Ermittlung der Modulkosten.....	135
10.2	Bemessung der Anlage im großtechnischen Maßstab.....	135
10.3	Kalkulation der Betriebskosten	136
11	Zusammenfassung und Ausblick	138
Literatur	141

Verzeichnis der Bilder

Bild R 1:	Prinzipieller Aufbau des Moduls	2
Bild R 2:	Zwei Prototypen des Membranmoduls A403	3
Bild 4-1:	Geplante und tatsächliche Projektdauer	20
Bild 5-1:	Technikstand und Teststand am ISA.....	26
Bild 5-2:	RI-Fließbild der halbtechnischen Pilotanlage.....	27
Bild 5-3:	Pilotanlage (a) und Doppeldeckermodule M70 (b).....	30
Bild 5-4:	Pilotanlage mit Doppeldecker M70(links) und Anordnung der Module im Reaktor (rechts).....	31
Bild 5-5:	Membrantestzelle in vertikaler Position	32
Bild 5-6:	Fließbild des Versuchsaufbaus	33
Bild 5-7:	Schematische Darstellung des verwendeten Schlaufenreaktors.....	34
Bild 5-8:	Versuchsaufbau zur Bestimmung des Gasgehalts im Downcomer, ohne(links) und mit (rechts) Membranmodul	35
Bild 5-9:	Versuchsaufbau zur Messung der Zirkulationsgeschwindigkeit	36
Bild 5-10:	Position der Platte zur Bestimmung der Aufstiegsgeschwindigkeit von Einzelblasen	37
Bild 5-11:	Abfolge der Bildauswertung zur Ermittlung der Aufstiegsgeschwindigkeit von Einzelblasen.....	38
Bild 6-1:	Hydraulische Betriebsdaten der Einfahrphase zur Schlammadaption.....	40
Bild 6-2:	Hydraulische Betriebsdaten der flussgeregelten Betriebsphase	42
Bild 6-3:	Hydraulische Betriebsdaten der druckgeregelten Betriebsphase mit dynamischer Zulaufhydraulik – Rückspülung Modul 1	46
Bild 6-4:	Entwicklung Flussleistung und Transmembrandruck nach der 2-stündigen hydraulischen Lastphase von Modul	46
Bild 6-5:	Entwicklung Flussleistung und Transmembrandruck nach der 3-stündigen hydraulischen Lastphase von Modul 1.....	47
Bild 6-6:	Hydraulische Betriebsdaten der druckgeregelten Betriebsphase mit dynamischer Zulaufhydraulik – Rückspülung Modul 2	49
Bild 6-7:	Öltröpfchenwurm im MBR-Schlamm	52

Bild 6-8:	Contec Siebrechen im Anlagenzulauf 1mm Lochsieb.....	52
Bild 6-9:	Stromverbrauch einer Strasse im Monat September 07	55
Bild 6-10:	Permeabilitätsverlauf Strasse 1 großtechnischer MBR Xanten-Vynen von Juli bis August 07 nach Insitu-Rückspülung	57
Bild 6-11:	Permeabilitätsverlauf Strasse 1 großtechnischer MBR Xanten-Vynen von Juli bis August 07 nach Insitu-Rückspülung als maintenance cleaning mit 200 ppm und recovery cleaning mit 2000 ppm.....	58
Bild 7-1:	Leitblechformen.....	63
Bild 7-2:	Vorversuche im Teststand.....	64
Bild 7-3:	Kammaufsatz	65
Bild 7-4:	modifizierter Kammaufsatz	66
Bild 7-5:	Lochblechaufsatz (Lochdurchmesser: ~2cm)	67
Bild 7-6:	Positionen eines bzw. zweier Doppeldeckermodule in der Pilotanlage.....	68
Bild 7-7:	Sondenmesskopf der ADV-Sonde.....	69
Bild 7-8:	Anordnung von Traversierungseinheit und ADV-Sensor auf der Pilotanlage	70
Bild 7-9:	Messraster für Positionen 1 bis 4 der Module in der Pilotanlage.....	71
Bild 7-10:	Umrechnung der Sondenkoordinaten auf die Behälterkoordinaten der Pilotanlage ...	73
Bild 7-11:	Standardmessraster und engeres Messraster über einem A40-Modul (Projektphase I).....	74
Bild 7-12:	Tabellenkopf der Ergebnistabellen	75
Bild 7-13:	Moduldurchströmung bei verschiedenen Belüftungsraten	79
Bild 7-14:	Ergebnisse aus den Klarwasseruntersuchungen mit den A3-Modulen A70 und M70 (Tacke, 2007).....	80
Bild 7-15:	Messung in belebtem Schlamm (TR ~ 10 g/l) bei unterschiedlichen Belüftungsraten (Versuch Nr. 71 und 72 nach Tabelle 7-1).....	81
Bild 7-16:	Geschwindigkeiten an einzelnen Messpunkten bei unterschiedlichen Belüftungsraten.....	82
Bild 7-17:	Einfluss der modifizierten Kammaufsätze auf die Strömungsverteilung oberhalb des Moduls im Vergleich zum Strömungsbild ohne Belüfteraufsätze mit einer Belüftungsrate von 0,31 Nm ³ /(m ² ·h)	85

Bild 7-18:	Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch Wiederholung der Messung direkt über dem Modul (Raster 1).....	85
Bild 7-19:	Einfluss des Lochbleches auf die Strömungsverteilung oberhalb des Moduls im Vergleich zum Strömungsbild ohne Belüfteraufsätze.....	86
Bild 7-20:	Maximal gemessene Geschwindigkeiten bei verschiedenen Belüftervariationen und unterschiedlichen Belüftungsintensitäten.....	87
Bild 7-21:	Ergebnisse der Moduldurchströmung vor und nach dem Tausch der Belüfterkerzen (Belüftung $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, mit Lochblechaufsatz).....	88
Bild 7-22:	Luftzufuhrkanal für die Belüfter im Aufströmkanal	89
Bild 7-23:	Strömungsbild im Reaktor bei unterschiedlichen Modulpositionen	91
Bild 7-24:	Strömungsbild über zwei Doppeldeckermodulen in der Pilotanlage.....	92
Bild 7-25:	Vektordarstellung der Geschwindigkeiten v_{xz} (a) im Vergleich zu den reinen Aufströmgeschwindigkeiten v_z (b) für Position 1, Belüftung $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	94
Bild 7-26:	Vektordarstellung der Geschwindigkeiten v_{xz} (a) und v_{yz} (b) im Vergleich zu den reinen Aufströmgeschwindigkeiten v_z (c) für Position 3, Belüftung $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	95
Bild 7-27:	Vektordarstellung der Geschwindigkeiten v_{xz} (a) und v_{yz} (b) im Vergleich zu den reinen Aufströmgeschwindigkeiten v_z (c) für Position 4, Belüftung $0,28 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	96
Bild 7-28:	Lage der Messpunkte ($y = 1.115 \text{ mm}$, 1.185 mm) für die Messung im downcomer ...	97
Bild 7-29:	Strömung im Downcomer des Reaktors in zwei Schnitten ($y = 1.115 \text{ mm}$, $y = 1.185 \text{ mm}$), Doppeldeckermodul in Position 1, Belüftung $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	98
Bild 7-30:	Moduldurchströmung in belebtem Schlamm bei verschiedenen Trockensubstanzgehalten von rund $7,6 \text{ g/l}$ (a), $8,4 \text{ g/l}$ (b), $10,4 \text{ g/l}$ (c) und $11,5 \text{ g/l}$ (d), Belüftung $0,27 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	101
Bild 7-31:	Vergleich der Moduldurchströmung in belebtem Schlamm ($\text{TR} \sim 11,5 \text{ g/l}$) und in Klarwasser	102
Bild 7-32:	Entwicklung der maximalen und minimalen Aufströmgeschwindigkeiten v_z bei unterschiedlichen TR-Gehalten und Viskositäten	102
Bild 8-1:	Darstellung des modular aufgebauten Rechengitters	108
Bild 8-2:	Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (ohne Membranmodul)	111

Bild 8-3:	Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)	112
Bild 8-4:	Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)	112
Bild 8-5:	Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)	113
Bild 8-6:	Vektorplot der berechneten Flüssigkeitsgeschwindigkeiten (ohne Membranmodul)	113
Bild 8-7:	Vektorplot der berechneten Flüssigkeitsgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)	114
Bild 8-8:	Vektorplot der berechneten Flüssigkeitsgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)	114
Bild 8-9:	Vektorplot der berechneten Flüssigkeitsgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)	115
Bild 8-10:	Berechnete vertikale Flüssigkeitsgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (ohne Membranmodul)	115
Bild 8-11:	Berechnete vertikale Flüssigkeitsgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)	116
Bild 8-12:	Berechnete vertikale Flüssigkeitsgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)	116
Bild 8-13:	Berechnete vertikale Flüssigkeitsgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)	117
Bild 8-14:	Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (ohne Membranmodul)	117
Bild 8-15:	Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)	118
Bild 8-16:	Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)	118
Bild 8-17:	Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr- geschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)	119
Bild 8-18:	Verlauf des TMP für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten (ohne Begasung)	120
Bild 8-19:	Verlauf des TMP für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten für eine Gasleerrohrgeschwindigkeit von 0,02 m/s	120

Bild 8-20:	Verlauf des TMP für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten bei einer Gasleerrohrgeschwindigkeit von 0,09 m/s.....	121
Bild 8-21:	Verlauf des TMP für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten U_g für eine Querstromgeschwindigkeiten von 0,2 m/s.....	121
Bild 8-22:	Verlauf des TMP für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten U_g für eine Querstromgeschwindigkeiten von 0,3 m/s.....	122
Bild 8-23:	Verlauf des TMP für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten U_g für eine Querstromgeschwindigkeiten von 0,4 m/s.....	122
Bild 8-24:	Logarithmische Darstellung hydrodynamischer Kräfte in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für einen Permeatfluss von 20 L/(m ² h)	124
Bild 8-25:	Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen zwischen parallelen Platten im Vergleich zu freien Blasen (Clift 1978).....	125
Bild 8-26:	Darstellung der Blasenform sowie der vertikalen Geschwindigkeit für einen Plattenabstand von 3 mm.....	125
Bild 8-27:	Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen zwischen parallelen Platten	126
Bild 8-28:	Ergebnisse der numerischen Simulationen für die maximale Wandschubspannung in Abhängigkeit vom Plattenabstand und der Blasengröße.	127
Bild 8-29:	Erweitertes Berechnungsschema zur Bestimmung der Zirkulationsgeschwindigkeit in Schlaufenreaktoren mit Membranmodulen	128
Bild 8-30:	Gasgehalt im Schlaufenreaktor für den Fall ohne und mit Membranmodul für eine Gasleerrohrgeschwindigkeit von 0,0234 m/s	129
Bild 8-31:	Vergleich der Ergebnisse für die Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit im Riser für den Fall mit Membranmodul mit einem Plattenabstand von 7 mm und einem Flächenverhältnis von $AD/AR = 2$	132
Bild 8-32:	Ergebnisse der neuen Korrelation für den Gasgehalt im Downcomer im Vergleich zum Ansatz von Chisti sowie zu den experimentellen Werten (Plattenabstand 7 mm, Flächenverhältnis $AD/AR = 2$)	132
Bild 8-33:	Ergebnisse der numerischen Simulation für Membranmodule mit verschiedenen Plattenabständen im Vergleich zum mathematischen Modell (Flächenverhältnis $AD/AR = 2$).....	133

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 5-1:	Modulabmessungen von A40 und M70.....	25
Tabelle 5-2:	Technische Kenngrößen der Pilotanlage	28
Tabelle 5-3:	Erfasste Betriebsdaten und Art der Aufzeichnung/Dokumentation	29
Tabelle 5-4:	Abmessungen des Schlaufenreaktormodells	35
Tabelle 6-1:	CSB-Konzentration im Anlagenzulauf als 24-h-Mischproben	38
Tabelle 6-2:	Betriebseinstellungen des Bioreaktors	39
Tabelle 6-3:	Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule – Modul 1 rückgespült mit Filtrat	43
Tabelle 6-4:	Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule – Modul 1 rückgespült mit Filtrat + 1x/Woche 200 ppm NaOCl	43
Tabelle 6-5:	Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule in der Zweitbetriebnahme druck geregelter Betrieb.....	44
Tabelle 6-6:	Betriebsdaten der Membranmodule während der dynamischen Belastung.....	45
Tabelle 6-7:	Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule – Modul 1 rückgespült	49
Tabelle 6-8:	Messung CST vom Belebtschlamm des MBR.....	51
Tabelle 6-9:	Hydraulische Leistungsdaten der Modulblöcke	53
Tabelle 6-10:	Leistungsaufnahme Filtratpumpe und Belüfter in Abhängigkeit der hydraulischen Last	54
Tabelle 6-11:	1-stündige externe Reinigung (recovery cleaning) in Lösung.....	58
Tabelle 7-1:	Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Belüftungsintensität (Messraster siehe Bild 7-9).....	78
Tabelle 7-2:	Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Belüftungseinheit (Messraster siehe Bild 7-9).....	84
Tabelle 7-3:	Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Modulpositionen (Messraster siehe Bild 7-9)	90
Tabelle 7-4:	Versuchseinstellungen für die Untersuchung des Viskositätseinflusses (Messraster siehe Bild 7-9).....	99
Tabelle 8-1:	Einlassrandbedingungen	109
Tabelle 8-2:	Reynoldszahlen der simulierten Zirkulationsströmung	110

Tabelle 9-1: Technische Änderungen/Weiterentwicklungen in der Modulfertigung bzw. Materialwahl	133
Tabelle 9-2: Wahl der Modulgeometrie.....	135
Tabelle 10-1: Abgeleitete Kenngrößen zur Bemessung einer großtechnischen MBR-Anlage.....	136
Tabelle 10-2: Zulaufhydraulik Beispiel.....	137
Tabelle 10-3: Modulbedarf sowie zugehöriger Luftbedarf	137
Tabelle 10-4: Leistungsbedarf zur Modulbelüftung	137
Tabelle 10-5: Spezifischer Leistungsbedarf bezogen auf die Filtratmenge	137

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
A	Fläche	[m ²]
A _b	Durchtrittsfläche der Strömung vom Downcomer in den Riser	[m ²]
A _D	Querschnittsfläche im Downcomer	[m ²]
A _R	Querschnittsfläche im Riser	[m ²]
ADV	Acoustic Doppler Velocimetry	[-]
A _{MM}	Querschnittsfläche der Strömung im Membranmodul	[m ²]
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf	[mg/l]
B	Breite	[m]
d _{MM}	Abstand der Membranplatten im Modul	[m]
F _L	Liftkraft auf ein Partikel in der Querströmung	[N]
F _Y	Schleppkraft der Filtratströmung	[N]
g	Gravitationskonstante	[m/s ²]
H	Höhe	[m]
h _d	belüftete Höhe im Reaktor	[m]
K _B	Widerstandskoeffizient der Strömungsumlenkung vom Downcomer zum Riser	[-]
K _{MM}	Widerstandskoeffizient des Membranmoduls	[-]
L	Länge	[m]
l _{MM}	Höhe des Membranmoduls	[m]
p	Druck	[bar]
Q	Zufluss, Durchfluss, Volumenstrom	[m ³ /h]
Re	Reynoldszahl	[-]
T	Tiefe des Membranmoduls	[m]
TS	Trockensubstanzgehalt	[g/l]
TR	Trockenrückstand	[g/l]
U _{GR}	Gasleerrohrgeschwindigkeit im Riser	[m/s]
U _{FR}	Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit im Riser	[m/s]

U_{MM}	Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit im Membranmodul	[m/s]
\dot{V}_{FR}	Volumenstrom der Flüssigkeit im Riser	[m ³ /s]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
v_x	Geschwindigkeit in x-Richtung	[m/s]
v_y	Geschwindigkeit in y-Richtung	[m/s]
v_z	Geschwindigkeit in z-Richtung	[m/s]
ε_D	Gasgehalt im Downcomer	[-]
ε_R	Gasgehalt im Riser	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ_F	Oberflächenspannung	[N/m]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
η	dynamische Viskosität, Zähigkeit	[kg/(m·s)], Pa·s]

1 Rückblick auf die Projektphase I

Grundsätzliches Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines kostengünstigen Membranmoduls, das zur Biomasseabtrennung im Belebungsverfahren Einsatz finden kann. Dabei soll neben einer bezüglich der Modulbelüftung energieoptimierten Modulkonstruktion auch eine Optimierung Filtrationsleistung im Langzeitbetrieb unter Berücksichtigung verschiedener Reinigungskonzepte untersucht werden.

Das Gesamtvorhaben ist zweiphasig konzipiert. Die erste Phase des Projektes wurde unter Beteiligung der A3 GmbH und des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft (ISA) der RWTH Aachen im Juni 2002 begonnen und im August des Jahres 2004 durch Abgabe des Abschlussberichtes abgeschlossen. Darauf folgte die zweite Projektphase, die von der DBU für einen Zeitraum von 24 Monaten bewilligt wurde. Beginn der Phase II war Mitte März 2005. Als zusätzlicher Projektpartner konnte für die zweite Phase das Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin gewonnen werden.

Im Rahmen der Phase I wurde ein neuer Typ eines Membranfiltrationsmoduls entwickelt und an Prototypen im Labormaßstab und im technischen Maßstab untersucht. Die in der Phase I gewonnenen Ergebnisse bilden die Grundlage für den vorliegenden Abschlussbericht der Phase II. Die Erkenntnisse aus der ersten Projektphase werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Membranentwicklung

Grundlage für die Entwicklung eines Membranmoduls ist zunächst die Auswahl eines geeigneten Membranmaterials und eines Trägermaterials (sogenannte „Spacer“) für die Membran sowie die Entwicklung einer entsprechenden Membranplatte (Filtertaschen) aus diesen beiden Komponenten. Die Zusammenfassung mehrerer Membranplatten ergibt ein Membranmodul (siehe auch Bild R.1).

Es wurde eine verfahrens- und fertigungstechnisch optimierte Membrantasche entwickelt, die sich für die Verarbeitung zu einem Modul eignet. Dafür wurden unterschiedliche Membranmaterialien mit verschiedenen innen liegenden Spacern durch Laminierung verbunden. So konnte ein Sandwichwerkstoff entwickelt werden, der eine hohe mechanische Festigkeit und eine große, freie Filtrationsfläche sowie eine offene Kanalstruktur auf der Filtratseite aufweist. Als Spacer wurde ein Kunststoffmaterial gewählt, das der Membranplatte die erforderliche Stabilität gibt und ein Abfließen des Permeats in der Modulplatte gewährleistet. Die durch den Laminierungsvorgang erzeugte Membranplatte wurde oben und unten wirkungsvoll und stabil verschlossen. Da die Anströmung des Moduls hauptsächlich von unten erfolgt, ist die Dichtheit der Platten besonders im unteren Bereich wichtig, um ein Eindringen von ungereinigtem Abwasser in das Modulinnere zu verhindern. Dazu wurden die Kunststoffprofile durch Verschweißen mit dem Membranmaterial unlösbar verbunden.

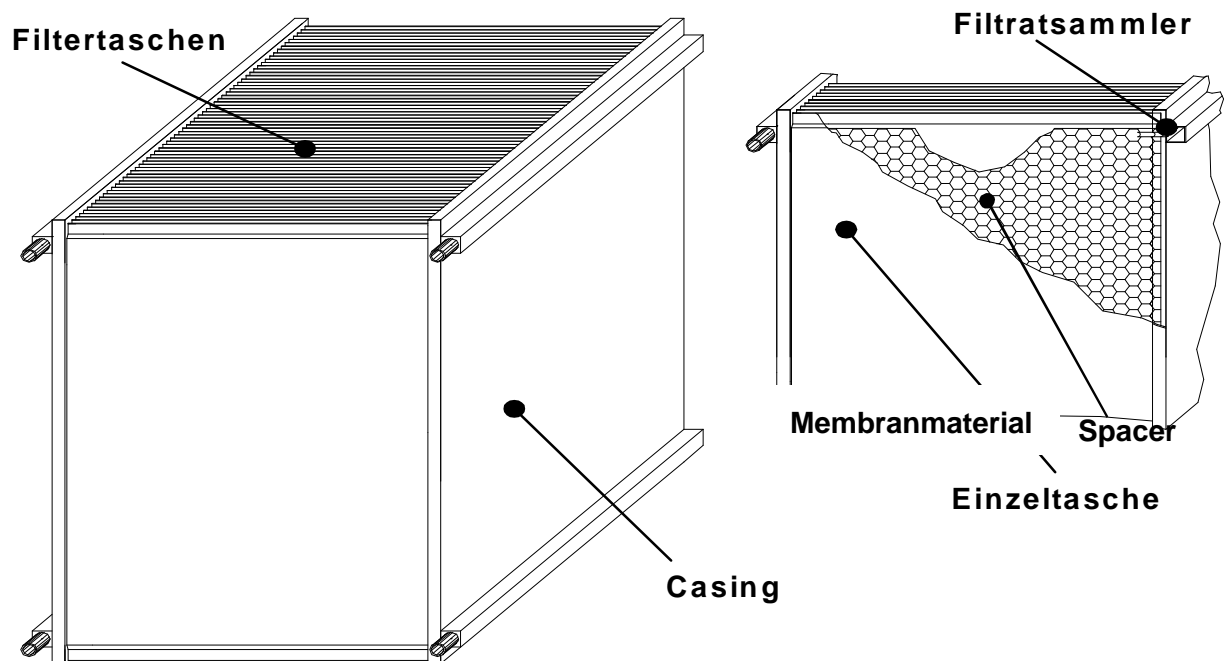


Bild R 1 Prinzipieller Aufbau des Moduls

Modulentwicklung und -fertigung

Auf Grundlage der entwickelten Membranplatte konnte ein verfahrens- und fertigungstechnisch optimiertes Membranmodul namens A40 entwickelt werden, das aus einer Vielzahl von Membrantaschen besteht und insgesamt eine Membranfläche von rund 42 m² aufweist. Es wurden mehrere dieser Filtrationsplatten mit definierten Abständen zwischen den Platten in einem schnell härtenden Kunststoffverguss eingelassen. Der schwarze Kunststoffverguss ist in Bild R.2 gut zu erkennen. Durch den Verguss wurden die Seiten des Moduls gebildet. Für den Abzug des Filtrates wurden im Verguss Fräsungen vorgenommen, die die eingelassenen Membranplatten öffnen. Durch Abdeckung der Fräsungen (silberne Platten, siehe Bild R.2) und Integration der Filtratentnahmeleitung in diese Abdeckung wurde es möglich, eine Vielzahl von Membranplatten durch eine einzige Filtratleitung zu entwässern. Es wurden Prototypen unterschiedlicher Module mit Membranflächen von 1,5 m², 4 m², 20 m² und 42 m² hergestellt. Die Module wurden anschließend unterschiedlichen mechanischen und hydraulischen Belastungen ausgesetzt und über mehrere Entwicklungsstufen fortlaufend verbessert.



Bild R 2: Zwei Prototypen des Membranmoduls A40

Bei der Modulentwicklung wurden fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt, um die zukünftigen Kosten der Modulherstellung so gering wie möglich halten zu können. Die Herstellungskosten sind im Wesentlichen von der Auslastung der automatisierten Fertigungsanlage und der Stückzahl abhängig. Je nach Auslastungsgrad werden die Modulkosten zwischen 50 €/m² und 120 €/m² liegen.

Filtrationseigenschaften

Zur Optimierung der Betriebsweise des Filtrationsmoduls wurden parallel zur Modulentwicklung seitens der A3 GmbH und des ISA weiterführende Untersuchungen zur mechanischen und hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranen sowie der angefertigten Prototypen der Membranmodule durchgeführt.

Die höchsten Filtrationsleistungen wurden seitens der A3 GmbH mit einer modifizierten Polyphenolharz-Membran erzielt. So wurden mit der Membran Permeabilitäten bis zu 1.300 l/(m²·h·bar) bei einer Porosität von ca. 65% und einer mittleren Porenweite von 0,4 µm gemessen, die beim Einsatz der Membran im Modul weitgehend bestätigt wurden.

In Laborversuchen testete die A3 GmbH die Filtrationsleistung eines Labormoduls (TM) in belebtem Schlamm. Je nach Herkunft und Zusammensetzung des belebten Schlammes zeigten sich dabei Filtrationsleistungen zwischen 10 l/(m²·h) und 40 l/(m²·h) bei Differenzdrücken von 15 - 100 mbar. Die Filtrationsleistung erwies sich dabei über einen mehrwöchigen Betrieb stabil.

Das ISA führte ergänzend Versuche mit belebtem Schlamm durch, in denen der Einfluss von Konditionierungsmitteln auf die Filtrierbarkeit des Schlammes untersucht wurde. Für die Dimensionierung einer großtechnischen Membrananlage wird ein Bemessungsfluss von ca. 20 bis 25 l/(m²·h) zugrunde gelegt (MUNLV NRW, 2002). Das Modul zeigte schon bei unkonditioniertem Schlamm einen sehr hohen kritischen Fluss von 37 l/(m²·h). Zur Konditionierung wurden dem Schlamm Perlite oder Polymere zugegeben. Positive Veränderungen konnten mit dem Konditionierungsmittel Nalco 7123 auf Polymerbasis festgestellt werden. Hier ergab sich eine

Steigerung des Flusses gegenüber unkonditioniertem belebtem Schlamm. Beim kritischen Fluss stellte sich ein Anstieg um rund 27% von 37 l/(m²·h) auf 47 l/(m²·h) ein.

Moduldurchströmung

Die Ermittlung und Optimierung der Moduldurchströmung wurden durch die Aufnahme von zahlreichen Geschwindigkeitsprofilen oberhalb des Moduls vorgenommen. Diese Untersuchungen ermöglichen eine Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Durchströmung des Moduls und helfen somit bei der Abschätzung möglicher Deckschichtbildung auf der Membranoberfläche. Die Geschwindigkeitsverteilung über dem Modul stellte sich bei dem ersten untersuchten Prototypen A40 sehr ungleichförmig dar, was die Deckschichtbildung fördert. Durch herstellerseitige Vergleichmäßigung des Membranplattenabstandes konnte die Moduldurchströmung wesentlich verbessert werden. Bei einer Belüftung von rund 34 Nm³/h (0,8 Nm³/(m²·h)) konnte die maximale Überströmungsgeschwindigkeit der Membranmodule gemessen sowie die vollständige Durchmischung des Reaktors gewährleistet werden. Die Untersuchungen ergaben für das aktuelle Modulkonzept des A40-Moduls Aufströmgeschwindigkeiten bis zu 0,8 m/s.

Außerdem wurde ermittelt, dass mit der Belüftung von 34 Nm³/h auch bei zwei übereinander aufgestellten Modulen (Doppeldeckermodul) die für die Deckschichtkontrolle erforderliche Überströmung der Membranplatten und Umströmung der Module erzeugt werden kann. Damit ist bei Einsatz von Doppeldeckermodulen eine Halbierung der einzutragenden Luftmenge und damit nahezu eine Halbierung des Energiebedarfes möglich. Im großtechnischen Betrieb ist mit einem membranflächenspezifischen Luftbedarf von ca. 0,4 Nm³/(m²·h) zu rechnen.

Es wurden Versuche mit einer 34%-igen Glycerinlösung durchgeführt, die eine vergleichbare Viskosität wie Belebtschlamm-Wasser-Gemische mit einem Trockensubstanzgehalt von 12 g/l aufweist. Diese Versuche dienten als Vorversuche der in Phase II geplanten Untersuchungen in verschiedenen belebten Schlämmen. Die höhere Viskosität führte zu einer Vergleichmäßigung des Strömungsprofils oberhalb des Moduls und zu einer rund 20 bis 30%-igen Abnahme der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten auf rund 0,5 bis 0,6 m/s.

Membranreinigung

Zur Reinigung der Module bzw. der Filtrationsmembranen wurden unterschiedliche Reinigungsmittel eingesetzt. Unter anderem wurde der Einsatz von Wasserstoffperoxid, Natronlauge, Chorbleichlauge, Salzsäure und Schwefelsäure untersucht. Es zeigte sich, dass die eingesetzten Membranen gegenüber den untersuchten Reinigungsmitteln stabil waren und die erforderliche Reinigungsleistung erreicht werden konnte. Es war möglich, trotz sehr starker Deckschichtkompaktierung im Modul, die Anfangspermeabilität eines neuen Moduls weitgehend wieder zu erreichen.

Bewertung der Ergebnisse aus Phase I und Ausblick

In Phase I konnte ein kostengünstig herstellbares Modul entwickelt werden. Im Vergleich zu den bestehenden Systemen (Marktpreis ca. 75 bis 150 €/m²) werden Herstellungskosten von minimal 50 €/m² erwartet.

In Vorversuchen konnte eine vergleichsweise hohe Filtrationsleistung und Permeabilität des Moduls für belebten Schlamm ermittelt und validiert werden. Die anhand der Bestimmung des kritischen Flusses abgeschätzte Flussleistung von bis zu 37 l/(m²·h) liegt oberhalb der Bemessungsflüsse von 25 l/(m²·h) bestehender Systeme. Hieraus sind Kostenvorteile aufgrund eines geringeren Membranflächenbedarfs zu erwarten.

Auf Basis der am Modulteststand ermittelten Geschwindigkeitsverteilungen in Wasser wurden für die Modulanordnung als Doppeldecker geringe membranflächenspezifische Belüftungsraten von ca. 0,4 Nm³/(m²·h) ermittelt. Dieser Wert liegt im Vergleich zu bestehenden Systemen mit Belüftungsraten von ca. 0,3 bis 0,9 Nm³/(m²·h) im unteren Bereich, so dass vor allem in Verbindung mit der geringer anzusetzenden installierten Membranfläche, mit Kostenvorteilen zu rechnen ist. Aussagen zur Regenerierbarkeit beschränken sich bislang auf die chemische Beständigkeit der Membran- bzw. Modulmaterialien. Erste erfolgreiche Reinigungen wurden durchgeführt.

Oben beschriebene Erkenntnisse aus der Projektphase I sowie Aussagen zur Standzeit des Moduls und zur Entwicklung der Filtrationsleistung im Langzeitbetrieb, müssen in weiteren Versuchen unter annähernd realen Bedingungen validiert bzw. ermittelt werden, um die Möglichkeit der großtechnischen Anwendung zu überprüfen. Dafür wird in der Phase II des Projektes eine halbtechnische Versuchsanlage errichtet und mit dem entwickelten Modul betrieben werden. Es sind dabei unter anderem Filtrationsversuche mit kommunalem Abwasser vor Ort geplant. Die Übertragbarkeit der bisher erzielten Messergebnisse soll überprüft und weitere Betriebsoptimierungen sollen vorgenommen werden. Zusätzlich ist die Entwicklung eines numerischen Berechnungsmodells vorgesehen, dass die strömungstechnische Optimierung der Modulbelüftung ermöglicht.

2 Veranlassung

Die Erkenntnisse aus der Projektphase I sowie Aussagen zur Standzeit des Moduls und zur Entwicklung der Filtrationsleistung im Langzeitbetrieb müssen in weiteren Versuchen unter annähernd realen Bedingungen validiert bzw. ermittelt werden. Dafür wurde in der Phase II des Projektes eine halbtechnische Versuchsanlage (Pilotanlage) errichtet. Die Ausstattung der Anlage erfolgte mit einem weiterentwickelten Prototyp (M70). Die Pilotanlage wurde über ein halbes Jahr mit belebtem Schlamm betrieben. Die Übertragbarkeit der bisher erzielten Messergebnisse im Labormaßstab konnte so überprüft und weitere Betriebsoptimierungen vorgenommen werden.

Für den wirtschaftlichen Betrieb von Membrananlagen bzw. von Membranmodulen sind u.a. die strömungstechnischen Aspekte von entscheidender Bedeutung. Sie bestimmen sowohl die Ausbeute als auch die Kosten des Membranverfahrens. So wird durch eine effektive Querströmung entlang der Membran deren Filtrationsleistung aufgrund der Deckschichtkontrolle stark beeinflusst. Andererseits bestimmen die Aufwendungen für die Deckschichtkontrolle bis zu 70% der Betriebskosten.

Die hydrodynamische Auslegung von Membranbioreaktoren erfolgt gegenwärtig überwiegend auf Basis von Erfahrungswerten und birgt noch erhebliches Optimierungspotential. Im Rahmen dieses Projekts zielten die numerischen und experimentellen Untersuchungen u.a. auf eine Optimierung der Strömung. Dabei standen folgende Fragen im Mittelpunkt des Interesses:

- Quantifizierung des Zusammenhangs zwischen der Belüftung und der Zirkulationsströmung in Abhängigkeit von geometrischen Parametern des Reaktors sowie des Membranmoduls
- Gleichmäßige Verteilung der Blasenströmung auf den gesamten Querschnitt des Membranmoduls
- Ermittlung der optimalen Blasengröße im Verhältnis zum Abstand der Membranplatten

3 Ziele

Ziel der Untersuchungen ist, wie in der Projektphase I, die Entwicklung eines innovativen Membranmoduls, das gegenüber bestehenden Systemen geringere Modulinvest- und Betriebskosten aufweist.

In der ersten Phase des Projektes wurde hierzu bereits ein Plattenmodulkonzept entwickelt und erste Prototypen hergestellt. Die Entwicklung erfolgte dabei in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (ISA), das begleitend zur Modulkonzipierung speziell physikalische Untersuchungen bezüglich der Moduldurchströmung vornahm.

Im Rahmen der Projektphase II soll das entwickelte Membranfiltrationsmodul im halbtechnischen Maßstab in kommunalem und industriellem belebtem Schlamm getestet werden. Erste Tests in Phase I mit einem Labormodul in belebtem Schlamm zeigten gute Ergebnisse bezüglich der Filtrationsleistung. Da es sich hierbei nur um zeitlich begrenzte Filtrationsuntersuchungen gehandelt hat, sollte in der zweiten Projektphase besonderes Augenmerk auf das Langzeitverhalten der Module sowie die Entwicklung einer effizienten Reinigungsstrategie gelegt werden. Daneben stand auch die weitere Optimierung der Moduldurchströmung im Vordergrund.

Unterstützend zu den physikalischen Untersuchungen zur Moduldurchströmung soll in der Phase II mit Hilfe der numerischen Strömungssimulation die Möglichkeit geschaffen werden, eine Weiterentwicklung des A3-Moduls voranzutreiben, ohne dass weitere aufwendige und kostenintensive Versuche erforderlich sind. Dadurch sollen im Bereich der Strömungsoptimierung

Veränderungen am Modulaufbau einfach, kostengünstig und mit großer Variationsbreite durchgeführt werden. Für die Durchführung der numerischen Simulation wurde als weiterer Projektpartner das Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin hinzugezogen.

4 Arbeitsprogramm und Projektablauf

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderte Projekt hatte eine planmäßige Laufzeit von 24 Monaten.

Aufgrund von Problemen beim Bau und besonders beim Betrieb der Pilotanlage ergab sich bei gleichbleibender Fördersumme eine Projektverzögerung von rund 6 Monaten. Der Betrieb des Modulteststandes wurde aufgrund im Vergleich zur Projektphase I veränderter Modulgeometrien eingestellt (siehe hierzu auch Kapitel 5.1). Der Teststand erwies sich für das seit der Phase I des Projektes weiterentwickelte A3-Modul als zu klein. Die hierfür geplanten Untersuchungen wurden daher in der Pilotanlage vollendet. Geplante und tatsächliche Projektdauer sowie die Schwerpunkte der durchzuführenden Untersuchungen sind in Bild 4-1 anhand eines Balkenplanes dargestellt.

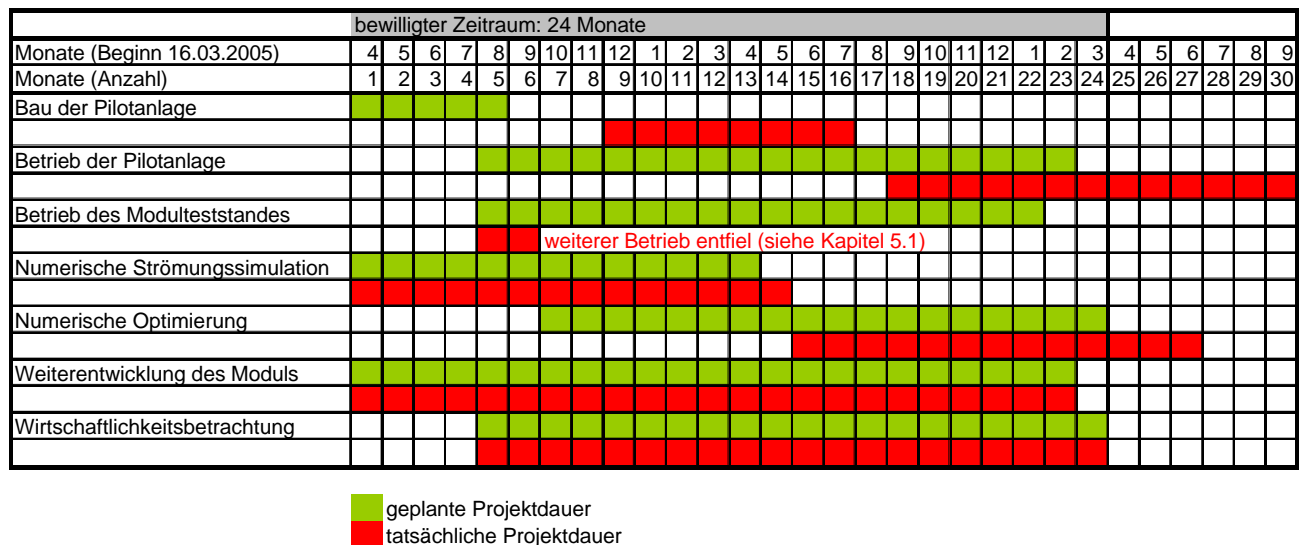


Bild 4-1: Geplante und tatsächliche Projektdauer

Im Folgenden werden die wesentlichen Untersuchungspunkte des Projektes aufgeführt:

1. Entwicklung und Bau der Pilotanlage

Der A3 GmbH oblag die Aufgabe, eine Pilotanlage zu entwickeln, die die im Projekt geplanten Untersuchungen möglich macht. Neben der Ausarbeitung der Anlagentechnik und –steuerung musste die Anlagentechnik beschafft und die Anlage gebaut werden. Dabei musste dafür Sorge getragen werden, dass die für die Strömungsmessungen erforderliche Messtechnik auf der Anlage angebracht werden konnte. Die Strömungsmessungen erfordern einen freien Querschnitt oberhalb der Membranmodule. Aus diesem Grund musste auf Einbauten oberhalb der Module so weit wie

möglich verzichtet werden. Für das Ein- und Ausbauen der Module mittels Kran wurden daher Drahtschlaufen entwickelt, die nach dem Moduleinbau so verstaute werden konnte, dass die Messsonde nicht gestört wurde. Da eine Befestigung der Module an der Reaktorwand ebenfalls ungünstig für die Messung gewesen wäre, wurden die Module gegen mögliches Aufschwimmen mit einem Betonsockel versehen.

2. Betrieb der Pilotanlage

Der Betrieb der Pilotanlage wurde vom ISA in Absprache mit der A3 GmbH vorgenommen. Die Anlage wurde auf dem Gelände der Abwasserreinigungsanlage Aachen Soers aufgestellt, wo das ISA ein Versuchsfeld betreibt. So war es möglich, die Anlage mit kommunalem Abwasser zu beschicken.

Die Pilotanlage wurde im Projekt zum einen für die Untersuchung der Moduldurchströmung und zum anderen für die Entwicklung von Betriebs- und Reinigungsstrategien verwendet. Für die Strömungsmessungen wurde zunächst ein Betrieb der Anlage mit Leitungswasser gewählt. Das ermöglichte neben optischen Beobachtungen der durch die Belüftungseinrichtung induzierten Strömung durch ein im unteren Bereich der Anlagen angebrachtes Sichtfenster ein einfaches Umbauen der Anlage und der Belüftungseinrichtung der Module. Leeren und Wiederbefüllen der Anlage mit Wasser war innerhalb eines Tages möglich. Beim Betrieb mit Abwasser hätte der belebte Schlamm in der Anlage für Umbauten abgelassen oder zwischengespeichert werden müssen. Eine Zwischenspeicherung von 8 m³ war nicht möglich und ein Ablassen des Schlammes hätte ein erneutes zeitintensives (ca. 4 Wochen andauerndes) Anzuchten der Schlamm Bakterien erforderlich gemacht. Da Messungen der Strömungsgeschwindigkeiten später auch im Schlammbetrieb vorgenommen wurden, war hier ein Abgleich der Messdaten zwischen Wasser- und Schlammbetrieb möglich.

Nachdem das Messprogramm für die Strömungsmessungen im Klarwasser abgeschlossen war, wurde die Pilotanlage mit belebtem Schlamm aus den Belebungsbecken der Abwasserreinigungsanlage Aachen Soers befüllt. In einer rund vierwöchigen Einfahrphase der Anlage konnte der belebte Schlamm auf den gewünschten Trockenrückstand von rund 10 g/l anwachsen. Nachdem ein stabiler Anlagenbetrieb erreicht war, wurden Untersuchungen bezüglich der Filtrationsleistung sowie Betriebs- und Reinigungsstrategien durchgeführt.

3. Betrieb des Modulteststandes

Da das weiterentwickelte A3-Modul über eine größere Membranfläche und damit auch über größere Abmessungen verfügte, war der Teststand für Strömungsmessungen über diesem neuen Modul nicht geeignet. Daher wurden im Teststand zu Beginn der Projektphase II nur optische Beobachtungen des Strömungsfeldes im Aufströmkanal durchgeführt. Alle weiteren Untersuchungen zur der Modul- und -durchströmung wurden daher in der Pilotanlage durchgeführt.

4. Numerische Strömungssimulation

Die numerischen Simulationen bezogen sich im Wesentlichen auf 2 unterschiedliche Zielstellungen, welche die Betrachtung unterschiedlicher Skalen erforderte. Zum einen wurde die gesamte Zirkulationsströmung im Reaktor untersucht, zum anderen standen die lokalen Strömungsphänomene unmittelbar an der Membran im Vordergrund.

Für die Simulation der Zirkulationsströmung mit dem Euler-Euler Modell wurde die kommerzielle CFD-Software CFX10/11 der Firma ANSYS.Inc verwendet. Dabei bestand die Zielstellung darin, den Zusammenhang zwischen der Zirkulationsgeschwindigkeit, der Belüftungsintensität und den geometrischen Abmessungen des Reaktors sowie des Membranmoduls zu quantifizieren. Außerdem sollte eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Gasblasen im Membranmodul erreicht werden. Entsprechend den geometrischen Abmessungen des Versuchsaufbaus aus der Phase I des Projekts wurde zunächst ein 2-dimensionales Modell erstellt. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen des ISA erfolgte eine erste Bewertung der Simulationsergebnisse, um die Auswahl der numerischen Modelle, der Randbedingungen, der Solverparameter und der Gitterauflösung zu beurteilen. Die Simulationen wurden zunächst für das Stoffsystem Wasser/Luft und anschließend analog zu den Untersuchungen am ISA für Glycerinlösung und Luft durchgeführt.

Bei der Auswertung der numerischen Ergebnisse zeigte sich, insbesondere für den Gasgehalt, eine starke Abhängigkeit von der vorgegebenen Blasengröße. Da zu diesen beiden Größen keine detaillierten experimentellen Ergebnisse vorlagen, wurde am IVT in Berlin ein quasi 2-dimensionaler Versuchstand mit transparenten Wänden gebaut. Damit war es möglich, die notwendigen Angaben zur Blasengröße und zum Gasgehalt für verschiedene Betriebsbedingungen (Belüftungsintensität, Füllstand und Flächenverhältnis Downcomer/Riser) zu ermitteln. Zusätzlich konnte die Verteilung der Gasblasen im Modul direkt beobachtet werden. Für die Messung der Geschwindigkeiten wurde ein Flügelradanemometer sowie die Particle Image Velocimetry (PIV) genutzt. Somit standen umfangreiche experimentelle Daten für die Validierung der Simulationsergebnisse zur Verfügung, so dass die weiteren numerischen Untersuchungen auch für den transparenten Versuchsaufbau durchgeführt wurden.

Um den Zusammenhang zwischen der Überströmung der Membran und dem Permeatfluß zu bestimmen wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Mit der Zielstellung, die optimale Überströmgeschwindigkeit und Belüftungsintensität zu ermitteln, erfolgten Versuche an einer begasten Testzelle mit belebtem Schlamm und dem Membranmaterial des Moduls. Für unterschiedliche Leerrohrgeschwindigkeiten der Luft und des Schlammes wurde der kritische Fluss durch Auswertung der transmembranen Druckdifferenz bei schrittweise ansteigenden Permeatflüssen bestimmt. Basierend auf den Geschwindigkeitsprofilen der entsprechenden CFD-Simulationen wurden die hydrodynamischen Kräfte für repräsentative

Partikeldurchmesser berechnet und die Wirksamkeit der hydrodynamischen Bedingungen für die Deckschichtkontrolle bewertet.

Um die Frage nach dem optimalen Abstand zwischen den Membranplatten und der verwendeten Blasengröße zu beantworten, erfolgten numerischen Simulationen der Strömung zwischen den Membranplatten wurden mit der CFD-Software FLUENT und der Volume of Fluid Methode (VOF) durchgeführt. Als Bewertungskriterium diente die maximale Wandschubspannung in der Nähe bzw. im Nachlauf der aufsteigenden Blasen. Zur Validierung der numerischen Ergebnisse wurden die Aufstiegsgeschwindigkeiten von Einzelblasen im Bereich von 3 bis 15 mm Durchmesser zwischen Platten mit einem Abstand zwischen 3 und 11 mm in ruhendem Wasser mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gemessen.

5. Numerische Optimierung

Die im Antrag formulierte Zielstellung, eine Optimierung der Reaktor- oder der Modulgeometrie durch die Kopplung zwischen der numerischen Strömungssimulation und einem evolutionärem Optimierungsalgorithmus zu realisieren, wurde wegen des hohen Zeitaufwandes dieser Methode und der begrenzten Aussagekraft der zu erwartenden Ergebnisse nicht verfolgt. Stattdessen wurde ein mathematisches Modell erstellt, mit dem die Zirkulationsströmung im Reaktor in Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen sowie den Betriebsparametern vorhergesagt werden kann. Der Vorteil des mathematischen Modells besteht insbesondere darin, dass auch nach Abschluss des Projektes und ohne weitere zeitaufwendige CFD-Simulation eine systematische Optimierung mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden kann.

Basierend auf dem von Chisti 1989 veröffentlichten Modell für die Berechnung der Zirkulationsströmung in Schlaufenreaktoren ohne Einbauten wurde eine Erweiterung für die Konfiguration mit Plattenmembranmodulen in der Aufstiegsregion formuliert.

Dazu wurde der Strömungswiderstand des Membranmoduls in Abhängigkeit von dessen Abmessungen in die Berechnung der Zirkulationsgeschwindigkeit mit einbezogen. Eine weitere Modifikation des mathematischen Modells von Chisti betrifft die Ermittlung des Gasgehalts in der Abstiegsregion des Schlaufenreaktors. Die numerischen und experimentellen Untersuchungen zeigten, dass die von Chisti verwendete lineare Beziehung zwischen dem Gasgehalt in der Aufstiegs- und der Abstiegsregion zu starken Abweichungen bei der Berechnung der Zirkulationsgeschwindigkeit in Membranbioreaktoren führt. Deshalb musste ein neuer Ansatz für den Gasgehalt in der Abstiegsregion gefunden werden, der das Verhältnis der Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen zur mittleren Geschwindigkeit der Flüssigkeit berücksichtigt. Mit dem entwickelten mathematischen Modell konnte die Zirkulationsgeschwindigkeit in guter Übereinstimmung mit den experimentellen bzw. numerisch ermittelten Werten berechnet werden.

6. Weiterentwicklung des Moduls

Neben der Beurteilung der mechanischen Stabilität, der Modulgeometrie und Standzeit der Membran - sofern in dem Projektzeitraum möglich - der entwickelten Prototypen sollen Betriebsstrategien zur Erhaltung bzw. Verbesserung der Filtrationsleistung sowie Weiterentwicklungen in der Modulfertigung ermittelt und erprobt werden.

7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Der Nachweis der Wirtschaftlichkeit erfolgt über die Betrachtung/Ermittlung der

- Herstellkosten
- Betriebskosten
- Membranstandzeit

anhand der in diesem Projekt ermittelten Kenngrößen bzw. Betriebsstrategien auf Grundlage der Ergebnisse der halbtechnischen MBR-Pilotierung.

5 Anlagenbeschreibung

Es standen zwei Anlagen zum Testen der A3-Module zur Verfügung: Der vom ISA entwickelte Modulteststand aus der ersten Projektphase und eine neue, halbtechnische Pilotanlage, die von A3 GmbH für die zweite Phase gebaut wurde. Des Weiteren betreibt die A3 GmbH die großtechnische MBR-Containeranlage der LINEG (Linksniederrheinischen Entwässerungs-Genossenschaft) auf der Kläranlage Xanten-Vynen. Aus dem Betrieb dieser Anlage konnten weitere Erkenntnisse bezüglich der im Projekt zu untersuchenden Aspekte gewonnen werden, welche in den Bericht einfließen konnten.

Am Institut für Verfahrenstechnik der TU Berlin wurden experimentelle Untersuchungen an einer begasten Membrantestzelle sowie an einem 2D-Modell eines Schlaufenreaktors durchgeführt

5.1 Beschreibung des labortechnischen A3-Modulteststandes

Zur Untersuchung der Modulplattenüberströmung und des In-situ-Reinigungsverhalten von Einzelmodulplatten wurde von der A3 GmbH ein labortechnischer Modulteststand entwickelt und ergänzend zu den halbtechnischen Versuchen betrieben. In den Teststand kann eine einzelne Membranplatte eingesetzt und bei optionaler Belüftung betrieben werden.

5.2 Beschreibung des halbtechnischen Modulteststandes des ISA

Während der ersten Projektphase wurden am ISA an dem Prototyp des Membranfiltrationsmoduls A40 Geschwindigkeitsmessungen zur Bestimmung der Durchströmungsverhältnisse durchgeführt (siehe Projektbericht zur Phase I). In der zweiten Phase stand ein auf Basis des A40-Moduls weiterentwickelter und größerer Modultyp M70 für die Untersuchungen zur Verfügung. Die

verschiedenen Abmessungen der Module A40 und M70 werden in Tabelle 5-1 zusammengestellt. Der Bodenabstand bezeichnet dabei den Abstand des Aufströmkanals vom Boden.

Der Teststand besteht aus einem Filtrationscontainer und einem Steuerpult, an dem Pumpe, Belüfter, Messtechnik, Datenerfassung und Steuerung untergebracht sind (Bild 5-1). Damit ist gewährleistet, dass der Teststand an andere Standorte verbracht werden kann.

Der Teststand ist 2,10 m hoch und hat eine Grundfläche von 1 m². Für Tests an zwei übereinander aufgestellten Modulen des Prototypen A40 (Doppeldeckermodul) kann der Container durch einen Aufsatz um 0,9 m auf eine Höhe von 3 m aufgestockt werden (Bild 5-1).

Tabelle 5-1: Modulabmessungen von A40 und M70

		Länge [m]	Breite [m]	Höhe [m]
A40	Bodenabstand	-	-	0,150
	Aufströmkanal	0,600	0,550	0,450
	Modul	0,600	0,550	0,820
	<i>Gesamthöhe einfaches Modul:</i>			<i>1,420</i>
	<i>Gesamthöhe Doppeldeckermodul:</i>			<i>2,240</i>
M70	Bodenabstand	-	-	0,300*
	Aufströmkanal	745	710	0,440
	Modul	745	710	1,097
	<i>Gesamthöhe einfaches Modul:</i>			<i>1,837</i>
	<i>Gesamthöhe Doppeldeckermodul:</i>			<i>2,934</i>

* Da für die Standfestigkeit des Moduls in der Pilotanlage eine Bodenplatte aus Beton erforderlich ist, beträgt die frei durchströmbare Höhe rund 0,200 m

Für das M70 ist bei der Betrachtung eines Doppeldeckers eine größere Höhe erforderlich, da zwei Module M70 einschließlich Aufströmkanal schon eine Höhe von 2,93 m erreichen. Für Modulüberdeckung und Freibord sind daher bis zur Behälteroberkante nur noch rund 12 cm vorhanden. Das ist bei einer übliche Überdeckung von 20 cm und einem dann noch erforderlichen Freibord von mindestens 20 cm nicht ausreichend. Da in der Phase II des Projektes auch noch eine Pilotanlage zur Verfügung stand, die auf das neue Modul M70 ausgelegt ist, wurde auf einen Umbau des Teststandes sowie Versuche mit Abwasser im Teststand verzichtet.

a) Technikstand, im Hintergrund: nicht aufgestockter Teststand



b) auf 3 m aufgestockter Teststand

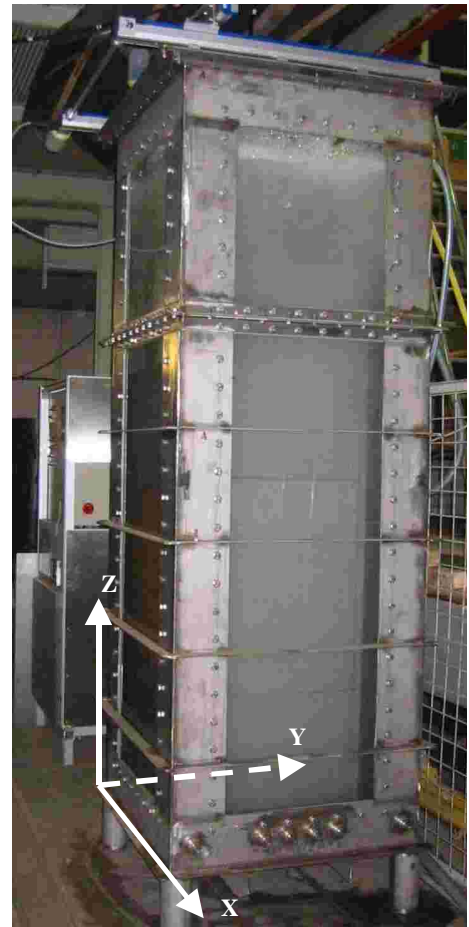


Bild 5-1: Technikstand und Teststand am ISA

5.3 Beschreibung der halbtechnischen A3-MBR-Pilotanlage

Zur Behandlung eines kommunalen Abwasserstroms wurde ein halbtechnischer Membranbioreaktor von der A3 GmbH gebaut und auf dem Versuchsfeld des ISA Aachen auf dem Gelände der Abwasserreinigungsanlage Aachen-Soers betrieben.

Die Pilotanlage verfügt über einen Abwasservorlagetank, eine Variozone — die entsprechend der geforderten Betriebsweise als vorgeschaltete Denitrifikationszone, intermittierende Denitrifikations- und Nitrifikationszone oder als zusätzliche Nitrifikationszone betrieben werden kann — einen Filtrationstank und einen Filtratvorlagetank (siehe Bild 5-2).

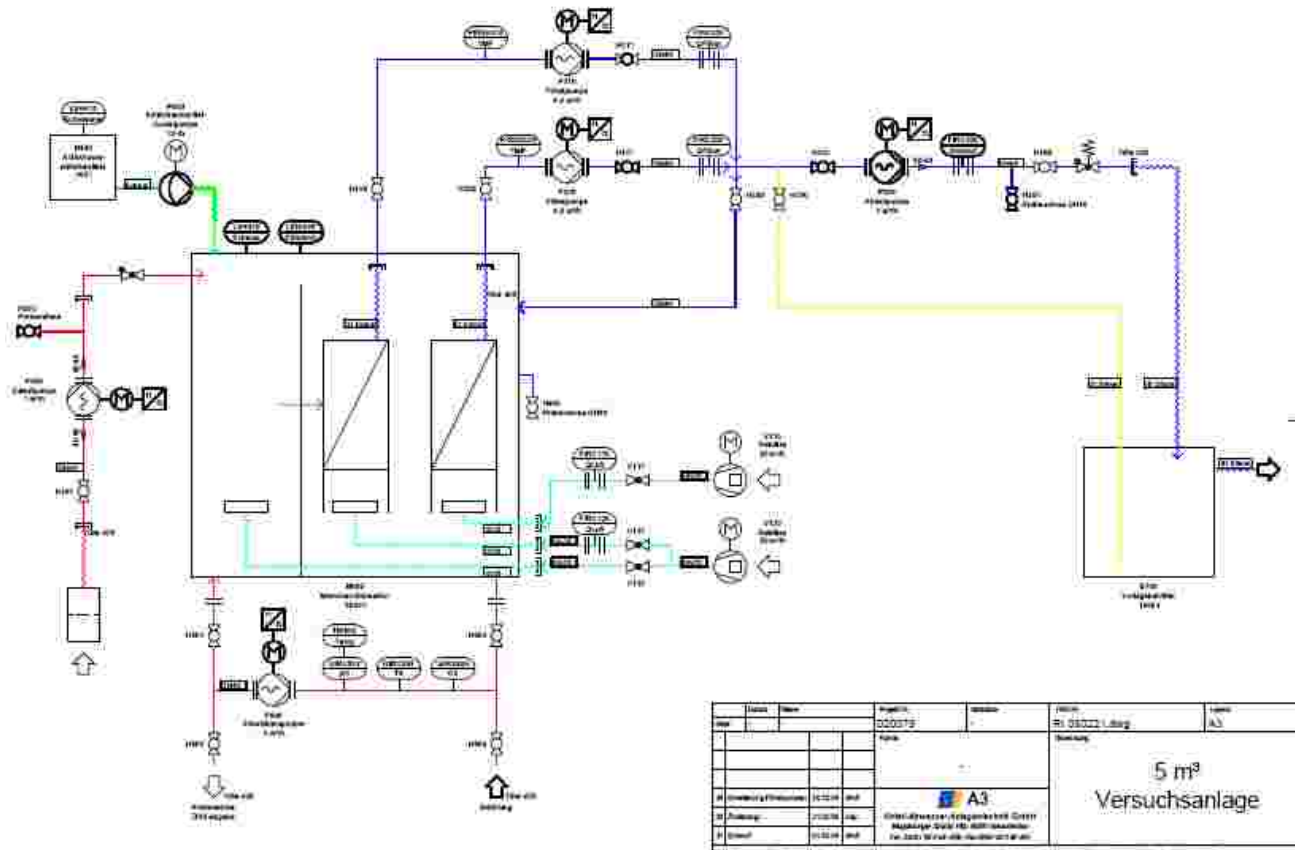


Bild 5-2: RI-Fließbild der halbtechnischen Pilotanlage

Die Abwasservorlage wurde mit dem Ablauf der Vorklärung der Abwasserreinigungsanlage (ARA) kontinuierlich beschickt. Eine 2 mm Lochsiebeinheit im Anlagenzulauf verhinderte den Eintrag partikulärer, abrasiver Stoffe in den Membranbioreaktor. Eine homogene Durchmischung des Anlagenzulaufs wurde durch ein Rührwerk sichergestellt.

Die Variozone mit einem Volumen von 2,5 m³ ermöglicht je nach geforderter Betriebsweise die Einstellung von Volumenverhältnissen von Denitrifikation zu Nitrifikation von 1:3.

Im Filtrationstank mit einem Volumen von 5,5 m³ sind zwei MMF-Membranstufen M70 ausgeführt als Doppelstockmodule mit einer Membranfläche von jeweils 140 m² eingesetzt und autark betrieben worden.

Die Beschickung der Pilotanlage erfolgte füllstandsgesteuert aus der kommunalen Abwasservorlage über die Variozone, die im Rahmen dieses Projektes als belüftete Variozone genutzt wurde, um eine Direktfiltration unbehandelten Abwassers durch Kurzschlussströmungen im Reaktor auszuschließen.

Die Entkopplung der Tageszulaufkraft (CSB-Raum- bzw. Schlammbelastung) von der Filtrationsleistung der Membranstufe erfolgte durch eine Rückführung des Filtrats in die Variozone.

Die technischen Kenngrößen der Pilotanlage sind in aufgeführt:

Tabelle 5-2: Technische Kenngrößen der Pilotanlage

Anlagenteil	Einheit	Größenbereich
Vorlage		
Volumen des Vorlagetanks (V_{Vorlage})	L	300
Vorsiebung (Lochsiebeinheit)	mm	2
Biologische Stufe		
Variozone (V_{Vario})	m ³	2,5
Filtrationstank (V_{Filt})	m ³	5,5
Membranstufe		
Porenweite	µm	0,1
Membranfläche	m ²	280
Leistungsbereich Membranstufe	L/(m ² *h)	15 – 30
Modulbelüftung	Nm ³ /m ²	0,2 – 0,25

Zur Erfassung der relevanten Betriebsgrößen ist die Pilotanlage mit Sonden zur Füllstands-, Temperatur-, Prozessdruck-, Sauerstoff-, pH-Wert- und TS-Messung ausgestattet. Die Datenerfassung erfolgte online mittels eines Datenloggers, der über eine Funkmodemverbindung verfügte. Änderungen von betriebssteuernden Grenzwerten erfolgten ebenfalls über die Modemverbindung. Zusätzlich wurden relevante Betriebsgrößen im Zuge der Anlagenwartung handschriftlich protokolliert. Auf Basis der in Tabelle 5-3 angegebenen Betriebsdaten war eine weitgehende Auswertung des Anlagenbetriebs hinsichtlich der Belastungszustände, der Überschussschlammproduktion, der Reinigungsleistung sowie der Leistungsentwicklung der Membranstufe möglich.

Der Aufbau der Pilotanlage auf dem Versuchsfeld des ISA sowie ein Doppeldeckermodul M70 sind in Bild 5-3 gezeigt. Bild 5-4 stellt in einem Schnitt die Abmessungen der Pilotanlage mit in der Anlage angeordnetem Doppeldeckermodul dar und zeigt die Modulordnung im Reaktor. Die Module wurden so angeordnet, dass die Umwälzung des Belebtschlammes durch den Lufteintrag nur auf einer, nicht begrenzten Seite möglich ist, während eine Umwälzung des Schlammes durch die Aufstellung in unmittelbarer Wandnähe nicht möglich ist. Die Modulordnung erfolgte im Hinblick auf den Einsatz von „Multimodulen“, bei denen mehrere Modulblöcke direkt nebeneinander angeordnet werden.

Tabelle 5-3: Erfasste Betriebsdaten und Art der Aufzeichnung/Dokumentation

Zweck	Größe	Erfassung/ Dokumentation
Hydraulische Bilanzierung	Zulaufmengen	MID / online
	Ablaufmengen	MID / online
	Rezirkulations-volumenströme	MID / online
	Überschuss-schlammmentnahmen	Auslitern / bei Entnahme
	Füllstand - BR	Drucksonde / online
Betriebsdaten Membranstufen	Permeatvolumenstrom	MID / online
	Prozessdruck	Drucksonden / online
	Lauf-/ Pausenzeiten	-/-
	Membranbelüftung	Schwebekörperdurchflussmesser / täglich
Betriebsdaten Bioreaktor	O ₂ -Gehalt	Messsonden / online
	pH-Wert	Messsonde / online
	Belüftungsvolumenstrom	Schwebekörperdurchflussmesser / täglich
	Temperatur	Messsonde / online
	TS-Gehalt	Messsonde / online

a) Aufbau der Pilotanlage



b) Doppeldecker M70 mit Aufströmkanal



Bild 5-3: Pilotanlage (a) und Doppeldeckermodule M70 (b)

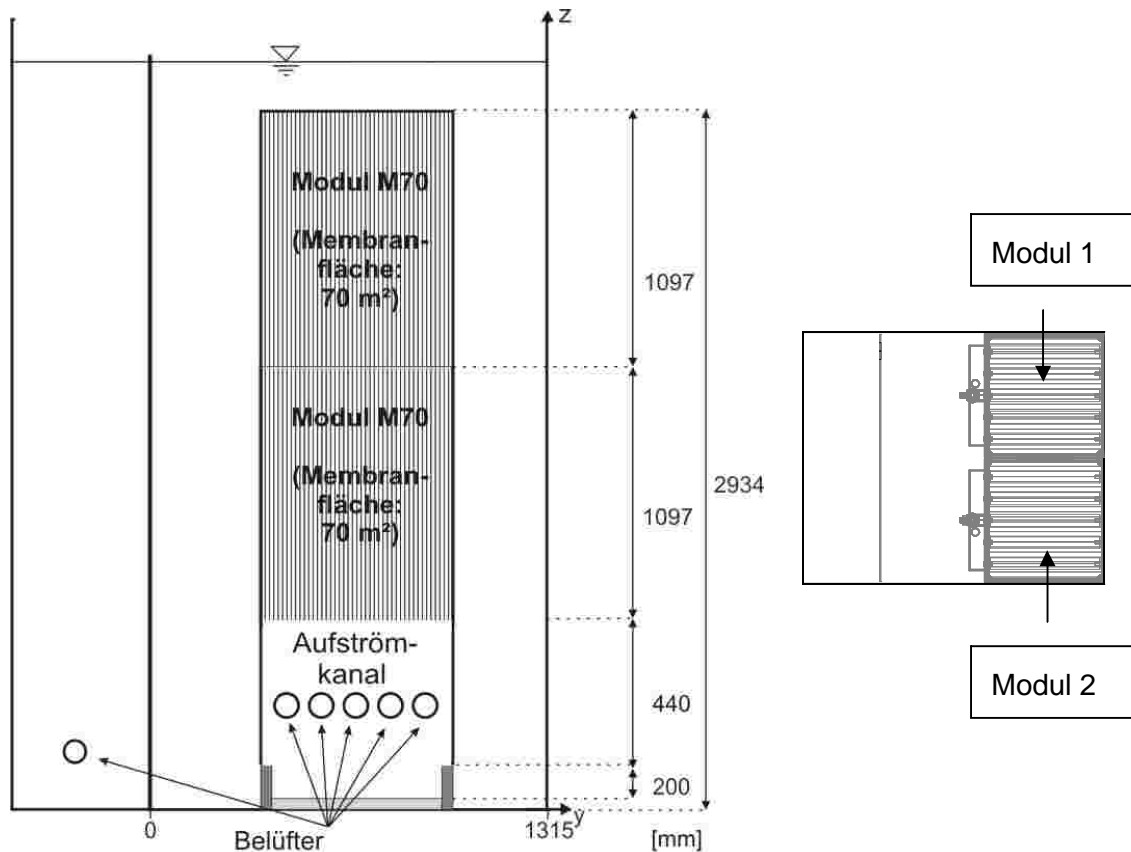


Bild 5-4: Pilotanlage mit Doppeldecker M70(links) und Anordnung der Module im Reaktor (rechts)

Aufgrund der Ergebnisse bezüglich der besseren Energieverwertung von Doppeldeckermodulen gegenüber Einzelmodulen wurde in der Projektphase II in der Pilotanlage nur mit Doppeldeckermodulen gearbeitet. Die Anlagenhöhe erlaubt den Einbau von zwei Doppeldeckermodulen des M70. Strömungstechnische Versuche in der Pilotanlage wurden alle mit einem oder zwei Doppeldeckermodulen durchgeführt. Die Untersuchungen bezüglich Betriebsbedingungen und Reinigungskonzepte erfolgten mit zwei Doppeldeckermodulen.

5.4 Beschreibung der großtechnischen MBR-Containeranlage LINEG

Auf dem Gelände der Kläranlage Xanten-Vynen der Linksniederrheinischen Entwässerungs-Genossenschaft (LINEG) betreibt die Firma A3 eine Pilotanlage nach dem Membranbelebungsverfahren mit einer Kapazität von ca. 2.000 EW. Die Membranbelebungsanlage ist als Containeranlage ausgeführt. Zur Erhöhung des Sauerstoffeintrags und zur Vergrößerung des Abbauvolumens, und damit der Aufenthaltszeit im Reaktor, pro Straße werden die Container in doppelstöckiger Bauweise ausgeführt. Dabei wird ein Aufbaucontainer auf das Basiscontainermodul aufgesetzt und dichtend verbunden.

Das zulaufende Wasser wird zunächst in einer bauseitigen Rechenanlage (6 mm) vorgereinigt. Hinter einem bauseitigen Sandfang wird, mit Hilfe einer Pumpe, das zu reinigende Abwasser

entnommen und über einen 2 mm Lochsieb zur neuen Membrananlage geleitet. Die Anlage wird im Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation betrieben.

Die Anlage verfügt über zwei Straßen, die unabhängig voneinander mit unterschiedlichen Betriebseinstellungen betrieben werden können, so dass ein direkter Vergleich veränderter Betriebskonzepte direkt möglich ist.

5.5 Membrantestzelle

Bei dem Versuchsaufbau in Bild 5-5 handelt es sich um einen Membranteststand, der im Fachbereich für Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Berlin entwickelt wurde. In die Membrantestzelle aus Plexiglas wird eine Membran mit einer Fläche von 7,5 cm x 21 cm eingespannt. Durch das Plexiglas hindurch lassen sich die Vorgänge in der Testzelle gut verfolgen.

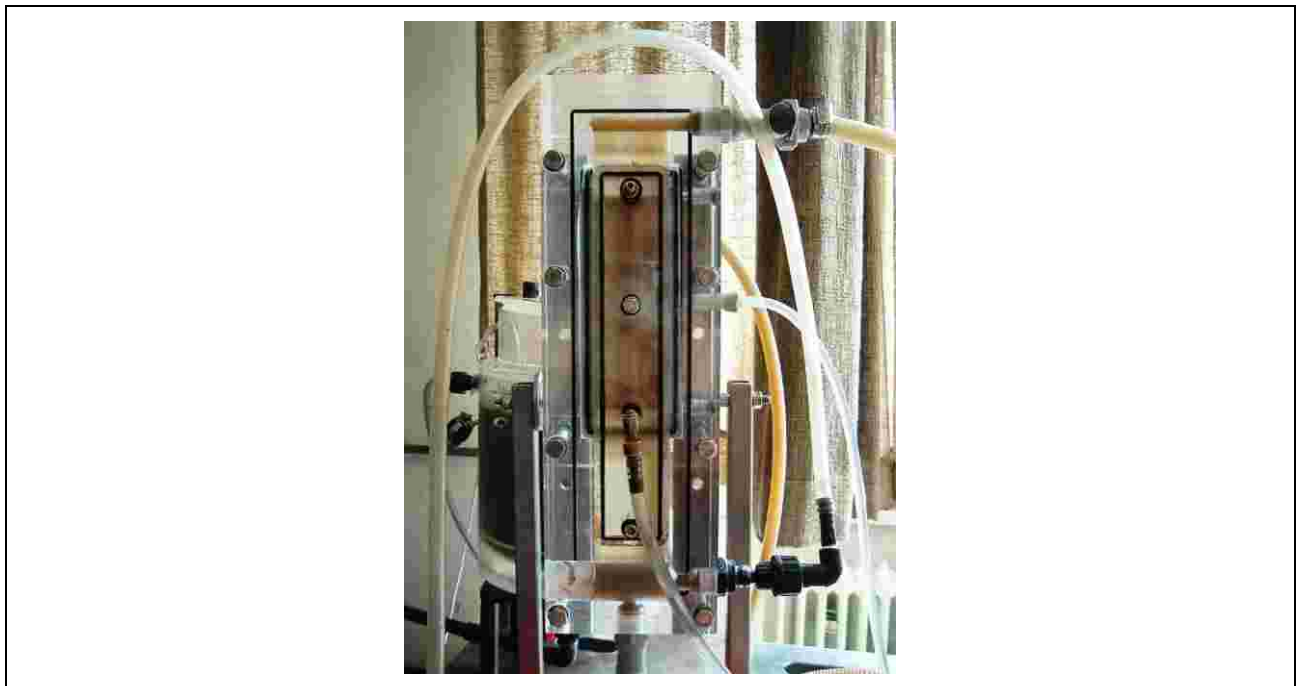


Bild 5-5: Membrantestzelle in vertikaler Position

Das Fließbild zu dem Versuchsaufbau zeigt das Bild 5-6. In einem Vorlagebehälter befinden sich ca. 6 L Belebtschlamm suspension, die mittels des Kühlwassers aus einem Thermostat über die doppelte Behälterwand auf einer konstanten Temperatur von 20°Celsius gehalten werden. Der Belebtschlamm wird von einer Schlauchpumpe mit Überströmgeschwindigkeiten von 20, 30 und 40 cm/s über die Membran gepumpt, wobei das Retentat im Kreislaufbetrieb oben aus der Testzelle über einen Schlauch wieder in den Vorlagebehälter zurückgeführt wird. Die Membrantestzelle wird vertikal beschickt, so dass der Feedstrom sie von unten nach oben durchströmt. Das Permeat wird aus der Permeatkammer hinter der Membran über eine weitere Schlauchpumpe abgezogen.

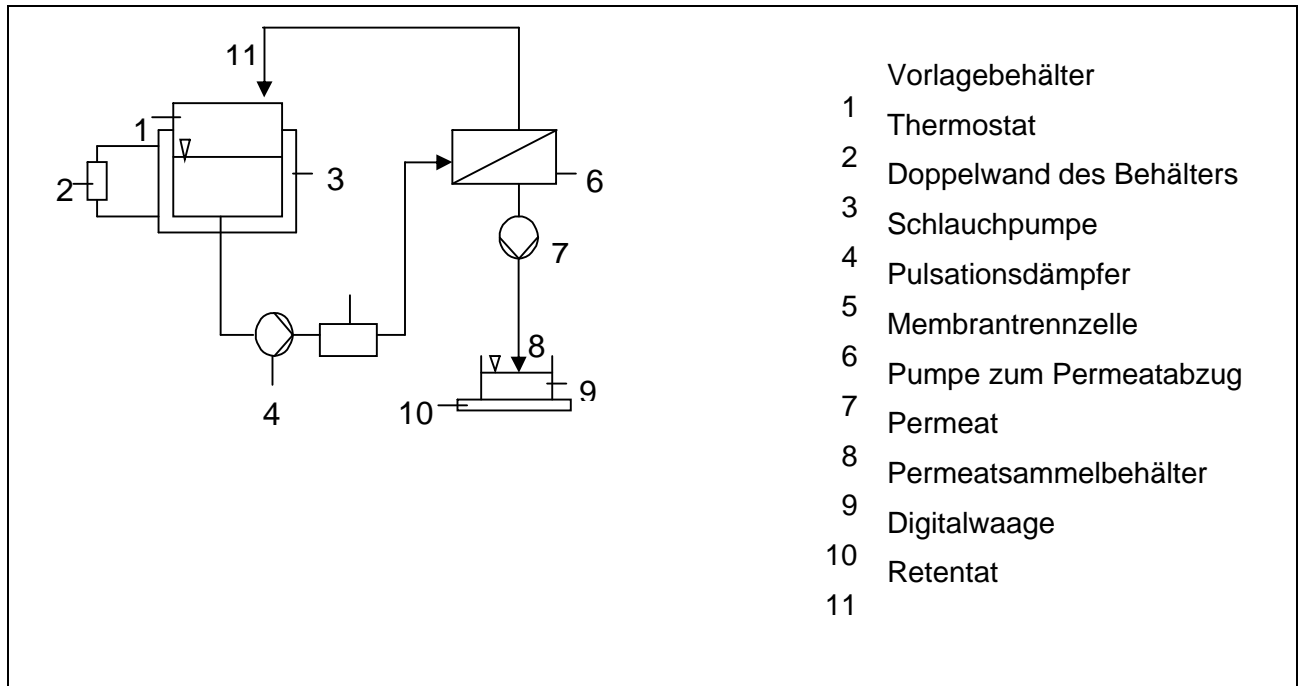


Bild 5-6: Fließbild des Versuchsaufbaus

Drucksensoren messen den statischen Druck vor der Membran (den Membrandruck) und hinter der Membran (den Permeatdruck). Alle Werte der Versuche werden elektronisch mit der Software Visual Designer aufgezeichnet. Die Software errechnet die Druckdifferenz zwischen den beiden Drücken. Diese Druckdifferenz so wie der Permeat- und der Membrandruck werden von dem Programm alle 5 Sekunden aufgezeichnet.

Die Spalthöhe der Membrankammer, durch die das Feed über die Membran hinweg strömt, beträgt 5 mm. Die Masse des Permeats wird mittels einer digitalen Waage gemessen und elektronisch an das Auswertungsprogramm weitergegeben.

Das Permeat wird über einen Schlauch von etwa 2 mm Durchmesser von einer Schlauchpumpe abgezogen und in einen Behälter auf der Digitalwaage gepumpt.

Vor den Versuchen werden die zugeschnittenen Membranen für zwei Stunden in vollentsalztem Wasser eingeweicht, um mögliche Chemikalien herauszulösen. Die Membran wird durch Gummidichtungen in der Testzelle in ihrer Position gehalten. Die effektiv genutzte Membranfläche beträgt 99 cm². Für jeden Versuch wurde eine neue

Membran verwendet, um definierte und vergleichbare Versuchsbedingungen zu erreichen.

5.6 2D-Modell eines Schlaufenreaktors

Die schematische Darstellung in Bild 5-7 zeigt das Modell eines quasi 2-dimensionalen Schlaufenreaktors, das verwendet wurde um den Einfluss verschiedener Parameter auf die Zirkulationsgeschwindigkeit zu untersuchen. Das Modell besteht aus zwei 2,5 cm dicken Plexiglasplatten, welche mit einem Abstand von 10 cm auf einen Stahlrahmen montiert wurden. Die

Abmessungen des Modells sind in Tabelle 5-4 wiedergegeben. Sie wurden so gewählt, dass die Flächenverhältnisse zwischen der Aufstiegs- und der Abstiegsregion dem Versuchsstand des ISA entsprechen. Durch die variable Anordnung von Trennwänden in der Abstiegsregion, wie in Bild 5-8 dargestellt, konnte dieses Flächenverhältnis verändert werden. Druckbohrungen in den Trennwänden ermöglichten die Bestimmung des Gasgehalts im Downcomer mit der Differenzdruckmethode. Das Messen der geringen Druckunterschiede erfolgte mit Hilfe von Betzmanometern. Die Belüftung des Reaktors wurde mit 3 Belüftern der Firma Envicon realisiert, wobei der Volumenstrom für jeden Belüfter gesondert mit Hilfe von Rotametern gemessen und mit Drehventilen eingestellt wurde. Das Plattenmembranmodul wurde als austauschbarer Verdrängungskörper ohne Filtereigenschaften ausgelegt.

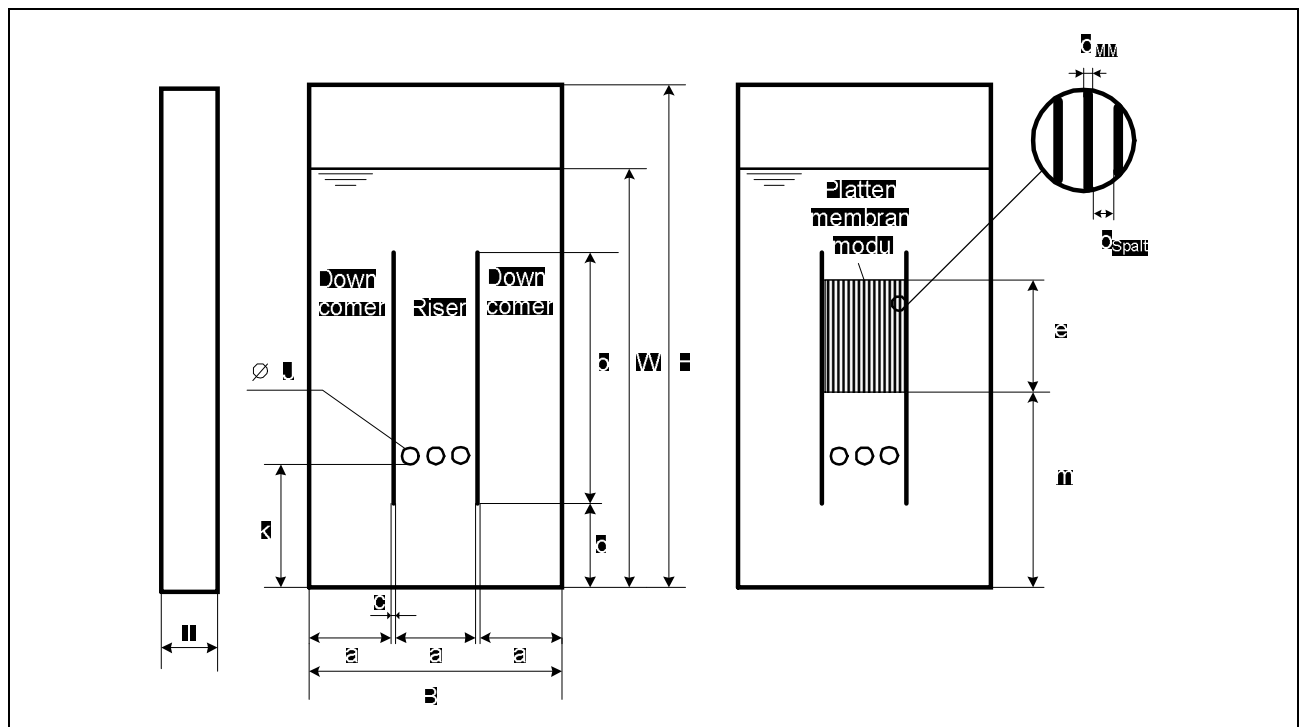


Bild 5-7: Schematische Darstellung des verwendeten Schlaufenreaktors

Tabelle 5-4: Abmessungen des Schlaufenreaktormodells

Bezeichnung	Beschreibung [Einheit]	Größe
B	Reaktorbreite [m]	1,095
H	Reaktorhöhe [m]	1,95
J	Durchmesser Belüfter [m]	0,067
T	Reaktor/Modultiefe [m]	0,1
W	Max. Wasserhöhe [m]	1,85
a	Wand/Trennwand - bzw. Trennwand / Trennwand Abstand [m]	0,355
b	Trennwandhöhe [m]	1,3
b _{Spalt}	Membranplattenabstand [m]	0,007
c	Trennwandbreite [m]	0,015
d	Trennwandabstand zum Boden [m]	0,2
d _{MM}	Membranplattendicke [m]	0,005
e	Membranplattenhöhe [m]	0,82
k	Bodenabstand des Belüfters [m]	0,35
m	Bodenabstand der Membranplatten [m]	0,6

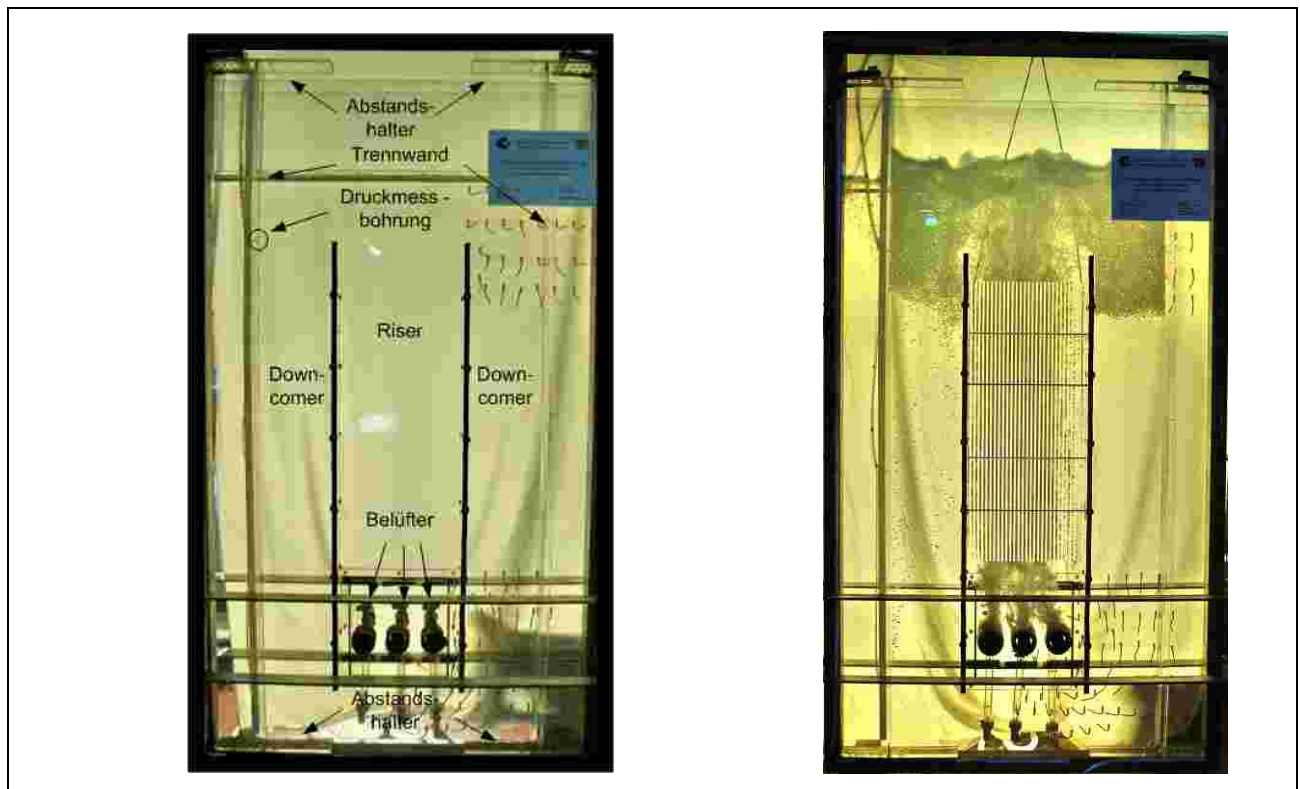


Bild 5-8: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Gasgehalts im Downcomer, ohne (links) und mit (rechts) Membranmodul

Der Gasgehalt im gesamten Reaktor wurde durch die Volumenänderung zwischen dem belüfteten und dem unbelüfteten Zustand ermittelt.

Um die sich einstellende Zirkulationsgeschwindigkeit für verschiedene Gasvolumenströme und Querschnittsflächenverhältnisse messen zu können, wurde ein Flügelradanemometer P670 der Firma Dostmann Electronic GmbH verwendet. Das Flügelrad wurde auf Wasser kalibriert und misst die Strömungsgeschwindigkeit in m/s. Da die Richtung der zu messenden Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zur Achse des Flügelrades liegen muss und das Flügelrad zur Messung von einphasigen Wasserströmungen kalibriert ist, wurde die Umlaufgeschwindigkeit wie in Bild 5-9 dargestellt am unteren Ende des Downcomers gemessen. Hier kann angenommen werden, dass die Strömung einphasig ist und die Geschwindigkeitsrichtung senkrecht zur Achse des Flügelrades steht.



Bild 5-9: Versuchsaufbau zur Messung der Zirkulationsgeschwindigkeit

Für die experimentelle Bestimmung der Aufstiegsgeschwindigkeit von Einzelblasen wurde in den Schlaufenreaktor ohne Membranmodul eine Platte mit Auslösevorrichtung parallel zur Frontplatte angeordnet, siehe Bild 5-10. Mit Hilfe von Distanzscheiben konnte der Abstand zwischen beiden Platten im Bereich von 3 bis 11 mm variiert werden. Die Luft wurde mit einer Spritze in einen Auffangbehälter dosiert, welcher nach der Koaleszenz zu einer Einzelblase über den Auslösemechanismus die Blase in den Spalt freigab. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera MV-D752 der Firma Photonfocus wurde der Blasenanstieg mit einer Aufnahmerate von 100 Bildern pro Sekunde gefilmt und auf einen PC übertragen. Dort wurden die Daten mit der Bildbearbeitungssoftware Image-Pro Plus 6 ausgewertet.



Bild 5-10: Position der Platte zur Bestimmung der Aufstiegs geschwindigkeit von Einzelblasen

Der Ablauf der Bildauswertung ist in Bild 5-11 dargestellt. Von den Aufnahmen einer Sequenz (b) wurde ein Referenzbild (a) ohne Blase subtrahiert, so dass in den bearbeiteten Bildern (c) nur noch die aufsteigende Blase dargestellt wird. Diese wird von einer Objektverfolgungsroutine erkannt und markiert (d). Die Blasenspur ergibt sich dann durch das Zusammenfügen der Bilder einer Sequenz (e). Die ermittelten Koordinaten der Blasen werden mit den entsprechenden Zeitschritten ausgegeben und ermöglichen so die Berechnung der Aufstiegs geschwindigkeit.

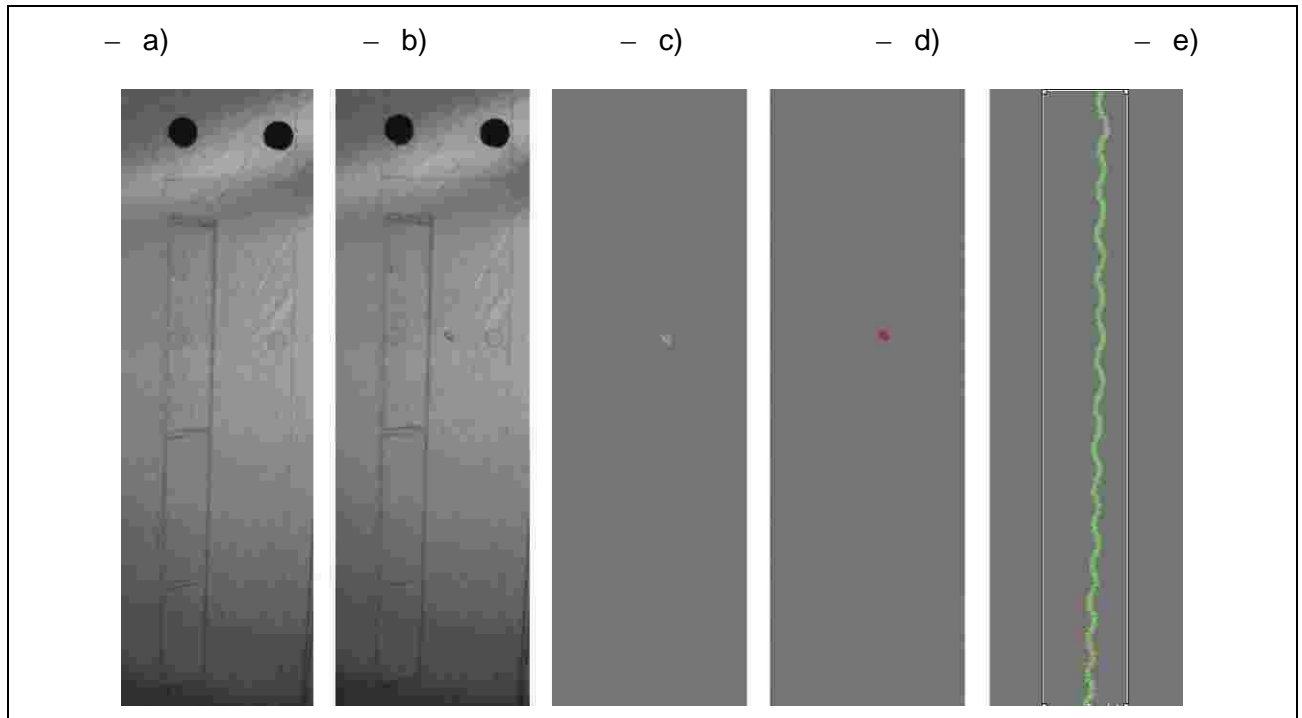


Bild 5-11: Abfolge der Bildauswertung zur Ermittlung der Aufstiegs geschwindigkeit von Einzelblasen

6 Entwicklung und Erprobung von Betriebskonzepten für das Filtrationsmodul

6.1 Untersuchung von Betriebskonzepten

In den Membranbioreaktor wurden zwei Membranmodule M70 002 als Doppelstockmodule mit einer Membranfläche von 140 m² parallel eingesetzt und autark betrieben. Beide Module wurden in einem Lauf-Pausenzeit-Zyklus von 8 Minuten Filtrationsdauer und 2 Pausenzeit Minuten betrieben.

Die CSB-Belastung des Abwasserzulaufs ist Tabelle 6-1 zu entnehmen.

Tabelle 6-1: CSB-Konzentration im Anlagenzulauf als 24-h-Mischproben

Parameter	Probenanzahl	MW in mg/L	85-Perzentil in mg/L
CSB	184	505	645

Die Entkopplung der Filtrationsleistung der Membranmodule bei variierenden Flüssen von 15 bis 30 L/(m²*h) von der Tageszulaufkraft wurde durch Rückführung von Filtrat in den MBR realisiert.

Die Betriebseinstellungen des Bioreaktors sind in Tabelle 6-2 aufgeführt:

Tabelle 6-2: Betriebseinstellungen des Bioreaktors

Parameter	Einheit	Betriebsbereich
pH-Wert	[-]	7 bis 8,5
O₂-Gehalt	[mg/L]	> 2
Temperatur Bioreaktor	[°C]	10 bis 27
Abwasserverweilzeit	[h]	8 bis 13
TS-Gehalt	[g/L]	8 bis 12
CSB-Schlammbelastung	[kg CSB/kg TS*d]	0,070 bis 0,100

6.1.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit und Permeabilitätsentwicklung der Module im flussgeregelten Betrieb

Inbetriebnahme/Einfahrphase I

Die Inbetriebnahme der halbtechnischen MBR-Anlage erfolgte Ende Februar 07 mit Belebtschlamm aus der konventionellen Kläranlage Aachen-Soers mit einem Start-TS-Gehalt von 10 g/L. Die Anlage wurde aus dem Abwasservorlagetank mit Ablauf Nachklärung der konventionellen Kläranlage Soers beschickt.

Eine Adaption des Belebtschlammes an das Abwasser erfolgte bis zum 03.04.07 über einen Zeitraum von 35 Tagen (ca.1 Schlammalter). Beide Module wurden flussgeregelt mit einem Bruttofluss von 30 L/(m²*h) betrieben. Dabei erfolgte bei Modul 1 von Beginn der Inbetriebnahme bis zum 02.04.07 eine tägliche Rückspülung (Backwash) mit Filtrat. Hierzu wurde über Drehrichtungsumkehr der Filtratpumpe eine vorgehaltene Filtratmenge mittels Drucküberwachung bis zur Vollfüllung der Membrantaschen gepumpt, wobei ein Maximaldruck von 50 mbar die sofortige Abschaltung der Filtratpumpe bewirkte. Modul 2 wurde nicht rückgespült. Ab dem 02.04.07 wurde die Rückspülung von Modul 1 dahin gehend modifiziert, dass neben den Rückspülungen mit Filtrat einmal pro Woche mit einer NaOCl-Reinigungslösung von 200 ppm rückgespült wurde (siehe Bild 6-1).

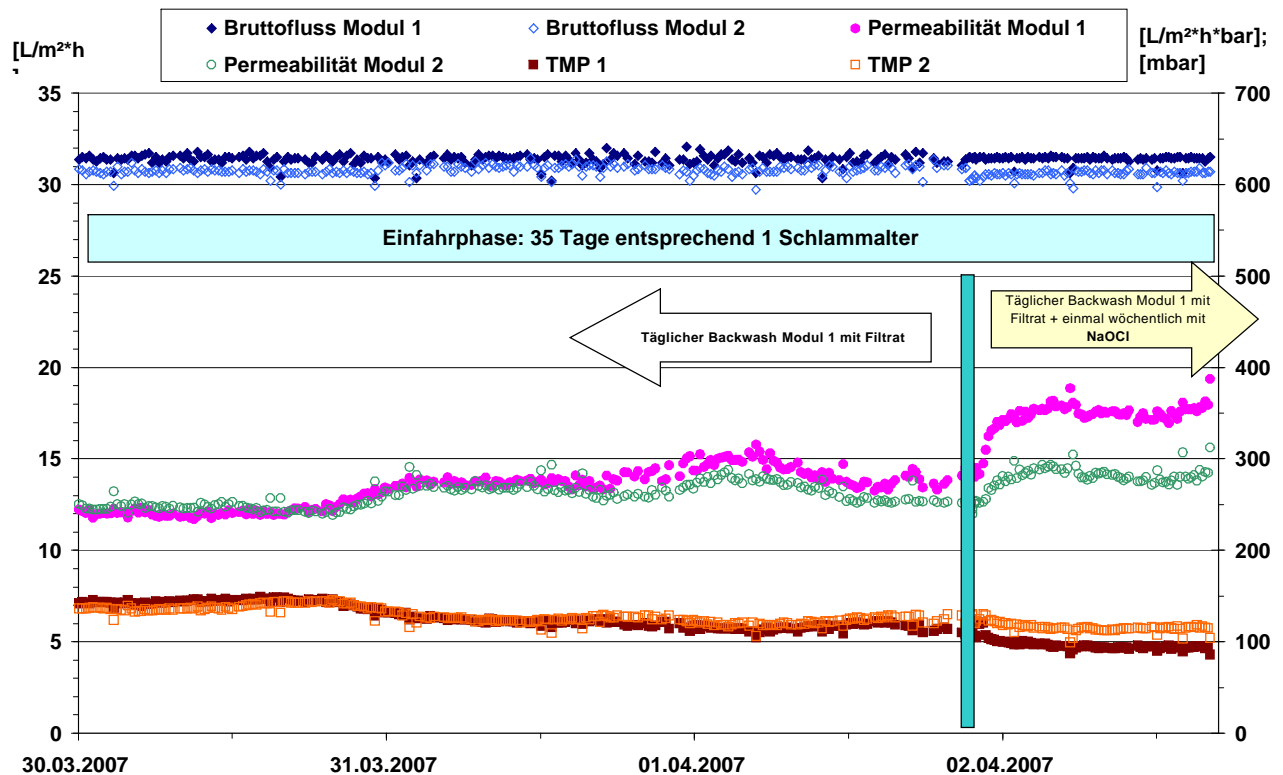


Bild 6-1: Hydraulische Betriebsdaten der Einfahrphase zur Schlammadaption

Ergebnis Einfahrphase/Inbetriebnahme I

Die Membranmodule wurde in der Einfahrphase mit unüblich hohen Flüssen $> 30 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ betrieben. Durch die nicht abgeschlossene Adaption des Belebtschlammes an die Abwassercharakteristik kann davon ausgegangen werden, dass in dieser Betriebsphase kein vollständiger Abbau der Organik erfolgte und damit Restorganik zu einer erhöhten Deckschichtbildung führte. Durch diesen eingestellten Worst-case-Betrieb konnten Auswirkungen des Rückspülbetriebs (Backwash) von Modul 1 im Vergleich zu Modul 2 in Hinblick auf die Permeabilität der Module untersucht werden.

Die Permeabilitäten beider Module lagen bis zum 02.04.07 in einem Bereich von 250 bis 300 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$. Ein signifikanter Einfluss der täglichen Rückspülung mit Filtrat von Modul 1 ist nicht erkennbar. Erst durch die Zugabe von 200 ppm NaOCl in das Rückspülfiltrat ab dem 02.04.07 konnte eine Erhöhung der Permeabilität von ca. 70 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ von Modul 1 im Vergleich zu Modul 2 erzielt werden (siehe Bild 6-1).

Fluss geregelter Filtrationsbetrieb

Im weiteren Versuchsbetrieb wurde der Fluss beider Module von 30 auf 15 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ reduziert und weiterhin lediglich Modul 1 rückgespült (analog zur Einfahrphase). Sukzessiv erfolgte eine Flussteigerung um jeweils 5 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ auf einen Endbruttofluss von 25 $\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Dadurch sollten Auswirkungen auf eine mögliche „Membranerholung“ bei veränderten Flüssen in Hinblick auf die

Permeabilität sowie der Einfluss der Rückspülung bei deutlich unterkritischem Fluss untersucht werden.

Ergebnis flussgeregelter Filtrationsbetrieb

Wie zu erwarten, führte die Reduzierung des Bruttoflusses von 30 auf 15 L/(m²*h) zu einer deutlichen Erhöhung der Permeabilitäten, bei Modul 1 > 800 und bei Modul 2 > 600 L/(m²*h*bar) (siehe Bild 6-2). Der Permeabilitätsunterschied beider Module lag für diesen Zeitraum bei 150 bis 200 L/(m²*h*bar), was einer Verdoppelung des Permeabilitätsunterschiedes des rückgespülten zu dem nicht rückgespülten Moduls im Vergleich zur Einfahrphase entspricht.

Eine Erhöhung des Flusses bei beiden Modulen auf 20 L/(m²*h) führte zu Permeabilitäten bei Modul 1 von ca. 700, bei Modul 2 von ca. 600 L/(m²*h*bar). Hier führte die Erhöhung des Bruttoflusses zu einer Reduzierung des Permeabilitätsunterschiedes zwischen beiden Modulen auf ca. 100 L/(m²*h*bar). Der Permeabilitätsunterschied von ca. 100 L/(m²*h*bar) blieb auch bei Erhöhung des Flusses auf 25 L/(m²*h) erhalten.

Während sich in den Betriebsphasen mit 15 und 20 L/(m²*h) konstante Transmembrandrücke einstellten, kam es in der Betriebsphase mit 25 L/(m²*h) zu einem Anstieg des Transmembrandrucks um ca. 12 mbar bei Modul 1 und ca. 20 mbar bei Modul 2 und daraus resultierend zu einer stetigen Abnahme der Permeabilität bei beiden Modulen. Eine Untersuchung des Belebtschlamm-Wasser-Gemisches am Ende der Betriebsphase mit 25 L/(m²*h) zeigte einen starken Befall des Schlammes mit Tubifex Tubifex. Es ist davon auszugehen, dass durch das Auftreten des Tubifex Tubifex eine negative Beeinflussung/Störung der Mischbiozönose Belebtschlamm eingetreten ist. So erfolgte beispielsweise keine vollständige Elimination der organischen Inhaltsstoffe durch Verdrängung des Belebtschlammes durch den Ringelwurm, wodurch es durch Restorganik zur erhöhten Deckschichtbildung auf der Membran kam. Eine anschließende Reduzierung des Flusses auf 20 L/(m²*h) führten zu Permeabilitäten bei Modul 1 von ca. 600, bei Modul 2 zu ca. 400 L/(m²*h*bar). Ein Vergleich der Permeabilitäten mit der Betriebsphase bei 20 L/(m²*h) vor dem Tubifex Tubifex-Befall zeigt eine Abnahme bei Modul 1 von ca. 100 L/(m²*h*bar), bei Modul 2 eine signifikante Abnahme von ca. 200 L/(m²*h*bar) (siehe Bild 6-2). Da die vor dem Befall erreichten Permeabilitäten nicht wieder erreicht werden konnten und daher von einer massiven Störung der Biozönose ausgegangen werden musste, wurde der Belebtschlamm am 24.04.07 gegen Belebtschlamm aus der konventionellen Kläranlage Aachen-Soers ausgetauscht und der MBR neu angefahren.

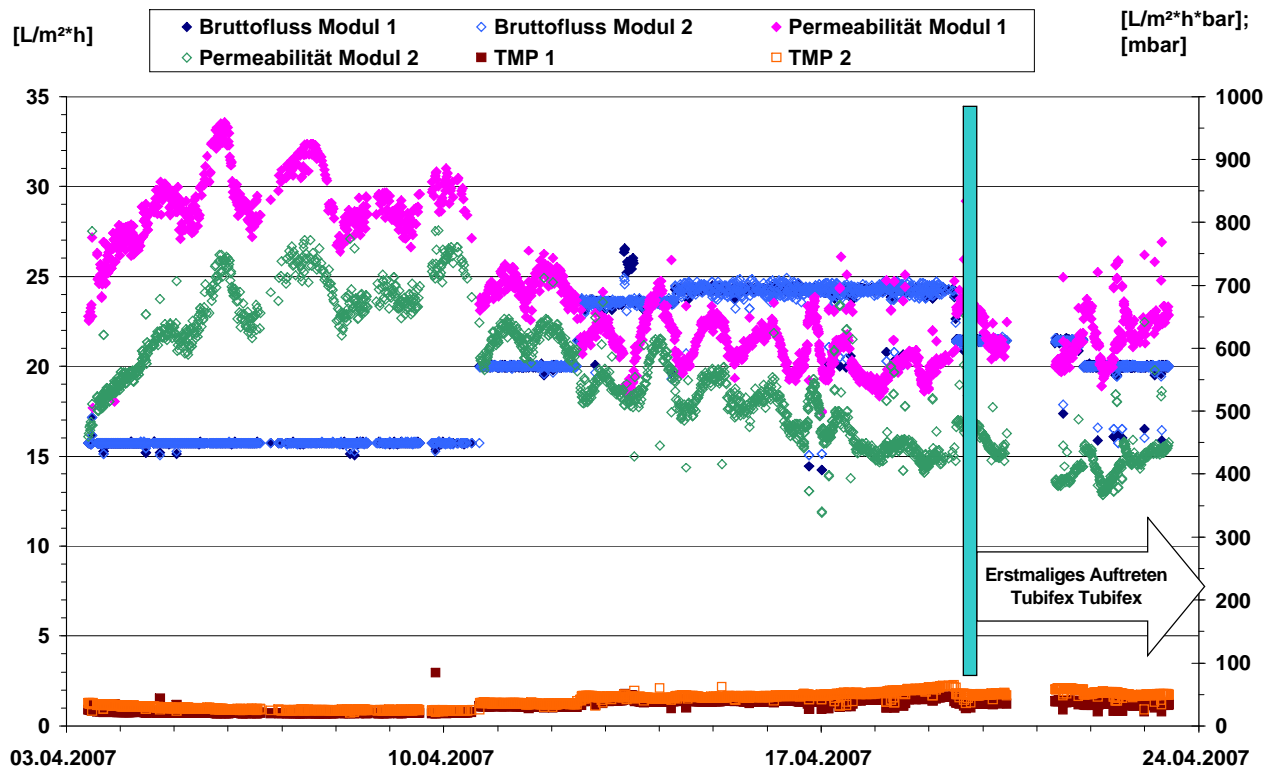


Bild 6-2: Hydraulische Betriebsdaten der flussgeregelten Betriebsphase

Zusammenfassung hydraulische Leistungsfähigkeit und Permeabilitätsentwicklung der Module im flussgeregelten Filtrationsbetrieb

Eine Inbetriebnahme der Membranmodule mit Flüssen > 30 L/(m²h) bei einem Transmembrandruck von 100-120 mbar führte in der Einfahrphase des MBR zu Permeabilitäten von 250 bis 300 L/(m²h*bar). Ein signifikanter Einbruch der Permeabilität konnte bei beiden Modulen nicht festgestellt werden.

Eine tägliche Rückspülung des Membranmodul 1 mit Filtrat zeigte im Vergleich zu dem nicht rückgespülten Membranmodul 2 keine signifikante Verbesserung der Permeabilität (siehe Tabelle 6-3). Die Rückspülung von Modul 1 wurde dahingehend modifiziert, dass einmal wöchentlich dem Rückspülfiltrat 200 ppm Natriumhypochlorit (NaOCL) zugegeben wurde, was einem maintenance cleaning entspricht. Dadurch konnte eine Permeabilitätssteigerung von ca. 70 L/(m²h*bar) von Modul 1 im Vergleich zu Modul 2 erreicht werden (siehe Tabelle 6-4).

Im weiteren flussgeregelten Filtrationsbetrieb wurden folgende hydraulische Kenngrößen ermittelt:

Tabelle 6-3 Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule – Modul 1 rückgespült mit Filtrat

		Modul 1 rückgespült Filtrat		Modul 2	
Betriebsdauer in d	Bruttofluss in L/(m ² *h)	Transmembrandruck in mbar	Permeabilität in L/(m ² *h*bar)	Transmembrandruck in mbar	Permeabilität in L/(m ² *h*bar)
35	30	120-140	i.M. 270	120-140	i.M. 270

Wie Tabelle 6-4 zu entnehmen, lag der Unterschied der Permeabilität des rückgespülten Moduls 1 zu dem nicht rückgespülten Modul 2 bei Bruttoflüssen ≤ 30 L/(m²*h) in einem Bereich von 70 bis 200 L/(m²*h*bar) in Abhängigkeit des eingestellten Flusses.

Das starke Auftreten des Ringelwurms Tubifex Tubifex im Belebtschlamm-Wasser-Gemisch führte zu einer Unterbrechung der stationären Betriebsphase und damit zu einem Austausch des Belebtschlammes mit konventionellem Belebtschlamm der Kläranlage Aachen-Soers und einer unplanmäßigen Neuinbetriebnahme des MBR.

Tabelle 6-4 Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule – Modul 1 rückgespült mit Filtrat + 1x/Woche 200 ppm NaOCl

		Modul 1 rückgespült Filtrat + 1x/Woche 200 ppm NaOCl		Modul 2	
Betriebsdauer in d	Bruttofluss in L/(m ² *h)	Transmembrandruck in mbar	Permeabilität in L/(m ² *h*bar)	Transmembrandruck in mbar	Permeabilität in L/(m ² *h*bar)
8	15	25	> 800	30	> 600
3	20	30	700	35	600
7	25	40	600	50	500
2	30	95	350	110	280

6.1.2 Hydraulische Leistungsfähigkeit und Permeabilitätsentwicklung der Module im druckgeregelten Betrieb

Inbetriebnahme/Einfahrphase II

Die Zweitbetriebnahme des MBR mit Belebtschlamm aus der konventionellen Kläranlage Aachen-Soers erfolgte am 24.04.2007 mit einem Start-TS-Gehalt von 8 g/L. Die Adaptionsdauer des Belebtschlamm-Wasser-Gemisches an das Abwasser betrug 30 Tage vom 24.4. bis 23.05.2007. Hierbei wurden beide Membranmodule druckgeregelt mit einem Transmembrandruck von 50 mbar betrieben. Weiterhin erfolgte bei Modul 1 eine tägliche Rückspülung mit einem 1x/Woche durchgeführten maintenance cleaning (200 ppm NaOCl), Modul 2 wurde nicht rückgespült (siehe 56.1.1).

Ergebnis Inbetriebnahme/Einfahrphase II

Im druckgeregelten Betrieb mit einem Transmembrandruck von 50 mbar wurden folgende hydraulische Betriebsdaten in der Zweitbetriebnahme ermittelt:

Zu Beginn der Zweitbetriebnahme hatten beide Membranmodule bei einer transmembranen Druckdifferenz von 50 mbar einen nahezu gleich hohen Bruttofluss von 26 bis 28 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von 520 bis 560 L/(m²*h*bar).

Tabelle 6-5 Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule in der Zweitbetriebnahme druckgeregelter Betrieb

Einfahrphase 30 d	Modul 1 rückgespült Filtrat + 1x/Woche 200 ppm NaOCl	Modul 2
Transmembrandruck [mbar]	50	50
Bruttofluss [L/(m²*h)]	28	26
Permeabilität [L/(m²*h*bar)]	560	520

Druckgeregelter Filtrationsbetrieb mit dynamischer Änderung der Zulaufhydraulik

Im weiteren Filtrationsbetrieb vom 23.5. bis 03.08.2007 wurden beide Membranmodule mit einer transmembranen Druckdifferenz von 50 mbar betrieben. Modul 1 wurde täglich mit Filtrat und 1x/Woche als maintenance cleaning (200 ppm NaOCl) rückgespült, wohingegen Modul 2 nicht rückgespült wurde. Die Rückspülung erfolgte mit einem Maximaldruck bis 50 mbar. Bei Modul 1 stellte sich bei konstanter transmembraner Druckdifferenz ein konstanter Bruttofluss von 28 bis 30 L/(m²*h) entsprechend einer Permeabilität von 600 L/(m²*h*bar) ein. Modul 2 filtrierte bis zum 27.05.07 mit einem vergleichbar hohen Fluss wie Modul 1 mit 26 bis 28 L/(m²*h) entsprechend einer Permeabilität von 560 L/(m²*h*bar). Nach einer Betriebsdauer von 35 Tagen incl. der

Einfahrphase kam es bei Modul 2 zu einem Rückgang des Bruttoflusses von 26 auf 22 L/(m²*h) bei gleicher transmembraner Druckdifferenz, was zu einem Permeabilitätsunterschied im Vergleich zu Modul 1 von 100 bis 200 L/(m²*h*bar) in Analogie zum flussgeregelten Betrieb führte (siehe Bild 6-3). Um die hydraulische Belastung der Membranmodule zu steigern, wurde ab dem 29.06.07 die transmembrane Druckdifferenz täglich für eine Zeitdauer von 2 Stunden (an 5 Tagen für eine Zeitdauer von 3 Stunden) von dem Betriebs-TMP von 50 mbar sukzessiv auf 70, 80 und 100 mbar gesteigert (siehe Bild 6-3) und nach Abschluss der hydraulischen Belastungsphase wieder mit einer transmembranen Druckdifferenz von 50 mbar weiterbetrieben. Dabei wurden die in Tabelle 6-6 aufgeführten Betriebsflüsse und –permeabilitäten erreicht.

Tabelle 6-6 Betriebsdaten der Membranmodule während der dynamischen Belastung

	Belastungsdauer 2 Stunden		
	Transmembrandruck in mbar	Bruttofluss in L/(m ² *h)	Permeabilität in L/(m ² *h*bar)
Modul 1	70	37	530
	80	41	510
	100	46	460
Modul 2	70	30	430
	80	33	410
	100	38	380

In Bild 6-4 ist der Verlauf des Filtratflusses und dem korrespondierenden Transmembrandruck des rückgespülten Modul 1 vor und nach einer hydraulischen Lastphase von 2 Stunden mit einem Transmembrandruck von 100 mbar dargestellt. Vor der hydraulischen Lastphase wurde bei einer transmembranen Druckdifferenz von 50 mbar mit einem spezifischen Fluss von ca. 25 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von ca. 500 L/(m²*h*bar), filtriert. Direkt nach Ende der Lastphase wurde bei einer transmembranen Druckdifferenz von 60 mbar mit einem spezifischen Fluss von ca. 24 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von ca. 400 L/(m²*h*bar), filtriert. Nach 20 Stunden druckgeregeltem Betrieb mit einem Transmembrandruck von 50 mbar lag der spezifische Fluss bei ca. 24 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von ca. 500 L/(m²*h*bar).

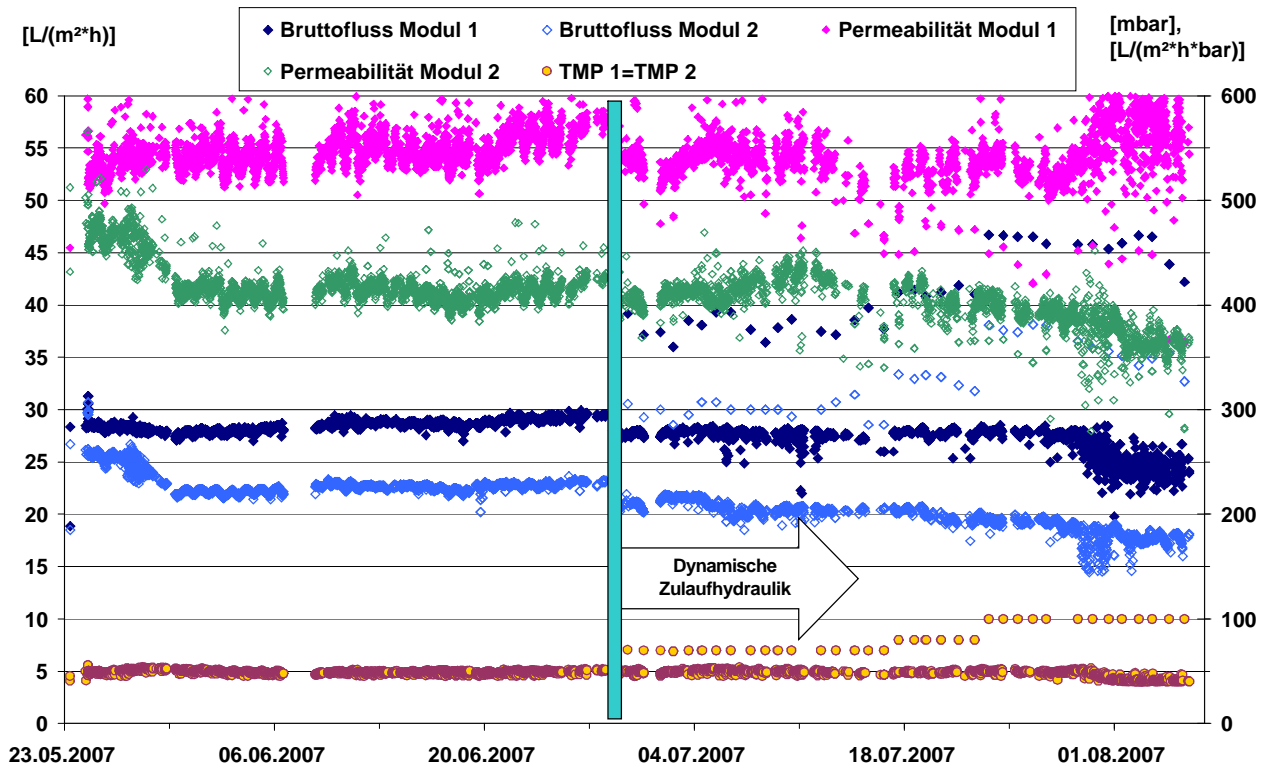


Bild 6-3: Hydraulische Betriebsdaten der druckgeregelten Betriebsphase mit dynamischer Zulaufhydraulik – Rückspülung Modul 1

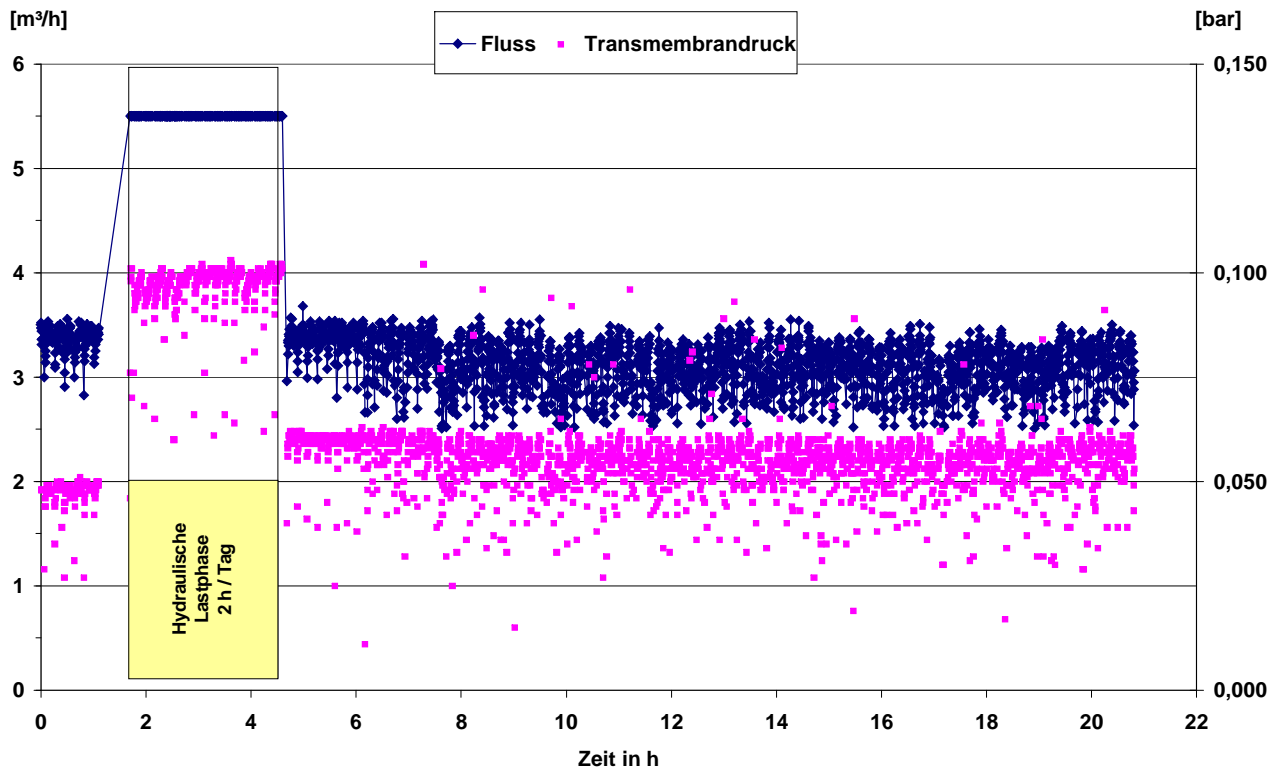


Bild 6-4: Entwicklung Flussleistung und Transmembrandruck nach der 2-stündigen hydraulischen Lastphase von Modul

Bild 6-5 zeigt den Verlauf des Filtratflusses und dem korrespondierenden Transmembrandruck des rückgespülten Modul 1 vor und nach einer hydraulischen Lastphase von 3 Stunden mit einem Transmembrandruck von 100 mbar dargestellt. Vor der hydraulischen Lastphase wurde bei einer transmembranen Druckdifferenz von 48 mbar mit einem spezifischen Fluss von ca. 25 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von ca. 520 L/(m²*h*bar), filtriert. Direkt nach Ende der Lastphase wurde bei einer transmembranen Druckdifferenz von 48 mbar mit einem spezifischen Fluss von ca. 23 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von ca. 480 L/(m²*h*bar), filtriert. Nach 24 Stunden druckgeregeltem Betrieb mit einem Transmembrandruck von 48 mbar lag der spezifische Fluss bei ca. 24 L/(m²*h), entsprechend einer Permeabilität von ca. 500 L/(m²*h*bar).

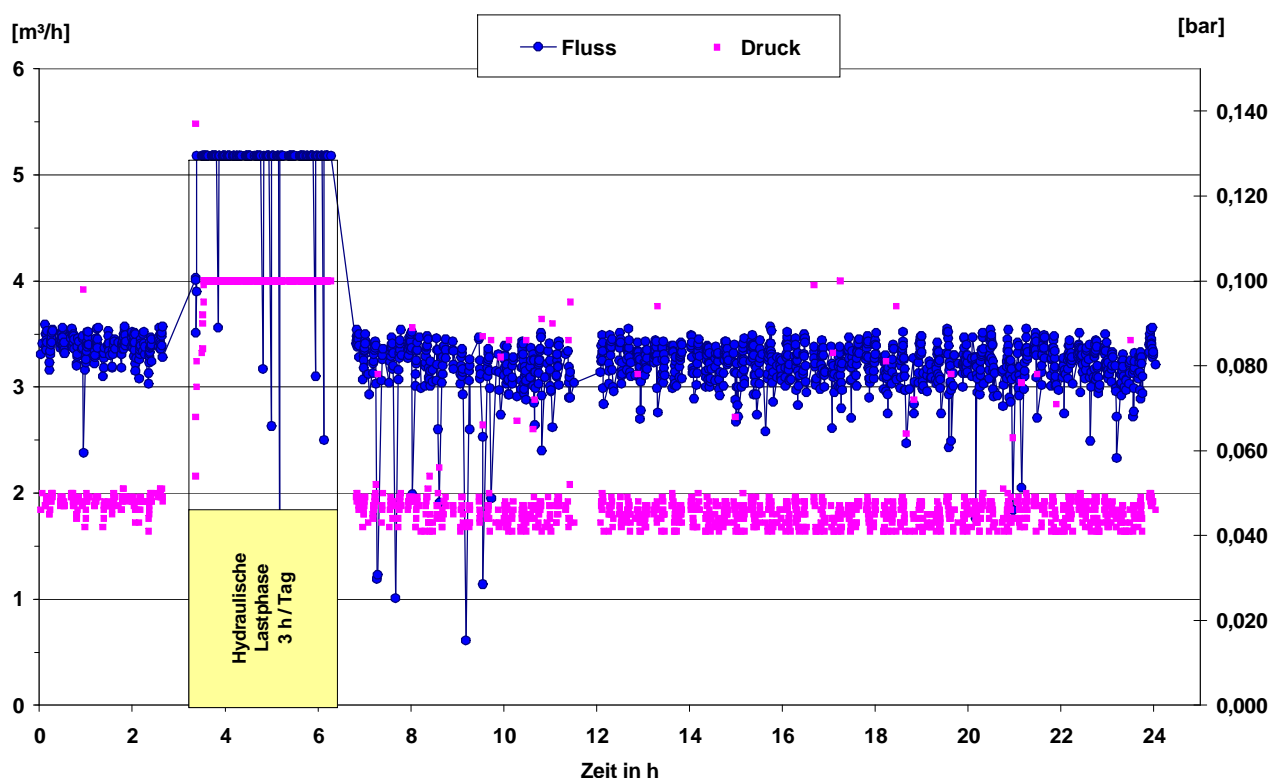


Bild 6-5: Entwicklung Flussleistung und Transmembrandruck nach der 3-stündigen hydraulischen Lastphase von Modul 1

Ergebnis durchgeregelter Filtrationsbetrieb bei Rückspülung Modul 1 unter hydraulischer Belastung

Bei dem rückgespülten Modul 1 fiel der Fluss von anfänglichen 30 L/(m²*h) zu Beginn der hydraulischen Belastung auf 25 L/(m²*h) bei transmembranen Belastungsdrücken von 100 mbar am Ende der Rückspülphase von Modul 1. Bei Modul 2 war eine Abnahme des Flusses von anfänglichen 22 L/(m²*h) auf 15 bis 17 L/(m²*h) gegeben. Bei beiden Modulen führte die 2-stündige Erhöhung des Flusses durch Einstellen einer transmembranen Druckdifferenz von 100 mbar um eine Abnahme des Bruttoflusses von 5 L/(m²*h).

Die hydraulischen Lastphasen mit transmembranen Druckdifferenzen von 100 mbar wurden für die Dauer von 2 bzw. 3 Stunden an 5 Betriebstage realisiert. Hierbei wurde das rückgespülte Modul 1 mit spezifischen Flüssen bis zu 46 L/(m²*h) (siehe Bild 6-4) filtriert. Ein Einbruch der Flussleistung bzw. der Permeabilität durch die tägliche hydraulische Laststeigerung für 2 bzw. 3 h wurde nicht festgestellt, vielmehr wurde nach 24-stündigem Filtrationsbetrieb die Flussleistung bzw. Permeabilität wie vor der Lastphase wieder erreicht.

Ergebnis durchgeregelter Filtrationsbetrieb bei Rückspülung Modul 2 unter hydraulischer Belastung

Am 06.08.2007 erfolgte eine Änderung des Betriebs der beiden Membranmodule dahingehend, dass folgend Modul 2 in Analogie zur Rückspülung von Modul 1 rückgespült wurde, während Modul 1 ohne Rückspülung filtrierte. Während bei Modul 1 ein konstanter Fluss von 25 L/(m²*h) im weiteren Filtrationsbetrieb erreicht wurde, war bei dem rückgespülten Modul 2 ein leichter Anstieg des Flusses von anfänglichen 15 L/(m²*h) auf 18 L/(m²*h) zu verzeichnen (siehe Bild 6-6). Der anfängliche Permeabilitätsunterschied von 100 bis 200 L/(m²*h*bar) zwischen dem zuvor rückgespülten Modul 1 und dem nicht rückgespülten Modul 2 konnte durch den betrieblichen Wechsel der Rückspülung von Modul 1 auf Modul 2 nicht erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass die betriebsbedingt ausgebildete Deckschicht auf Modul 2 durch den Rückspülbetrieb nur teilweise vermindert bzw. abgetragen werden konnte und daher weniger effektiv bzgl. der Deckschichtkontrolle wie bei Rückspülung einer Membran ohne Deckschicht war.

Zusammenfassung hydraulische Leistungsfähigkeit und Permeabilitätsentwicklung der Module im druckgeregelten Betrieb

Eine Inbetriebnahme der Membranmodule mit einer transmembranen Druckdifferenz von 50 mbar führte in der Einfahrphase des MBR bei beiden Modulen zu Flüssen von 26 bis 28 L/(m²*h), entsprechend zu Permeabilitäten von 520 bis 560 L/(m²*h*bar).

Nach einem 35-tägigen Betrieb kam es bei Modul 2 zu einer Abnahme des Flusses von 26 auf 22 L/(m²*h), was in Analogie zum flussgeregelten Betrieb zu einem Permeabilitätsunterschied 100 bis 200 L/(m²*h*bar) im Vergleich zu dem rückgespülten Modul 1 führte.

Nach einem druckgeregelten Betrieb von 60 Tagen mit einer transmembranen Druckdifferenz von 50 mbar wurden beide Module mit hydraulischen Spitzenlasten über einen Zeitraum von 2 Stunden/Tag beaufschlagt. Dabei erfolgte für die Dauer der Belastung die Filtration zuerst bei 70 mbar über einen Zeitraum von 18 Tagen, anschließend eine Steigerung um 10 mbar auf 80 mbar Transmembrandruck für 7 Tage und abschließend mit einer transmembranen Druckdifferenz von 100 mbar über 65 Tage (siehe Tabelle 6-7).

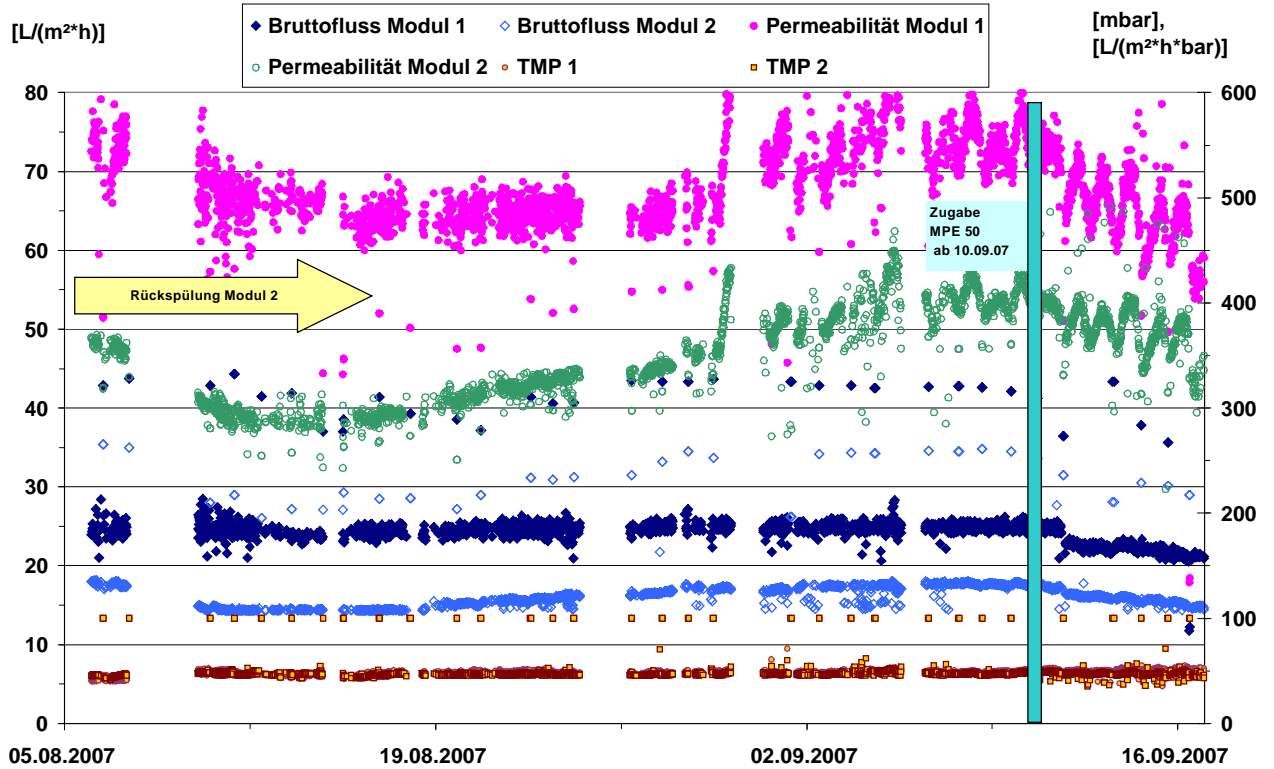


Bild 6-6: Hydraulische Betriebsdaten der druckgeregelten Betriebsphase mit dynamischer Zulaufhydraulik – Rückspülung Modul 2

Tabelle 6-7 Hydraulische Betriebsdaten der Membranmodule – Modul 1 rückgespült

Betriebsdauer in d	TMP im Normalbetrieb	Hydraulische Last durch Erhöhung TMP	Modul 1 rückgespült Filtrat + 1x/Woche 200 ppm NaOCI		Modul 2	
			Bruttofluss in L/(m²*h)	Permeabilität in L/(m²*h*bar)	Bruttofluss in L/(m²*h)	Permeabilität in L/(m²*h*bar)
60	50	-----	28	560	22	440
18	50	70	37*	528	30*	428
7	50	80	41*	512	33*	412
65	50	100	46*	460	38*	380

* Leistungsdaten der hydraulischen Lastphase

Die hydraulischen Lastphasen mit transmembranen Druckdifferenzen < 100 mbar führten zu keinem signifikanten Rückgang des Flusses bzw. Abnahme der Permeabilität. Erst die Lastphasen

mit 100 mbar Transmembrandruck zeigten nach einer Betriebsdauer von 7 Tagen eine Abnahme des Flusses um ca. 5 L/(m²*h).

Die betriebliche Änderung der Rückspülung von Modul 1 auf Modul 2 - unter identischen Rückspülbedingungen wie zuvor bei Modul 1 - führte zu keiner wesentlichen Annäherung der Permeabilität von Modul 2 an die von Modul 1. Es ist davon auszugehen, dass sich bei dem zuvor ohne Rückspülung betriebenen Modul 2 eine irreversible Deckschicht ausgebildet hat, während bei Modul 1 die Rückspülung eine derartige Deckschichtbildung wie bei Modul 2 beeinflusst bzw. verhindert hat.

Zusammenfassend lässt sich anhand der durchgeführten Versuche für das Betriebskonzept „Rückspülung“ festhalten, dass

- eine tägliche Rückspülung mit Filtrat zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Flussleistung/Permeabilität
- eine tägliche Rückspülung mit Filtrat in Verbindung mit einem 1x wöchentlich durchgeführten maintenance cleaning mit 200 ppm Natriumhypochlorit führte bei den Membranmodulen ohne betriebsbedingte Deckschicht in neuem oder abgereinigtem Zustand zu einem Unterschied in den Flussleistungen von 5 bis 7 L/(m²*h).
- Das tägliche Rückspülen mit Filtrat in Verbindung mit einem 1x wöchentlich durchgeführten maintenance cleaning mit 200 ppm Natriumhypochlorit bei dem Modul mit bereits betriebsbedingt ausgebildeter Deckschicht hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Verbesserung des Filtratflusses/der Permeabilität.

Für das Betriebskonzept „flussgeregelter“ bzw. „druckgeregelter“ Betrieb lassen sich die Ergebnisse der durchgeführten Versuche wie folgt zusammenfassen:

- Das nicht rückgespülte Modul im flussgeregelten Betrieb filtrierte mit 25 L/(m²*h) über einen Zeitraum von 7 Tagen. Der zu Beginn dieser Betriebsphase korrespondierende Transmembrandruck von 40 mbar stieg auf einen Endtransmembrandruck von 60 mbar an (ohne Berücksichtigung des Zeitraums mit Tubifex Tubifex-Befall).
- Das nicht rückgespülte Modul im druckgeregelten Betrieb filtrierte mit 50 mbar transmembraner Druckdifferenz bei konstantem Fluss von 23 L/(m²*h) über einen Zeitraum von 29 Tagen.
- Ein Vergleich von flussgeregeltem und druckgeregeltem Betrieb bei annähernd gleicher hydraulischer Last zeigt, dass es im flussgeregelten Betrieb zu einer Abnahme der Permeabilität durch Zunahme der Deckschichtbildung kam, während im druckgeregelten Betrieb keine Deckschichtzunahme erkennbar war.

Die durchgeführten dynamisch hydraulischen Lastphasen durch Erhöhung der transmembranen Druckdifferenz über eine Zeitdauer von 2 h (bzw. 3 h an 5 Tagen) zeigten:

- Transmembrane Druckdifferenzen von 50 bis 80 mbar führten zu keiner Abnahme des Flusses/der Permeabilität.
- Bei einem Transmembrandruck von 100 mbar kam es nach einer Betriebsdauer von 7 Tagen zwar zu einer Abnahme des Flusses um 5 L/(m²*h), jedoch konnte im weiteren Versuchsbetrieb stationär filtriert werden, wobei Deckschichtneubildung und –abtrag einen Gleichgewichtszustand erreichten und eine stabile Betriebspermeabilität erreichten.

6.1.3 Einsatz von Zusatzstoffen zur Verbesserung der Filtrierbarkeit des Wasser-Schlamm-Gemisches

Ab dem 10.09.07 erfolgte die Zugabe eines Zusatzstoffes von Nalco PermaCare® MPE50™ - Polymer zur Verbesserung der Filtrierbarkeit des Belebtschlammes und Reduzierung des Fouling (siehe Bild 6-6). Die Zugabe des Polymers erfolgte wie folgt:

$$MPE50\text{-Zugabe} = 400\text{ ppm} * (0,01 + \frac{1}{t_{TS}}) L / d \quad \text{Gleichung 6-1}$$

Vor Zugabe des Polymers wurde am 10.09.07 eine Messung der kapillaren Fließzeit (CST) des Belebtschlammes vor und nach Zugabe des Polymers durchgeführt:

Tabelle 6-8 Messung CST vom Belebtschlamm des MBR

10.09.2007	Belebtschlamm unconditioniert	Belebtschlamm konditioniert mit 400 ppm MPE 50
CST in Sek.	45	12

Durch die Zugabe des Polymers MPE 50 kam es zu einer deutlichen Reduzierung der kapillaren Fließzeit von 45 auf 12 Sekunden.

Entgegen der Ergebnisse der CST-Untersuchung kam es einen Tag nach Zugabe des MPE50-Polymers bei beiden Modulen zu einer stetigen Abnahme des Flusses um 5 L/(m²*h) in einem Zeitraum von 6 Tagen. Darauf hin erfolgte eine mikroskopische Untersuchung des Belebtschlammes, wobei am 17.09. ein extrem starker Befall mit Öltröpfchenwürmern (Aeolosoma hemprichi) mit ca. 10-12 Tierchen pro ml Probe festgestellt wurde (siehe Bild 6-7).

Inwieweit das Auftreten des Öltröpfchenwurms in Zusammenhang mit der Zugabe des Polymers steht, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Ebenso wenig die dem Vorversuch widersprechende Abnahme der Flussleistung bzw. Permeabilität mit Beginn der Zugabe des Polymers. Es ist davon auszugehen, dass der starke Wurmbefall direkt die Permeabilitätsabnahme beider Module beeinflusste und die leistungssteigernde Wirkung des Polymers vollkommen überlagerte, so dass im Rahmen dieses Versuches keine gültigen Aussagen bzgl. der Verbesserung der Filtrierbarkeit durch Zugabe des Polymers MPE 50 getroffen werden können.

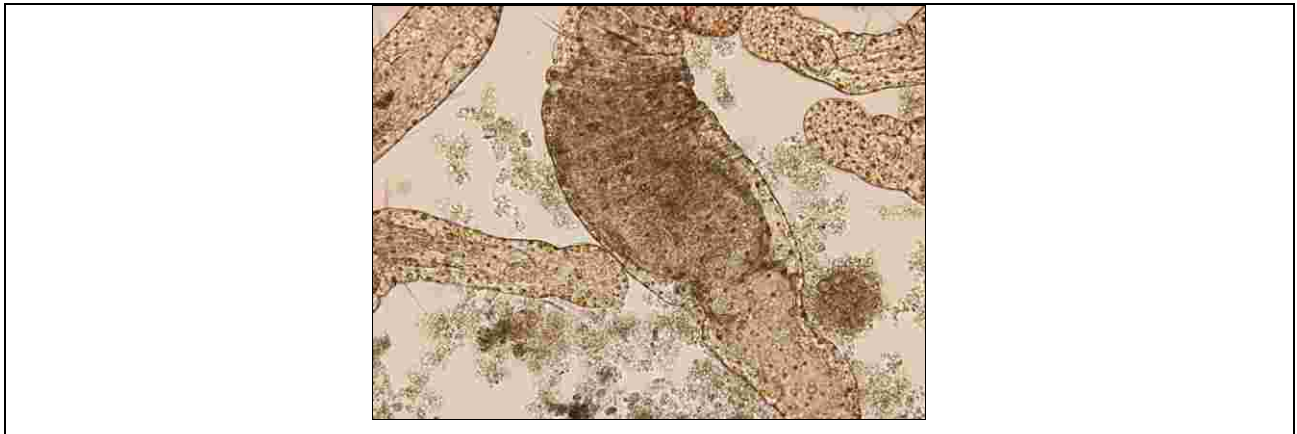


Bild 6-7: Öltröpfchenwurm im MBR-Schlamm

Zusammenfassung Einsatz eines Polymers zur Verbesserung der Filtrierbarkeit

In der relevanten Betriebsphase mit Zugabe des Polymers MPE 50 von Nalco zur Verbesserung der Filtrierbarkeit kam es zu einer Störung des stationären Betriebs durch massives Auftreten des Öltröpfchenwurms im Belebtschlamm des MBR, wodurch keine belastbaren Aussagen zu dem Einsatz des Polymers getroffen werden können.

6.1.4 Einfluss der Vorreinigung auf den Zulaufbetrieb am Beispiel der MBR-Containeranlage Xanten

In der Klärcontaineranlage Xanten ist ein Contec Siebrechen ausgelegt für 40 m³/h mit einer Lochsiebung von 1 mm zur Vorreinigung des kommunalen Abwassers (siehe Bild 6-8) eingesetzt. Ein Fettfang ist auf der konventionellen Anlage Xanten nicht vorhanden.

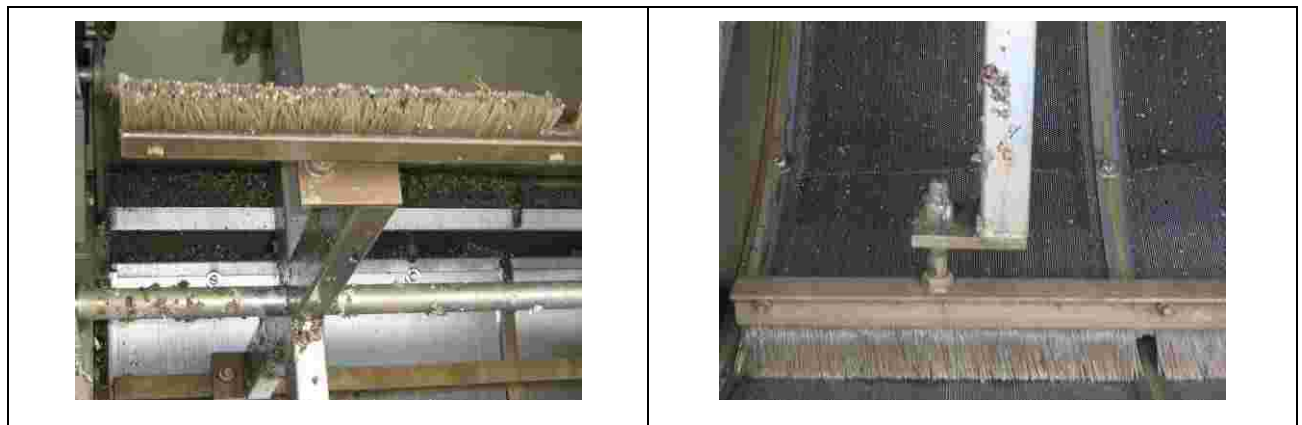


Bild 6-8: Contec Siebrechen im Anlagenzulauf 1mm Lochsieb

Das eingesetzte 1 mm Lochsieb führte zu einer Leistungsminderung des Siebrechens, wodurch der Anlagenzulauf ungesiebt über den Siebüberlauf in den MBR beschickt wurde. Verantwortlich hierfür sind vornehmlich die durch das 1 mm Lochsieb zurückgehaltenen Fette. Die Lochsiebung von 1 mm forderte eine tägliche manuelle Reinigung des Siebes mittels Hochdruck, um die

Verstopfungen des Siebes wirksam zu entfernen. Darauf hin wurde das 1 mm Lochsieb gegen ein 2 mm Lochsieb ausgetauscht. Der 2 mm Siebeinsatz weist im derzeit laufenden Betrieb nahezu keine Verblockungen auf. Eine negative Einflussnahme durch den Eintrag von partikulären Stoffe > 2mm auf den Betrieb der Membranstufen wie Membran-Clogging oder Beschädigung der Membranoberfläche durch abrasive Stoffe wurde nicht festgestellt.

6.1.5 Belüftungsstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs

Die Membrananlage in Xanten wird angepasst an die hydraulische Ganglinie der Kläranlage Xanten-Vynen betrieben. Die Umsetzung erfolgt durch automatisierte Zu- und Abschaltung einzelner Modulblöcke in Abhängigkeit des Anlagenzulaufs. Bei der Abschaltung eines Modulblocks wird gleichzeitig die Modulbelüftung abgeschaltet. Eine separate zusätzliche Belüftungseinrichtung in der Belegung ist nicht realisiert. Um jedoch eine ausreichende Versorgung der Biomasse an gelöstem Sauerstoff sicher zu stellen, ist die sukzessive Abschaltung der Belüftermodule auf einen Mindestsauerstoffgehalt von 1 mg/L begrenzt, unabhängig vom Anlagenzulauf.

Jeder Modulblock der insgesamt 4 Modulblöcke pro Straße hat eine Membranfläche von 280 m² und wird mit einem Luftvolumenstrom von 100 Nm³/h belüftet. Die hydraulische Leistung eines Modulblocks liegt bei 4 m³/h als Zu- bzw. Abschaltbedingung der einzelnen Modulblöcke. Daraus resultieren die in Tabelle 6-9 aufgeführten hydraulischen Leistungsdaten der Modulblöcke:

Tabelle 6-9 Hydraulische Leistungsdaten der Modulblöcke

Modulblock	Hydraulische Leistung m ³ /h	Luftvolumenstrom Nm ³ /h
1	≤ 4	100
1+2	≤ 8	200
1+2+3	≤ 12	300
1+2+3+4	≥ 12	400

Für die in Tabelle 6-9 aufgeführten Betriebszustände wurden die in Tabelle 6-10 dargestellten Leistungsaufnahmen der Filtratpumpe und des Belüfters vor Ort ermittelt:

Tabelle 6-10 Leistungsaufnahme Filtratpumpe und Belüfter in Abhängigkeit der hydraulischen Last

Hydraulische Leistung m ³ /h	Leistungsaufnahme Filtratpumpe kW	Leistungsaufnahme Belüfter kW
≤ 4	bis 0,20	5,23
≤ 8	bis 0,40	7,18
≤ 12	bis 0,70	9,28
≥ 12	0,70 bis 2,10	10,68

Die Leistungsaufnahme der Restperipherie beträgt 6,0 kW.

Der berechnete Stromverbrauch ohne Modulabschaltung ist ebenfalls in Bild 6-9 dargestellt. Hier wurde zugrunde gelegt, dass alle Modulblöcke einer Strasse belüftet werden und filtrieren. Ohne Modulabschaltung würde bei einer Filtratmenge von 4 m³/h ein Stromverbrauch von 4 kWh/m³Filtrat erforderlich sein, wo hingegen bei Modulabschaltung ca. 2,5 kWh/m³Filtrat benötigt wurden. Bei 8 m³/h Filtratmenge betrüge die Differenz ca 0,5 kWh/m³Filtrat, erst ab Filtratmengen > 12 m³/h würde sich der Stromverbrauch angleichen.

In Bild 6-9 ist der Stromverbrauch von Strasse 1 im Monat September 2007 in Abhängigkeit der Filtratablaufmenge dargestellt. Bei einer Gesamtfiltratmenge von 3.900 m³ ergab sich bei einem Gesamtstromverbrauch von 8.030 kWh eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 2 kWh/m³_{Filtrat}. Für den Betrieb eines Modulblocks lag der spezifische Leistungsbedarf zwischen 2,5 und 4,5 kWh/m³_{Filtrat} und damit deutlich über dem durchschnittlichen Verbrauch von 2 kWh/m³_{Filtrat}. Als Ursache für den hohen spezifischen Stromverbrauch ist die Sicherstellung eines Sauerstoffgehaltes von 1 mg O₂/l in der Belebung durch die Modulbelüftung, ggf. durch Zuschaltung der Belüftung eines zweiten Modulblocks, zu erwähnen. Erst das Hinzuschalten eines zweiten Modulblocks und die Erhöhung des Filtratablaufs > 6 m³/h führte zu einem Leistungsbedarf unter 2 kWh/m³_{Filtrat}. Des Weiteren wurden die Belüfteraggregate redundant dimensioniert, so dass ein Aggregat im Störfall des anderen Aggregats die Belüftung der Gesamtanlage gewährleisten kann.

Ab Filtratmengen > 8m³/h lag der Leistungsbedarf in einem Bereich von 1 bis 1,5 kWh/m³_{Filtrat}. Der berechnete Stromverbrauch ohne Modulabschaltung ist ebenfalls in Bild 6-9 dargestellt. Hier wurde zugrunde gelegt, dass alle Modulblöcke einer Strasse belüftet werden und filtrieren. Ohne Modulabschaltung würde bei einer Filtratmenge von 4 m³/h ein Stromverbrauch von 4 kWh/m³_{Filtrat} erforderlich sein, wo hingegen bei Modulabschaltung ca. 2,5 kWh/m³_{Filtrat} benötigt wurden. Bei 8 m³/h Filtratmenge betrüge die Differenz ca 0,5 kWh/m³_{Filtrat}, erst ab Filtratmengen > 12 m³/h würde sich der Stromverbrauch angleichen.

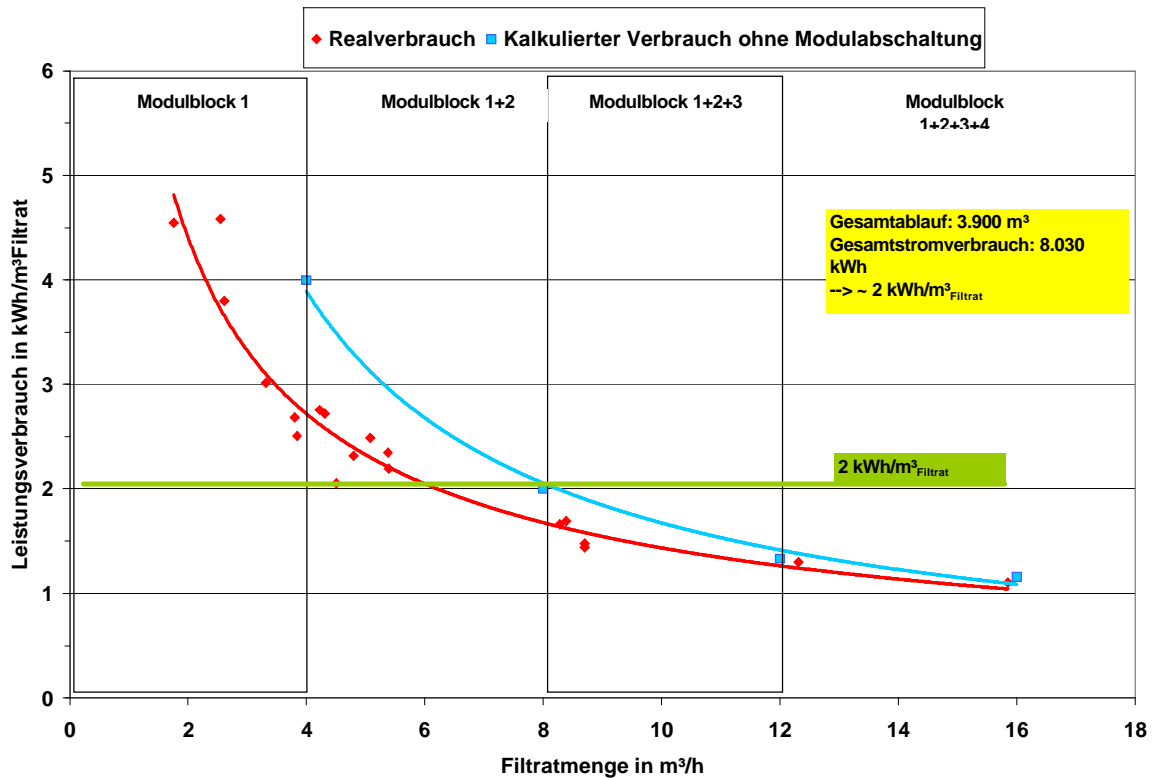


Bild 6-9: Stromverbrauch einer Strasse im Monat September 07

Zusammenfassung Belüftungsstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs

Die in der großtechnischen MBR-Containeranlage Xanten-Vynen durchgeführte Anpassung des Filtrationsbetriebes an die hydraulische Ganglinie durch Zu- und Abschaltung einzelner Modulblöcke hat gezeigt, dass in Abhängigkeit der Filtratmenge bei

- 4 m³/h Filtrat ca. 37 % weniger Energieverbrauch durch die Modulabschaltung,
- 8 m³/h Filtrat ca. 25 % weniger Energieverbrauch durch die Modulabschaltung

realisierbar sind.

Bei dem in der großtechnischen Anlage ermittelten mittleren Bedarfswert von 2 kWh/m³_{Filtrat} gilt unbedingt zu berücksichtigen, dass zum einen die Auswahl der Verdichteraggregate als redundant ausgeführte Belüftungseinrichtung sowie die hohe Belüftungsrate der Module von 0,35 Nm³/m²*h maßgeblich zu dem hohen Bedarfswert von 2 kWh/m³_{Filtrat} führen. Die Pilotierungsversuche in Aachen zeigten, dass die Membranmodule betriebsstabil mit einer Belüftungsrate von 0,2 bis 0,25 Nm³/m²*h bei Flussleistungen bis zu 30 L/(m²*h) betrieben werden konnten, was einer Verdoppelung gegenüber der Flussleistung in Xanten-Vynen entspricht.

Weitergehender Untersuchungsbedarf zur Energieeinsparung liegt in der Einbringung einer autarken Belüftungseinrichtung zur Sicherstellung eines Mindestsauerstoffgehalts in der Belebung und damit der Entkoppelung der Sauerstoffversorgung der Belebung von der Modulbelüftung. Hier

muss der Fall betrachtet werden, wenn der Mindestsauerstoffgehalt in der Belebung durch eine Modulblockbelüftung nicht sichergestellt werden kann und eine zweite Modulblockbelüftung ohne Filtrationsbetrieb der Module zugeschaltet wird.

Des Weiteren ist die Betriebsführung der Modulzuschaltung über einen Niveaugrenzwert dahingehend zu variieren, dass die Modulzuschaltung nicht unmittelbar bei Überschreitung eines Niveaus, sondern vielmehr über eine Hysterese des Bezugsniveaus und Betrieb der Module mit höheren Flussraten erfolgt.

6.2 Untersuchung von Reinigungskonzepten

Im Rahmen des Betriebs des halbtechnischen MBR sowie des großtechnischen MBR Xanten-Vynen wurde die Einflussnahme auf die Deckschichtkontrolle durch

- tägliche insitu-Rückspülung der Module mit Filtrat mit 1x/Woche durchgeführten maintenance cleaning (200 ppm NaOCl)
- externe Reinigung der Module getaucht in Reinigungslösung

untersucht.

Tägliche Rückspülung der Module mit Filtrat mit 1x/Woche durchgeführten maintenance cleaning (200 ppm NaOCl)

Ergebnisse zur Insitu-Rückspülung der Module des halbtechnischen MBR mit Filtrat sowie mit Reinigungslösung sind Abschnitt 6.1 zu entnehmen. Die Rückspülung mit Reinigungslösung als maintenance cleaning zeigte lediglich bei fabrikneuen bzw. abgereinigten Membranen einen Einfluss auf die Deckschichtkontrolle im Vergleich zur Rückspülung mit Filtrat ohne Reinigungslösung. Bei bereits betriebsbedingt ausgebildeter Deckschicht auf der Membran konnte mit der Insitu-Rückspülung mit Reinigungslösung als maintenance cleaning keine signifikante Verbesserung bzgl. der Membranabreinigung im Vergleich zur bloßen Rückspülung mit Filtrat erreicht werden.

Die Rückspülung der Membranmodule des großtechnischen MBR Xanten-Vynen erfolgt in Analogie zur Rückspülung des halbtechnischen MBR mit Filtrat sowie mit 200 ppm NaOCl-Reinigungslösung 1 mal wöchentlich. In Bild 6-10 ist der Permeabilitätsverlauf der Strasse 1 des großtechnischen MBR Xanten-Vynen sowie die wöchentlichen Insitu-Rückspülungen mit 200 ppm NaOCl-Lösung dargestellt. Die tägliche Rückspülung mit Filtrat ist nicht dargestellt.

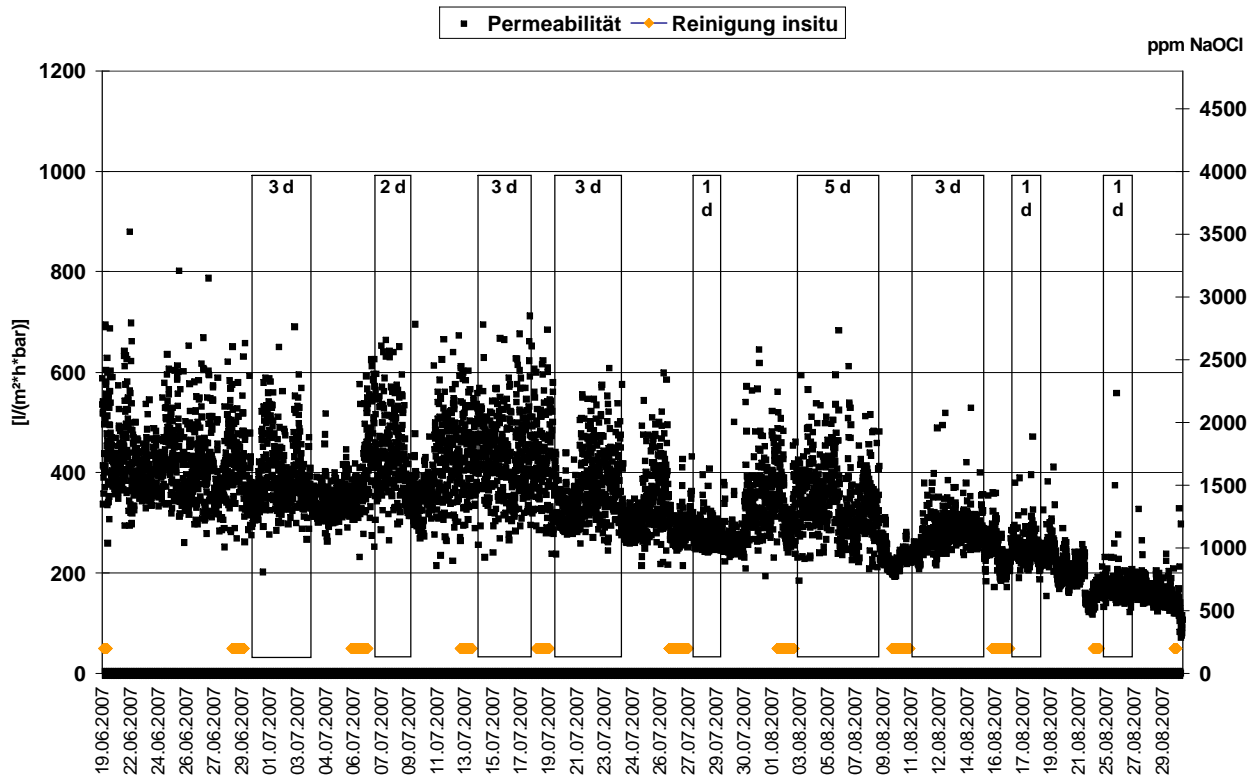


Bild 6-10: Permeabilitätsverlauf Strasse 1 großtechnischer MBR Xanten-Vynen von Juli bis August 07 nach Insitu-Rückspülung

Betrachtet man sich exemplarisch den 60-tägigen Betriebszeitraum von Juli bis Ende August 07, ist eine Abnahme der Permeabilität von anfänglichen 400 auf ca. 100 L/(m²·h·bar), was einer Permeabilitätsabnahme von 5 L/((m²·h·bar)·d) entspricht, zu verzeichnen. Dennoch bleibt fest zu halten, dass die Insitu-Rückspülungen mit Reinigungslösung zu einer kurzzeitigen Verbesserung bzw. Erhalt der Permeabilität für den Zeitraum direkt nach der Rückspülung führte. Führt man die in Bild 6-10 aufgeführten Zeiträume zum Permeabilitätserhalt auf die Rückspülung mit Reinigungslösung zurück, ergibt sich in der Addition ein „Permeabilitätserhaltungszeitraum“ von 22 Tagen. Unter der Annahme eines linearen Permeabilitätsrückgang bedeutet dies für den Betrieb ohne Rückspülung, dass das Endpermeabilitätsniveau von 100 L/(m²·h·bar) bereits nach 38 Tagen erreicht wäre, was einer Permeabilitätsabnahme von ca. 8 L/((m²·h·bar)·d) entspräche und damit einem Permeabilitätsrückgang von ca. 38 % bei Annahme einer identischen Permeabilitätsentwicklung ohne Rückspülung.

Der Permeabilitätsverlauf nach Insitu-Reinigung als recovery cleaning der Module des großtechnischen MBR-Anlage Xanten-Vynen ist in Bild 6-9 dargestellt. Hier wurde mit einer Reinigungslösung von 2000 ppm Natriumhypochlorit für 50 Minuten gereinigt. Durch die Reinigung konnte eine Permeabilitätssteigerung von anfänglichen 100 auf 400-600 L/(m²·h·bar) erreicht werden, was einer nahezu vollständigen Regeneration der Module bzgl. der Permeabilität entspricht.

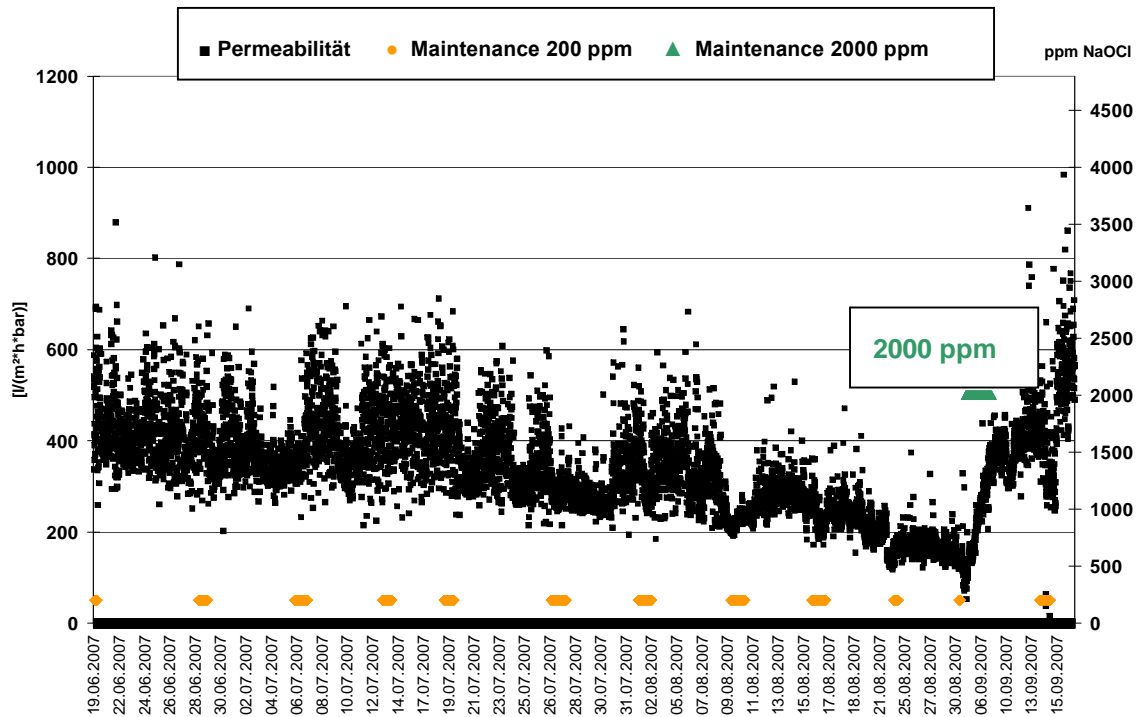


Bild 6-11: Permeabilitätsverlauf Strasse 1 großtechnischer MBR Xanten-Vynen von Juli bis August 07 nach Insitu-Rückspülung als maintenance cleaning mit 200 ppm und recovery cleaning mit 2000 ppm.

Externe Reinigung der Module getaucht in Reinigungslösung

Nach Versuche wurden die Membranmodule des halbtechnischen MBR extern in Reinigungslösung mit 1000 ppm Natriumhypochlorit-Lösung für 1 h gereinigt. Das Ergebnis der Reinigung ist Tabelle 6-11 zu entnehmen:

Tabelle 6-11 1-stündige externe Reinigung (recovery cleaning) in Lösung

Externe Reinigung getaucht in Reinigungslösung 1000 ppm NaOCl			
	Temperatur der Reinigungslösung °C	Ausgangsp permeabilität L/(m²·h·bar)	Endpermeabilität L/(m²·h·bar)
Modul 1	13	400	650
Modul 2	13	300	570

Somit war durch eine externe Reinigung der Module in Reinigungslösung (1000 ppm NaOCl) eine nahezu vollständige Regeneration der Module bzgl. ihrer Permeabilität möglich.

Zusammenfassung Untersuchung von Reinigungskonzepten

Im Betrieb des halbtechnischen MBR konnten bei täglichen Rückspülungen mit Filtrat und 1x wöchentlichen Rückspülungen mit Reinigungslösung als maintenance cleaning (200 ppm NaOCl)

Permeabilitätssteigerungen lediglich bei fabrikneuen bzw. abgereinigten sprich „offenen“ Membranmodulen erreicht werden. Im Betrieb des großtechnischen MBR hingegen zeigten die täglichen Rückspülungen mit Filtrat und 1x wöchentlichen Rückspülungen mit Reinigungslösung als maintenance cleaning (200 ppm NaOCl) durchaus einen Einfluss auf die Deckschichtausbildung sprich Permeabilitätsentwicklung. Hier konnte ein Erhalt der Permeabilität für Zeiträume von 1 bis 5 Tagen unmittelbar nach der Rückspülung erzielt werden.

Eine externe Reinigung der Membranmodule des halbtechnischen in Reinigungslösung mit 1000 ppmh Natriumhypochloritlösung zeigte eine nahezu vollständige Regenerierbarkeit der Membranmodule bzgl. der Flussleistung, entsprechend Permeabilitäten $> 570 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$.

Weiterer Untersuchungsbedarf bzgl. der Reinigung ist zum einen in der Variation der Konzentration der Reinigungslösung sowie in der Substitution der Reinigungschemikalie Natriumhypochlorit durch z.B. H_2O_2 erforderlich.

6.3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen hinsichtlich der Betriebskonzepte für das Filtrationsmodul

Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zur Betriebsweise der Membranstufe hinsichtlich

- der Regelparameter für den Filtrationsbetrieb – fluss- bzw. druckgeregelt
- der Auswirkungen hydraulischer Lastphasen auf die Leistungsfähigkeit der Module
- der Aufrechterhaltung des Filtrationsflusses – Rückspülung mit Filtrat und Reinigungslösung als maintenance cleaning
- der Belüftungsstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs
- von Reinigungskonzepten

durchgeführt.

6.3.1 Ergebnisse der Betriebsphasen

Regelparameter für den Filtrationsbetrieb

Die mit dem halbtechnischen A3-MBR durchgeführten Versuche hinsichtlich fluss- und druckgeregeltem Betrieb zeigten, dass bei gleicher hydraulischer Last der Membranstufe der flussgeregelt Betrieb innerhalb von 7 Tagen zu einer Permeabilitätsabnahme von ca. 30 % führte, während im druckgeregelten Betrieb mit einem konstanten Fluss über einen Zeitraum von 29 Tagen filtriert werden konnte. An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die zuvor genannte Permeabilitätsabnahme von 30 % im flussgeregelten Betrieb mit fabrikneuen sprich „offenen“ Modulen mit Ausgangspermeabilitäten $> 700 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ und nicht mit einer regulären „Betriebspermeabilität“ wie im druckgeregelten Betrieb festgestellt wurde. Es ist davon

auszugehen, dass sich im flussgeregelten Betrieb bei Einsatz einer Membran mit „Betriebspermeabilität“ eine geringe Permeabilitätsabnahme einstellt.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche ist davon auszugehen, dass es im flussgeregelten Betrieb zu einer Zunahme der Deckschichtbildung kam, während es im druckgeregelten Betrieb bei gleicher hydraulischer Last keine Deckschichtzunahme erfolgte.

Hydraulische Lastphasen

Weiterhin wurde in der Versuchsphase des druckgeregelten Betriebs zur Steigerung der hydraulischen Last täglich für eine Zeitdauer von 2 Stunden (an 5 Tagen für 3 Stunden) die transmembrane Druckdifferenz sukzessiv vom Betriebs-TMP (50 mbar) auf 70, 80 und 100 mbar gesteigert.

Bei transmembranen Druckdifferenzen ≤ 80 mbar wurde keine signifikante Abnahme des Flusses bzw. der Permeabilität festgestellt. Auch bei 100 mbar Transmembrandruck konnte nach Erreichen einer Betriebspermeabilität stationär ohne Permeabilitätseinbruch mit Flussraten von $46 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ filtriert werden.

Aufrechterhaltung des Filtrationsflusses

In der halbtechnischen Anwendung zeigte die tägliche Rückspülung (Backwash) mit Filtrat mittels drucküberwachter Drehrichtungsumkehr der Filtratpumpe bis zur Vollerfüllung der Membrantaschen keinen signifikanten Einfluss auf die Flussleistung.

In der halbtechnischen Anwendung wurden bei der täglichen mit Filtrat und 1x wöchentlichen mit Natriumhypochlorit 200 ppm als maintenance cleaning durchgeführte Rückspülung bis zur Vollerfüllung der Membrantaschen folgende Einflüsse auf die Flussleistung festgestellt:

- bei neuen oder abgereinigten Membranen wurde ein Mehrfluss bis zu $7 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ gegenüber Membranen ohne 1 x wöchentlichen maintenance cleaning ermittelt.
- bei Membranen mit bereits betriebsbedingt ausgebildeter Deckschicht konnte keine signifikante Verbesserung der Flussleistung erreicht werden.

In der großtechnischen Anwendung konnte durch die täglichen Rückspülungen mit Filtrat in Verbindung mit dem 1x wöchentlichen maintenance cleaning (200 ppm NaOCl) gezeigt werden, dass ein Erhalt der Permeabilität unmittelbar nach dem maintenance cleaning gegeben war. Dadurch konnte für den betrachteten Zeitraum (60 Tage) einer Abnahme der Permeabilität für 1 bis 5 Tage nach dem maintenance cleaning entgegengewirkt werden, wodurch letztendlich der Betriebszeitraum der Membranstufe bis zum nächsten recovery cleaning verlängert wurde.

Belüftungsstrategie

Der Betrieb des halbtechnischen A3-MBR mit Doppelstockmodulen M 70 002 zeigte, dass eine Belüftungsrate von 0,2 bis 0,25 Nm³/m²*h für einen stabilen Filtrationsbetrieb bei 30 L/(m²*h) sorgte.

Die in der großtechnischen MBR-Anlage realisierte Zu- und Abschaltung einzelner Modulblöcke in Abhängigkeit des Anlagenzulaufs zeigte, dass eine Reduzierung des Energieverbrauchs durch Zu- und Abschaltung einzelner Modul- und Belüfterblöcke bis zu 37 % realisierbar ist.

Reinigungskonzepte

Das Reinigungskonzept der periodischen Rückspülung mit Filtrat in Kombination mit Rückspülen einer Reinigungslösung als maintenance cleaning bewirkte in der großtechnischen Anwendung einen Leistungserhalt bzgl. des Filtratflusses bzw. der Permeabilität.

6.3.2 Schlussfolgerungen

Der Regelparameter Druck als transmembrane Druckdifferenz für den Betrieb der Membranstufe zeigte im Vergleich zum flussgeregeltem Betrieb ein stabileres Filtrationsverhalten, ausgehend von einer wirksameren Deckschichtkontrolle in Hinblick auf die Deckschichtneubildung. Demzufolge wäre der druckgeregelte Betrieb der Membranstufe dem flussgeregelten vorzuziehen. Entscheidendes Ausschlusskriterium für die Anwendung des druckgeregelten Betriebs ist die Bestimmung eines Bemessungsflusses in Korrelation zu der transmembranen Druckdifferenz. Eine belastbare Ermittlung eines Bemessungsflusses im Vorfeld wäre nur über eine zeit- und kostenintensive Pilotierung vor Ort möglich.

Bei hydraulischen Spitzenlasten von 40 bis 50 L/(m²*h) konnte mit dem rückgespülten Modul sowohl während der 2-stündigen Lastphase als auch im folgenden Regelbetrieb stabil filtriert werden. Weiterhin wurde eine „Regeneration“ der Membran bzgl. der Permeabilität in einem Zeitraum von 20 bis 24 Stunden nach der Lastphase auf das Permeabilitätsniveau vor der Lastphase festgestellt.

Zur Aufrechterhaltung der Filtrationsleistung hat sich die Betriebsweise mit täglicher Filtratrückspülung in Kombination mit 1x wöchentlichen maintenance cleaning etabliert. Weiterer Untersuchungsbedarf liegt in der Substitution der Reinigungschemikalie.

Durch den Einsatz von Doppelstockmodulen M70 002 konnten stabile Filtrationsleistungen mit 0,2 bis 0,25 Nm³/(m²*h) erzielt werden, was einer deutlichen Reduzierung des Energiebedarfs durch die Modulbelüftung entspricht.

Die umgesetzte Zu- und Abschaltung einzelner Modulblöcke in Abhängigkeit des Anlagenzulaufs führte weiterhin zu einer deutlichen Reduzierung des Energieverbrauchs und wird auch zukünftig kennzeichnend für den Betrieb eines A3 MBR eingesetzt werden.

7 Experimentelle Strömungsuntersuchungen

Experimentelle Strömungsuntersuchungen wurden am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und am Institut für Verfahrenstechnik (TU Berlin) durchgeführt. Forschungsschwerpunkte waren am ISA die Ermittlung von Strömungsgeschwindigkeiten und insbesondere die Verteilung der eingetragenen Luft im Membranmodul; das Institut für Verfahrenstechnik hat eine Membrantestzelle und ein 2D-Modell eines Schlaufenreaktors entwickelt und betrieben, in dem die Strömung beobachtet werden kann.

7.1 Strömungsuntersuchungen mittels optischer Beobachtung

In der Phase I des Projektes wurden bereits Untersuchungen zum Lufteintrag und zur Verteilung der Luft im Membranmodul durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass in das Modul eingetragene Luftblasen auf ihrem Weg durch das Modul fast ausschließlich senkrecht aufsteigen und innerhalb des Moduls kaum eine weitere Verteilung der Luft stattfindet. Daher wurde versucht, durch konstruktive Änderungen der Belüftungseinrichtung den Luftstrom so aufzufächern, dass sich der Lufteintrag gleichmäßiger unter und im Modul verteilt. Der Effekt der Veränderungen an der Belüftungseinrichtung wurde zunächst mittels optischer Beobachtung beurteilt. In einigen Fällen wurde außerdem ein Geschwindigkeitsprofil mittels Acoustic Doppler Velocimetry aufgenommen (siehe Kapitel 7.2).

Ideal wäre ein flächiger Lufteintrag unterhalb des Moduls. Die konstruktive Ausführung einer solchen Belüftung, z.B. als Platte, lässt sich in einem Membranbioreaktor nur schwer realisieren, da

- auf einem flächig ausgebildeten Belüfter beispielsweise bei Ausfall der Belüftung die Gefahr von Schlammablagerungen besteht und
- die durch die Belüftung eingetragene Energie für die Ausbildung einer durch den Reaktor zirkulierenden Strömung genutzt werden soll. Eine flächenmäßige Ausbildung der Belüftungseinrichtung würde den freien Querschnitt zu stark verengen und damit die Strömung stark reduzieren bzw. verhindern.

Die Strömungsverhältnisse in einem Membranbioreaktor sind vergleichbar mit denjenigen in einem Schlaufenreaktor (air lift loop configuration), in dem eingebrachtes Gas für die Mischung des Reaktorinhaltes verwendet wird. Die hydrodynamischen Verhältnisse in einem Schlaufenreaktor ohne Einbauten sind bereits intensiv untersucht worden (siehe z.B. Blenke, 1979; Chisti, 1988, 1989). In einem Schlaufenreaktor verursacht die Belüftung im Aufströmkanal (riser) einen Druckunterschied zu den Abströmbereichen (downcomer) des Reaktors. So kommt es zu einer Zirkulation des Flüssigkeit-Gas-Gemisches durch den gesamten Reaktor. Im Unterschied zu einem Schlaufenreaktor befindet sich in einem Membranbioreaktor das Membranmodul im Aufstiegskanal der Luft, wodurch es zu einer Querschnittsverengung kommt. Inwieweit das einen Einfluss auf den

Luft eintrag und die Energieausnutzung durch die eingetragene Luft hat, wurde noch nicht intensiv untersucht. Im Rahmen des Projektes wurden hierzu weitere Erkenntnisse gewonnen.

Trotz der Querschnittsverengung durch das Membranmodul ist davon auszugehen, dass die Vorteile des Schlaufenreaktorprinzips mit Abstrichen auch im Membranbioreaktor zum Tragen kommen.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes versucht, die bestehende Belüftereinrichtung (siehe Kapitel 5.3) so weit zu modifizieren, dass eine Auffächerung der eingetragenen Luft und somit eine flächigere Verteilung erzielt werden konnte, ohne den freien Querschnitt dabei unnötig stark zu verengen. Für dieses Ziel wurden zwei verschiedene Ansätze verfolgt:

1. Aufbringung von Leitblechen direkt auf den Belüftern.
2. Einbau einer Lochblechplatte im Aufströmkanal oberhalb der Belüfter.

Vorversuche mit Einbauten zur Modifizierung des Luftpfeintrags wurden im Teststand des ISA an einem ersten Prototyp des Moduls M70 vorgenommen. Folgende in Bild 7-1 gezeigte Leitblechformen wurden im Teststand auf die Belüfter aufgebracht.

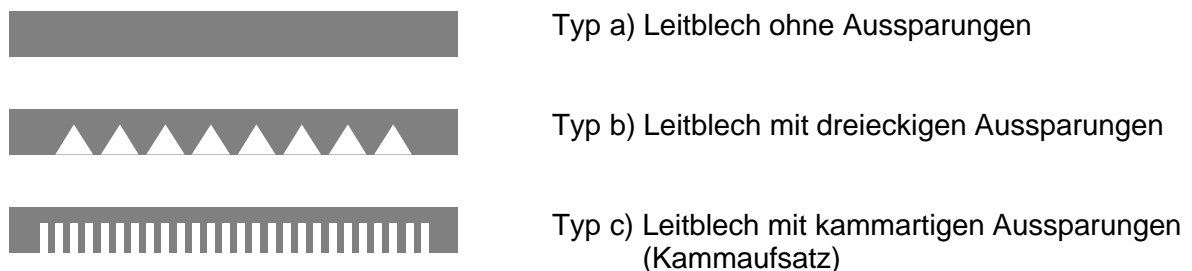


Bild 7-1: Leitblechformen

Mittels Beobachtungen in Klarwasser der durch die Belüftung eingetragenen Blasen und deren Verteilung und Aufstiegsverhalten im Aufströmkanal unter dem Modul wurden die in Bild 7-1 dargestellten Leitblechformen bezüglich ihrer Wirkung auf die Strömung beurteilt. Zunächst wurden Leitbleche ohne Aussparungen (Bild 7-1 a) auf die Belüfter aufgebracht.

Bild 7-2 zeigt die Vorgehensweise bei den Vorversuchen im Teststand. Ausgangsbasis sind die Belüfter ohne Aufsätze (Bild 7-2 a). Hier wird deutlich, dass der Luftpfeintrag unter den Modulen ungleichmäßig stattfindet. Die Luftblasen steigen senkrecht nach oben und es findet nur eine sehr geringe Verteilung der Luft statt, so dass die Bereiche zwischen den Belüftern nur sehr schwach beaufschlagt werden. Mit Hilfe der Aufsätze sollte nun eine Auffächerung des Luftpfeintrags erzielt werden. Bei Betrachtung von Bild 7-2 d wird deutlich, dass der Aufsatz die Luftverteilung beeinflusst. Die eingetragenen Luftblasen werden durch die Leitbleche zum Teil zur Seite abgelenkt. Dadurch werden die Lücken zwischen den Belüftern kleiner als bei der Variante ohne

Aufsatz. Durch Unterbrechung der geraden Kante der Leitbleche durch dreieckige oder kammartige Aussparungen zeigt sich optisch eine noch bessere Verteilung der Luft im Aufströmkanal (Bild 7-2 d).

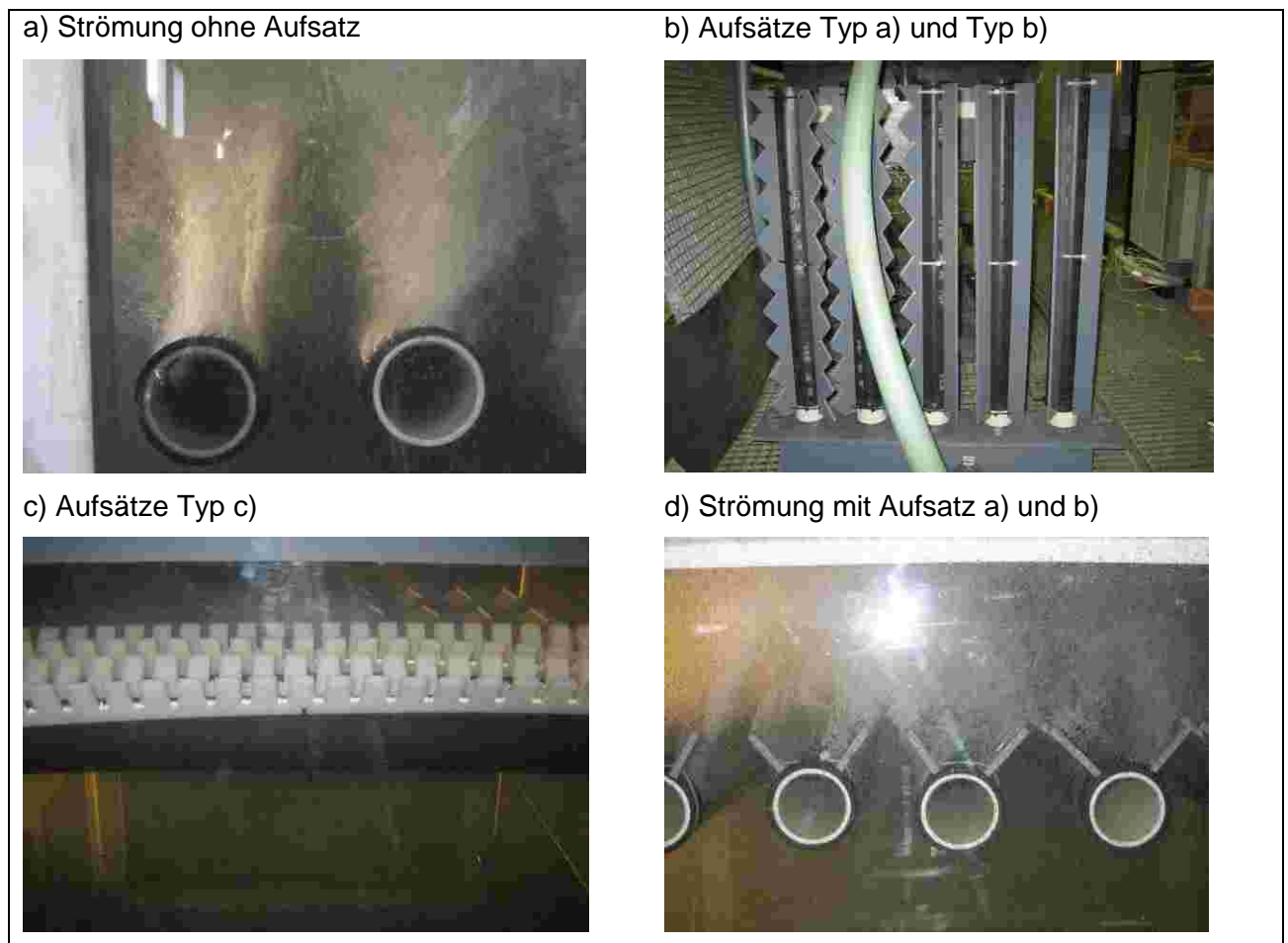


Bild 7-2: Vorversuche im Teststand

Aufgrund der positiven Vorversuche im Teststand wurden für die Belüfter in der Pilotanlage ebenfalls Aufsätze für die Belüfter entwickelt. Da die kammartigen Aussparungen den besten Einfluss auf die Luftverteilung gezeigt haben, wurde eine ähnliche Art der Aussparung gewählt. Befestigt wurden die Leitbleche auf den Belüftern durch hinten und vorne an den Leitblechen angebrachte Klemmen.

Bild 7-3 a und b zeigt die Kammaufsätze und die Positionierung auf den Belüftern. Wird die Luftverteilung durch die Aufsätze betrachtet, fällt auf, dass eine Auffächerung der Luft stattfindet (Bild 7-3 c). Im Randbereich des Aufströmkanals wird allerdings wie zuvor keine bessere Verteilung der Luft erreicht (siehe rote Markierung in Bild 7-3 c). Bei der Aufsicht von der Seite (Bild 7-3 d) wird ein weiterer Aspekt deutlich: Durch die Aussparungen in den Leitblechen, erfolgt eine Unterbrechung des Lufteintrages. Es werden also nur in den Bereichen Luftblasen nach außen geleitet, in denen die Leitbleche nicht unterbrochen sind. Dieser Effekt war auch

gewünscht, um nicht die gesamte eingetragene Luft nach außen zu lenken, sondern Teile auch direkt über den Belüfter einzutragen.

Die Neigung der Kammaufsätze wurde so gewählt, dass eine möglichst weite Auffächerung der eingetragenen Luft stattfindet. Die Kämme benachbarter Belüfter treffen fast aufeinander. Durch die Aussparungen im Kammprofil wird sichergestellt, dass die Zirkulationsströmung im Gesamtreaktor trotz der Belüfteraufsätze stattfinden kann.



Bild 7-3: Kammaufsatz

Die Befestigung der Leitbleche mittels der integrierten Klemmen erwies sich als problematisch, da der Luftstrom im Belüfter beeinträchtigt wurde. Die Gummimembran wurde besonders an der Stelle des Lufteintrages in den Belüfter zu stark zusammengedrückt. Daher wurde der Aufbau der Kammaufsätze modifiziert.

In Bild 7-4 ist der modifizierte Kammaufsatz und die Befestigung mittels Kabelbindern auf den Belüftern abgebildet. Die Kammaufsätze wurden so befestigt, dass die Aufsätze benachbarter Belüfter fast aneinander stoßen. Bild 7-4 c und d gibt zwei Ansichten auf die Belüfter und den Lufteintrag wieder. In beiden Bildern ist auch die Unterkante des Membranmoduls mit seinen einzelnen Modulplatten zu erkennen. Die eingetragene Luft wird zwar wie vorher beschrieben aufgefächert, es wird aber deutlich, dass bei Eintritt in das Membranmodul immer noch eine

ungleichmäßige Verteilung der Luftblasen vorliegt. Deutlich zu sehen ist in Bild 7-4 d, dass die Randbereiche im Aufströmkanal immer noch schwächer beaufschlagt werden. Hier konnte nicht der gewünschte Effekt einer Luftauffächerung erzielt werden.



Bild 7-4: modifizierter Kammaufsatz

Da der Aufsatz von Leitblechen nicht den gewünschten Erfolg hatte, wurde der Einsatz eines Lochbleches oberhalb der Belüfter untersucht. Diesem Aufbau lag die Idee zu Grunde, durch das Lochblech eine Art Aufstau der Luftblasen zu erreichen. Die aufgestauten Luftblasen sollten dann gleichmäßig verteilt durch die Löcher weiter aufsteigen. Dabei sollte der Querschnitt nicht zu stark verengt werden, um weiterhin eine gute Rezirkulation im gesamten Reaktor zu erhalten und die Zirkulationsströmung nicht zu stark zu behindern. Zu kleine Lochdurchmesser können außerdem dazu führen, dass sich auf dem Lochblech Schlamm ablagert und die Löcher verstopfen. Daher wurden die Lochdurchmesser (rund 2 cm) nicht zu klein gewählt (siehe Bild 7-5 a). Der Einbau erfolgte rund 5 cm oberhalb der Belüfterkerzen (rund 20 cm unterhalb des Moduls).

Bild 7-5 b zeigt den Einfluss des Lochbleches auf die Verteilung der Luftblasen. Es ist eindeutig erkennbar, dass eine Vergleichmäßigung des Lufteintrages nicht stattfindet. Die Blasen steigen

unbeeinflusst von dem eingebauten Lochblech senkrecht nach oben und erfahren keine bessere Verteilung. Der Einbau von Lochblechen im Aufströmkanal wurde daher nicht weiter verfolgt.

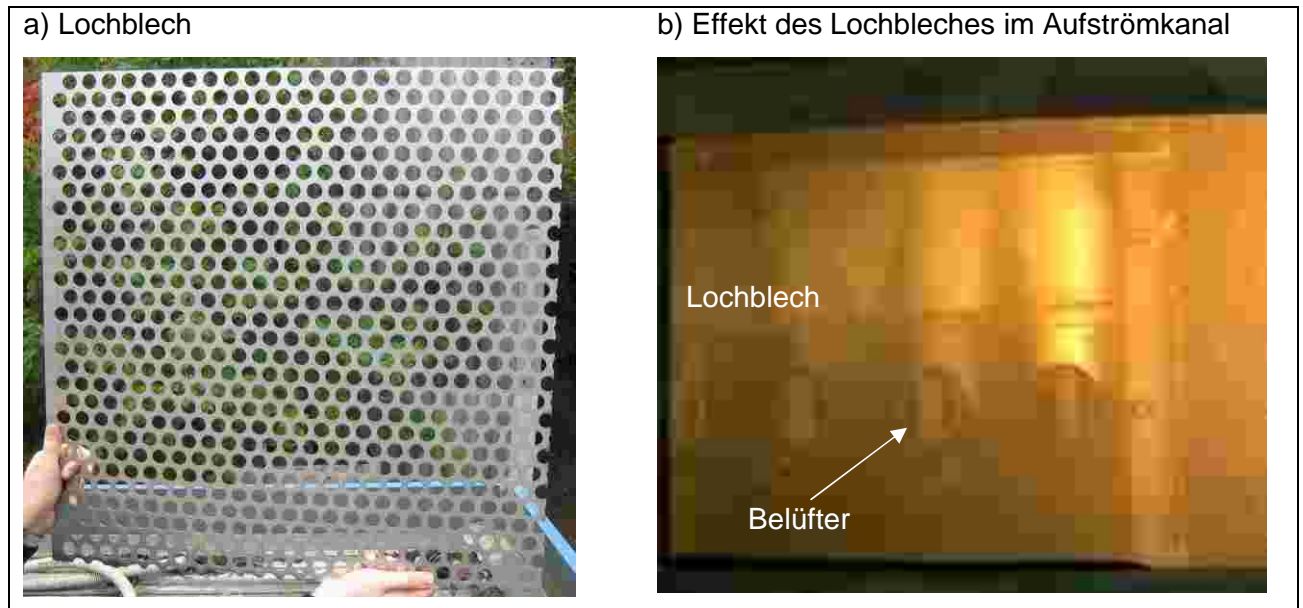


Bild 7-5: Lochblechaufsatz (Lochdurchmesser: ~2cm)

Bei der Konstruktion eines Lochbleches könnten noch weitere Varianten mit veränderten Lochgrößen und/oder Lochverteilungen untersucht werden. Dieser Aspekt sollte allerdings in einer gesonderten Anlage untersucht werden, die ein schnelleres Umbauen des Aufströmkanals ermöglicht.

Die durchgeführten Untersuchungen mittels optischer Beobachtung zeigen, dass die Umlenkung der Strömung in der gewünschten Weise weder mit den Kammaufsätzen noch mit dem Lochblech zufriedenstellend erreicht werden konnte. In einigen Fällen wurde die modifizierte Belüftungseinrichtung noch mit Hilfe der Geschwindigkeitsmessung untersucht, um so die aus den Beobachtungen gewonnen Erkenntnisse zu überprüfen (siehe Kapitel 7.2).

7.2 Strömungsuntersuchungen mittels Acoustic Doppler Velocimetry

Die Strömungsuntersuchungen wurden sowohl in Klarwasser als auch in belebtem Schlamm vorgenommen. In einem ersten Schritt wurden Messungen in Klarwasser durchgeführt. Dabei sollte unter anderem geprüft werden, wie sich die Anordnung des Moduls im Reaktor auf das Strömungsbild auswirkt. Die untersuchten Positionen sind die Folgenden (Bild 7-6):

- Position 1: mittige Anordnung im Reaktor
- Position 2a: Anordnung an einer Reaktorwand; Ausrichtung der Membranplatten senkrecht zur Reaktorwand
- Position 2b: Anordnung an einer Reaktorwand; Ausrichtung der Membranplatten parallel zur Reaktorwand
- Position 3: Anordnung in einer Reaktorecke

- Position 4: Anordnung von zwei Modulen im Reaktor.

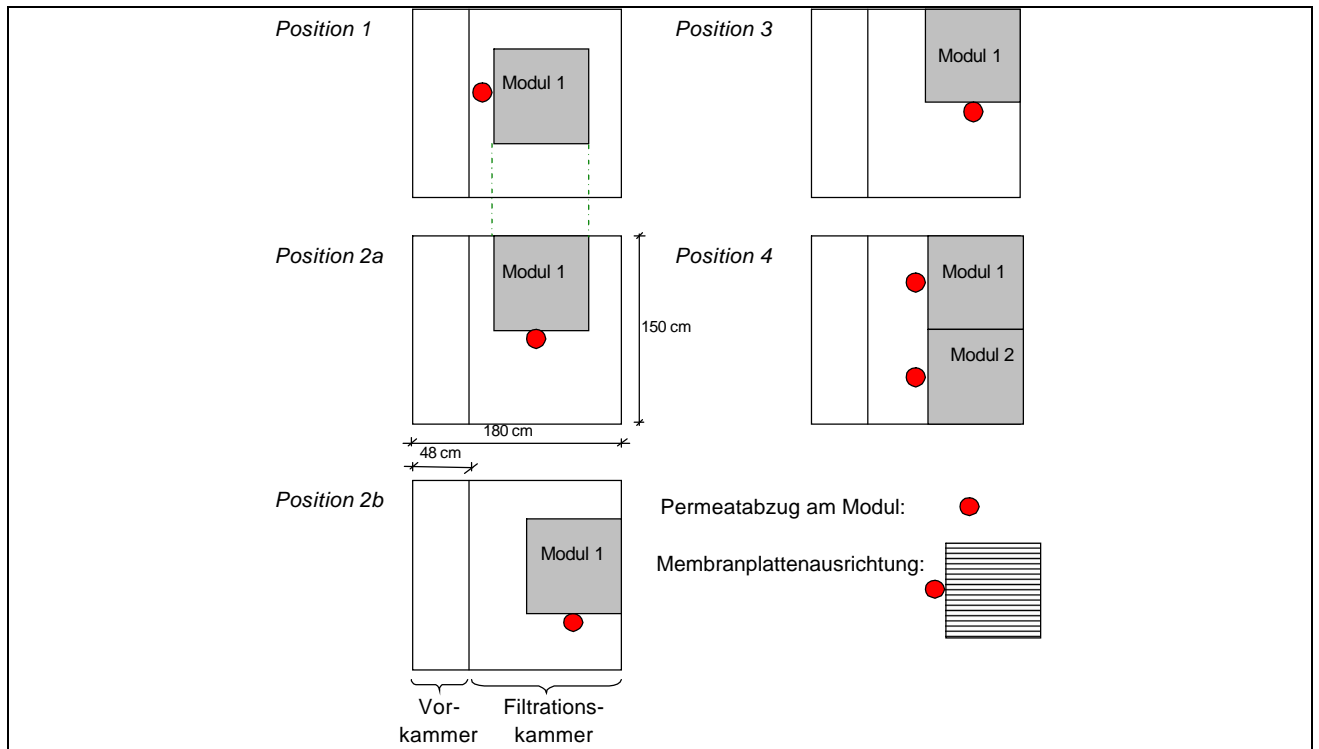


Bild 7-6: Positionen eines bzw. zweier Doppeldeckermodule in der Pilotanlage

Die Position 3 und 4 ist besonders für den Einsatz der Module in größeren Reaktoren interessant, da geplant ist, beim Einsatz mehrerer Doppeldeckermodule die Module nebeneinander anzuordnen.

Zusätzlich zu den Strömungsuntersuchungen standen bei den Messungen im Schlammbetrieb vor allem die Filtrationsleistung und die Entwicklung von Reinigungs- und Betriebsstrategien im Vordergrund. Ein Umsetzen der Module war im Schlammbetrieb nicht möglich, da in erneutes Füllen des Reaktors mit belebtem Schlamm eine Einfahrphase von rund einem Monat benötigt. Für einen kontinuierlichen Betrieb sind stabile Schlammeigenschaften erforderlich. Einen Umbau im Schlammbetrieb ließ der Zeitrahmen des Projektes daher nicht zu. Für den Betrieb mit belebtem Schlamm wurden gleichzeitig zwei Doppeldeckermodule betrieben. Die Pilotanlage macht einen unterschiedlichen Betrieb für die beiden Module möglich, so dass über die Datenaufzeichnung Erkenntnisse über verschiedene Betriebsansätze erzielt werden konnten. Für die Messungen in belebtem Schlamm stand somit nur die Position 4 (2 Doppeldeckermodule, siehe Bild 7-9) zur Verfügung.

7.2.1 Beschreibung des Messverfahrens

Prinzip der ADV-Messung

Die Geschwindigkeitsmessungen wurden mittels Acoustic-Doppler-Velocimetry (ADV) durchgeführt. Bei diesem auf dem Doppler-Effekt beruhenden Messverfahren wird ein Ultraschall-Impuls ausgesendet, der von den im Wasser befindlichen Partikeln reflektiert wird. Aufgrund der Eigenbewegung der Teilchen tritt im reflektierten Impuls eine von der Raumrichtung abhängige Phasenverschiebung der Signale und deren Laufzeit auf.

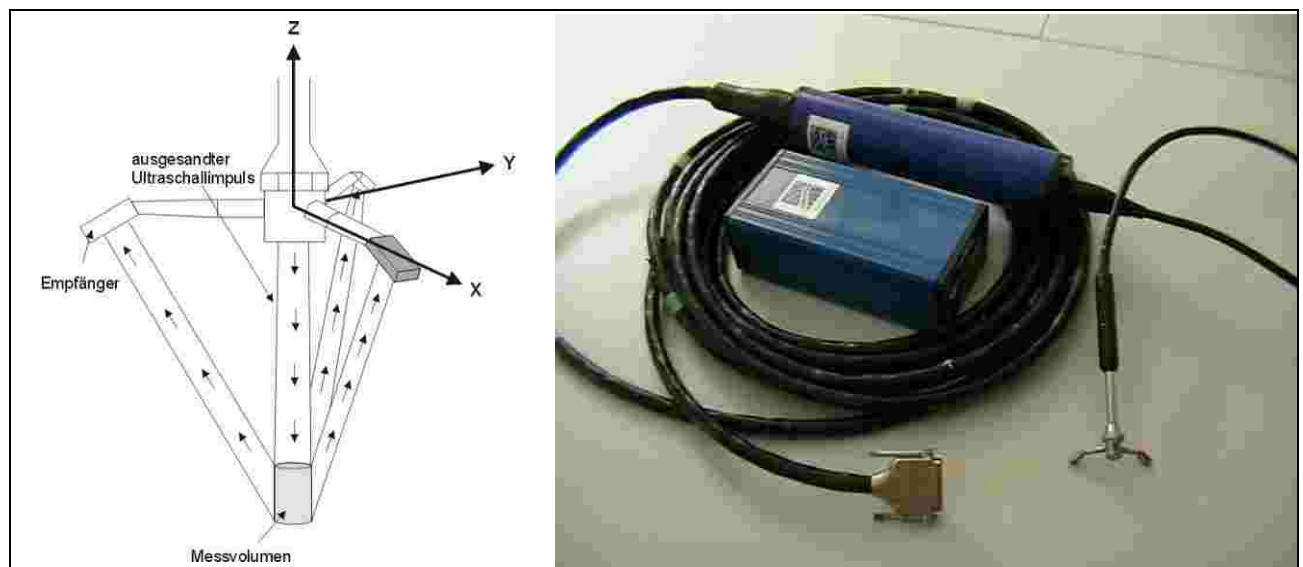


Bild 7-7: Sondenmesskopf der ADV-Sonde

Wie in Bild 7-7 dargestellt, lässt sich hieraus mittels dreier Empfänger, die äquidistant um den Ultraschall-Sender angebracht sind, zeitgleich die Geschwindigkeit der Partikel entlang der drei Raumrichtungen ermitteln. Das empfangene Signal wird digitalisiert und mit einem Software-Tool ausgewertet. So werden dreidimensionale Durchschnittsgeschwindigkeiten errechnet. Das Messvolumen befindet sich rund 50 mm unterhalb des Senders. Die Messfrequenz ist zwischen 0,1 - 25 Herz einstellbar. Die ADV-Sonde ermöglicht die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 0,05 - 100 cm/s (Nortek, 1997). Zur Wahl eines geeigneten Messbereiches müssen vor Beginn der Messung die größten zu messenden Geschwindigkeiten abgeschätzt werden. Die Messgenauigkeit beträgt nach Herstellerangaben $\pm 0,25\%$ des eingestellten Messbereiches (Nortek AS). In Bild 7-7 ist der Sondenkopf der ADV-Sonde abgebildet.

Position der Sonde im Reaktor

Die Sondenpositionierung erfolgt über eine Traversierungseinheit (Firma: iselautomation), die ein millimetergenaues Anfahren der Messpunkte ermöglicht. Sonde und Traversierungseinrichtung zeigt Bild 7-8. Mittels der blauen Traversierungsschienen ist eine genaue Positionierung der ADV-

Sonde möglich. Im Bild 7-8 ist eine Aufsicht von oben auf die Filtrationskammer der Pilotanlage zu sehen. Es ist außerdem ein mittig im Reaktor angeordnetes Doppeldeckermodul M70 mit seitlichem Filtratabzug zu erkennen (Position 1).

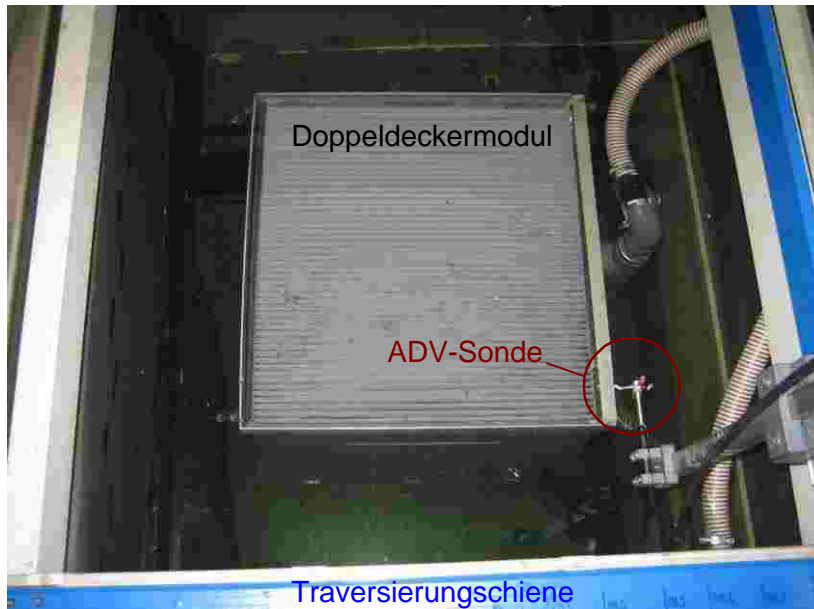


Bild 7-8: Anordnung von Traversierungseinheit und ADV-Sensor auf der Pilotanlage

In Bild 7-9 sind in Anlehnung an das Bild 7-6 die vier untersuchten Positionen und die jeweils verwendeten Messraster dargestellt.

Da der Querschnitt des Reaktors wesentlich größer ist als der Querschnitt, der von der Traversierungseinheit angesteuert werden kann, musste die Traversierung für die Messung teilweise auf dem Reaktor verschoben werden. So war es möglich an verschiedenen Stellen im Reaktor zu messen (Bild 7-9, z.B. Raster 3). Je nach Modulposition wurden unterschiedliche Messraster verwendet. Die Messraster für die verschiedenen Positionen sind durchnummeriert. Die schwarzen Punkte stellen die einzelnen Messpunkte dar. Aufgrund von Einbauten und Schläuchen oberhalb der Module und der Tatsache, dass die Sonde einen Mindestabstand zu festen Gegenständen benötigt, können nicht alle Bereiche des Reaktors vermessen werden.

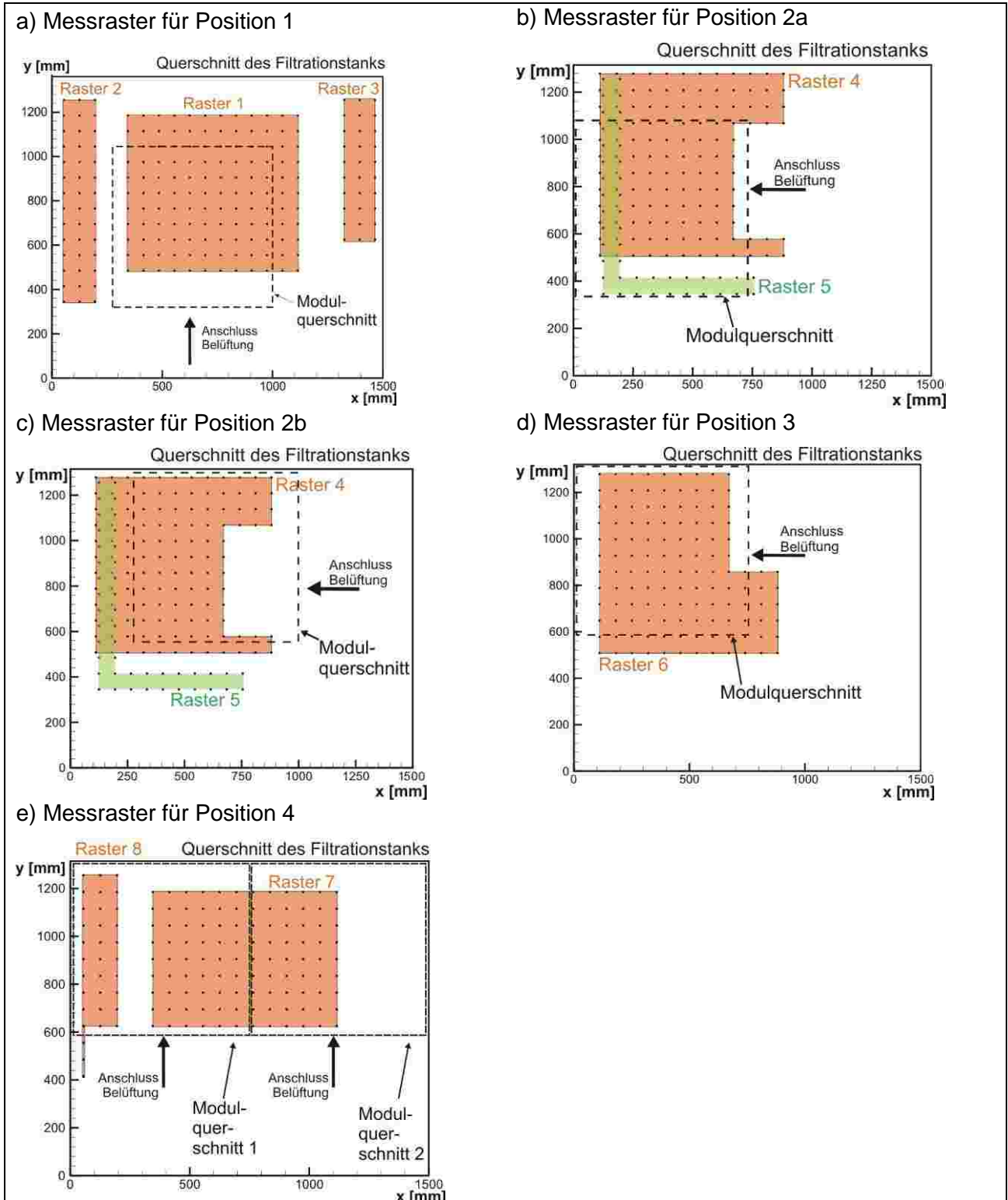


Bild 7-9: Messraster für Positionen 1 bis 4 der Module in der Pilotanlage

Auswertung der ADV-Daten

Zur Auswertung der ADV-Messungen waren insgesamt die drei nachstehend genannten Schritte notwendig:

1. Schritt Datenverdichtung: Die Software WinADV bietet eine Visual Basic 4.0 basierte Softwareumgebung zur Ansicht, Bearbeitung und Auswertung von Messdaten, die mit der ADV-Sonden erfasst wurden. Die Analyse der Daten erfolgte in MS Excel und mit der Visualisierungssoftware TecPlot.

2. Schritt Datentransformation: Da die ADV-Sonde einen Mindestabstand zu festen Gegenständen benötigt, wurde sie für manche Messprofile bezogen auf den Uhrzeigersinn um -90° oder 180° gedreht in die Sondenhalterung der Traversierungseinheit eingebaut. Je nach Ausrichtung des Sondenkopfes war eine Transformation der Messdaten in MS Excel erforderlich. Dabei wurden alle Messdaten auf die Koordinaten des Versuchsbehälters transformiert. In Bild 7-10 sind die Umrechnungen für verschiedene Ausrichtungen des Messkopfes dargestellt. Der Sondenmesskopf ist hier mit einem rot markierten Messfüßchen versehen: dieses Messfüßchen zeigte bei allen Messungen nach oben (z-Richtung der Pilotanlage) und definiert für den Sondenkopf die x-Koordinate (siehe auch Bild 7-7).

3. Schritt Datenvisualisierung: Die Messdaten wurden mit der Software Tecplot visualisiert (Plotting-Software zur zwei- und dreidimensionalen Visualisierung von technischen Daten).

Alle Versuche wurden im Filtrationsmodus vorgenommen, damit die Membranen an dem Trägermaterial (Spacer) anliegen und somit reale Betriebsbedingungen für die Durchströmung gegeben waren. Die Belüftungsrate wurde in den Versuchen variiert.

Je nach Untersuchung wurden für die Aufnahme der Geschwindigkeitsprofile unterschiedliche Messraster entwickelt, die die Messung über unterschiedlichen Bereichen des Teststandes bzw. der Pilotanlage möglich machte. Teilweise wurde auf die Aufnahme eines kompletten Querschnittes verzichtet, wenn dies aufgrund von Symmetrien möglich war.

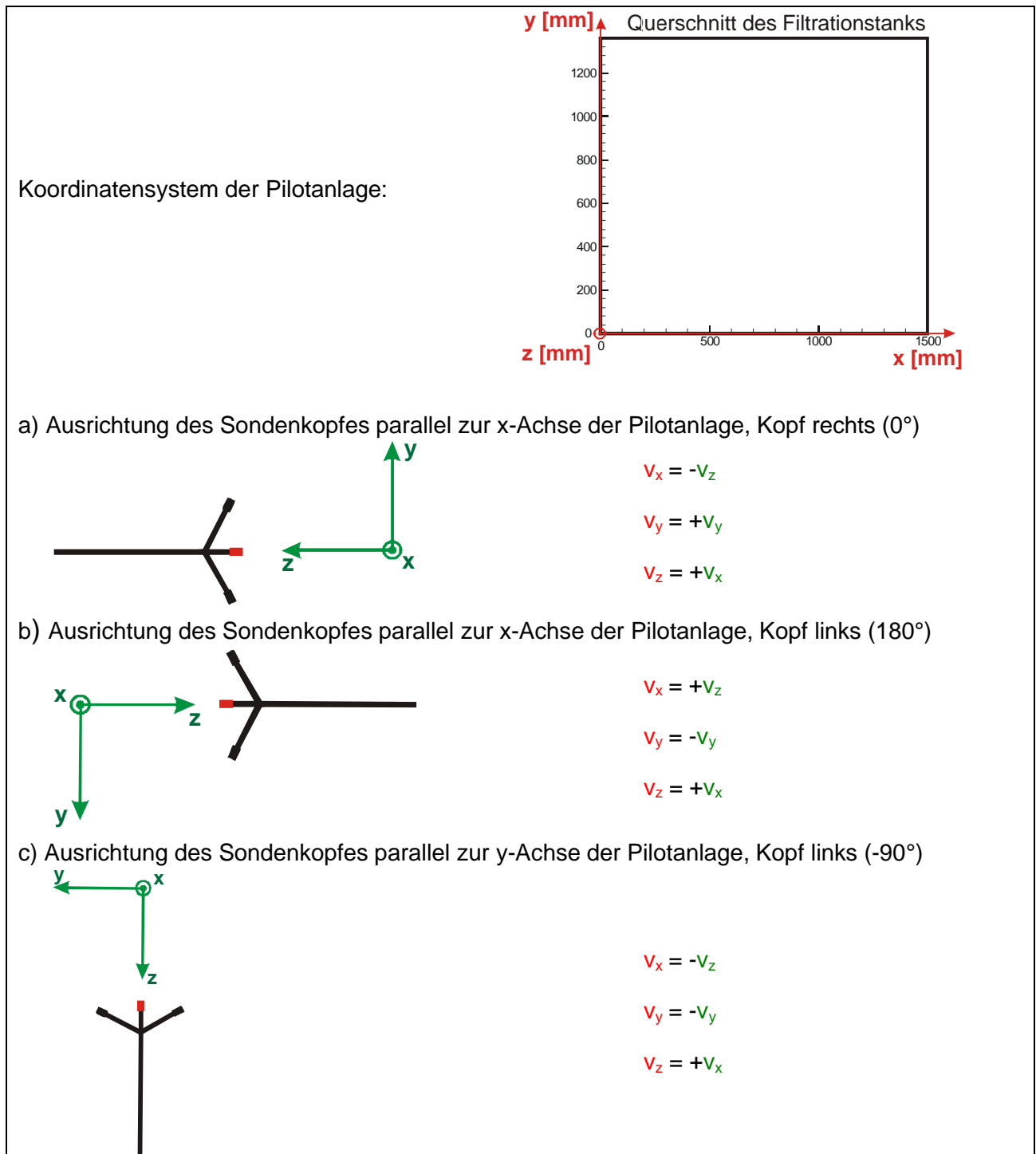


Bild 7-10: Umrechnung der Sondenkoordinaten auf die Behälterkoordinaten der Pilotanlage

Die Frage, ob eine geringere Zahl von Messpunkten ein Strömungsprofil hinreichend wiedergibt, wurde in den Messungen zur Phase I des vorliegenden Projektes bereits untersucht. Bei der Wahl des Messrasters wurde darauf geachtet, die Zahl der Messpunkte so gering wie möglich zu halten, um den Zeitaufwand pro Messraster zu minimieren. In Bild 7-11 sind die Ergebnisse der

Strömungsmessung in einem Ausschnitt des Teststandes mit 36 und 169 Messpunkten gezeigt. Die Falschfarbendarstellung der Strömungsprofile entsteht mittels Triangulation zwischen den aufgenommenen Messwerten. Dafür werden die Messpunkte zunächst zu einem Netz verknüpft (Finite Elemente Methode). Anschließend wird jeweils zwischen drei Knotenpunkten (Messpunkten) des so erzeugten Netzes interpoliert.

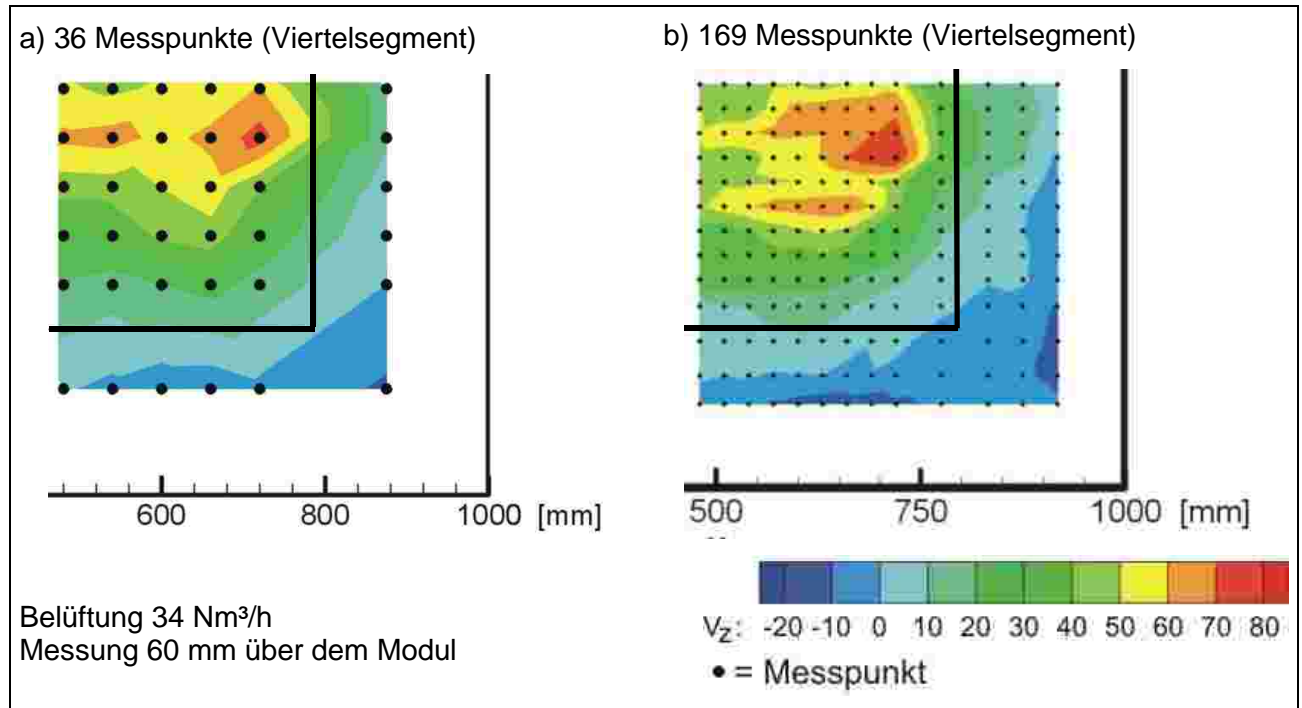


Bild 7-11: Standardmessraster und engeres Messraster über einem A40-Modul (Projektphase I)

Wie zu erwarten, zeigt das feinere Messraster Bild 7-11 b) die Geschwindigkeitsverteilung genauer an. Für die Beurteilung des Moduldurchströmung bezüglich gut und schwach durchströmten Bereichen sowie der maximalen und minimalen Geschwindigkeiten ist das gröbere Messraster hinreichend genau (Bild 7-11 a)). Aus diesem Grund wurden auch für die Versuche in der Pilotanlage größere Raster gewählt, mit einem Abstand der Messpunkte untereinander von 70 mm.

Luftmengenmessung

Die Messung der Luftmengen erfolgte mit Durchflussmessern der Firma Krohne. Die Luftmenge ist temperaturabhängig und druckabhängig. Um Normkubikmeter Luft pro Stunde [Nm³/h] zu erhalten, wurde unter Berücksichtigung der Eichung der Durchflussmesser eine Umrechnung der auf den Durchflussmessern abgelesenen Luftmenge vorgenommen. Als Betriebstemperatur in den Luftzuleitungen wurde eine Temperatur von rund 25°C ermittelt. Der Betriebsdruck ergab sich zu rund 0,34 bis 0,36 bar und wird in der Umrechnung mit 0,35 bar für alle Volumenströme berücksichtigt.

Die verwendeten Krohne Durchflussmesser sind auf eine Dichte von 1,293 kg/Nm³, eine Temperatur von 80°C sowie einen Betriebsdruck von 0,40 bar geeicht. Die Umrechnung der Betriebszustände erfolgt laut Krohne mit Hilfe der einfachen Skalenumrechnung.

7.2.2 Durchgeführte Untersuchungen

Ziel der Untersuchung der Strömung war es, Erkenntnisse über die Moduldurch- und Modulstromung zu gewinnen. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse sollte eine Belüftungseinstellung gefunden werden, die eine gleichmäßige Moduldurchströmung bei geringen Belüftungsraten erzielt, da so eine möglichst kostengünstiger Belüftung erreicht werden kann.

Folgende Punkte wurden im Rahmen des Projektes untersucht:

1. Untersuchung der Belüftungsintensität (Luftmenge),
2. bauliche Variation der Belüftungseinheit,
3. Einfluss der Modulposition im Reaktor auf die Durchströmung des Moduls,
4. Strömung im Abströmbereich (downcomer) des Reaktors,
5. Untersuchung des Viskositätseinflusses von belebtem Schlamm auf die Strömung.

In der ersten Phase des Projektes wurden bereits Untersuchungen bezüglich verschiedener Belüftungsraten durchgeführt. Aufgrund der veränderten Reaktor- und Modulgeometrien in der Projektphase II wurden diese Versuche mit der neuen Konfiguration wiederholt. Da die Pilotanlage ein größeres Reaktorvolumen aufweist, konnte außerdem der Einfluss der Modulposition im Reaktor auf die Moduldurchströmung untersucht werden.

7.2.3 Ergebnisse

Es wurden insgesamt 72 Versuche mittels ADV-Messung durchgeführt. Die einzelnen Versuche sind in den folgenden Kapiteln thematisch sortiert in Tabellen zusammengestellt. In den Tabellen werden die Ergebnisse wie folgt vereinheitlicht dargestellt:

Nr.	Medium	Modul- position	Belüftung		V _{min}	V _{max}	Prototyp	Mess- raster	Belüfter
			[m ³ /(m ² ·h)]	[Nm ³ /(m ² ·h)]	[cm/s]	[cm/s]			

Bild 7-12: Tabellenkopf der Ergebnistabellen

- **Nr.:** Die Versuche sind fortlaufend durchnummeriert. Teilweise waren mehrere Versuche für die Messung über einem Modul erforderlich. Versuche mit gleichen Einstellungen sind chronologisch hintereinander aufgeführt, grau oder weiß hinterlegt und an der gleichen Belüftungsrate zu erkennen.
- **Medium:** Die Versuche wurden mit Wasser und belebtem Schlamm mit unterschiedlichen TR-Gehalten durchgeführt.

- **Modulposition:** Die Module wurden im Reaktor an verschiedenen Stellen platziert (siehe hierzu auch Bild 7-6).
- **Belüftung:** Hier werden sowohl die am Durchflussmesser abgelesenen Belüftungsraten als auch die auf Normkubikmeter umgerechneten Werte dargestellt. Außerdem erfolgt eine Umrechnung auf die belüftete Membranfläche.
- **v_{\min} und v_{\max} :** Die Extremwerte der Geschwindigkeitsmessungen werden hier aufgeführt, weil sie einen Vergleich verschiedener Belüftungsraten ermöglichen. Verglichen werden können Extremwerte natürlich nur, wenn sie im gleichen Raster ermittelt wurden.
- **Prototyp:** verwendet wurde der Prototyp M70. In der Pilotanlage wurden entweder zwei übereinandergestellte Prototypen (Doppeldecker) oder zwei Doppeldecker, also vier M70 untersucht.
- **Messraster:** Die verwendeten Messraster werden in Bild 7-9 erläutert.
- **Belüfter:** Herstellerseitig wurden die verwendeten Belüfter ohne Aufsätze geliefert. Für die Untersuchungen wurden die Belüfter teilweise mit Aufsätzen versehen (siehe Kapitel 6, bzw. Bild 7-1).

Die Messungen erfolgten fast ausschließlich 70 mm oberhalb des Membranmoduls. Dabei ist zu beachten, dass dieser Wert innerhalb einer Messung um wenige Millimeter differieren kann, da die Moduloberfläche nicht absolut plan ist. Der Wasserstand über dem Modul betrug bei allen Versuchen mit Klarwasser rund 190 bis 200 mm im unbelüfteten Zustand. Bei belebtem Schlamm musste der Wasserstand aus betrieblichen Gründen leicht abgesenkt werden, so dass im unbelüfteten Zustand ein Wasserstand von rund 120 mm, im belüfteten rund 150 mm Wasserstand über dem Modul vorhanden waren. Das Absenken des Wasserstandes war erforderlich, da im Schlammbetrieb ein tägliches Rückspülen der Module erfolgte. Das hatte kurzfristig ein Ansteigen des Wasserspiegels im Reaktor zur Folge. Um das Freibord hier möglichst groß zu halten, wurde der Wasserstand im Filtrationsbetrieb leicht abgesenkt.

Aufgrund eines Defektes an der Messsonde, die durch eine Reparatur behoben werden konnte, sind die Ergebnisse der Versuche Nr. 1 bis 9 nur beschränkt verwertbar. Die Daten der Versuche Nr. 7, 8 und 9 sind meistens verworfen worden und werden daher grau gedruckt und nur der Vollständigkeit halber mit aufgeführt.

7.2.3.1 Untersuchung der Strömungsbeeinflussung durch die Belüftungsintensität

In Tabelle 7-1 sind die Versuchseinstellung mit unterschiedlichen Belüftungsintensitäten zusammengestellt. Untersucht wurden Belüftungsraten von 0,11 bis 0,31 $\text{Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Über 0,31 $\text{Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ hinaus war in der Pilotanlage aufgrund begrenzter Verdichterleistung keine Steigerung möglich. In Klarwasser konnte die Belüftung bis 0,31 $\text{Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ gesteigert werden, in belebtem

Schlamm war nur eine Belüftung bis rund $0,27 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ möglich, da hier die höhere Viskosität des Schlammes den Leistungseintrag reduziert.

Die meisten Versuche wurden mit Klarwasser durchgeführt, damit die Beeinflussung des Lufteintrags durch eine Deckschichtbildung weitgehend unterbunden sowie die Einstellung sehr geringer Belüftungsraten möglich wurde. Die Versuche Nr. 71 und 72 in Tabelle 7-1 wurden in belebtem Schlamm durchgeführt. Hierbei wurden unterschiedliche Belüftungsintensitäten eingestellt und die Geschwindigkeiten gemessen. Um die Belastungsdauer für die Module durch geringe Belüftungsraten gering zu halten, wurde während der Messung nur mit einer sehr geringen Flussleistung filtriert und nur wenige Punkte eines Messrasters pro Einstellung vermessen. Eine zu lang anhaltende Filtration mit geringer Belüftung kann zu Deckschichtbildung und Modulverblockung führen. Das sollte im Zuge der Untersuchungen zu den Betriebskonzepten (siehe Kapitel 6) vermieden werden. Eine Geschwindigkeitsmessung muss während der Filtration erfolgen, damit ein Unterdruck und damit ein Anliegen der Membranen gewährleistet sind.

In Bild 7-13 sind die Ergebnisse der Aufströmgeschwindigkeiten v_z von vier verschiedenen Belüftungsraten mittels Falschfarbendarstellung wiedergegeben. In Bild 7-13 a ist außerdem die Lage der einzelnen Belüfter durch gestrichelte Rechtecke angedeutet. Es ist anhand des Strömungsbildes gut zu erkennen, wo die Belüfter angeordnet sind, da über diesen Bereichen im Modul der stärkste Lufteintrag und damit die höchsten Geschwindigkeiten sichtbar sind. Dieser Einfluss der Belüftungseinrichtungen konnte schon bei den Messungen in der ersten Projektphase im Teststand nachgewiesen werden. Eintrag und Austrag der Luft aus dem Membranmodul scheinen fast identisch zu sein. Außerdem ist auffällig, dass der linke Bereich des Moduls offensichtlich stärker durchströmt wird als die rechte Seite. Vor allem oberhalb des dritten und vierten Belüfters ist eine schwächere Belüftung zu erkennen. Es scheint wahrscheinlich, dass die einzelnen Belüfter einen unterschiedlich guten Lufteintrag gewährleisten. Daher wurde ein Austausch der einzelnen Belüfter vorgenommen (siehe Kapitel 7.2.3.2).

Tabelle 7-1: Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Belüftungsintensität (Messraster siehe Bild 7-9)

Nr.	Medium	Modul-position	Belüftung		V_{\min}	V_{\max}	Prototyp	Mess-raster
			[m ³ /(m ² ·h)]	[Nm ³ /(m ² ·h)]	[cm/s]	[cm/s]		
1	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-27	14	2 70M	Raster 3
2	Wasser	Position 1			-58	58	2 70M	Raster 2
3	Wasser	Position 1			-3	61	2 70M	Raster 1
4	Wasser	Position 1	0,25	0,26	-26	16	2 70M	Raster 2
7	Wasser	Position 1			-30	13	2 70M	Raster 3
8	Wasser	Position 1			-	-	2 70M	Raster 1
5	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-24	7	2 70M	Raster 2
6	Wasser	Position 1			-47	11	2 70M	Raster 3
9	Wasser	Position 1			-33	56	2 70M	Raster 1
20	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-42	5	2 70M	Raster 3
21	Wasser	Position 1			-37	11	2 70M	Raster 2
22	Wasser	Position 1			-3	72	2 70M	Raster 3
23	Wasser	Position 1	0,25	0,26	-37	9	2 70M	Raster 2
24	Wasser	Position 1			-42	5	2 70M	Raster 3
25	Wasser	Position 1			-2	68	2 70M	Raster 1
26	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-23	8	2 70M	Raster 2
27	Wasser	Position 1			-29	3	2 70M	Raster 3
28	Wasser	Position 1			-32	56	2 70M	Raster 1
29	Wasser	Position 2b	0,30	0,31	-11	69	2 70M	Raster 4
30	Wasser	Position 2b			-10	10	2 70M	Raster 5
31	Wasser	Position 2b	0,14	0,15	-14	62	2 70M	Raster 4
32	Wasser	Position 2b			-11	6	2 70M	Raster 5
33	Wasser	Position 2a	0,30	0,31	-11	56	2 70M	Raster 5
34	Wasser	Position 2a			-19	65	2 70M	Raster 4
35	Wasser	Position 2a			-20	55	2 70M	Raster 5
36	Wasser	Position 2a	0,14	0,15	-26	58	2 70M	Raster 4
40	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-3	70	2 70M	Raster 1
41	Wasser	Position 1	0,19	0,21	-3	63	2 70M	Raster 1
71	Schlamm, TR ~ 11 g/l	Position 4	0,11 bis 0,25	0,11 bis 0,26	-	-	2 70M	Raster 7
72	Schlamm, TR ~ 11 g/l	Position 4	0,11 bis 0,26	0,11 bis 0,27	-	-	2 70M	Raster 7

alle Versuche ohne Belüfteraufsätze

Deutlich erkennbar ist eine Abnahme der Durchströmungsgeschwindigkeiten mit abnehmender Belüftungsintensität. Dies gilt sowohl für die schnell durchströmten Bereiche oberhalb der Belüfter als auch für die schwächer mit Luft beaufschlagten Bereiche. Ferner wird deutlich, dass die Steigerung von 0,26 auf 0,31 Nm³/(m²·h) augenscheinlich keinen großen Einfluss auf das ermittelte Strömungsbild der Aufströmgeschwindigkeiten hat. Die maximalen über dem Querschnitt ermittelten Geschwindigkeiten fallen zwar etwas höher aus (Steigerung von 68 cm/s auf 72 cm/s, Tabelle 7-1), die Steigerung ist aber nicht signifikant, vor allem da das Strömungsbild fast identisch ist. Auch das Strömungsbild, das mit einer Belüftung von 0,21 Nm³/(m²·h) ermittelt wurde, zeigt ein relativ ähnliches Bild. Lediglich die Randbereiche weisen hier etwas geringere Geschwindigkeiten auf und die hohen Geschwindigkeiten von rund 0,60 bis 0,70 cm/s direkt oberhalb der Belüfter treten kaum noch auf. Für die Belüftung in klarem Wasser wäre also schon eine Belüftungsrate von 0,26 Nm³/(m²·h) oder sogar 0,21 Nm³/(m²·h) ausreichend. Inwieweit diese Belüftungsraten die Deckschichtbildung begrenzen können, ist anhand der Messungen in belebtem Schlamm zu beurteilen.

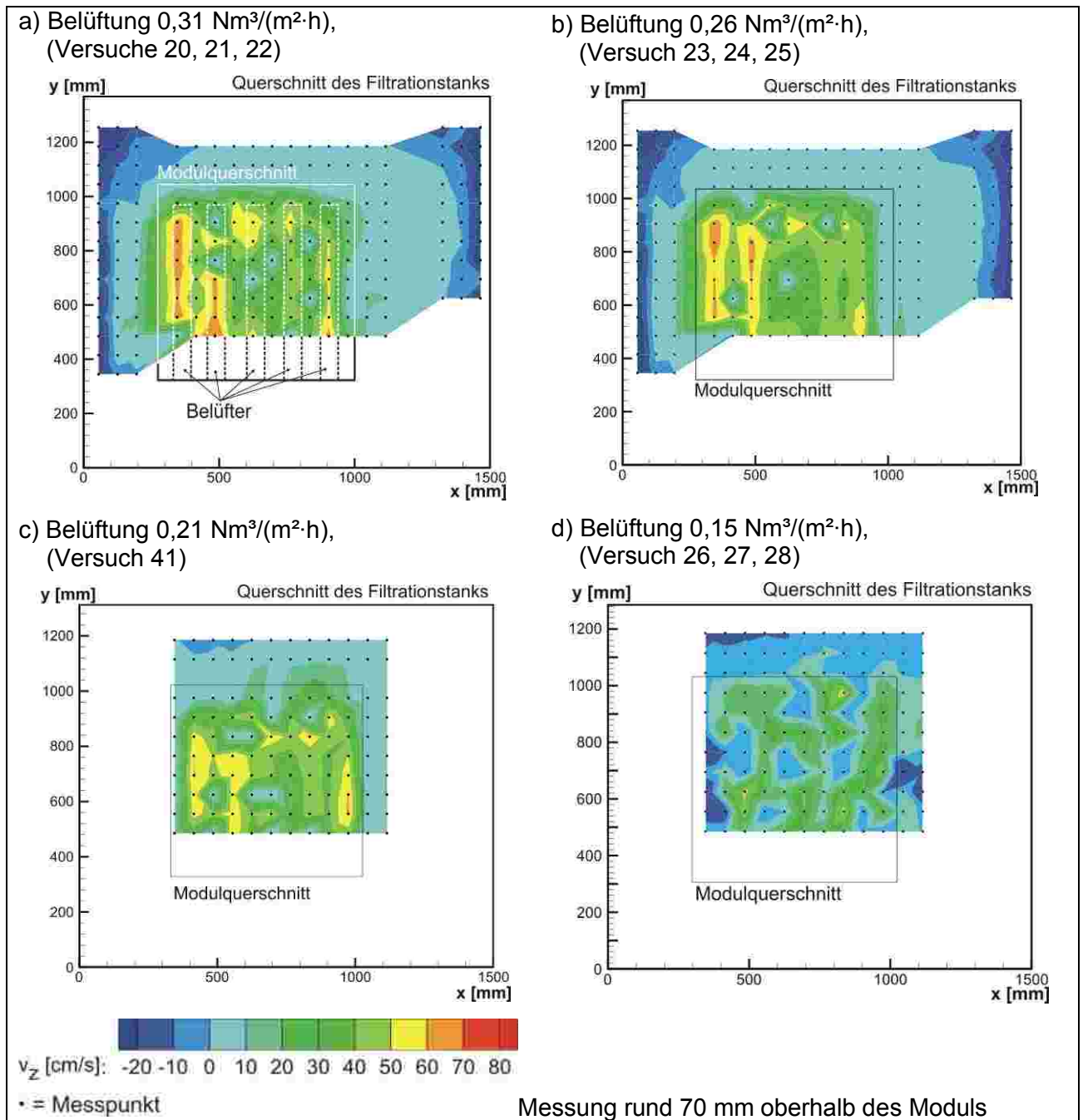


Bild 7-13: Moduldurchströmung bei verschiedenen Belüftungsraten

Gegenüberstellung Modul A40 und Modul M70

Bereits in der Projektphase I wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen Belüftungsraten durchgeführt. Gemessen wurde hier sowohl über einem einzelnen Modul A40 als auch über einem Doppeldecker A40. Die ermittelten maximalen Aufströmgeschwindigkeiten über dem einzelnen A40-Modul sowie Doppeldeckermodul A40 bzw. einem Doppeldeckermodul M70 aus der Projektphase II sind in Bild 7-14 grafisch dargestellt. Bei steigender Belüftungsrate wird ab rund ca. $1,0 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ keine weitere Zunahme der Aufströmgeschwindigkeiten erreicht. Teilweise kann

hier sogar eine Abnahme der Geschwindigkeiten beobachtet werden. Eine hohe Belüftungsrate verbunden mit einem hohen Energieverbrauch bedeutet daher nicht unbedingt eine gute Überströmung der Modulplatten. Des Weiteren wird deutlich, dass über einem Doppeldeckermodul bei stark reduzierter Belüftungsrate die gleichen Geschwindigkeiten und damit die gleiche Abreinigung der Membranoberfläche erzielt werden können wie bei einem Einzelmodul.

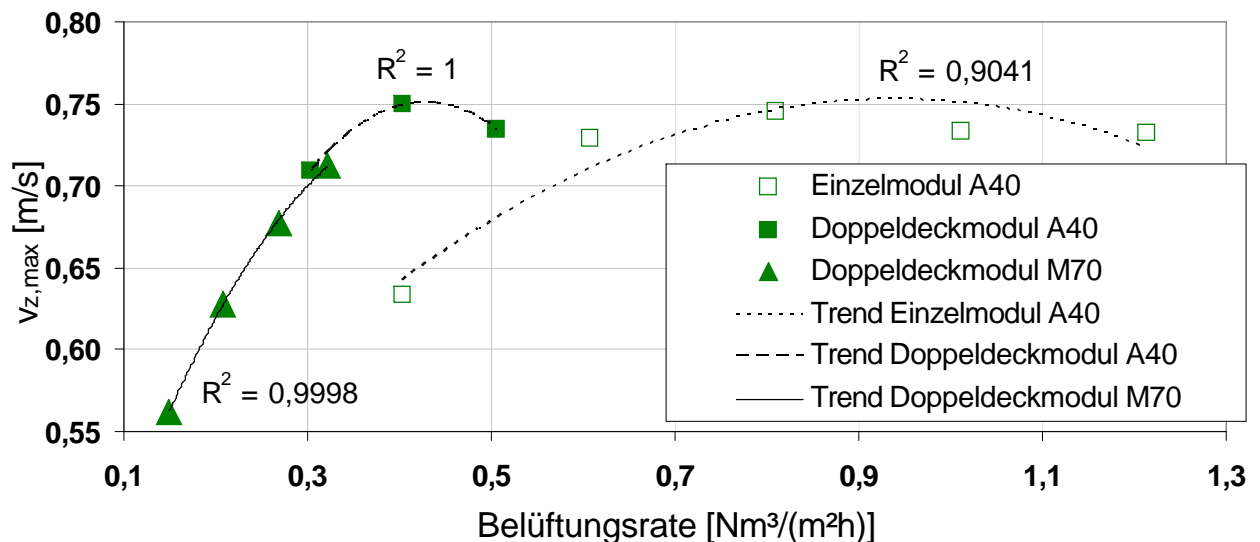


Bild 7-14: Ergebnisse aus den Klarwasseruntersuchungen mit den A3-Modulen A70 und M70 (Tacke, 2007)

Messungen im Belebtschlamm

Die bisher vorgestellten Geschwindigkeiten und Strömungsverteilungen wurden fast ausschließlich in Klarwasser ermittelt. Die Untersuchung der Belüftungsintensität in belebtem Schlamm gestaltet sich im laufenden Versuchsbetrieb einer Anlage schwierig, da durch Verringerung der Belüftung über einen längeren Zeitraum die Gefahr besteht, dass es zu stärkerer Modulverblockung und damit zu einer langfristigen negativen Veränderung der Modulfiltrationsleistung kommt. Aus diesem Grund konnten nicht für alle Belüftungsraten, die im Klarwasser untersucht wurden, ein komplettes Messraster aufgenommen werden.

Für die Untersuchung verschiedener Belüftungsraten in belebtem Schlamm wurde daher nur ein Ausschnitt des Messrasters Nr. 7 (Bild 7-9 e) von je 9 Messpunkten, die oberhalb des Membranmoduls lagen, ausgewählt. Die Messdauer pro Belüftungsrate konnte so auf rund 20 Minuten reduziert werden. In Bild 7-15 ist die Lage des Messbereiches sowie die Lage der einzelnen Messpunkte markiert. Der Bereich wurde anhand der Messerfahrungen in Klarwasser so ausgewählt, dass es sich um einen relativ gut durchströmten Bereich handelt, in dem auch hohe Geschwindigkeiten auftreten.

Die Messungen in diesem kleinen Messbereich wurden zweimal durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu überprüfen (Versuch 2 zur Überprüfung der

Reproduzierbarkeit). Gewählt wurde ein quadratischer Bereich. So konnte sowohl über stark wie auch über schwach mit Luft beaufschlagten Bereichen gemessen werden. In Bild 7-15 sind die Ergebnisse der Messungen mittels Falschfarben dargestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse der beiden Versuche zu erkennen. Vor allem die Messungen bei höheren Belüftungsraten von 0,23 und 0,26 Nm³/(m²·h) und daraus resultierenden höheren Geschwindigkeiten weisen ein sehr ähnliches Strömungsbild auf. Bei geringeren Belüftungsraten scheinen stärkere Turbulenzen als bei hohen Belüftungsraten aufzutreten und zu stärker abweichenden Strömungsbildern zu führen. Die Ergebnis der Belüftung 0,23 Nm³/(m²·h) und 0,26 Nm³/(m²·h) zeigen eine sehr ähnliche Moduldurchströmung und damit keine deutlichere Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten bei Steigerung der Belüftungsintensität.

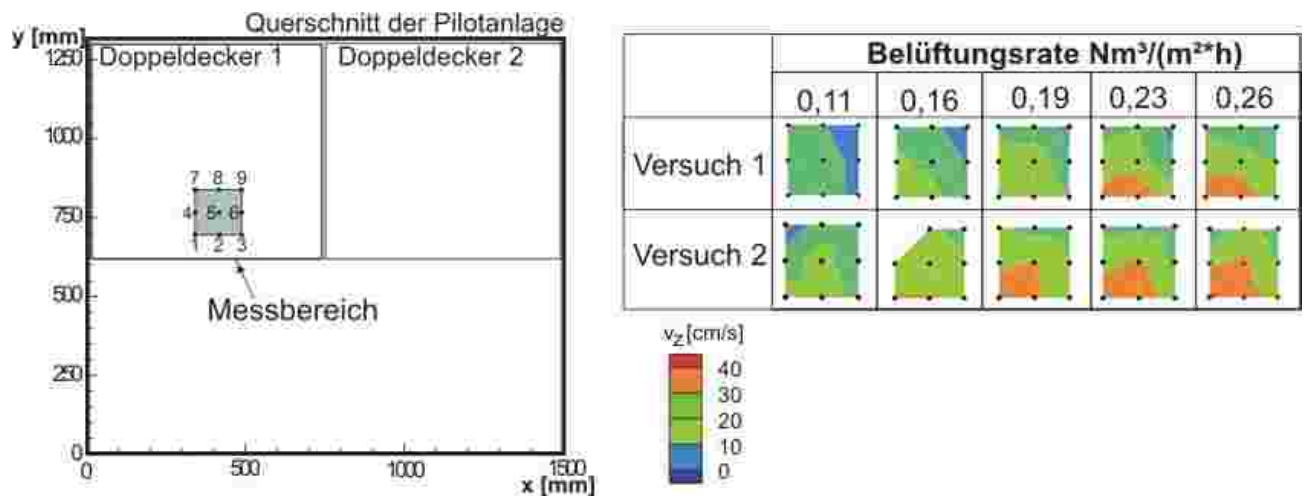


Bild 7-15: Messung in belebtem Schlamm (TR ~ 10 g/l) bei unterschiedlichen Belüftungs-raten (Versuch Nr. 71 und 72 nach Tabelle 7-1)

Es werden im Folgenden die einzelnen an jedem Punkt gemessenen Geschwindigkeiten betrachtet, um die Steigerung der Geschwindigkeiten genauer beurteilen zu können. In Bild 7-16 sind die Messergebnisse aus beiden Versuchen (Versuch 1 und Referenz-Versuch 2) für die einzelnen Punkte graphisch dargestellt.

Die Graphen aus beiden Versuchen zeigen, dass in einigen Punkten der Anstieg der Strömungsgeschwindigkeiten mit steigender Belüftungsrate stagniert (z.B. Punkt 4). Das gilt nur eingeschränkt für die Bereiche, die besonders hohe Geschwindigkeiten aufweisen. In diesen Bereichen, die direkt oberhalb der Belüfter liegen, scheint noch eine Steigerung der Geschwindigkeiten durch Erhöhung der Belüftungsrate möglich zu sein, während die schwächer mit Luft beaufschlagten Bereiche kaum noch eine Steigerung erfahren.

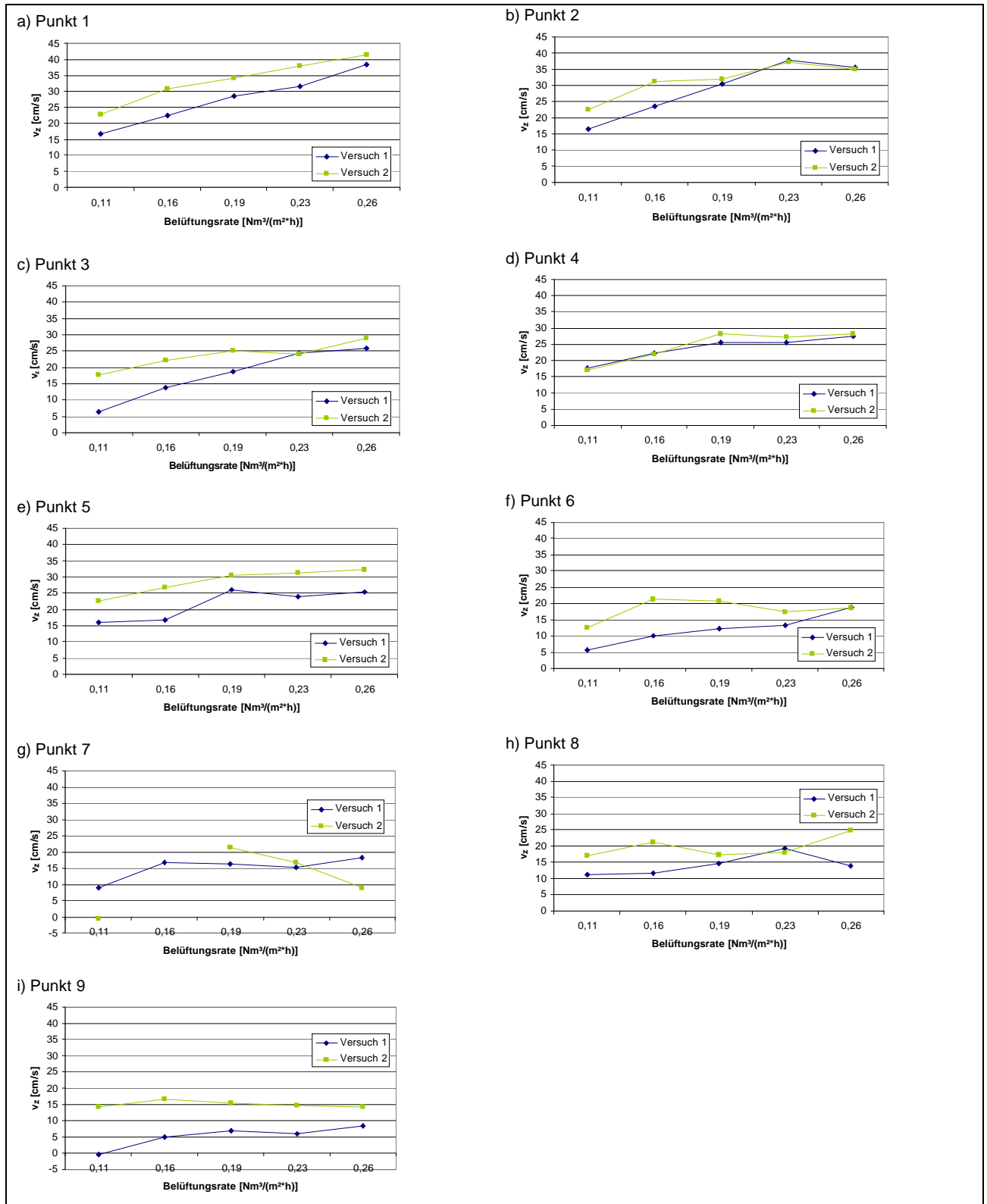


Bild 7-16: Geschwindigkeiten an einzelnen Messpunkten bei unterschiedlichen Belüftungsraten

Abweichungen zwischen den Messergebnissen aus den beiden Versuchen können aus folgenden Gründen entstehen:

- Die Belüftung muss von Hand auf die unterschiedlichen Raten eingestellt werden, so dass hier leichte Unterschiede entstehen können.
- Der Trockenrückstand wurde bei beiden Versuchen zu rund 10 g/l ermittelt. Hier kann sich aufgrund von Ungenauigkeiten in der Ermittlung des TR-Gehaltes durchaus ein Unterschied von bis zu einem Gramm zwischen den beiden Versuchen ergeben.

Die Auswirkungen unterschiedlicher Viskositäten des Schlamm-Wasser-Gemisches auf die Strömungsgeschwindigkeiten werden im Folgenden noch diskutiert (Kapitel 7.2.3.5).

7.2.3.2 Variation der Belüftungseinheit

Wie in Kapitel 6.1 bereits erläutert, wurden mit dem Ziel des gleichmäßigeren Lufteintrags in das Membranmodul Variationen der Belüftereinheit vorgenommen. Diese Untersuchungen wurden in Klarwasser durchgeführt. Es wurden zwei kammartige Aufsätze auf den Belüftern sowie der Einbau eines Lochbleches oberhalb der Belüfter untersucht. Da die optische Beobachtung der Strömung nach dem Einbau der ersten Kammaufsätze (vgl. Bild 7-3) eindeutig keine Verbesserung des Strömungsbildes ergab, wurden hierzu keine Strömungsmessungen durchgeführt. Nach der Optimierung der Kammaufsätze (modifizierter Kammaufsatz, vgl. Bild 7-4) wurden die Strömungsverhältnisse auch mit der ADV-Sonde erfasst.

Um die Geschwindigkeitsprofile der Variationen der Belüftungseinheiten miteinander vergleichen zu können, wurde für alle Varianten die gleiche Belüftungsrate von $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ gewählt. Da der Aspekt der Belüftungsintensität bereits mit der herstellerseitig vorgesehenen Belüftungseinrichtung intensiv untersucht wurde, wurden für die Variation der Belüftungseinrichtung Strömungsmessungen mit verschiedenen Belüftungsraten nur in geringem Umfang durchgeführt.

In Tabelle 7-2 sind die Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Variation der Belüftungseinheit zusammengestellt.

Zunächst wird auf die Untersuchungen mit den modifizierten Kammaufsätzen eingegangen.

Bild 7-17 a) zeigt das Strömungsbild oberhalb des Moduls, das durch den Lufteintrag der mit den modifizierten Kammaufsätzen versehenen Belüfter entsteht. In Bild 7-17 b) ist für den direkten Vergleich noch einmal das Messergebnis ohne Belüfteraufsätze abgebildet. Der Vergleich der beiden Strömungsbilder zeigt, dass durch die Kammaufsätze der Verlauf der Belüfter im Strömungsbild nicht mehr so eindeutig auszumachen ist wie ohne die Aufsätze. Das wurde auch schon bei der optischen Beobachtung des Lufteintrags unter dem Modul angenommen, da durch die Aufsätze eine Auffächerung der Luft stattfindet. Allerdings wird auch sichtbar, dass die Randbereiche des Membranmoduls weniger stark durchströmt werden.

Tabelle 7-2: Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Belüftungseinheit (Messraster siehe Bild 7-9)

Nr.	Medium	Modul-position	Belüftung		$V_{z,min}$ [cm/s]	$V_{z,max}$ [cm/s]	Prototyp	Mess-raster	Belüfter
			[m ³ /(m ² ·h)]	[Nm ³ /(m ² ·h)]					
10	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-18	80	2 70M	Raster 1	mod. Kamm
12	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-27	7	2 70M	Raster 3	mod. Kamm
13	Wasser	Position 1			-23	10	2 70M	Raster 2	mod. Kamm
11	Wasser	Position 1			-5	73	2 70M	Raster 1	mod. Kamm
14	Wasser	Position 1			-5	71	2 70M	Raster 1	mod. Kamm
15	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-19	9	2 70M	Raster 2	mod. Kamm
17	Wasser	Position 1			-43	13	2 70M	Raster 3	mod. Kamm
16	Wasser	Position 1			-6	63	2 70M	Raster 1	mod. Kamm
18	Wasser	Position 3			0,30	0,31	-9	90	2 70M
43	Wasser	Position 3	0,30	0,31	-36	3	2 70M	Raster 3	Lochblech
44	Wasser	Position 1			-38	10	2 70M	Raster 2	Lochblech
45	Wasser	Position 1			-2	67	2 70M	Raster 1	Lochblech
46	Wasser	Position 1			-24	8	2 70M	Raster 2	Lochblech
47	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-41	4	2 70M	Raster 3	Lochblech
48	Wasser	Position 1	0,25	0,26	-5	60	2 70M	Raster 1	Lochblech
49	Wasser	Position 1			-33	9	2 70M	Raster 2	Lochblech
50	Wasser	Position 1			-39	4	2 70M	Raster 3	Lochblech
51	Wasser	Position 1			-39	69	2 70M	Raster 1	Lochblech
52	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-14	3	2 70M	Raster 3	Lochblech, Belüftertausch
53	Wasser	Position 1			-28	9	2 70M	Raster 2	Lochblech, Belüftertausch
54	Wasser	Position 1			-1	76	2 70M	Raster 1	Lochblech, Belüftertausch
59	Wasser	Position 1			-31	9	2 70M	Raster 3	Lochblech, Belüftertausch
60	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-37	4	2 70M	Raster 2	Lochblech, Belüftertausch
55	Wasser	Position 1			-4	81	2 70M	Raster 1	Lochblech, Belüftertausch
56	Wasser	Position 1			-24	9	2 70M	Raster 2	Lochblech, Belüftertausch
57	Wasser	Position 1			0,14	0,15	-20	3	2 70M
58	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-2	61	2 70M	Raster 1	Lochblech, Belüftertausch

Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten konzentrieren sich stärker auf den inneren Bereich des Moduls. Wie in Kapitel 6.1 bereits erläutert, ließ schon die Beobachtung des Luftblasenaufstiegs unterhalb des Moduls die Vermutung zu, dass die Luft durch die Kammaufsätze noch stärker in die Modulmitte umgeleitet wird. Dies konnte durch die Strömungsmessung bestätigt werden.

Um sicherzustellen, dass das veränderte Strömungsbild aus den Belüfteraufsätzen und nicht aus Fehlern bei der Messung resultierte, wurde die Messung direkt über dem Membranmodul wiederholt. Erste Messung (Versuch Nr. 11, 12, 13) und Wiederholung (Versuch Nr. 14) sind in Bild 7-18 zusammengestellt.

Die Wiederholungsmessung zeigt ein zur ersten Messung vergleichbares Strömungsbild, womit die Reproduzierbarkeit der Messung nachgewiesen ist. Auch hier sind die schwach durchströmten Randbereiche deutlich zu erkennen und die Anordnung der Belüfter wird kaum aus der Geschwindigkeitsverteilung ersichtlich.

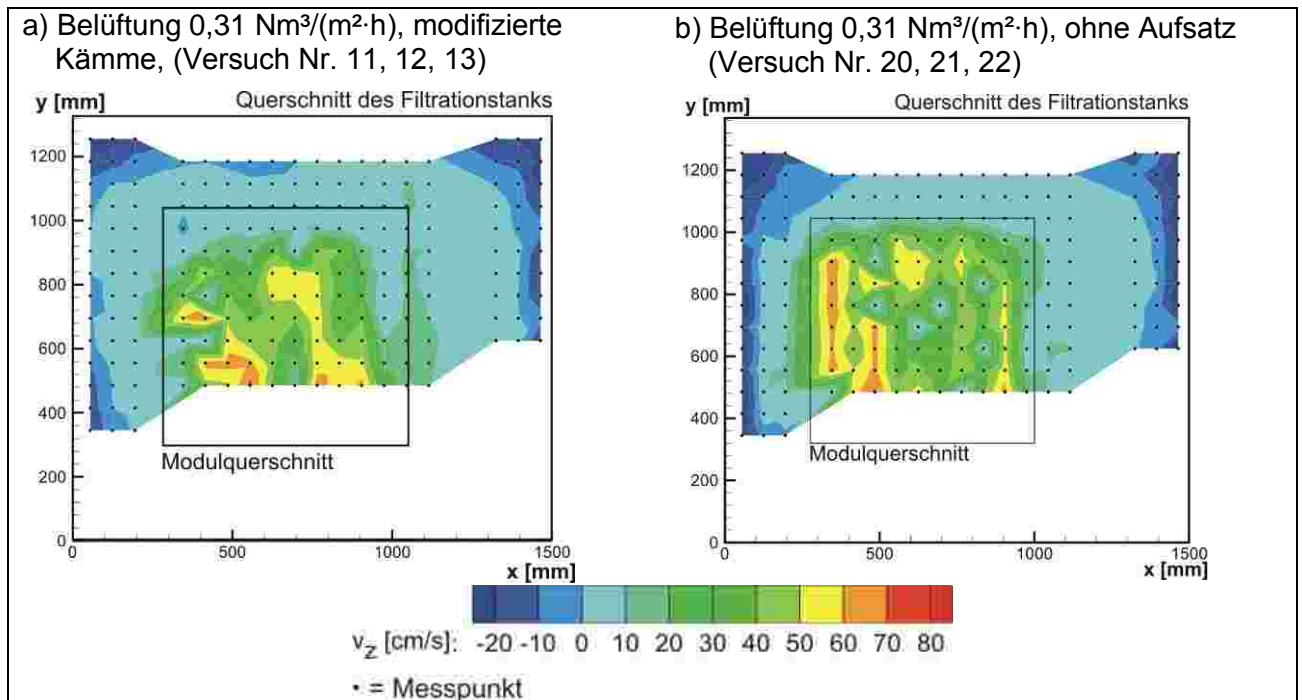


Bild 7-17: Einfluss der modifizierten Kammaufsätze auf die Strömungsverteilung oberhalb des Moduls im Vergleich zum Strömungsbild ohne Belüfteraufsätze mit einer Belüftungsrate von $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$

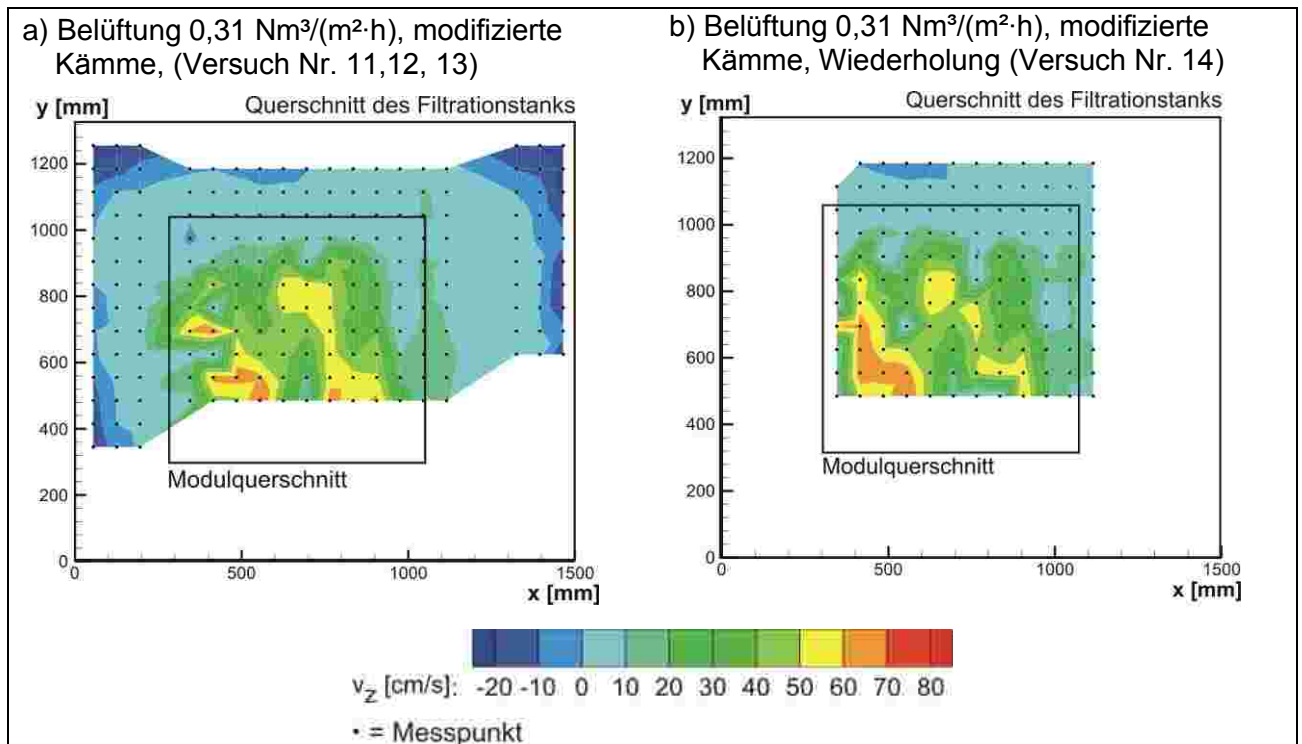


Bild 7-18: Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch Wiederholung der Messung direkt über dem Modul (Raster 1)

Da auch der Einbau der modifizierten Kammaufsätze nicht die gewünschte gleichmäßigere Verteilung des Lufteintrags erbrachte, wurde statt der Kammaufsätze eine Lochblechplatte (Lochdurchmesser ~2 cm) rund 5 cm oberhalb der Belüfter im Aufströmkanal eingebaut (siehe Bild 7-5). In Bild 7-19 a) ist die Strömungsverteilung mit Lochblechaufsatz bei einer Belüftungsrate von $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ dargestellt. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass die Randbereiche des Moduls auch mit dem Lochblecheinsatz nicht stärker durchströmt, als bei den Versuchen ganz ohne Aufsatz (Bild 7-19 b)). Beim direkten Vergleich der Strömungsbilder fällt auf, dass die Geschwindigkeitsverteilungen sehr ähnlich sind. Auch bei den Messergebnissen mit dem Lochblech kann die Lage der Belüfter teilweise aus der Verteilung der Geschwindigkeiten abgeschätzt werden. Damit bestätigt das Messergebnis die optische Beobachtung des Lufteintrags (siehe Kapitel 6.1), wonach durch das Lochblech kaum eine Verteilung der Luftblasen stattfindet. Die Blasen steigen auch nach Passieren des Lochbleches senkrecht auf – eine Ablenkung und damit eine Auffächerung der Luft sind nicht zu beobachten. Das Lochblech hat kaum Einfluss auf den Blasenanstieg.

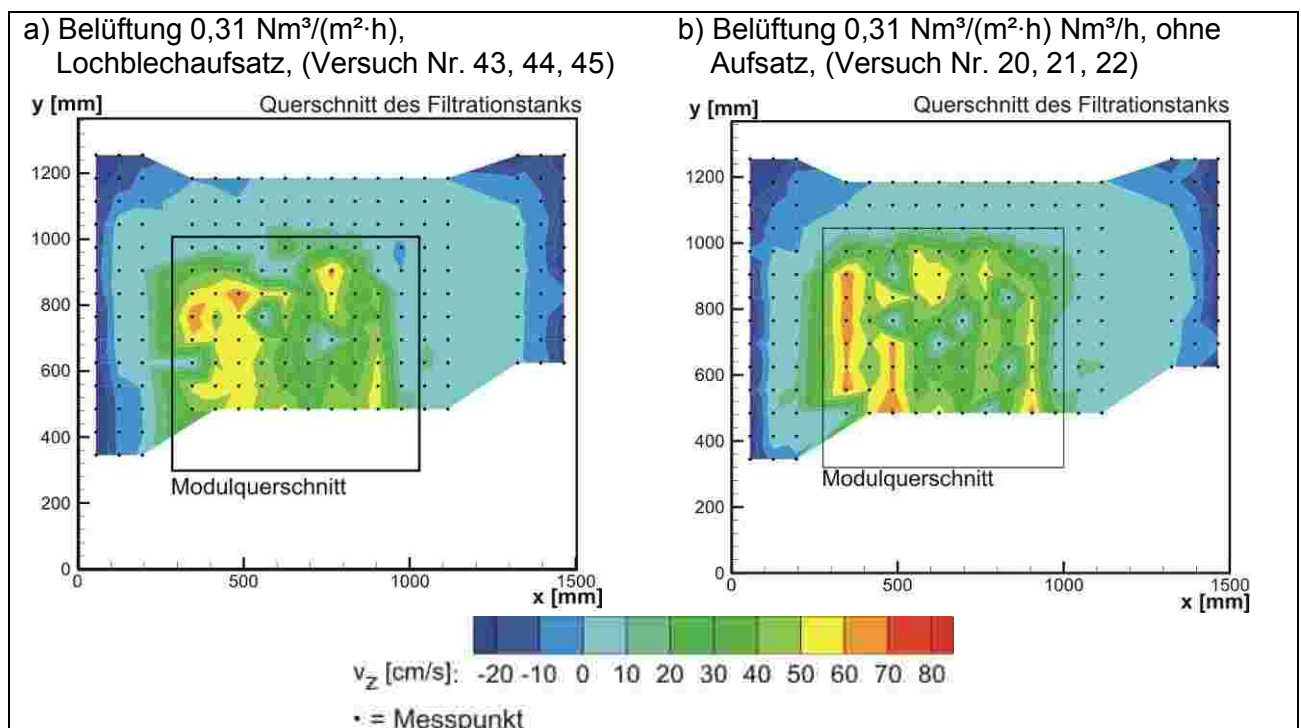


Bild 7-19: Einfluss des Lochbleches auf die Strömungsverteilung oberhalb des Moduls im Vergleich zum Strömungsbild ohne Belüfteraufsätze

Auch für die verschiedenen Belüfteraufsätze wurden unterschiedliche Belüftungsraten untersucht. Da der Zeitaufwand pro Versuch sehr hoch war, wurden hierzu wenige Versuche durchgeführt.

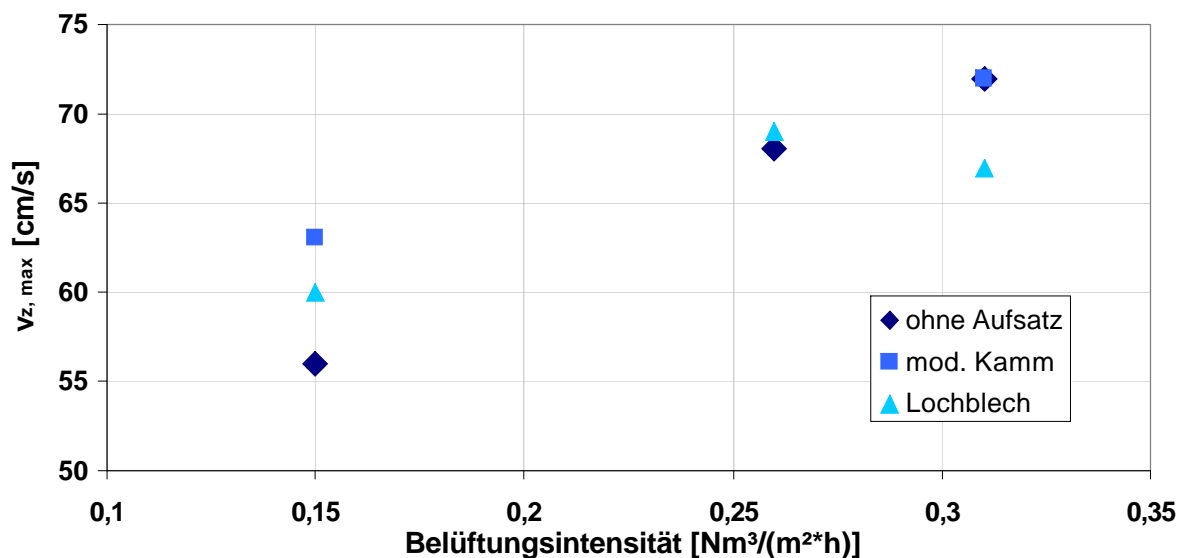


Bild 7-20: Maximal gemessene Geschwindigkeiten bei verschiedenen Belüftervariationen und unterschiedlichen Belüftungsintensitäten

Werden die maximalen gemessenen Geschwindigkeiten aus den einzelnen Versuchen mit und ohne Belüfteraufsätze gegenübergestellt (Bild 7-20), zeigt sich, dass die Geschwindigkeiten unabhängig vom Belüfteraufsatz vergleichbare Werte für die verschiedenen Belüftungsintensitäten aufweist. Neben einer möglichst hohen Strömungsgeschwindigkeit ist vor allem die gleichmäßige Verteilung der Luft im Modul von Bedeutung, so dass die maximalen Geschwindigkeiten hier nur einen zusätzlichen Aspekt zur Beurteilung der Strömung darstellen können.

Abschließend wird das Ergebnis des Austausches der Belüfter vorgestellt. Bei den Versuchen 52 bis 60 ist in Tabelle 7-3 neben dem Lochblech in der Spalte „Belüfter“ noch ein Belüftertausch vermerkt (siehe auch Kapitel 7.2.3.1). Aufgrund der Vermutung, dass einzelne Belüfter mehr Luft abgeben als andere, wurde ein Vertauschen der einzelnen Belüfter untereinander vorgenommen, um diese Annahme zu überprüfen. Der Belüftertausch wurde während der Versuche mit dem eingebauten Lochblechaufsatz vorgenommen. Das Ergebnis des Belüftertausches ist in Bild 7-21 dargestellt, wobei Bild 7-21 a die Durchströmung vor, Bild 7-21 b die Durchströmung nach dem Vertauschen der Belüfter zeigt. Die Anordnung der einzelnen Belüfter vor und nach dem Tausch ist ebenfalls unter den Strömungsbildern vermerkt. Das Strömungsbild nach dem Belüftertausch wurde noch einmal in einem zweiten Versuch überprüft und ergab ein vergleichbares Ergebnis.

Der Belüfter Nr. 5 wurde an der ursprünglichen Position belassen, um die Vergleichbarkeit der beiden Versuche vor und nach dem Tausch sichtbar zu überprüfen. Wird das Strömungsbild über diesem Bereich betrachtet, ist deutlich, dass hier kaum eine Veränderung festzustellen ist. Abweichungen ergeben sich links neben dem Belüfter, da hier die Belüftungseinheit verändert wurde. Beim Vergleich der Strömungsbilder fällt auf, dass auch nach dem Tausch der Belüfter vor allem die linke Modulhälfte stärker durchströmt wird. Die Lage der beiden links gelegenen Belüfter ist sogar noch deutlicher zu erkennen als vor dem Tausch. Die Belüfter 3 und 4 scheinen also im

Vergleich einen etwas stärkeren Lufteintrag zu bewirken. Dafür spricht auch, dass der rechte Modulteil über den Belüftern 1 und 2 nun anscheinend etwas schwächer mit Luft beaufschlagt wird.

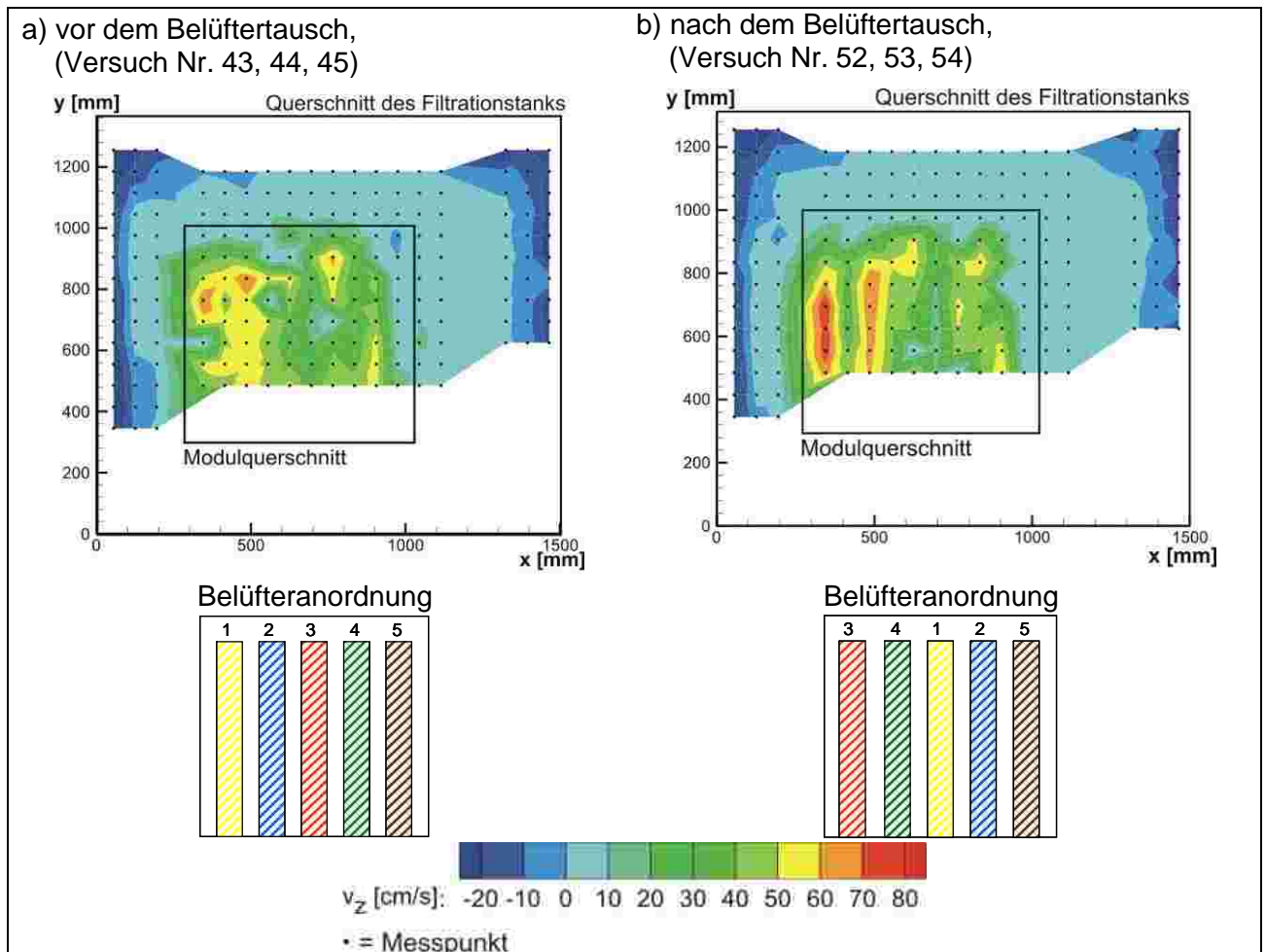


Bild 7-21: Ergebnisse der Moduldurchströmung vor und nach dem Tausch der Belüfterkerzen (Belüftung $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, mit Lochblechaufsatz)

Da das Strömungsbild vor und nach dem Belüftertausch aber eine ähnliche Verteilung der Geschwindigkeiten zeigt, scheint die unregelmäßige Belüftung nicht allein in den einzelnen Belüftern begründet zu sein. Es ist davon auszugehen, dass leichte Unregelmäßigkeiten im Modulplattenabstand im Modul zu der ungleichmäßigen Verteilung führen. Da es sich bei dem untersuchten Modul um eine Doppeldeckervariante handelt, können auch leichte Abweichungen zwischen den Plattenabständen der beiden aufeinandergesetzten Module zu engeren Spalten und damit zu schlechter durchströmbaren Bereichen führen. Da die einzelnen Belüfter nicht jeweils über eine eigene Zuleitung versorgt werden, kann es über den Verteilerkanal zu einer ungleichmäßigen Beschickung der Belüfter kommen (Bild 7-22).



Bild 7-22: Luftzufuhrkanal für die Belüfter im Aufströmkanal

7.2.3.3 Einfluss der Modulposition im Reaktor auf die Durchströmung des Moduls

In der Pilotanlage ist es möglich, ein einzelnes Doppeldeckermodul an verschiedenen Positionen im Reaktor zu platzieren (siehe auch Bild 7-6). Daneben besteht die Möglichkeit, zwei Doppeldeckermodule direkt nebeneinander im Reaktor einzubauen. In Tabelle 7-3 sind die Versuchseinstellungen für die Untersuchung der verschiedenen Modulpositionen zusammengestellt.

Aufgrund der im Reaktor verlaufenden Permeat- und Belüftungsschläuche ist die Messung mit der ADV-Sonde teilweise nur eingeschränkt möglich, da die Sonde einen freien Querschnitt oberhalb des Moduls benötigt. Einschränkend kommt hinzu, dass ein gewisser Abstand zur Reaktorwand eingehalten werden muss, um Störsignale bei der Messung zu vermeiden.

Tabelle 7-3: Versuchseinstellungen für die Untersuchung der Modulpositionen (Messraster siehe Bild 7-9)

Nr.	Medium	Modul- position	Belüftung		V _{z,min} [cm/s]	V _{z,max} [cm/s]	Prototyp	Mess- raster
			[m ³ /(m ² *h)]	[Nm ³ /(m ² *h)]				
1	Wasser	Position 1	0,29	0,31	-27	14	2 70M	Raster 3
2	Wasser	Position 1			-58	58	2 70M	Raster 2
3	Wasser	Position 1			-3	61	2 70M	Raster 1
4	Wasser	Position 1	0,25	0,27	-26	16	2 70M	Raster 2
7	Wasser	Position 1			-30	13	2 70M	Raster 3
8	Wasser	Position 1			-	-	2 70M	Raster 1
5	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-24	7	2 70M	Raster 2
6	Wasser	Position 1			-47	11	2 70M	Raster 3
9	Wasser	Position 1			-33	56	2 70M	Raster 1
19	Wasser	Position 3	0,30	0,31	-10	77	2 70M	Raster 6
20	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-42	5	2 70M	Raster 3
21	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-37	11	2 70M	Raster 2
22	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-3	72	2 70M	Raster 1
23	Wasser	Position 1	0,25	0,26	-37	9	2 70M	Raster 2
24	Wasser	Position 1			-42	5	2 70M	Raster 3
25	Wasser	Position 1			-2	68	2 70M	Raster 1
26	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-23	8	2 70M	Raster 2
27	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-29	3	2 70M	Raster 3
28	Wasser	Position 1	0,14	0,15	-32	56	2 70M	Raster 1
29	Wasser	Position 2b	0,30	0,31	-11	69	2 70M	Raster 4
30	Wasser	Position 2b			-10	10	2 70M	Raster 5
31	Wasser	Position 2b	0,14	0,15	-14	62	2 70M	Raster 4
32	Wasser	Position 2b	0,14	0,15	-11	6	2 70M	Raster 5
33	Wasser	Position 2a	0,30	0,31	-11	56	2 70M	Raster 5
34	Wasser	Position 2a			-19	65	2 70M	Raster 4
35	Wasser	Position 2a	0,14	0,15	-20	55	2 70M	Raster 5
36	Wasser	Position 2a	0,14	0,15	-26	58	2 70M	Raster 4
37	Wasser	Position 2a	0,30	0,31	-19	65	2 70M	Raster 4
39	Wasser	Position 2a	0,30	0,31	-4	66	2 70M	Raster 4
40	Wasser	Position 1	0,30	0,31	-3	70	2 70M	Raster 1
41	Wasser	Position 1	0,19	0,21	-3	63	2 70M	Raster 1
63	Wasser	Position 4	0,26	0,28	-12	65	4 70M	Raster 7

alle Versuche ohne Belüfteraufsätze

In Bild 7-23 sind die Messergebnisse der Geschwindigkeiten über den verschiedenen Positionen eines einzelnen Doppeldeckermoduls dargestellt, die bei einer maximal möglichen Belüftungsrate von 0,31 Nm³/(m²-h) durchgeführt wurden. Da die Anordnung der Belüfter einen Einfluss auf das Strömungsbild hat und das Modul je nach Position im Reaktor gedreht wurde, wird die Anordnung der Belüfter mit dargestellt.

Bei allen vier Positionen (1, 2a, 2b und 3) lässt sich die Lage der Belüfter aus den Strömungsbildern ableiten. Bei Position 1 und 3 wird die Lage am besten sichtbar.

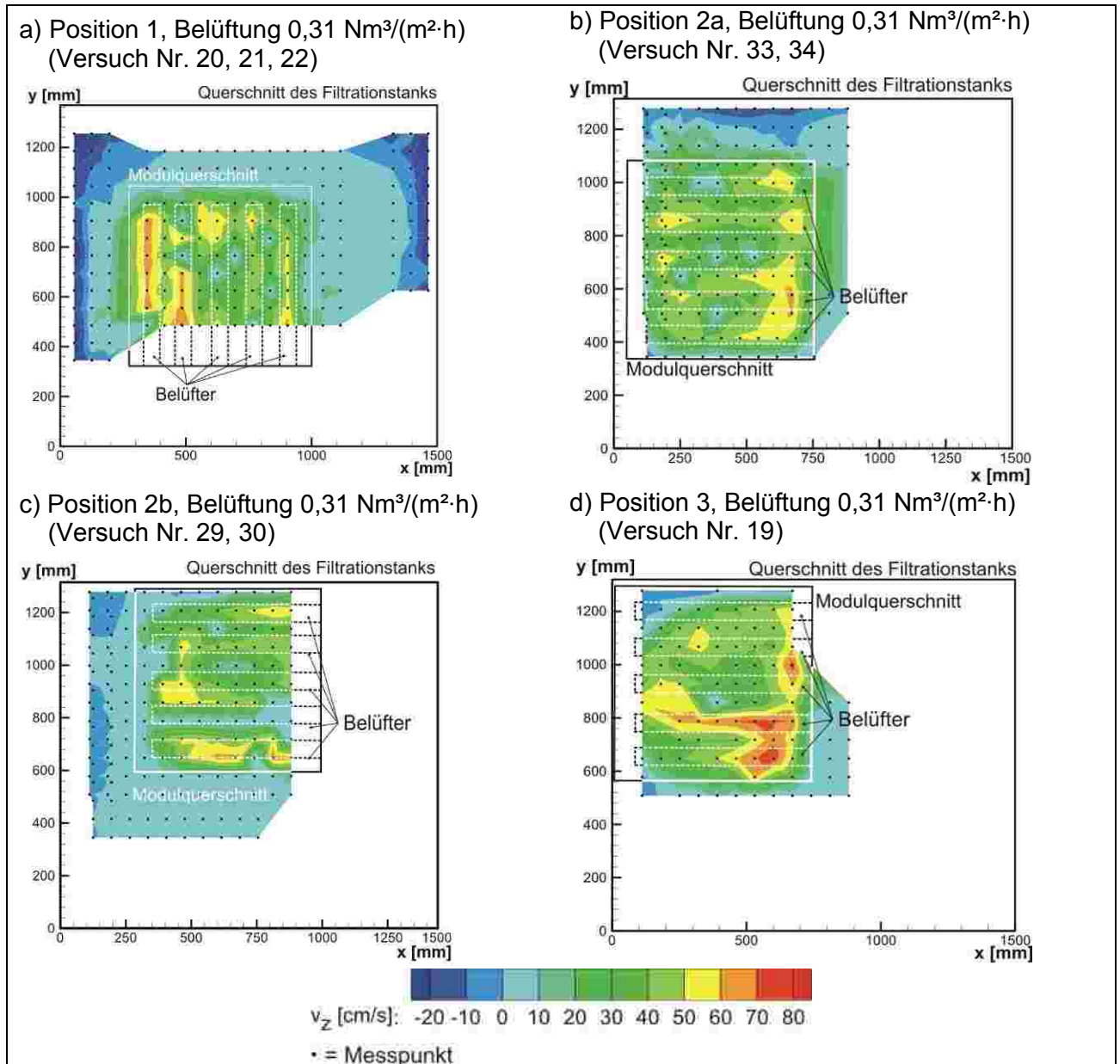


Bild 7-23: Strömungsbild im Reaktor bei unterschiedlichen Modulpositionen

Bei allen Positionen ist tendenziell die linke Seite des Moduls stärker belüftet als der rechte Bereich. Ansonsten lassen sich keine große Unterschiede zwischen den Strömungsbildern feststellen. Lediglich bei der Anordnung des Moduls in der Reaktorecke (Position 3) wird deutlich, dass direkt in der Ecke die Geschwindigkeiten stark abnehmen und sogar schon eine leichte abwärtsgerichtete Strömung im Modul stattfindet. Das deutet darauf hin, dass die Anordnung des Moduls an zwei rechtwinklig zueinander stehenden Wänden die Strömungsverhältnisse im Modul beeinflussen. Die Umströmung des Moduls kann ungehindert nur noch an zwei Seiten stattfinden, so dass die Strömung in den Bereichen, wo sie nicht mehr ausweichen kann, abgebremst wird

bzw. eine Rückströmung im Modul erfolgt. Ob es in der Ecke des Moduls zu noch stärkeren Rückströmungen kommt, kann nicht beurteilt werden, da eine Messung dort nicht möglich war. Da die Messung der Strömung über den einzelnen Modulpositionen keine großen Unterschiede zeigte, wurde im Klarwasser auch noch eine Messung über zwei parallel angeordneten Doppeldeckermodulen durchgeführt. Die Modulbelüftung wurde in diesem Fall auf $0,28 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ eingestellt, um eine Vergleichbarkeit mit den Messungen in belebtem Schlamm zu erhalten: bei den Versuchen mit belebtem Schlamm war eine Steigerung der Belüftung bedingt durch die erhöhte Viskosität nur bis auf eine Belüftung von maximal $0,28 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ möglich (vgl. Kapitel 7.2.3.5).

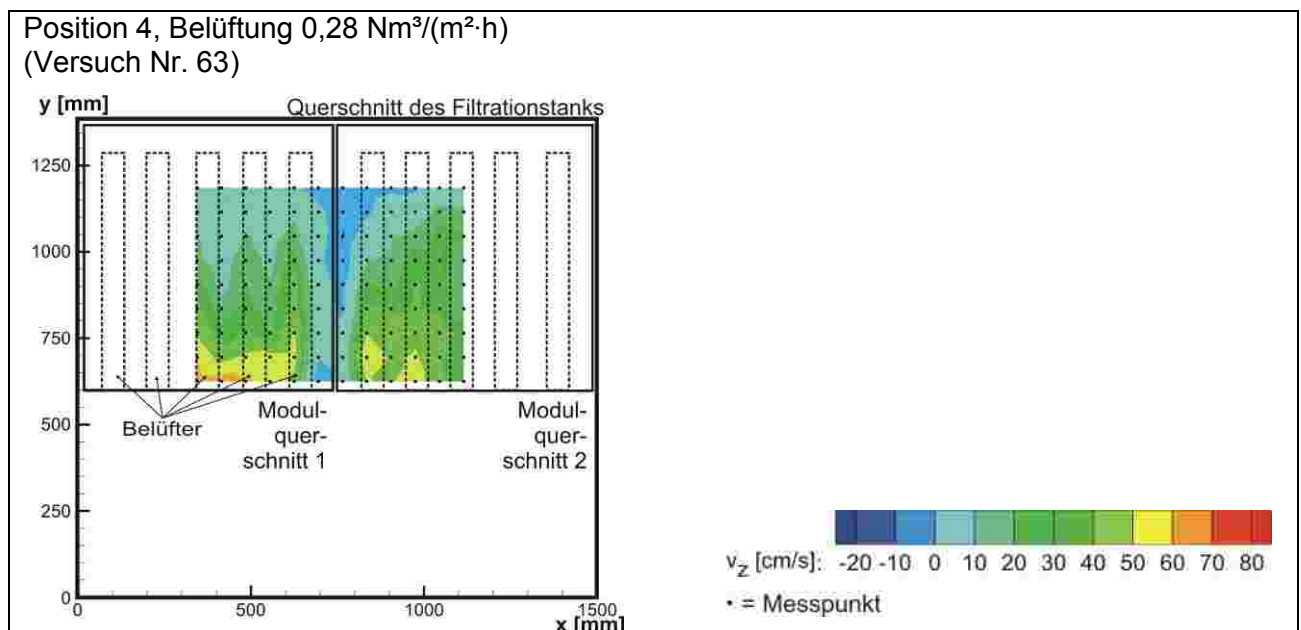


Bild 7-24: Strömungsbild über zwei Doppeldeckermodulen in der Pilotanlage

Bei Betrachtung der Strömungsverteilung über den zwei Doppeldeckermodulen (Bild 7-24) ist die Lage der Belüfter ebenfalls abschätzbar, wenn auch nicht mehr ganz so deutlich zu erkennen wie bei einem alleine im Reaktor angeordneten Modul.

Daneben werden zwei Aspekte deutlich:

- Obwohl im hinteren Bereich des Moduls, der näher zur Reaktorwand liegt, keine Messung vorgenommen wurde, lässt sich aus der Geschwindigkeitsverteilung abschätzen, dass dort Rückströmungen innerhalb der Module stattfinden. Der hellblau eingefärbte Bereich des Strömungsbildes steht für Geschwindigkeiten von 0 bis 10 cm/s. Es ist ableitbar, dass sich der schon in einigen Bereichen angedeutete mittelblaue Bereich mit Geschwindigkeiten von -10 bis 0 cm/s bis zur Reaktorwand fortsetzt und die Strömung schließlich nur noch abwärtsgerichtet stattfindet.
- Des Weiteren lässt sich beobachten, dass in dem Bereich, wo beide Doppeldeckermodule zusammenstoßen, eine Rückströmung stattfindet.

Die Strömungsbilder der Position 3 (ein Doppeldeckermodul in der Reaktorecke) und der Position 4 (zwei Doppeldeckermodule direkt nebeneinander) zeigen, dass die Ausbildung einer Zirkulationsströmung im Reaktor stattfindet, auch wenn das Modul nicht mittig im Reaktor angeordnet ist und die Strömung sich nicht frei ausbilden kann. Allerdings erfolgt die Strömung bei Anordnung des Moduls an Wänden oder neben einem anderen Modul innerhalb des Membranmoduls selbst. Da die Geschwindigkeiten im Fall der Rückströmung durch Energieverluste geringer ausfallen, als bei der direkten Durchströmung von unten, könnte hieraus in den Rückströmungsbereichen eine geringere Abreinigung der Membranoberfläche resultieren.

Die Ausbildung der Strömung ist sowohl von der Belüftungseinheit als auch von der Anordnung des Moduls im Reaktor abhängig. Für eine bessere Beurteilung der Strömung sollen im Folgenden neben den Aufströmgeschwindigkeiten v_z auch noch die Geschwindigkeiten der zwei anderen Raumrichtungen v_x und v_y mit in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Im Folgenden werden für ein mittig im Reaktor angeordnetes Doppeldeckermodul (Position 1), für ein Doppeldeckermodul in einer Reaktorecke (Position 3) und für zwei Doppeldeckermodule (Position 4) die Aufströmgeschwindigkeiten unter Einbeziehung der Raumrichtungen x und y dargestellt (Bild 7-25, Bild 7-26, Bild 7-27). Bei den Vektordarstellungen handelt es sich um Ansichten von der Seite auf den Reaktor. Es werden in die Bildebene hinein mehrere Messpunkte hintereinander dargestellt, so dass die hier anscheinend in einem Punkt dargestellten Vektorpfeile tatsächlich hintereinander liegen. Zum besseren Verständnis sind neben die jeweiligen Seitenansichten die bekannten Strömungsbilder der Aufströmgeschwindigkeiten v_z wiedergegeben (Reaktoraufsicht), in denen die einzelnen Messpunkte zu erkennen sind.

Für das mittig im Reaktor angeordnete Doppeldeckermodul werden in Bild 7-25 a) die Aufströmgeschwindigkeiten von v_x und v_z dargestellt. Gut zu erkennen sind die aufwärtsgerichteten Austrittsgeschwindigkeiten aus dem Modul, die durch die Modulbelüftung induziert werden. Des Weiteren ist erkennbar, dass neben dem Modul im freien Flüssigkeitsquerschnitt (downcomer) eine Abströmung stattfindet. Es findet also eine zu einem Schlaufenreaktor vergleichbare Zirkulationsströmung statt, mit einer im Reaktor aufwärtsgerichteten Strömungsrichtung durch das Modul (riser) und abwärtsgerichteten Strömungen außerhalb des Moduls (downcomer). Gut erkennbar ist außerdem die ungleichmäßige Durchströmung des Moduls, wie sie bereits der Darstellung der Aufströmgeschwindigkeiten v_z entnommen werden konnte (vergleiche Bild 7-25 b)). Daneben wird ein weiterer Aspekt deutlich: Die stärkeren Strömungen im linken Bereich des Moduls erzeugen anscheinend eine Art Sog durch den stärkeren induzierten Unterdruck. Dadurch wird die Strömung leicht nach links abgelenkt.

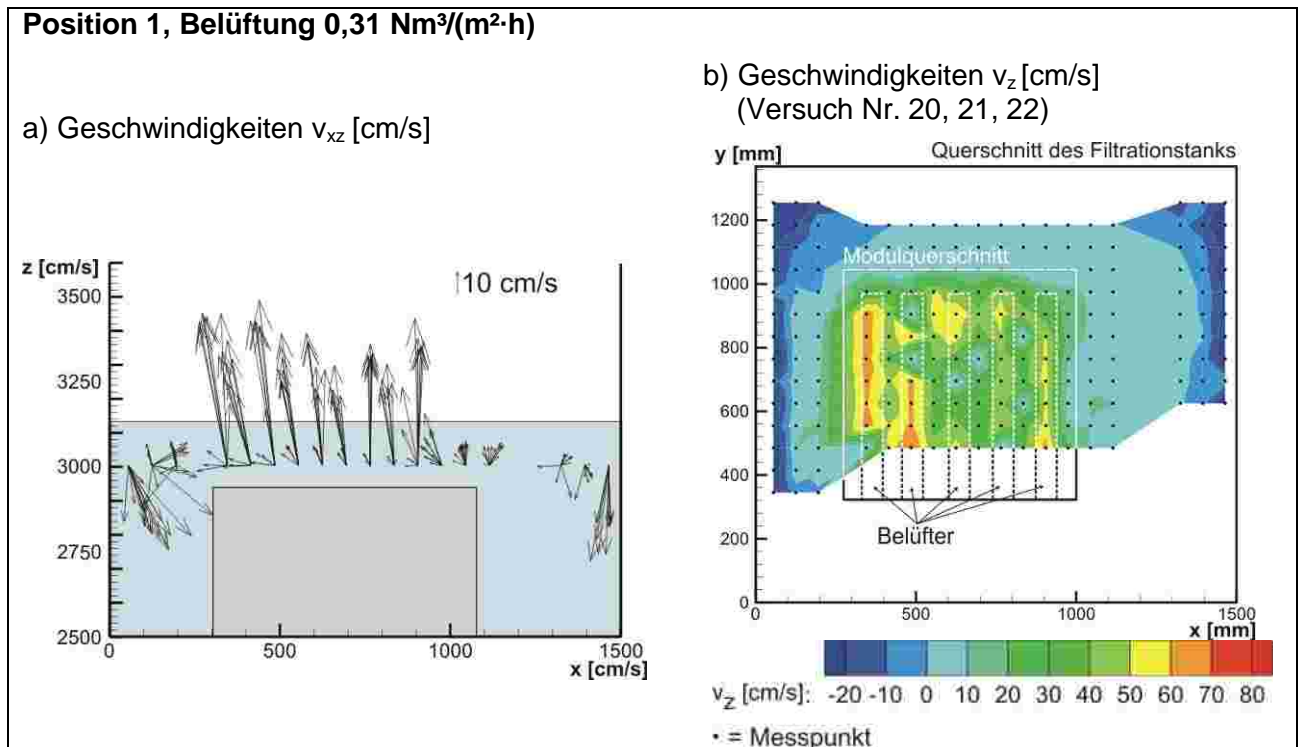


Bild 7-25: Vektordarstellung der Geschwindigkeiten v_{xz} (a) im Vergleich zu den reinen Aufströmgeschwindigkeiten v_z (b) für Position 1, Belüftung 0,31 Nm³/(m²·h)

Dass sich eine Zirkulationsströmung bei einem mittig im Reaktor angeordneten Modul ausbildet, konnte gezeigt werden. Interessant ist daneben die Fragestellung, inwieweit die Reduzierung des freien Wasserquerschnitts um das Modul herum durch die Anordnung eines Moduls an der Reaktorwand einen Einfluss auf diese Zirkulationsbewegung hat. Im Folgenden wird daher die Anordnung des Moduls in der Reaktorecke betrachtet. In Bild 7-26 sind die Strömungen v_{xz} und v_{yz} mittels Vektoren dargestellt. Es wird deutlich, dass eine Ablenkung der Strömung in Richtung des freien Wasserquerschnittes stattfindet. Aufgrund des Permeatabzugs am Modul konnten keine Geschwindigkeiten im freien Querschnitt neben dem Modul ermittelt werden. Es kann aber vermutet werden, dass in diesem Bereich eine abwärtsgerichtete Strömung stattfindet.

Abschließend wurde die Strömung für die Richtungen x und y in Kombination mit z für zwei nebeneinander angeordnete Module (Position 4) betrachtet. In Bild 7-27 sind die Vektordarstellungen für die Position 4 wiedergegeben. Bild 7-27 a) zeigt die Rückströmung, die in dem Bereich stattfindet, wo beide Module aneinander stoßen. In Bild 7-27 b) wird deutlich, dass die Strömung stark nach links, also in die Richtung des freien Wasserquerschnittes abgelenkt wird und nach rechts in Richtung Behälterwand kontinuierlich abnimmt. Außerdem sind im Bereich der abnehmenden Geschwindigkeiten erste Rückströmungen im Bereich der beiden Membranmodule zu sehen.

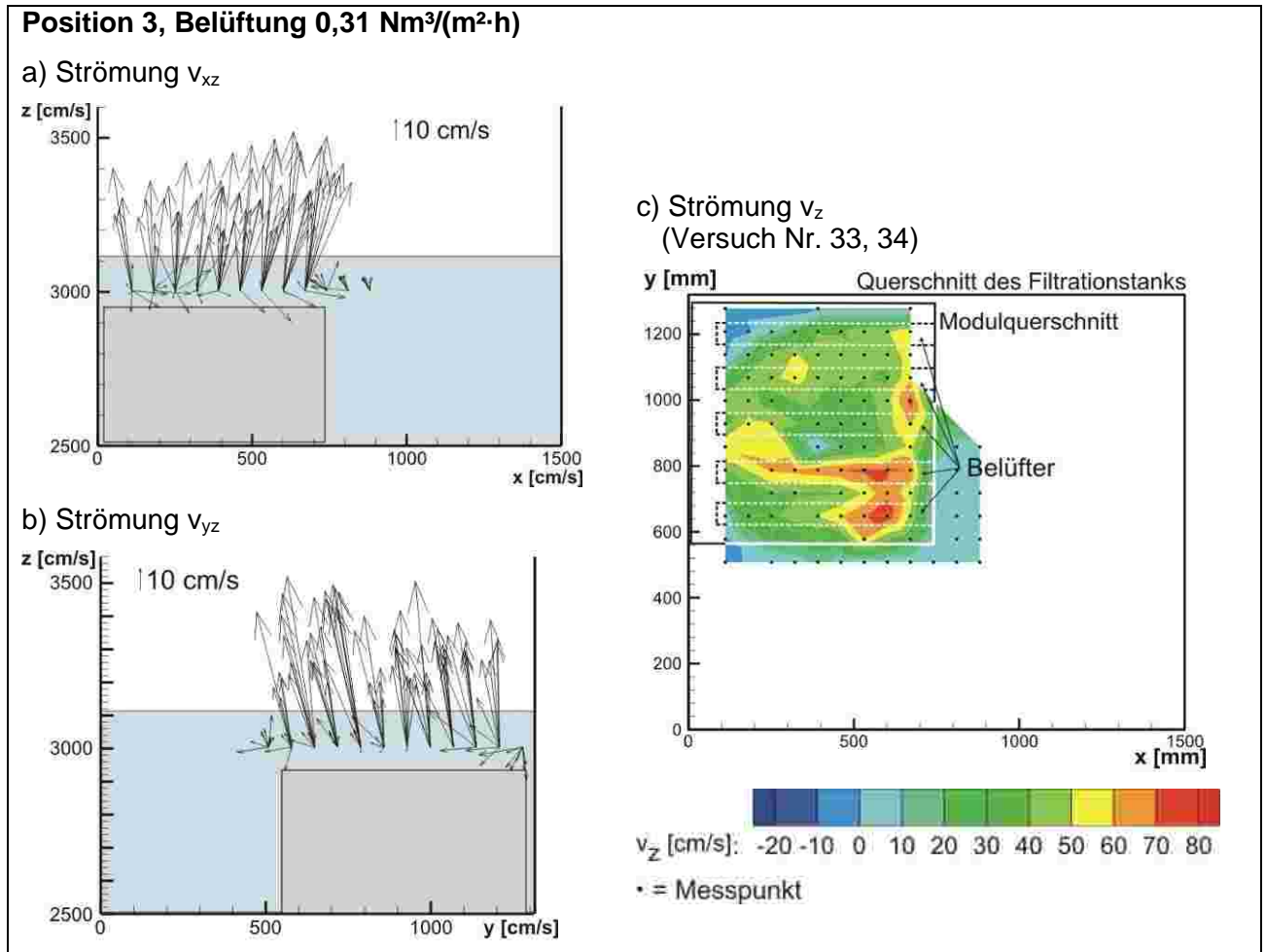


Bild 7-26: Vektordarstellung der Geschwindigkeiten v_{xz} (a) und v_{yz} (b) im Vergleich zu den reinen Aufströmgeschwindigkeiten v_z (c) für Position 3, Belüftung 0,31 Nm³/(m²·h)

Für die Aufstellung der Module an verschiedenen Positionen im Reaktor lassen sich folgende Ergebnisse feststellen:

- Wird ein Modul mittig im Reaktor angeordnet, bildet sich im Reaktor eine Zirkulationsströmung aus, wie sie bereits aus Schlaufenreaktoren bekannt ist.
- Es bestätigt sich auch in der Pilotanlage, dass stärker durchströmte Bereiche einen Sog erzeugen, so dass eine Umlenkung der benachbarten Strömung in Richtung der stärker durchströmten Bereiche erfolgt.
- Bei Anordnung der Module an einer Wand erfolgt eine Ablenkung der Strömung von der Wand weg. In Wandnähe ist außerdem eine Abnahme der aufwärtsgerichteten Strömungsgeschwindigkeiten zu beobachten.
- Es finden Rückströmungen innerhalb des Moduls statt, wenn das Modul an einer Wand bzw. neben einem weiteren Modul angeordnet ist.

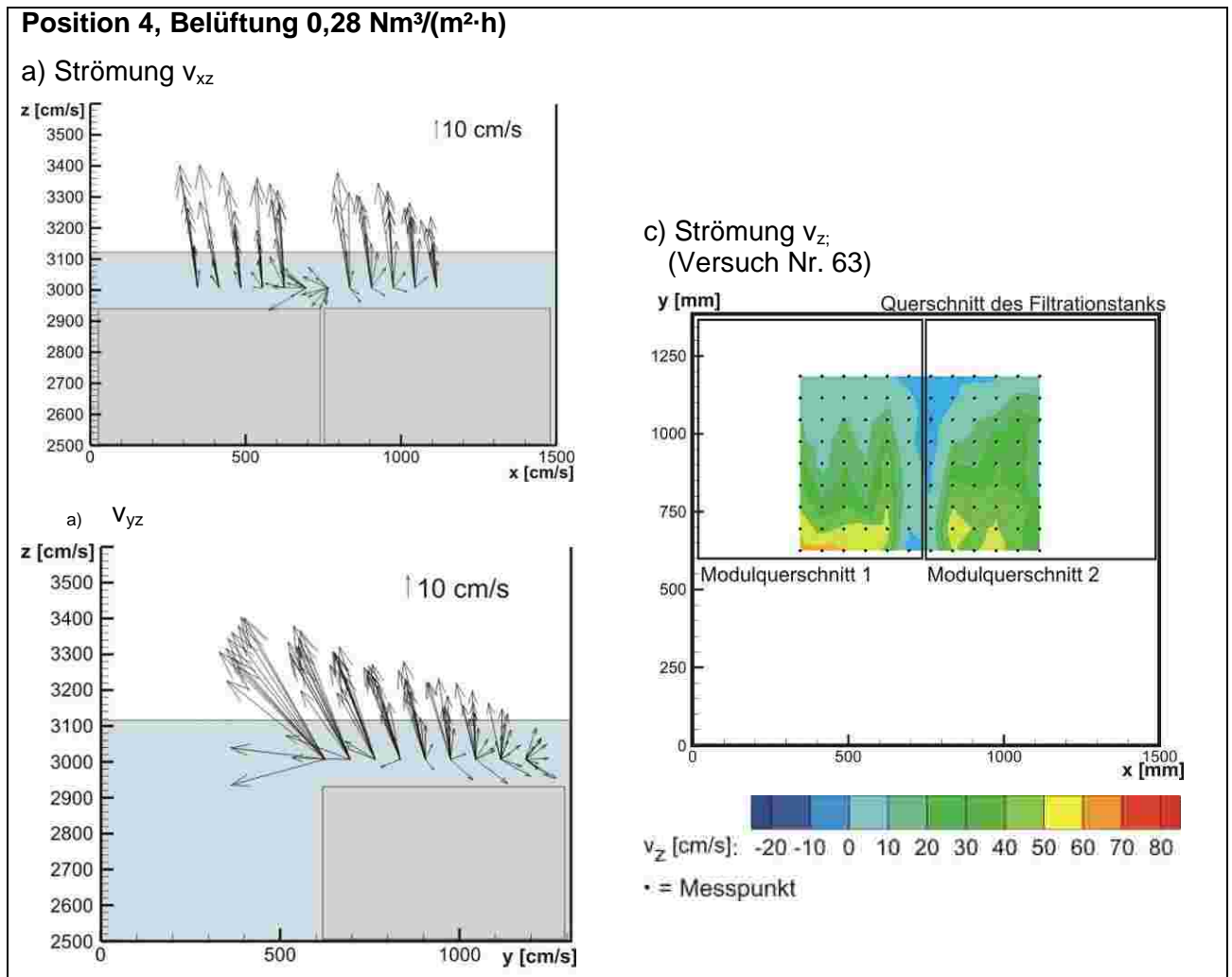


Bild 7-27: Vektordarstellung der Geschwindigkeiten v_{xz} (a) und v_{yz} (b) im Vergleich zu den reinen Aufströmgeschwindigkeiten v_z (c) für Position 4, Belüftung 0,28 Nm³/(m²·h)

7.2.3.4 Strömung im Abströmbereich des Reaktors

Die Untersuchungen der Strömung in der Pilotanlage konzentrierten sich vor allem auf die Durchströmung eines bzw. zweier Doppeldeckermembranmodule. Daneben wurden exemplarisch Messungen im Abströmbereiche (downcomer) des Reaktors, also neben dem Membranmodul durchgeführt. Ziel war es, die abwärtsgerichtete Strömung näher zu untersuchen und so eventuell Erklärungen für die Reduzierung der Zirkulationsströmung im gesamten Reaktor zu finden.

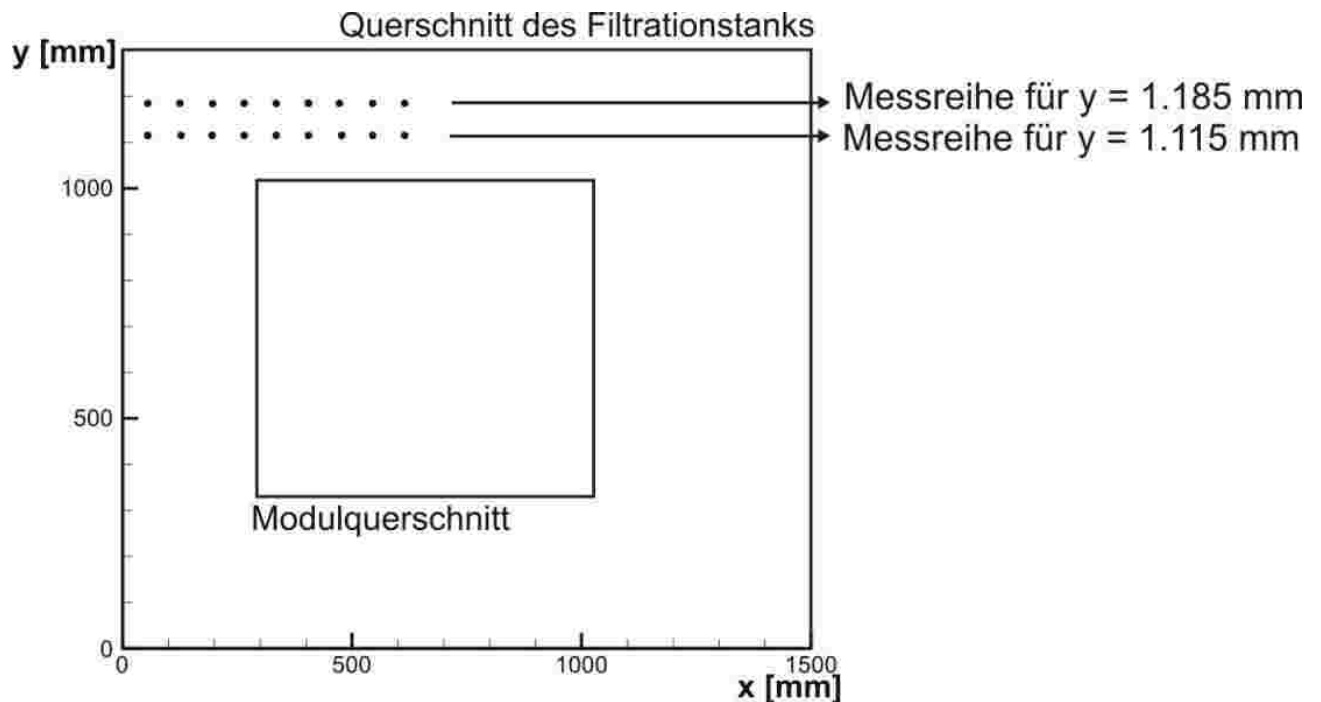


Bild 7-28: Lage der Messpunkte ($y = 1.115 \text{ mm}$, 1.185 mm) für die Messung im downcomer

Hierzu wurden Untersuchungen durchgeführt, bei denen das Doppeldeckermodul während der Messung mittig im Reaktor angeordnet war (Position 1). Die Belüfter waren noch mit dem Lochblechaufsatz versehen. Es wurde in zwei Schnitten im downcomer zwischen Doppeldeckermodul und Reaktorwand gemessen (siehe auch Bild 7-28):

- Messung rund 10 cm vor dem Modul bzw. rund 20 cm vor der Reaktorwand ($y = 1.115 \text{ mm}$),
- Messung rund 20 cm vor dem Modul bzw. rund 10 cm vor der Reaktorwand ($y = 1.185 \text{ mm}$).

Die Messpunkte liegen im Bild 7-29 alle hinter dem Membranmodul. Aus diese Grund ist die Position des Moduls auch nur in hellgrau und mit einer gestrichelten Umrandung dargestellt.

In Bild 7-29 sind die Messergebnisse im downcomer bei einer Belüftung von $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ mit Hilfe von Vektoren dargestellt. Gemessen wurde bis ungefähr einen Meter unter der Wasseroberfläche. Bei Betrachtung von Bild 7-29 wird deutlich, dass im downcomer wie erwartet eine abwärtsgerichtete Strömung stattfindet ($x = 0$ bis rund 300 mm). Für den Schnitt $y = 1.185 \text{ mm}$ (Bild 7-29 b) liegen die Messpunkte näher an der Reaktorwand und weisen höhere und deutlicher abwärtsgerichtete Geschwindigkeiten auf als die Messung näher am Membranmodule (Bild 7-29 a)). Des Weiteren wird eine nicht erwartete aufwärtsgerichtete Strömung zwischen Membranmodul und Reaktorwand sichtbar, die in Bild 7-29 a) besonders deutlich auftritt. Es ist davon auszugehen, dass diese Strömung von Luftblasen erzeugt wird, die in den Abströmbereich (downcomer) gezogen werden. Da die Strömung nicht ausreicht, die Blasen bis zum Reaktorboden zu befördern, steigen sie im Abströmbereich auf und verursachen so eine aufwärtsgerichtete Strömung.

Das Institut für Verfahrenstechnik hat zum Thema der Strömung im downcomer weitere Untersuchungen mittels optischer Visualisierung durchgeführt. Diese Versuche werden im Folgenden noch diskutiert.

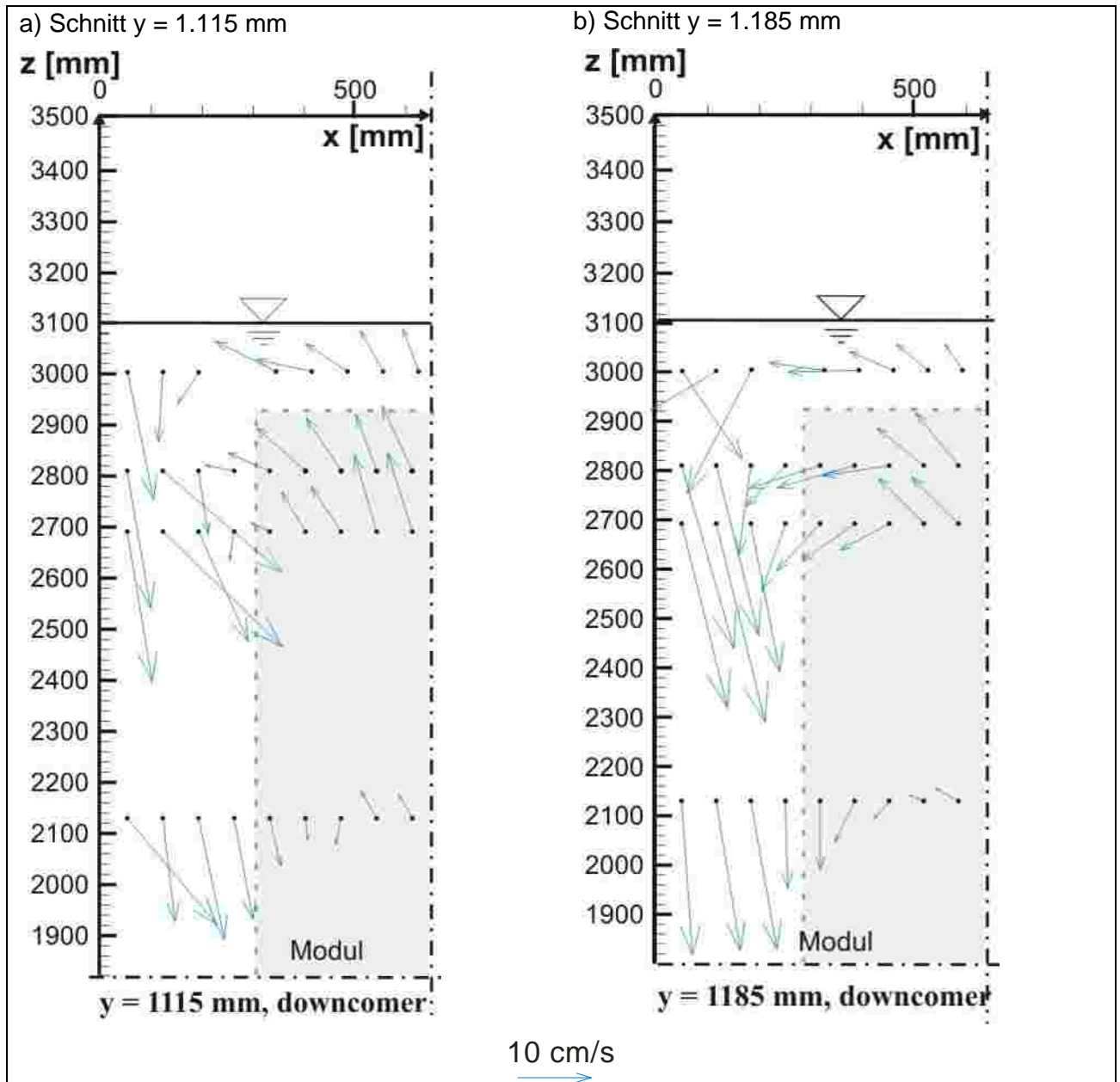


Bild 7-29: Strömung im Downcomer des Reaktors in zwei Schnitten ($y = 1.115 \text{ mm}$, $y = 1.185 \text{ mm}$), Doppeldeckermembranmodul in Position 1, Belüftung $0,31 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

7.2.3.5 Einfluss der Viskosität von belebtem Schlamm auf die Strömung

Untersuchungen zum Einfluss der Viskosität wurden bereits in der Phase I des Projektes mit einer Glycerin-Lösung vorgenommen, mit der das Fließverhalten eines belebten Schlammes mit einem Trockenrückstand-Gehalt von rund 11 g/l simuliert werden konnte. Die höhere Viskosität führte zu

einer Vergleichmäßigung des Strömungsprofils oberhalb des Moduls und zu einer rund 20 bis 30%-igen Abnahme der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten.

Da es sich bei belebtem Schlamm nicht um eine Lösung, sondern um eine Suspension handelt, sollten die Messungen in der Glycerin-Lösung in belebtem Schlamm verifiziert werden.

Der Schlamm für die Pilotanlage wurde aus dem Belebungsbecken der kommunalen Kläranlage Aachen Soers genommen und auf rund 7 g/l aufkonzentriert. Um beim Betrieb der Pilotanlage mit ca. 10 bis 11 g/l arbeiten zu können, wurde eine rund vierwöchige Wachstumsphase für den belebten Schlamm erforderlich. Ein weiteres Aufkonzentrieren des belebten Schlammes innerhalb kürzester Zeit hätte erfahrungsgemäß eine zu rasche Änderung der Milieubedingungen für die Biozönose nach sich gezogen. Dieser Zeitraum wurde genutzt, um Geschwindigkeitsmessungen bei unterschiedlichen Trockensubstanzgehalten und daraus resultierenden unterschiedlichen Viskositäten vorzunehmen.

In Tabelle 7-4 sind die Versuchseinstellungen für die Untersuchung des Viskositätseinflusses zusammengestellt. Mit aufgeführt werden die Versuche Nr. 71 und 72, die bereits teilweise in Kapitel 7.2.3.1 bezüglich der Belüftungsintensität diskutiert wurden.

Tabelle 7-4: Versuchseinstellungen für die Untersuchung des Viskositätseinflusses (Messraster siehe Bild 7-9)

Nr.	Medium	Modulposition	Belüftung		V _{z,min}	V _{z,max}	Prototyp	Messraster
			[m ³ /h]	[Nm ³ /(m ² *h)]	[cm/s]	[cm/s]		
64	Schlamm, TR ~ 7,6 g/l	Position 4	0,26	0,27	-18	57	4 70M	Raster 7
65	Schlamm, TR ~ 8,6 g/l	Position 4	0,26	0,27	-13	54	4 70M	Raster 7
66	Schlamm, TR ~ 8,3 g/l	Position 4			-16	39	4 70M	Raster 8
67	Schlamm, TR ~ 10 g/l	Position 4	0,26	0,27	-9	24	4 70M	Raster 8
68	Schlamm, TR ~ 10,9 g/l	Position 4			-29	43	4 70M	Raster 7
69	Schlamm, TR ~ 11,1 g/l	Position 4	0,26	0,27	-26	41	4 70M	Raster 7
70	Schlamm, TR ~ 11,9 g/l	Position 4			-6	27	4 70M	Raster 8
71	Schlamm, TR ~ 11 g/l	Position 4	0,11 bis 0,25	0,11 bis 0,26	-	-	2 70M	Raster 7
72	Schlamm, TR ~ 11 g/l	Position 4	0,11 bis 0,26	0,11 bis 0,27	-	-	2 70M	Raster 7

alle Versuche ohne Belüfteraufsätze

In Bild 7-30 werden die Strömungsprofile der Aufströmgeschwindigkeiten v_z für die Trockenrückstand-Gehalte 7 g/l, 8 g/l, 9,5 g/l und 11 g/l dargestellt. Die Messung der TR-Gehalte ist aufgrund der biologischen Aktivität des Schlammes immer mit leichten Abweichungen versehen. Die Belüftung wurde bei beiden Versuchen auf den maximal möglichen Wert von rund 0,27 Nm³/(m²*h) eingestellt.

Unabhängig vom TR-Gehalt lässt sich bei allen Strömungsbildern die Lage einzelner Belüfter erkennen. Die maximalen Geschwindigkeiten von bis zu 70 cm/s werden bei den Messungen in belebtem Schlamm nicht mehr erreicht. Lediglich bei TR-Gehalten von gut 7 bzw. 8 g/l (Bild 7-30 a und b) sind ganz punktuell maximale Geschwindigkeiten von 70 cm/s zu beobachten, während Geschwindigkeiten von 10 bis 20 cm/s und 20 bis 30 cm/s dominieren. Werden die

Strömungsbilder bei etwas höheren TR-Gehalten betrachtet (Bild 7-30 c) und d)) sinken die Aufströmgeschwindigkeiten sogar in weiten Teilen auf Werte von 0 bis 10 cm/s.

Bei allen hier untersuchten TR-Gehalten sind Rückströmungen im Modul in den Bereichen erkennbar, in denen das Modul an die Reaktorwand stößt. Vor allem der hintere Bereich der Module, der an die hintere Reaktorwand angrenzt, weist deutliche Rückströmungen auf. Starke Rückströmungen treten in dem Bereich auf, wo die beiden Module aneinanderstoßen. Hier werden bei den höheren TR-Gehalten (Bild 7-30 c), d)) abwärtsgerichtete Strömungen mit Geschwindigkeiten von bis zu knapp 30 cm/s erreicht. Bei höheren Viskositäten nehmen die Geschwindigkeiten in den Rückströmbereichen stärker zu als in Klarwasser. Da die Aufströmgeschwindigkeiten bei höheren TR-Gehalten zusätzlich abnehmen, gleichen sich Auf- und Abströmgeschwindigkeiten im Modul an. Das bedeutet, dass auch bei Rückströmungen im Modul nicht unbedingt eine geringer ausgeprägte Überströmung vorhanden ist, als in den aufwärts durchströmten Bereichen. Dieser Aspekt wirkt sich positiv auf eine gleichmäßigere Überströmung im gesamten Modul aus.

In Bild 7-31 sind die Strömungsbilder für die Messung in belebtem Schlamm und die Messung in Klarwasser zum besseren Vergleich nebeneinander dargestellt. In beiden Fällen nimmt die aufwärtsgerichtete Durchströmung zur Reaktorwand hin ab. Bei den Messungen in belebtem Schlamm stellt sich das Strömungsbild gleichmäßiger dar, da die Bereiche mit hohen maximalen Geschwindigkeiten fehlen. Die Rückströmung zwischen den Modulen fällt in Klarwasser schwächer aus.

Abschließend werden die maximalen und minimalen Strömungsgeschwindigkeiten sowie die gemessenen Viskositäten in Bild 7-32 grafisch dargestellt.

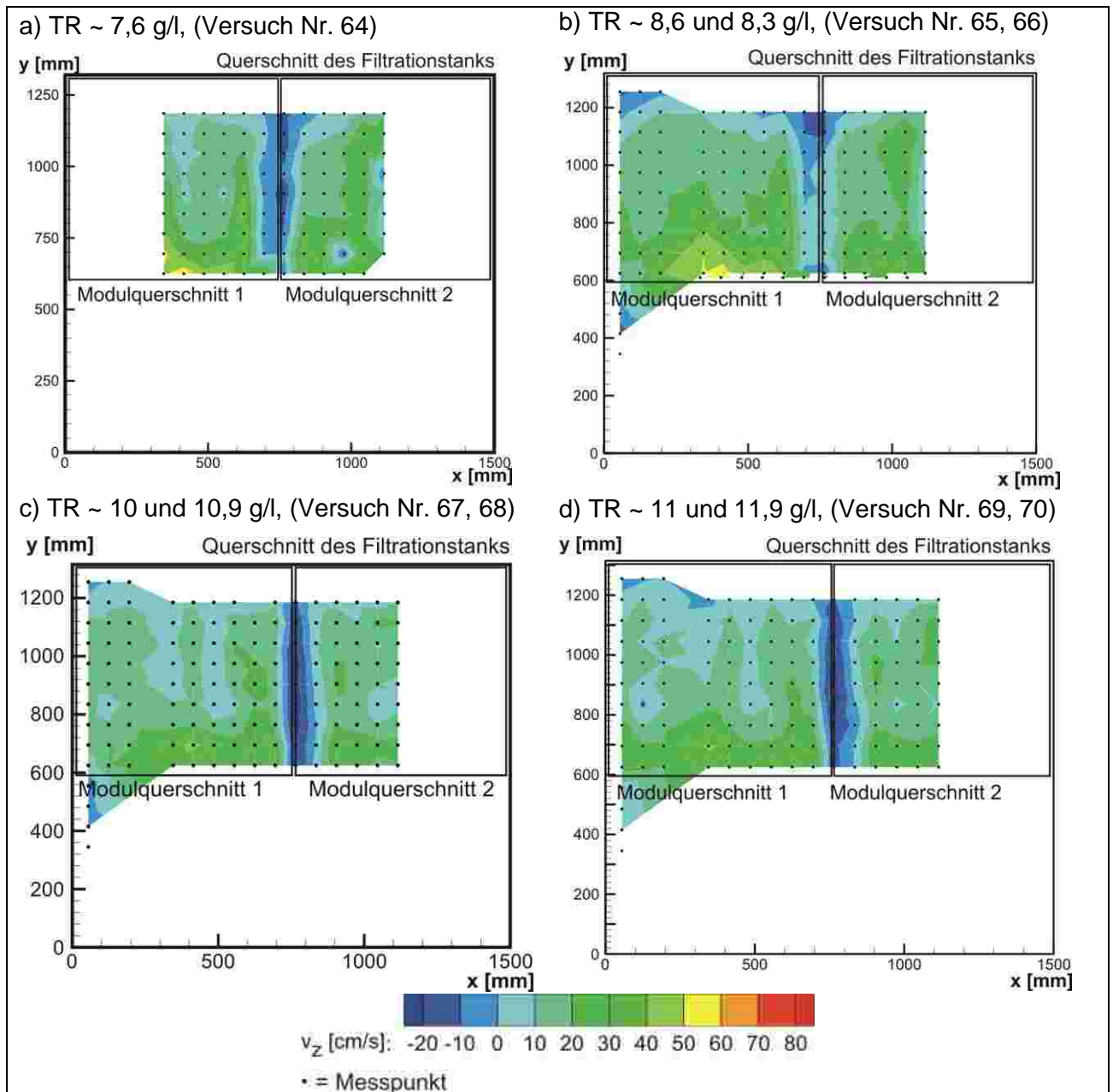


Bild 7-30: Moduldurchströmung in belebtem Schlamm bei verschiedenen Trockensubstanzgehalten von rund 7,6 g/l (a), 8,4 g/l (b), 10,4 g/l (c) und 11,5 g/l (d), Belüftung 0,27 Nm³/(m²·h)

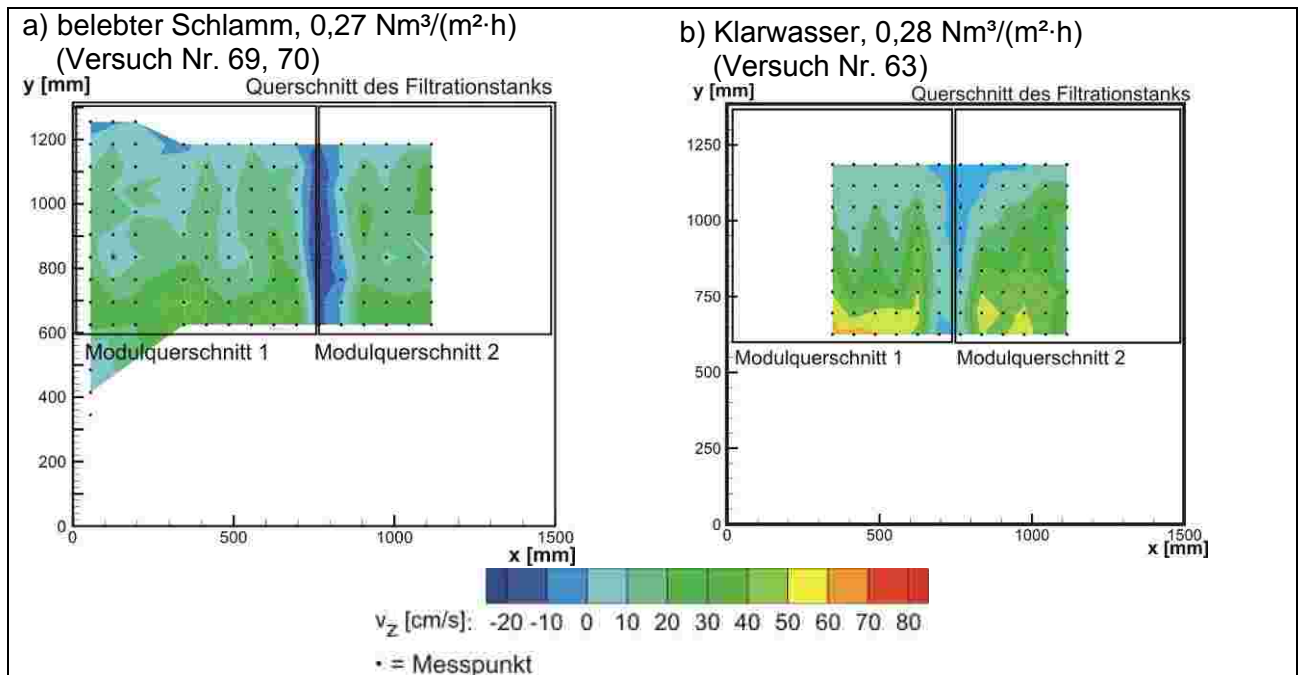


Bild 7-31: Vergleich der Moduldurchströmung in belebtem Schlamm (TR ~ 11,5 g/l) und in Klarwasser

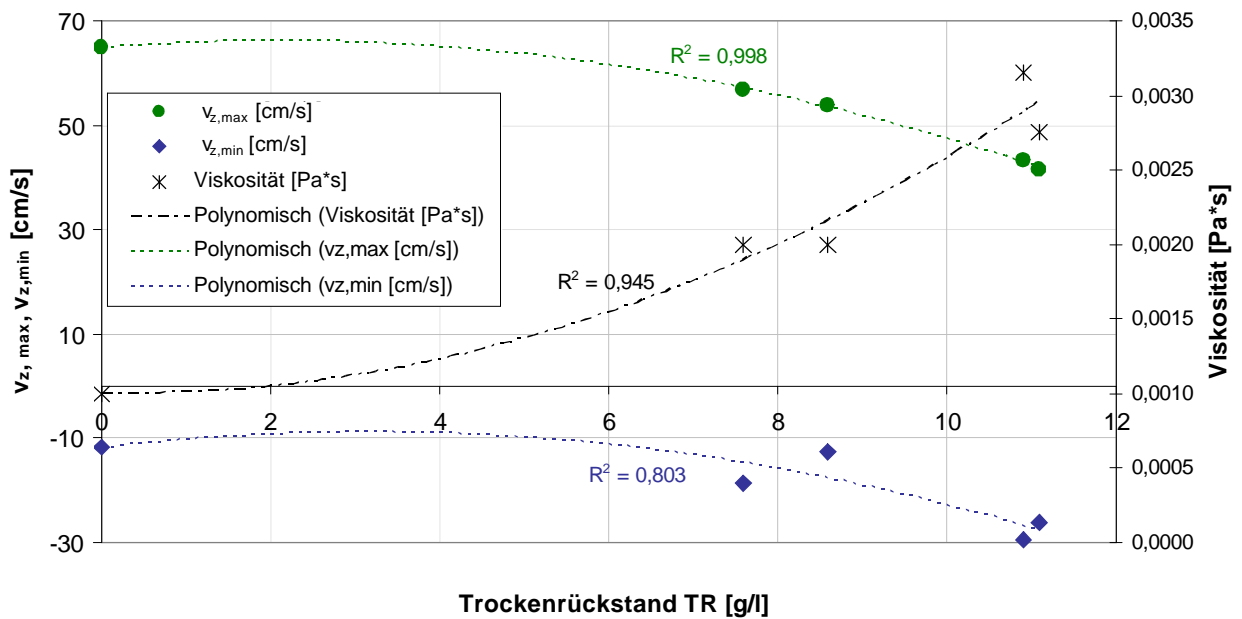


Bild 7-32: Entwicklung der maximalen und minimalen Aufströmgeschwindigkeiten v_z bei unterschiedlichen TR-Gehalten und Viskositäten

Die hier aufgetragenen Maximalwerte sind jeweils dem Messraster 7 (vgl. Bild 7-9 e) entnommen, dass den Bereich über den beiden Modulen abdeckt. Das Raster 8 (vgl. Bild 7-9 e) wurde hier nicht mit einbezogen, da nicht für alle TR-Gehalten dieses Raster vermessen wurde. In dem Bereich von einem TR-Gehalt von 0 g/l (Klarwasser) bis zu rund 8 g/l findet eine Reduzierung der

maximalen Geschwindigkeiten um rund 12 bis 17% statt. Der Einfluss der Viskosität nimmt bis zu einem TR-Gehalt von rund 11 g/l so stark zu, dass die maximalen Geschwindigkeiten um bis zu 36% reduziert werden.

In der Projektphase I wurde bei Messungen in einer Glycerin-Lösung bei Viskositäten um rund 0,003 Pa·s eine Reduzierung der Geschwindigkeiten von 20 bis 30% festgestellt. Das Ergebnis für die Messung in belebtem Schlamm fällt geringfügig höher aus. Da es sich hier um Einzelmessungen handelt und sowohl bei der Ermittlung des Trockenrückstandes als auch bei der Viskositätsmessung leichte Abweichungen ergeben können, sind die Unterschiede als relativ gering anzusehen. Die geringfügigen Abweichungen der Messergebnisse können auch in der unterschiedlichen Reaktorgeometrie von Teststand und Pilotanlage begründet sein.

7.3 Schlussfolgerungen

Mit Hilfe der Acoustic Doppler Velocimetry wurden in der Projektphase II zahlreiche Geschwindigkeitsprofile oberhalb des neu entwickelten Membranmoduls M70 gemessen. Das Modul wurde in den Versuchen als Doppeldecker eingesetzt. Das bedeutet, dass bei zwei übereinander angeordneten Modulen M70 oberhalb des oberen Moduls Geschwindigkeitsmessungen durchgeführt wurden. Daneben wurden Messungen im Abströmbereich (downcomer) neben den Modulen vorgenommen. Die Messungen erfolgten sowohl in Klarwasser als auch in belebtem Schlamm. Diese Untersuchungen ermöglichen eine Beurteilung der Gleichmäßigkeit der Moduldurchströmung und helfen somit bei der Abschätzung der Deckschichtbildung auf der Membranoberfläche.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Strömungsuntersuchungen am ISA kurz zusammengestellt und diskutiert.

Ergebnisse zur erforderlichen Belüftungsrate

Für die Untersuchung der Belüftungsrate in Klarwasser zeigte sich, dass eine Belüftung von $0,26 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ oder sogar $0,21 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ eine Moduldurchströmung erzeugt, die durch Steigerung der Belüftungsrate über $0,26 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ hinaus nicht verbessert werden kann. Eine höhere Belüftungsrate führt nur zu einer unterproportionalen Steigerung der Geschwindigkeiten. Daneben treten in kleinen Bereichen des Querschnitts höhere Maximalgeschwindigkeiten bis zu 70 cm/s auf. Eine Vergleichmäßigung der Moduldurchströmung stellt sich bei höheren Belüftungsraten nicht ein. Es scheint, dass eine Belüftungsrate, die zwischen $0,21 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ und $0,26 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ liegt, für den Betrieb in Klarwasser bzw. für Flüssigkeiten oder Suspensionen mit Viskositäten, die von Klarwasser nur gering abweichen, ausreichend ist.

Bereits in der Projektphase I wurden Untersuchungen mit unterschiedlichen Belüftungsraten in Klarwasser durchgeführt. Allerdings stand bei diesen Versuchen noch ein Vorgängermodell A40 des in Phase II verwendeten Moduls M70 zur Verfügung. Gemessen wurde hier sowohl über

einem Einzelmodul A40 als auch über einem Doppeldeckermodul des A40. Die Ergebnisse der Klarwassermessungen aus der Phase I konnten trotz abweichender Modulabmessungen mit den Messungen aus der Phase II bestätigt werden: Eine hohe Belüftungsrate verbunden mit einem hohen Energieverbrauch bedeutet nicht unbedingt eine gute Überströmung der Modulplatten. Des Weiteren wurde bereits in Phase I deutlich, dass über einem Doppeldeckermodul bei stark reduzierter Belüftungsrate die gleichen Geschwindigkeiten und damit die gleiche Abreinigung der Membranoberfläche erzielt werden können wie bei einem Einzelmodul. Bei einer Belüftungsrate von rund $0,3 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ konnten bei dem Doppeldeckermodul M70 trotz der größeren Abmessungen (Höhe des Doppeldeckers M70: 2,934 m, Höhe des Doppeldeckers A40: 2,24 m) vergleichbar hohe Geschwindigkeiten für die Moduldurchströmung erreicht werden wie bei dem Doppeldeckermodul A40.

Auch für die Durchströmung der Module in belebtem Schlamm wurden bei einem TR-Gehalt von rund 10 g/l unterschiedliche Belüftungsraten untersucht. Dabei konnte ebenfalls eine Stagnation der Geschwindigkeitszunahme bei höheren Belüftungsraten festgestellt werden. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten fielen geringer aus als bei den Messungen in Klarwasser und lagen bei gut 40 cm/s bei einer Belüftungsrate von $0,26 \text{ Nm}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$. Für Bereiche mit hohen Geschwindigkeiten und Maximalgeschwindigkeiten ließ sich bei zunehmender Belüftungsrate eine Stagnation bei der Geschwindigkeitszunahme feststellen. In diesen Bereichen, die direkt oberhalb der Belüfter liegen, scheint noch eine Steigerung der Geschwindigkeiten durch Erhöhung der Belüftungsrate möglich zu sein, während davon auszugehen ist, dass die schwächer mit Luft beaufschlagten Bereiche kaum noch eine Steigerung erfahren.

Ergebnisse zum Viskositätseinfluss

In der Phase der Inbetriebnahme der Pilotanlage bestand die Möglichkeit, bei gleichbleibender Belüftungsrate aber unterschiedlichen TR-Gehalten Geschwindigkeitsmessungen vorzunehmen. Dabei lässt sich eine eindeutige Abhängigkeit des Geschwindigkeitsprofils vom Feststoffgehalt und damit von der Viskosität feststellen. In dem Bereich von einem TR-Gehalt von 0 g/l (Klarwasser) bis zu rund 8 g/l findet eine Reduzierung der maximalen Geschwindigkeiten um rund 12 bis 17% statt. Der Einfluss der Viskosität nimmt bis zu einem TR-Gehalt von rund 11 g/l (Viskosität $\eta \sim 0,003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) so stark zu, dass die maximalen Geschwindigkeiten um bis zu 36% reduziert werden. Der Bereich um einen Trockensubstanzgehalt von 11 g/l ist für den Betrieb von Membranbelebungsanlagen besonders interessant, da viele Membrananlagen mit 10 bis 12 g/l betrieben werden. Strömungsspitzen im Geschwindigkeitsprofil treten dabei weniger auf und insgesamt erfolgt eine Vergleichmäßigung des Profils.

Die in belebtem Schlamm ermittelten Messergebnisse decken sich dabei mit den Erfahrungen, die in der Projektphase I mit einer Glycerinlösung gesammelt werden konnten. Dabei zeigt sich eine Abnahme der Maximalgeschwindigkeiten bei einer Viskosität von $0,003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ von bis zu 30%. Es ist davon auszugehen, dass Unterschiede zwischen den Messergebnissen in Glycerin und

belebtem Schlamm in Modulsystemunterschieden (A40 und M70) sowie in Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Viskosität begründet sind. Damit stellt eine Glyzerinlösung für den Bereich der Membranbioreaktoren eine gute Modelllösung für die Geschwindigkeitsmessung mittels ADV dar. So können für weitere Untersuchungen aufwendigere und hygienisch bedenklichere Messungen in belebtem Schlamm vermieden werden.

Ergebnisse der Untersuchung der Belüftungseinheit

Mit dem Ziel eines gleichmäßigeren Lufteintrages unter dem Membranmodul wurden verschiedene Modifikationen am Aufströmkanal bzw. an den Belüftern vorgenommen und untersucht. Dabei wurden zum einen verschiedene Aufsätze für die Belüfter entwickelt, zum anderen wurde eine Lochblechplatte angefertigt, die im Aufströmkanal zwischen dem Modul- und den Belüftern eingesetzt wurde.

Da die ADV-Messungen sehr zeitintensiv sind und Modulteststand und Pilotanlage mit Sichtfenstern versehen sind, wurden zunächst nur optische Beobachtungen der Modifikationen vorgenommen. Aufgrund der Tatsache, dass die Pilotanlage zunächst mit Klarwasser befüllt wurde, waren Beobachtungen des Lufteintrages optisch möglich. Dabei zeigte sich, dass ein gleichmäßigerer Lufteintrag in der gewünschten Weise weder mit den Belüfteraufsätzen noch mit dem Lochblech zufrieden stellend erreicht werden konnte. Mit den Belüfteraufsätzen konnte zwar eine Auffächerung der Strömung in den mittleren Bereichen des Moduls erzielt werden, aber gerade für die Randbereiche, die auch ohne Aufsätze nur schlecht mit Luft versorgt wurden, zeigte sich sogar noch eine Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten. Es ist davon auszugehen, dass durch die Umlenkung der Strömung der Energieeintrag für die Modulbelüftung reduziert wurde ohne dabei die gewünschte gleichmäßige Luftverteilung über dem gesamten Modulquerschnitt zu erzielen. Dem Lochblecheinbau lag die Idee zugrunde, eine Art Aufstau unterhalb des Bleches mit einer anschließenden gleichmäßigeren Verteilung der so aufgestauten Luft zu erreichen. Der gewünschte Effekt konnte nicht erzielt werden: das Lochblech beeinflusste die Strömung kaum.

In einigen Fällen wurde die modifizierte Belüftungseinrichtung noch mit Hilfe der Geschwindigkeitsmessung untersucht, um so die aus den Beobachtungen gewonnen Erkenntnisse zu überprüfen. Die Messungen bestätigten die Beobachtungen.

Ergebnisse zur Untersuchung der Modulposition

In der Phase I des Projektes wurden die ersten Prototypen der Module mittig im Modulteststand angeordnet, so dass an allen vier Modulseiten ein Abströmbereich vorhanden war. In der zweiten Phase des Projektes wurde zusätzlich untersucht, inwieweit eine Positionierung eines Moduls an der Reaktorwand oder neben einem zweiten Modul die Durch- und Umströmung beeinflusst.

Bei einer Anordnung des Moduls mittig im Reaktor bildet sich, wie bereits in Phase I ermittelt, im Reaktor eine Zirkulationsströmung aus, wie sie von Schlaufenreaktoren (air-lift loop reactor) bekannt ist. Dabei erzeugt die im Modul aufsteigende Luft eine Strömung, die im oberen

Reaktorbereich umgelenkt wird und neben dem Modul im Abströmbereich (downcomer) zurückströmt. Wird der Querschnitt des Abströmbereiches verändert, in dem ein Modul an einer Reaktorwand oder in einer Reaktorecke positioniert wird, verändert sich die Strömung. Es erfolgt eine Ablenkung der Strömung von der Wand weg und in Wandnähe finden innerhalb des Moduls Rückströmungen statt. Der zwischen Modul und Wand nicht mehr vorhandene Abströmbereich verlagert sich somit in den Bereich des Modulquerschnittes. Bei Anordnung zweier Module nebeneinander findet eine Rückströmung in dem Bereich statt, in dem die Module aneinander stoßen. Da die Rückströmgeschwindigkeiten durch Energieverluste (Ausgasung der Luft, Umlenkung der Strömung, etc.) geringer ausfallen, als die direkt durch Lufteintrag induzierten Aufströmgeschwindigkeiten, ist eine Rückströmung im Modul nicht als positiv zu beurteilen. Es ist davon auszugehen, dass hieraus eine geringere Abreinigung der Membranoberfläche resultiert, da eine Anordnung eines Moduls an einer Wand oder in der Nähe anderer Module zu einer schlechteren Moduldurchströmung führt.

Ergebnisse zu Messungen im Abströmbereich (downcomer)

Neben der Betrachtung der Moduldurchströmung wurden Messungen neben dem Membranmodul also im Abströmbereich (downcomer) des Reaktors durchgeführt. Die Messungen konnten in der Pilotanlage bis in eine Tiefe von gut einem Meter unterhalb der Wasseroberfläche durchgeführt werden.

Wie aus Untersuchungen zu Schlaufenreaktoren bekannt ist, ist eine abwärtsgerichtete Strömung im downcomer zu erwarten. Dies konnte mit Hilfe der Geschwindigkeitsmessungen bestätigt werden. Des Weiteren wurde festgestellt, dass im Abströmbereich neben den erwarteten abwärtsgerichteten Strömungen Rückströmungen zur Wasseroberfläche beobachtet werden können. Es erscheint wahrscheinlich, dass diese aufwärtsgerichtete Strömung im Downcomer durch Luftblasen verursacht werden, die aufgrund der geringen Strömungsenergie nicht bis zum Reaktorboden befördert werden, sondern beginnen, im Downcomer aufzusteigen.

Das Institut für Verfahrenstechnik der TU Berlin hat zum Thema der Strömung im downcomer weitere Untersuchungen mittels optischer Visualisierung durchgeführt. Die Überlagerung der Ergebnisse des ISA und des VT werden daher im Folgenden noch diskutiert.

8 Numerische Strömungssimulation

Numerischen Simulationen wurden im Rahmen dieses Projektes mit insgesamt drei verschiedenen Zielstellungen durchgeführt. Scherpunkt bildete die globale Zirkulationsströmung in einem Schlaufenreaktor. Außerdem wurden die einphasige Strömung von belebtem Schlamm in einer Testzelle sowie der Aufstieg von Einzelblasen zwischen zwei parallelen Platten mit variablem Abstand simuliert. Zu jedem dieser 3 Aufgabengebiete wurden parallel zu den Simulationen experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Diese dienten als Referenz zur Validierung, sowie zur Justierung der numerischen Modellparameter.

8.1 Untersuchung der Zirkulationsströmung

Zielstellung

Ziel der numerischen Untersuchungen war es, für verschiedene geometrische Variationen des Schlaufenreaktors den Zusammenhang zwischen der Zirkulationsgeschwindigkeit, der Belüftung und den geometrischen Parametern des Reaktors sowie des Membranmoduls zu quantifizieren. Darüber hinaus zielten die Simulationen auf eine Verbesserung bzw. Vergleichmäßigung der Blasenverteilung im Membranmodul.

Zunächst wurde der Schlaufenreaktor für zwei Konfigurationen numerisch und experimentell untersucht. Dies waren der Schlaufenreaktor ohne Membranmodul sowie die Konfiguration mit Membranmodul, wobei der Plattenabstand 7 mm betrug. Durch den Vergleich der Ergebnisse konnten die Einstellungen für das numerische Modell angepasst werden. Anschließend wurden weitere Modell mit verändertem Plattenabstand im Membranmodul nur noch numerisch simuliert.

Darstellung des numerischen Modells

Für die numerischen Simulationen wurde das kommerzielle CFD-Programm CFX 11 der Firma ANSYS verwendet. Die Rechnungen wurden 2-dimensional und stationär für das Stoffsystem Wasser und Luft durchgeführt. Da die Residuen der Geschwindigkeit und des Drucks relativ rasch ein konstantes Niveau annahmen, wurde die Lösung erst dann als konvergent angenommen, wenn der Gasgehalt im gesamten Reaktor einen stationären Endwert erreicht hatte.

Die Berechnungen erfolgten auf einem Hexaedergitter mit bis zu 35.000 Zellen. Das Berechnungsgebiet repräsentiert einen 2-dimensionalen Schnitt durch den in Kapitel 5.5 beschriebenen Versuchsstand.

Für unterschiedliche Gitterauflösungen wurde eine Konvergenzstudie durchgeführt um zu beurteilen, ob das physikalische Verhalten ausreichend genau erfaßt wird. Die verwendeten Gitter bestanden aus zwei Teilen, dem Gitter ohne Membranmodul und dem Gitter für das eigentliche Membranmodul. In Bild 8-1 sind beide dargestellt. Für die Berechnungen mit veränderten Membranmodulgeometrien mußte somit nur das Gitter für das Membranmodul neu erstellt und in das bestehende Gitter des übrigen Reaktors integriert werden. Dies verringerte den Aufwand bei der Gittererzeugung erheblich.

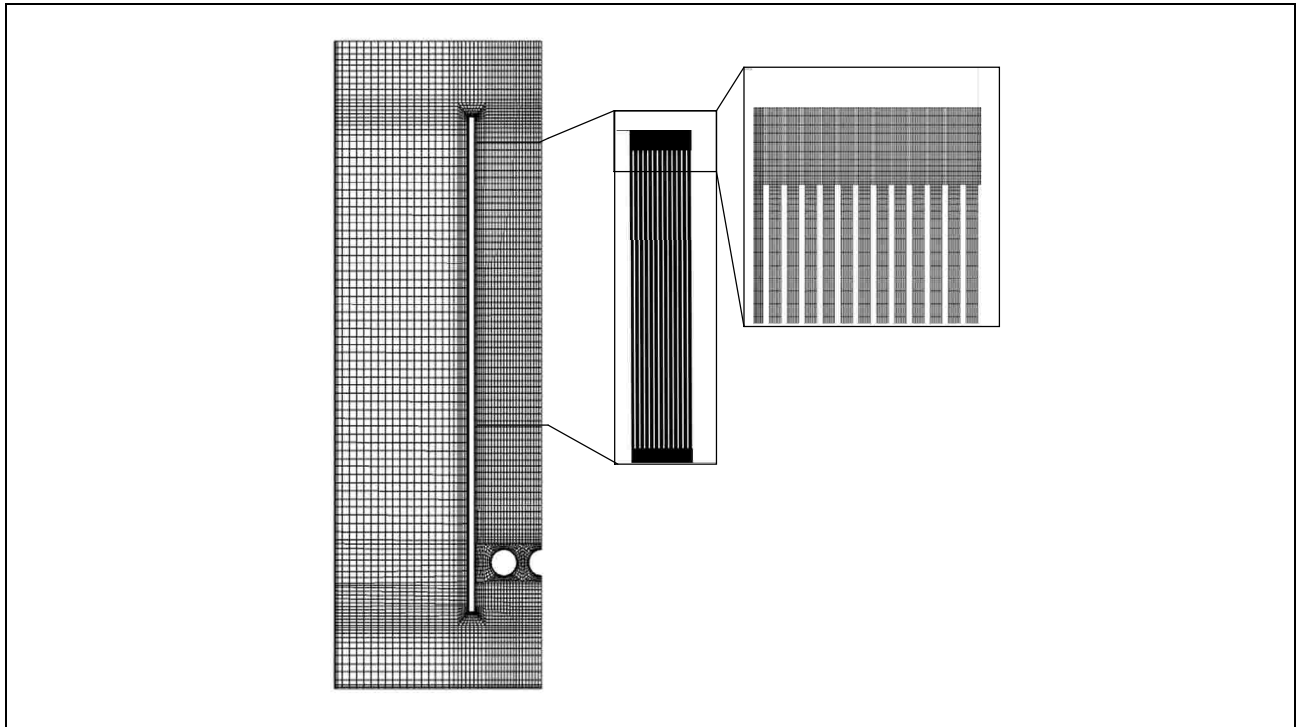


Bild 8-1: Darstellung des modular aufgebauten Rechengitters

Aufgrund des lokalen Phasenanteils der dispersen Phase (Luft) von mehr als 5 %, wurde die so genannte Euler/Euler Methode zur Lösung des mehrphasigen Strömungsproblems verwendet. Bei diesem Modell werden die Bilanzgleichungen der Erhaltungsgrößen Masse und Impuls für jede Phase einzeln, aber für das gleiche Koordinatensystem aufgestellt und unter Berücksichtigung so genannter Austauschsterme zwischen den einzelnen Phasen gelöst. Dies bedeutet, dass für jede Phase ein eigenes Geschwindigkeitsfeld berechnet wird und die Felder der unterschiedlichen Phasen über die Austauschsterme miteinander verknüpft sind. Um den Aufwand für die Berechnungen zu begrenzen wurde für die disperse Phase Luft ein konstanter Blasendurchmesser angenommen. Für die Phasenwechselwirkung wurde das speziell für das Stoffsystem Wasser – Luft kalibrierte Grace-Modell verwendet. Von den sogenannten Non-Drag Forces wurden bei den Simulationen die *lift force*, die *wall lubricati force* und die *turbulent dispersion force* berücksichtigt.

Folgende Randbedingungen kamen bei den Simulationen der Zirkulationsströmung zur Anwendung:

1. Einlass

Hier erfolgte die Vorgabe von Einlassgeschwindigkeiten für Luft auf der Oberfläche der Belüfter. Die konkreten Werte ergaben sich aus der Umrechnung der experimentellen Volumenströme und sind in der Tabelle 8-1 dargestellt.

Tabelle 8-1: Einlassrandbedingungen

Volumenstrom (Experiment) [m³/h]	Volumenstrom (Simulation) [m³/h]	U_{GR}[m/s]	U_{G_inlet} [m/s]
0,6	0,03	0,00469484	0,00263939
1,2	0,06	0,00938967	0,00527877
1,8	0,09	0,01408451	0,00791816
2,4	0,12	0,01877934	0,01055754
3,0	0,15	0,02347418	0,01319693
3,45	0,1725	0,02699531	0,01517647

2. Auslass

Die Modellierung einer bewegten Flüssigkeitsoberfläche hätte den Rechenaufwand drastisch erhöht, ohne die Zirkulationsgeschwindigkeit wesentlich zu beeinflussen. Deshalb fand hier die sogenannte degassing-Randbedingung Anwendung, bei der lediglich die disperse gasförmige Phase das Rechengebiet verlassen kann.

3. Wandbedingung

Für die feste Begrenzung des Reaktors, die Trennwände sowie die Membranplatten wurden die Wandrandbedingungen vergeben. An diesen Oberflächen wird für die kontinuierliche Phase die Haftbedingung vorgegeben, d.h. die Geschwindigkeit wird zu Null gesetzt. Um das Gleiten der Blasen entlang der Wände wiederzugeben wurde für die disperse Phase die Slipbedingung vergeben, bei der die Schubspannung direkt an der Wand zu Null gesetzt wird.

4. Symmetriebedingungen

Da aufgrund der geometrischen Gegebenheiten Spiegelsymmetrie vorliegt, wurde lediglich die Hälfte des Reaktors berechnet und an der Spiegelebene eine Symmetrierandbedingung festgelegt. Auch auf der Vorder- und Rückseite des Reaktors wurden die Symmetriebedingungen vergeben und somit nur ein quasi 2-dimensionaler Schnitt mit einer Zelltiefe von 0,005 m berechnet. Dies führte zu einer erheblichen Verringerung des Rechenaufwands.

Die ermittelten Reynoldszahlen für die Strömung durch das Membranmodul belegen die Notwendigkeit, die turbulenten Effekte zu berücksichtigen. Für die kontinuierliche Phase wurde das Shear Stress Transport (SST) Modell und für die disperse Luft ein Null- Gleichungsmodell benutzt.

Tabelle 8-2: Reynoldszahlen der simulierten Zirkulationsströmung

Belüftungs- volumenstrom	Plattenabstand 5 mm		Plattenabstand 9 mm	
	Re [-]	U_{lr} [m/s]	Re [-]	U_{lr} [m/s]
0.6 m ³ /h	7900	0.13	9900	0.17
3.45 m ³ /h	17000	0.27	20000	0.34

Ergebnisse für die Simulation der Zirkulationsströmung

Die Ergebnisse der Berechnungen sind von Bild 8-2 bis Bild 8-17 grafisch dargestellt. Dabei wird die jeweils betrachtete Größe für die von links nach rechts ansteigende Gasleerrohrgeschwindigkeit gezeigt. In den Abbildungen sind die Fälle ohne Membranmodul, sowie mit Membranmodul für die Plattenabstände 5, 7 und 9 mm nacheinander angeordnet. Für die vertikale Geschwindigkeit wurde die aufwärtsgerichtete Komponente als die mathematisch positive Richtung festgelegt.

Die numerischen Ergebnisse geben das physikalische Verhalten der Zweiphasenströmung qualitativ richtig wieder. So wird für eine zunehmende Belüftungsstärke auch eine ansteigende Zirkulationsgeschwindigkeit der kontinuierlichen und der dispersen Phase ausgewiesen. Der Vergleich der Fälle ohne und mit Membranmodul zeigt deutlich den Einfluss des zusätzlichen Widerstandes des Membranmoduls auf die Zirkulation. Für den geringsten Plattenabstand von 5 mm ergeben sich die geringsten Zirkulationsgeschwindigkeiten. Auch der enge Zusammenhang zwischen dem Gasgehalt im Downcomer und der Zirkulationsgeschwindigkeit ist deutlich zu erkennen. Bei höheren Geschwindigkeiten der flüssigen Phase wird wesentlich mehr Gas in den Downcomer mitgerissen. Dadurch verringert sich die Differenz zwischen dem Gasgehalt im Riser und im Downcomer und somit die treibende Kraft für die Zirkulation. Dieser Zusammenhang führt maßgeblich zu einer Begrenzung der Zirkulationsgeschwindigkeit.

Die numerischen Simulationen ermöglichten mit der Vorgabe einer konstanten Blasengröße deren Einfluss auf die Zirkulationsströmung zu untersuchen. Es zeigte sich, analog zu den experimentellen Beobachtungen, dass kleinere Blasen vermehrt in den Downcomer mitgerissen werden als größere Blasen. Die Wahl eines repräsentativen Blasendurchmessers von 1,8 mm für die numerischen Simulationen erfolgte entsprechend den experimentell ermittelten Blasengrößenverteilungen sowie in Auswertung der Berechnungen für einen Blasendurchmesser von jeweils 1, 2 und 3 mm.

Analog zu den Untersuchungen am ISA wurde sowohl in den experimentellen und auch in den numerischen Untersuchungen eine deutlich ausgeprägte Zirkulation innerhalb des Downcomers beobachtet. Mit zunehmender Zirkulation im Reaktor stieg zwar der Betrag der abwärtsgerichteten

Strömung im Downcomer, ihr Querschnitt blieb jedoch im Wesentlichen unverändert. Diese Tatsache ist für die Abschätzung des Gasgehalts im Downcomer von Bedeutung, denn das Gas wird nur in den Downcomer mitgerissen, wenn die Aufstiegs geschwindigkeit der Blasen geringer ist als die lokale abwärtsgerichtete Strömung.

Die numerischen Simulationen zeigen in Übereinstimmung mit den experimentellen Beobachtungen eine ungleichmäßige Verteilung des Gases in der Aufstiegsregion des Reaktors. Insbesondere für die Randbereiche des Membranmoduls ist eine unzureichende Belüftung zu erkennen. Dieser Zustand konnte auch durch verschiedene Anordnungen der Belüfter nicht wesentlich verbessert werden. Das Anbringen von Belüfteraufsätzen führte ebenfalls nicht zu einer Vergleichmäßigung der Blasen innerhalb des Membranmoduls.

Auf die quantitative Auswertung der Ergebnisse wird im Kapitel 8.4. näher eingegangen.

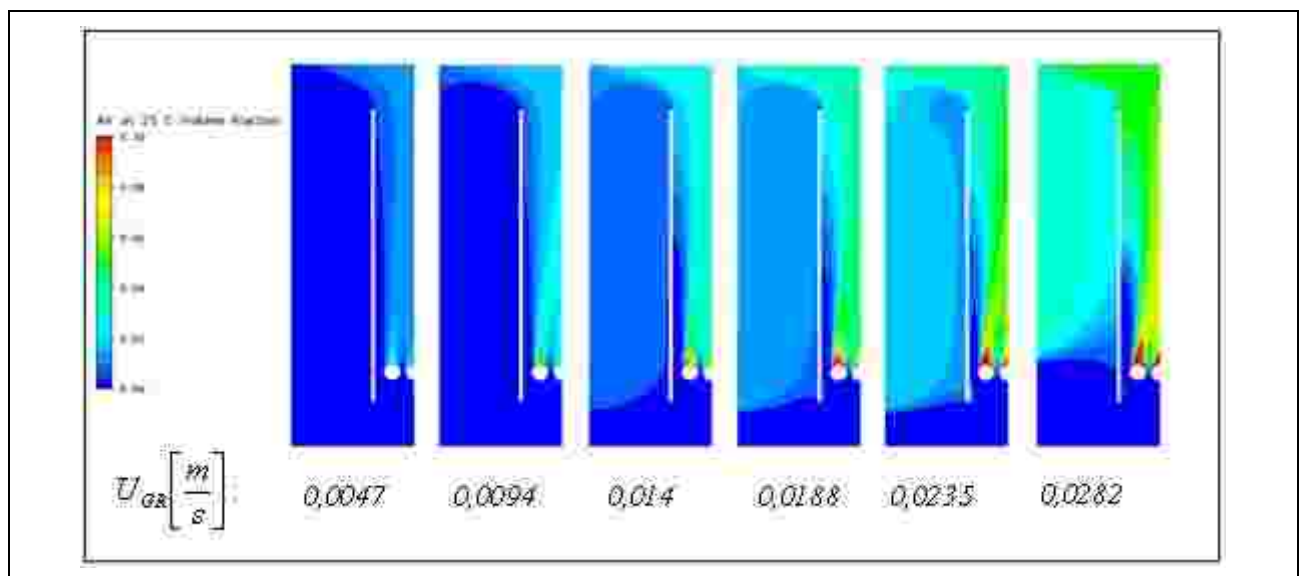


Bild 8-2: Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (ohne Membranmodul)

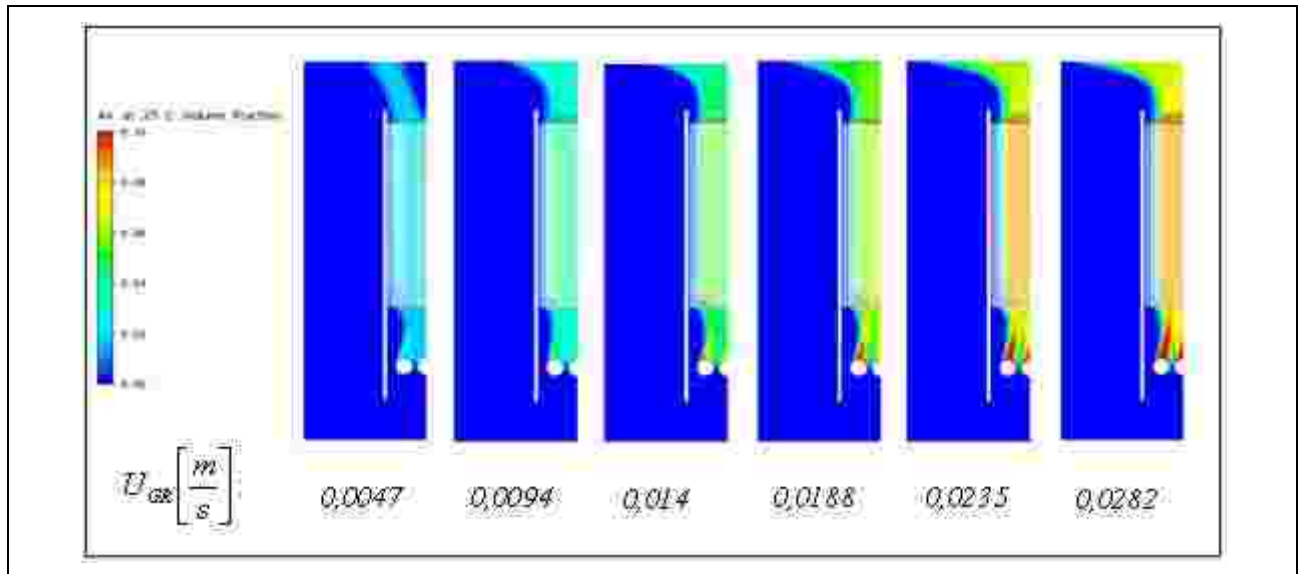


Bild 8-3: Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)

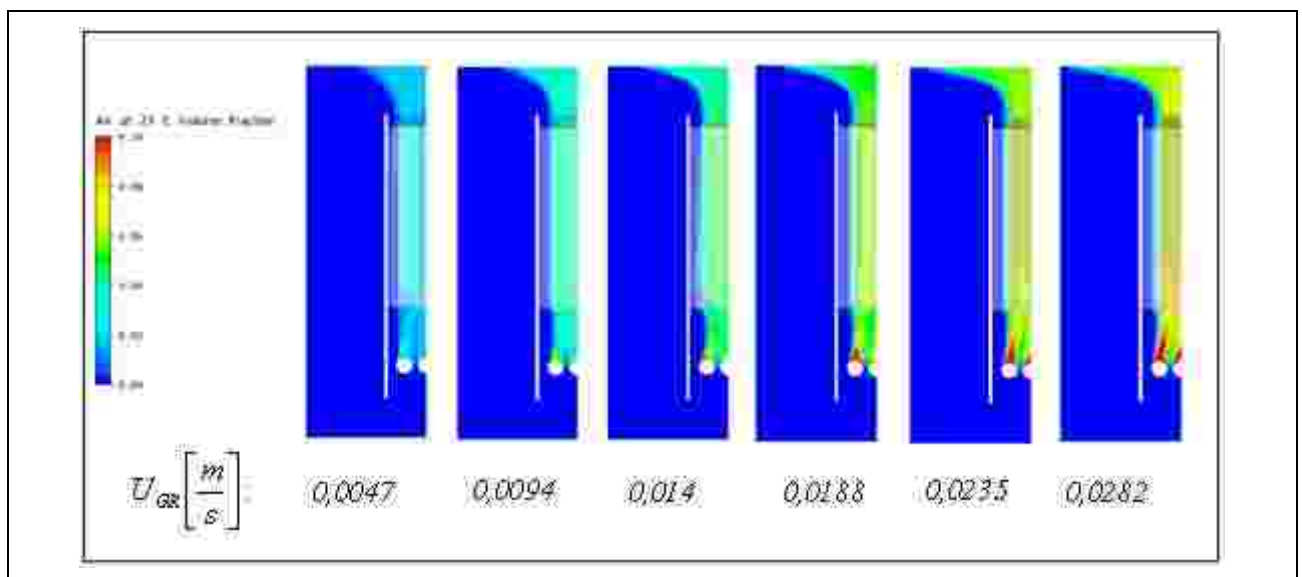


Bild 8-4: Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)

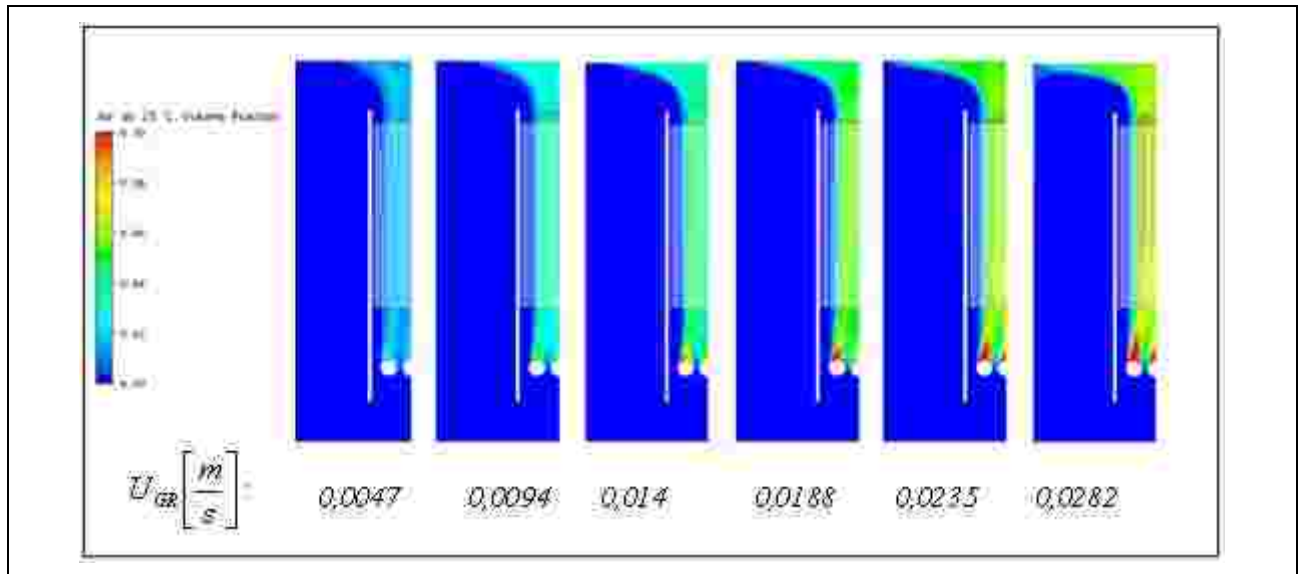


Bild 8-5: Numerische Ergebnisse zum Gasgehalt für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)

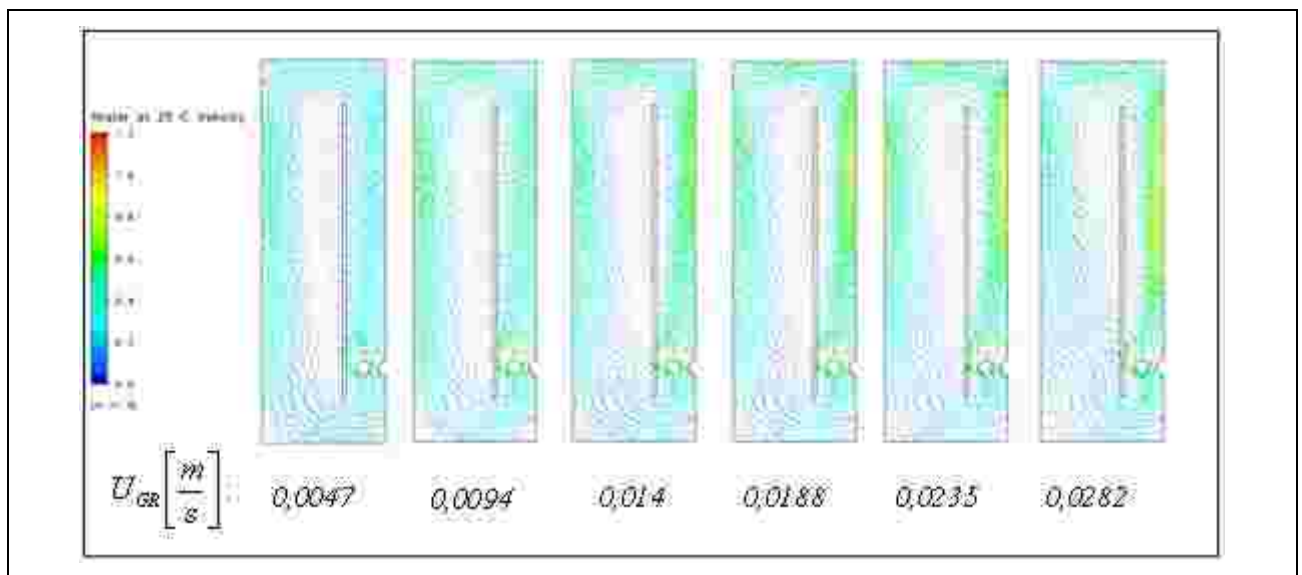


Bild 8-6: Vektorplot der berechneten Flüssigkeitsgeschwindigkeiten (ohne Membranmodul)

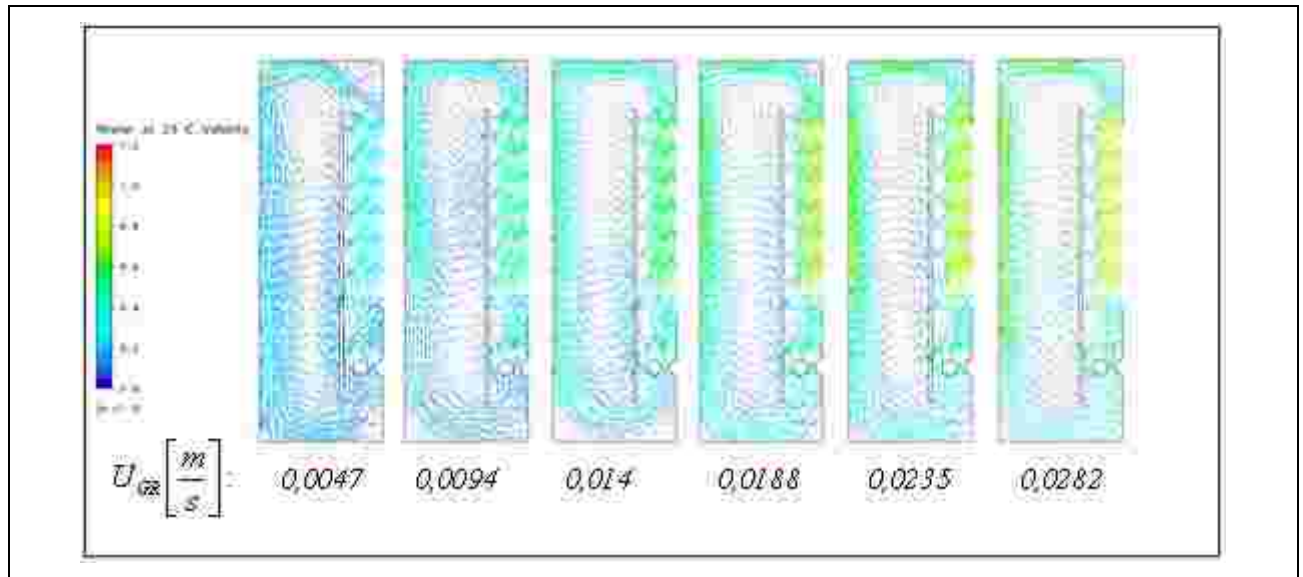


Bild 8-7: Vektorplot der berechneten Flüssigkeitgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)

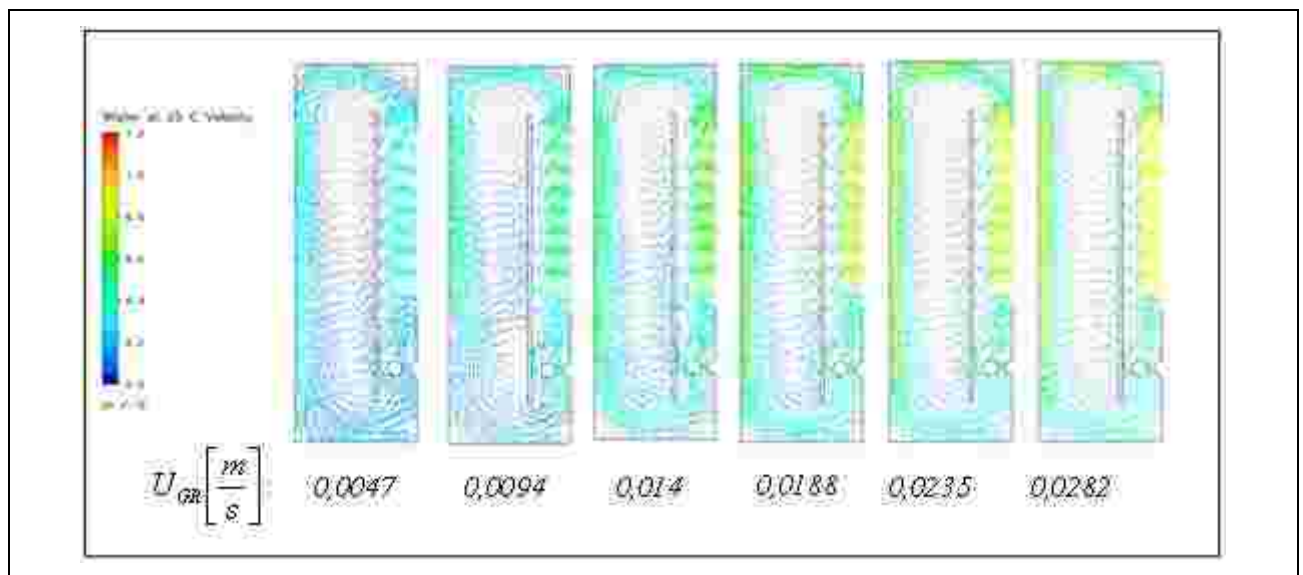


Bild 8-8: Vektorplot der berechneten Flüssigkeitgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)

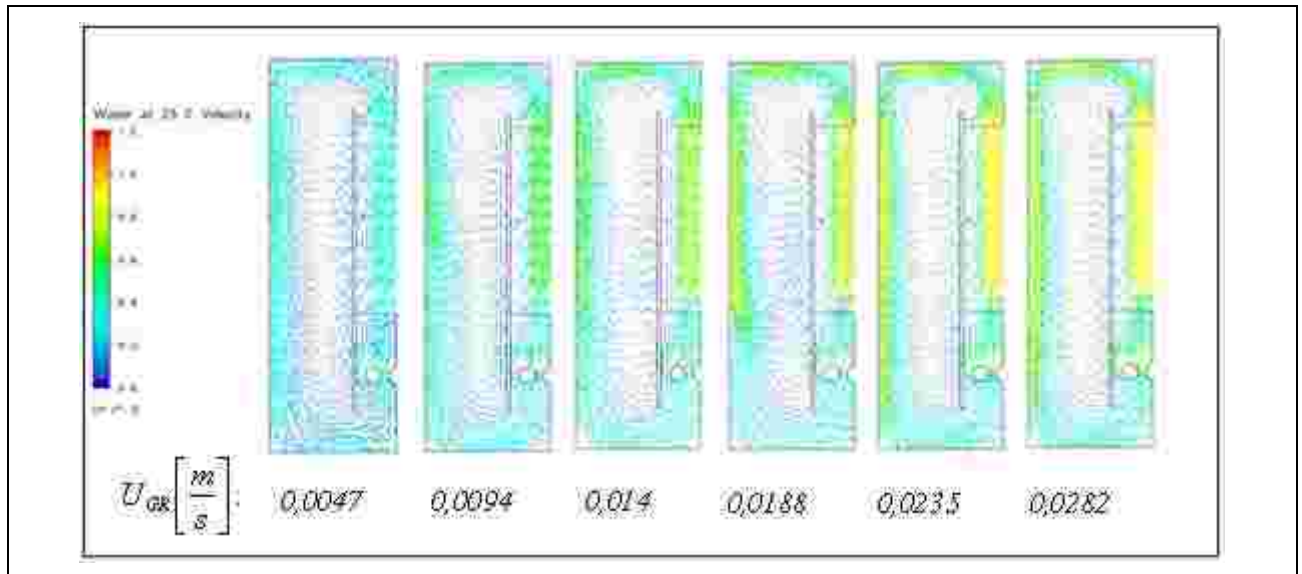


Bild 8-9: Vektorplot der berechneten Flüssigkeitgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)

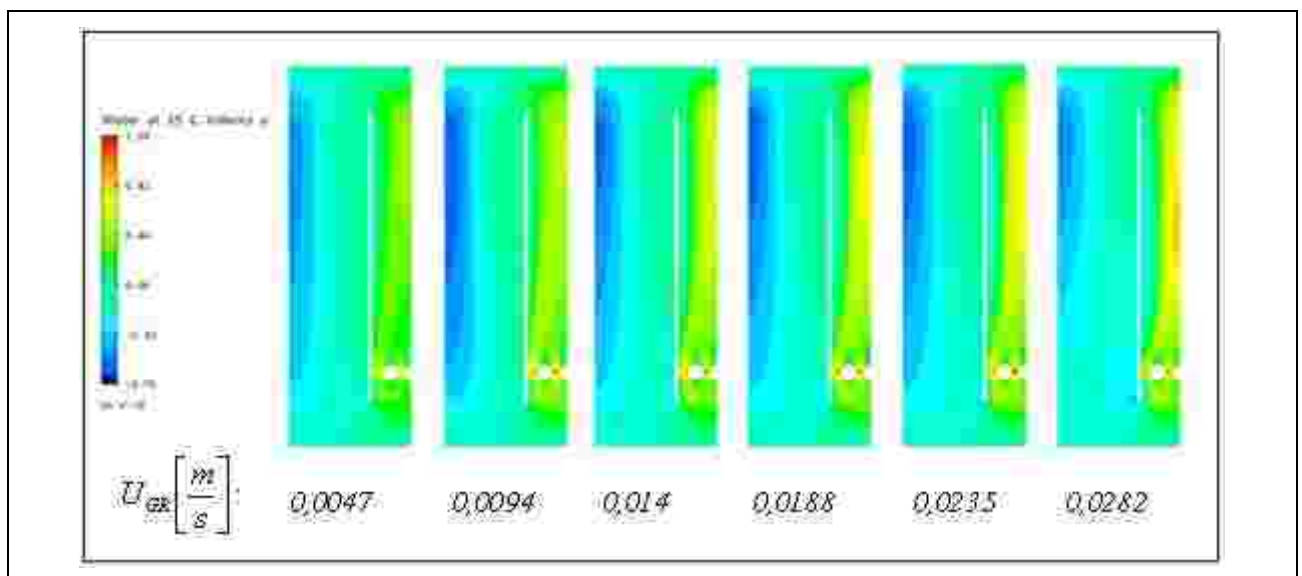


Bild 8-10: Berechnete vertikale Flüssigkeitgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (ohne Membranmodul)

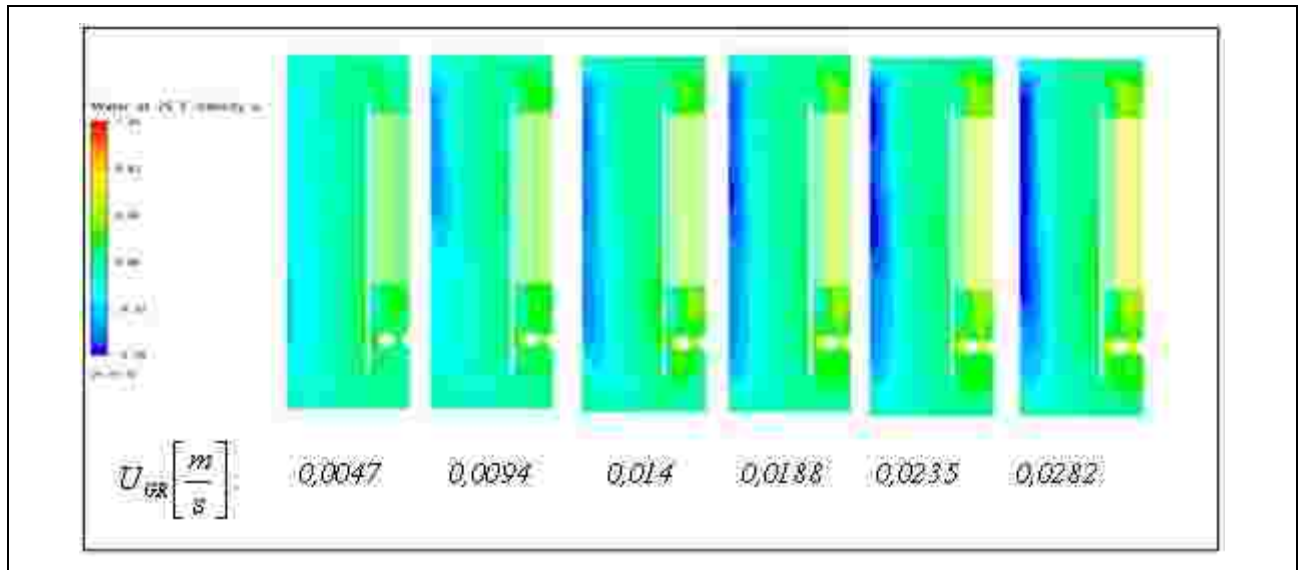


Bild 8-11: Berechnete vertikale Flüssigkeitgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)

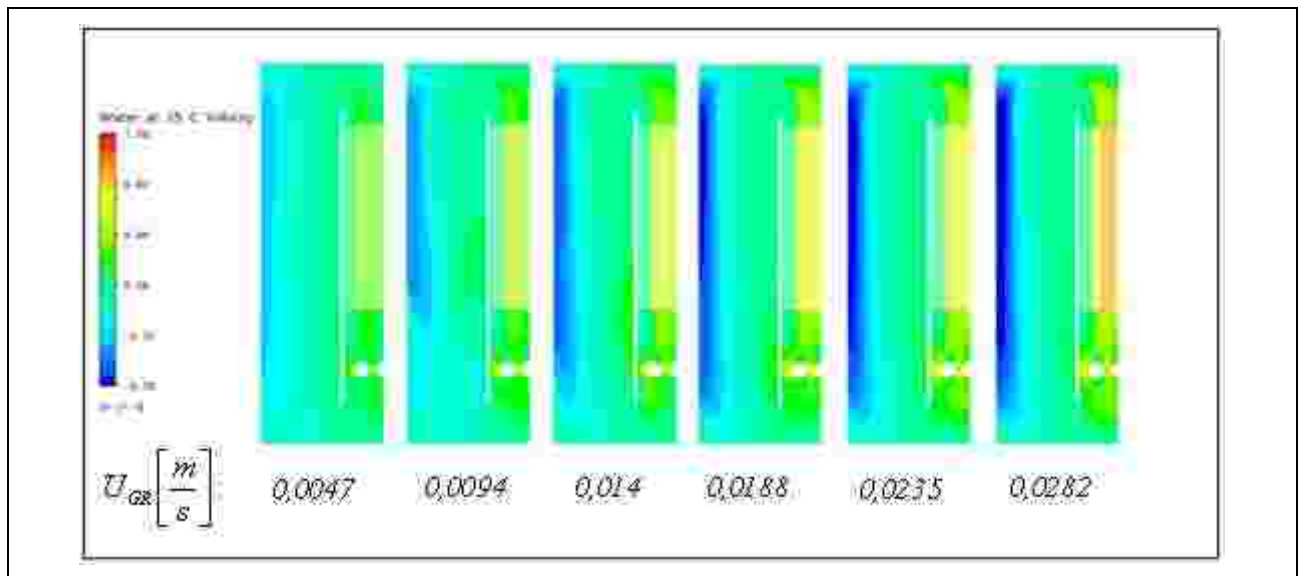


Bild 8-12: Berechnete vertikale Flüssigkeitgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)

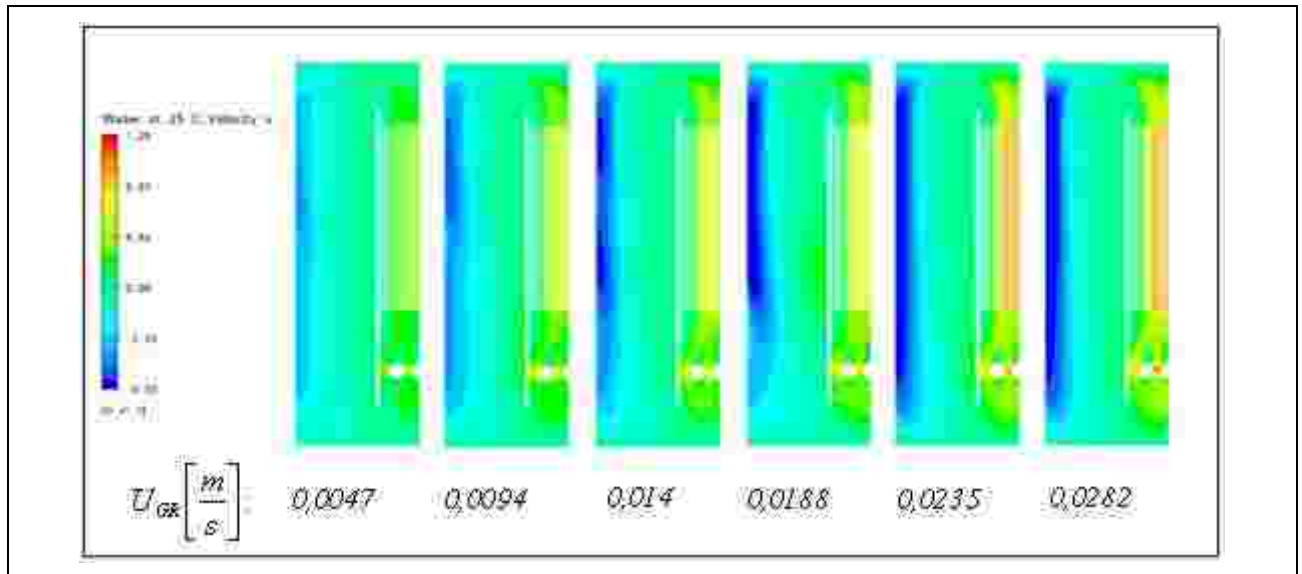


Bild 8-13: Berechnete vertikale Flüssigkeitgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)

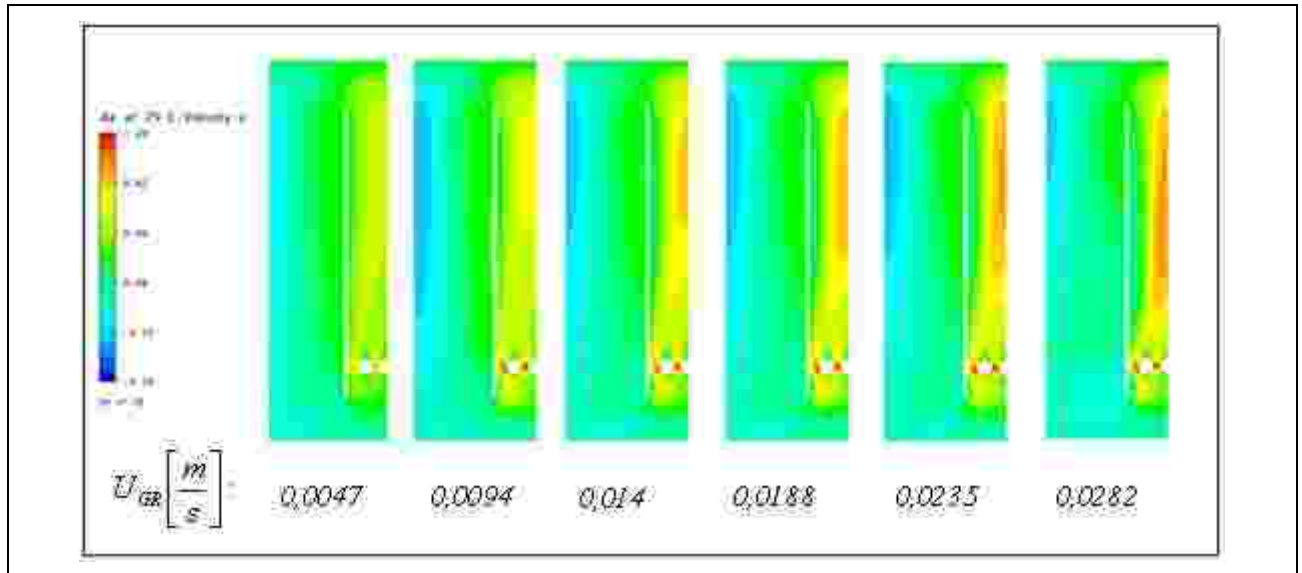


Bild 8-14: Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (ohne Membranmodul)

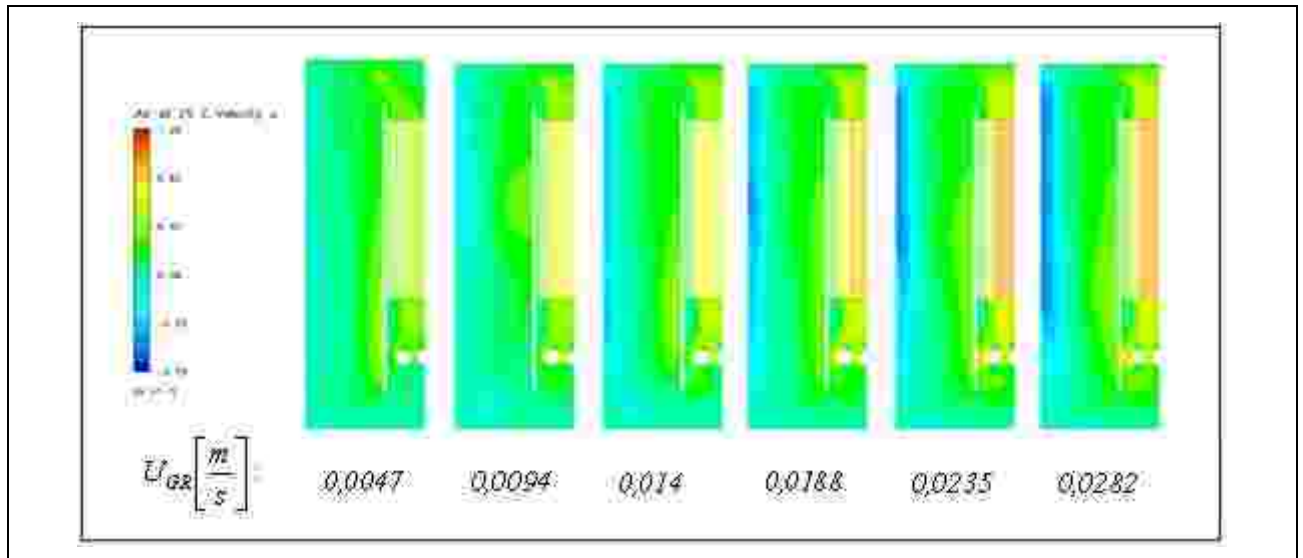


Bild 8-15: Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr-geschwindigkeiten (Membranmodul mit 5 mm Plattenabstand)

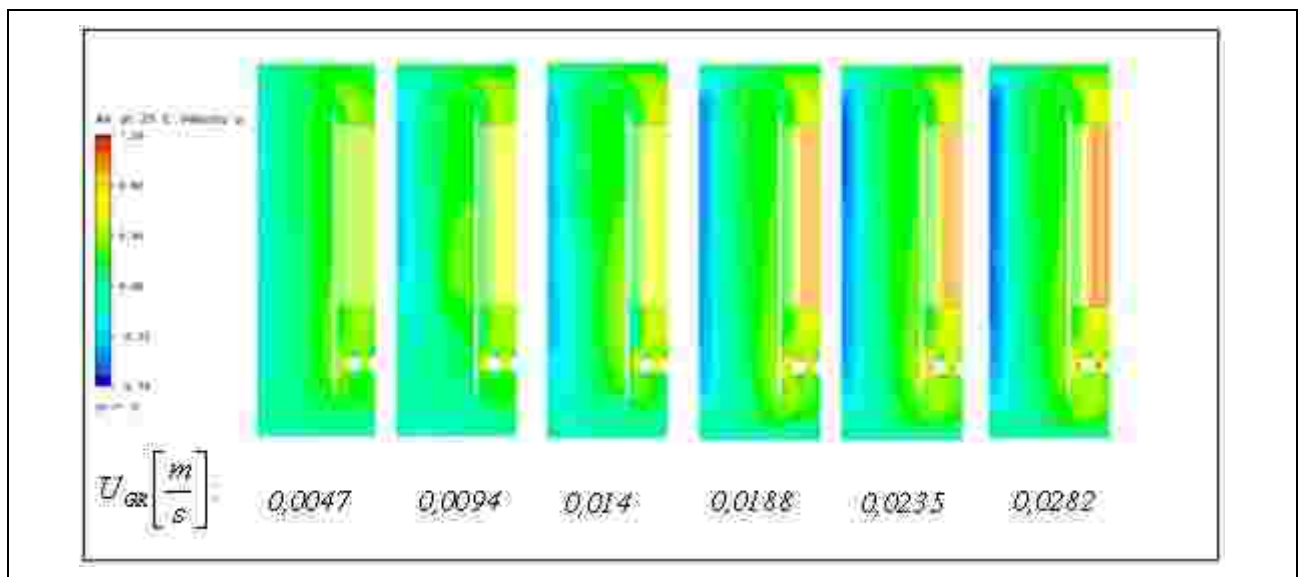


Bild 8-16: Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohr-geschwindigkeiten (Membranmodul mit 7 mm Plattenabstand)

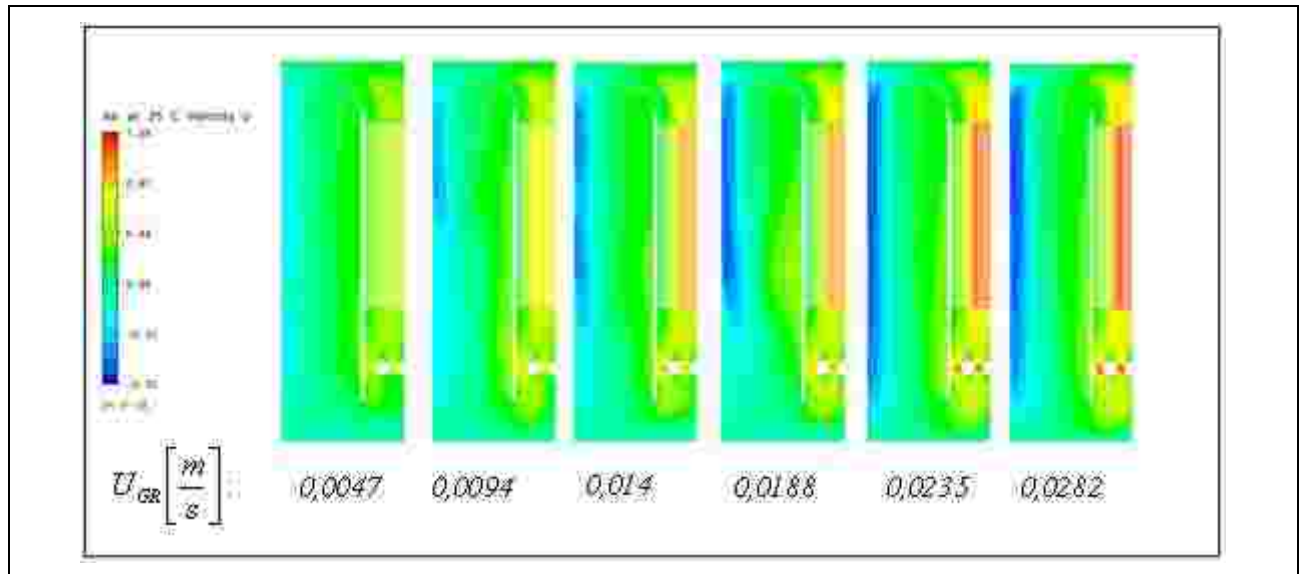


Bild 8-17: Berechnete vertikale Gasgeschwindigkeiten für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten (Membranmodul mit 9 mm Plattenabstand)

8.2 Untersuchungen zum Einfluss der Querströmung auf die Filtrationsleistung

Um den Zusammenhang zwischen der Überströmung der Membran und dem Permeatfluß zu bestimmen wurden experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Mit der Zielstellung, die optimale Überströmgeschwindigkeit und Belüftungsintensität zu ermitteln, erfolgten die Versuche an einer begasten Testzelle mit belebtem Schlamm und dem Membranmaterial des Moduls. Für unterschiedliche Leerrohrgeschwindigkeiten der Luft und des Schlamms wurde der kritische Fluss durch Auswertung der transmembranen Druckdifferenz bei schrittweise ansteigenden Permeatflüssen bestimmt. Die Intervalle für den konstanten Fluß betragen jeweils 15 Minuten.

Die Ergebnisse der Versuche ohne Begasung in Bild 8-18 konnte nicht gefunden werden. zeigen deutlich, dass der transmembrane Druck (TMP) bei einer Überströmgeschwindigkeit des Feeds von 40 cm/s bei einem niedrigeren Permeatfluss ansteigt als bei den beiden geringeren Überströmgeschwindigkeiten.

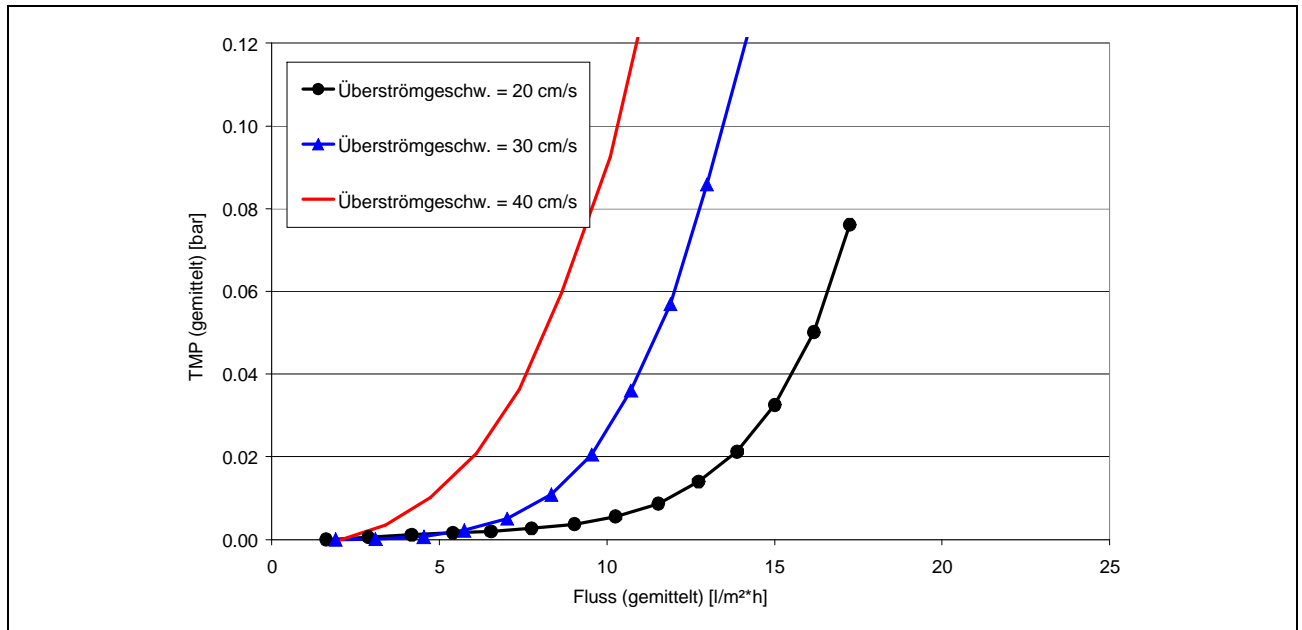


Bild 8-18: Verlauf des TMP für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten (ohne Begasung)

Diese Ergebnisse entsprachen zunächst nicht den Erwartungen und wurden deshalb mehrfach wiederholt. Es ergaben sich jedoch analoge Resultate. Auch die Versuche mit jeweils unterschiedlichen Belüftungsraten zeigten einen ähnlichen Verlauf, wie in Bild 8-19 und in Bild 8-20 dargestellt ist. Für höhere Querstromgeschwindigkeiten wurden bei gleichem Permeatfluss auch höhere Transmembrandrücke gemessen.

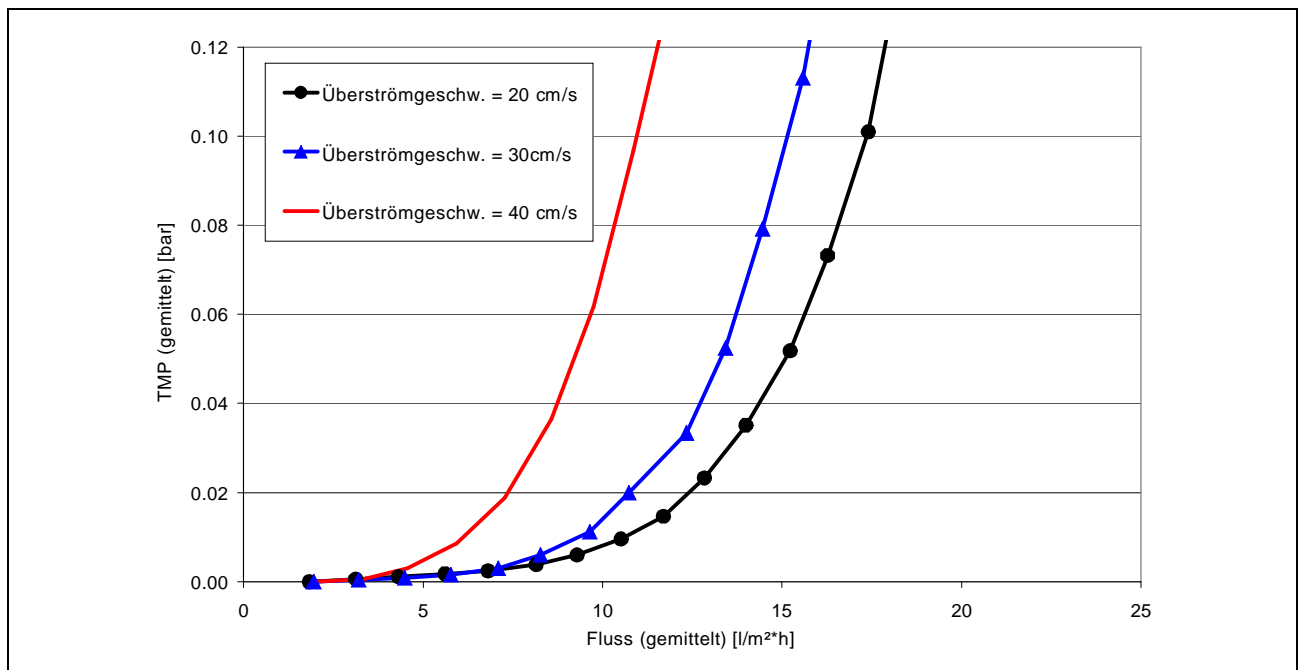


Bild 8-19: Verlauf des TMP für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten für eine Gaslerrohrgeschwindigkeit von 0,02 m/s

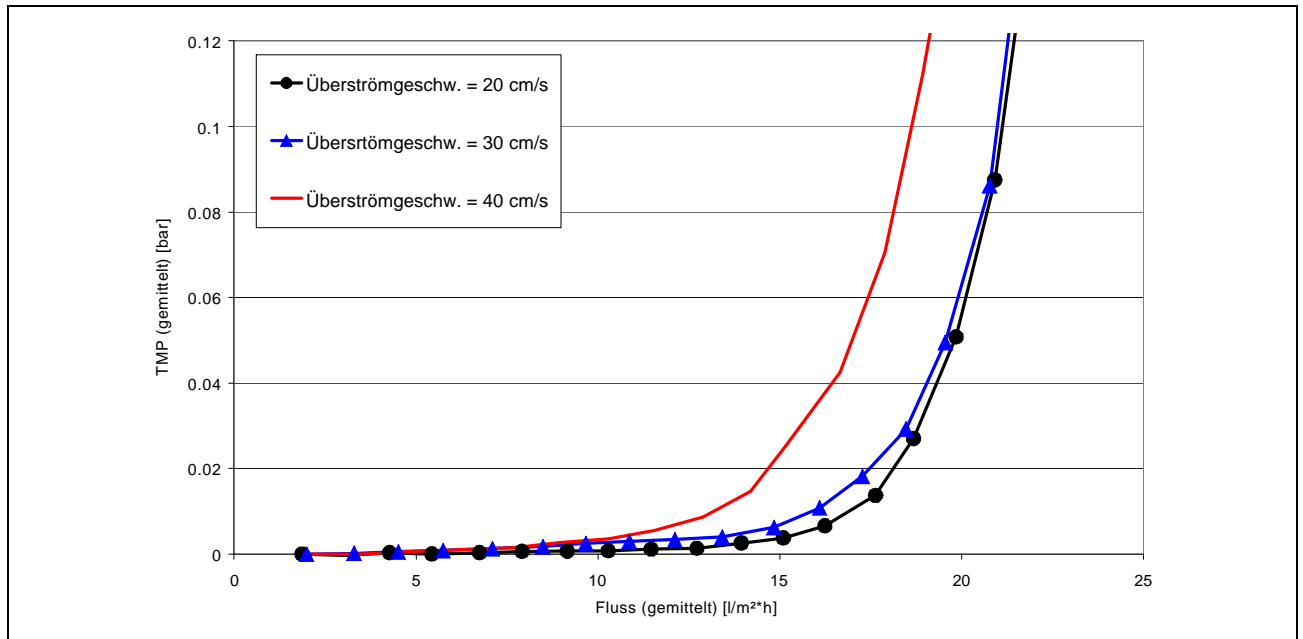


Bild 8-20: Verlauf des TMP für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten bei einer Gasleerrohrgeschwindigkeit von 0,09 m/s

In den folgenden Diagrammen von Bild 8-21 bis Bild 8-23 wird der Einfluss der Belüftung auf den Verlauf der transmembranen Druckdifferenz bei jeweils konstantem Volumenstrom des Belebtschlammes gezeigt. Zunächst werden mit zunehmender Belüftungsstärke bei gleichem TMP höhere Permeatflüsse erzielt. Dieser Verlauf entspricht den Erwartungen, dass durch die höheren Schubspannungen infolge der Belüftung der Widerstand der Deckschicht reduziert wird.

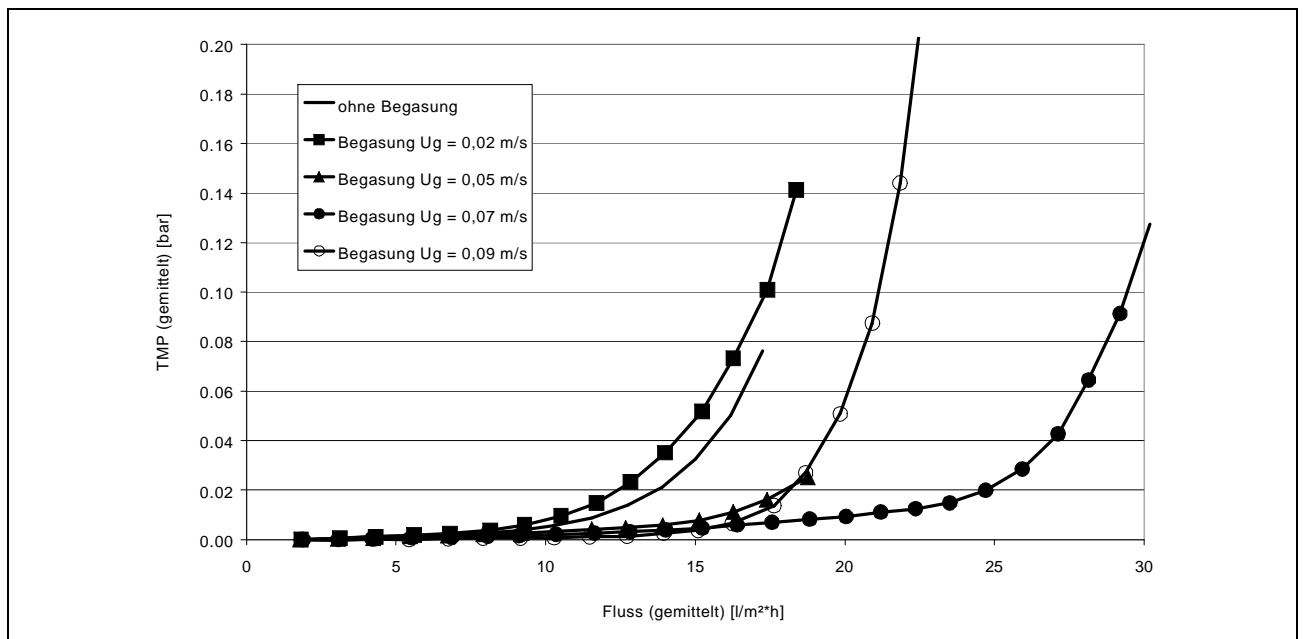


Bild 8-21: Verlauf des TMP für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten Ug für eine Querstromgeschwindigkeiten von 0,2 m/s

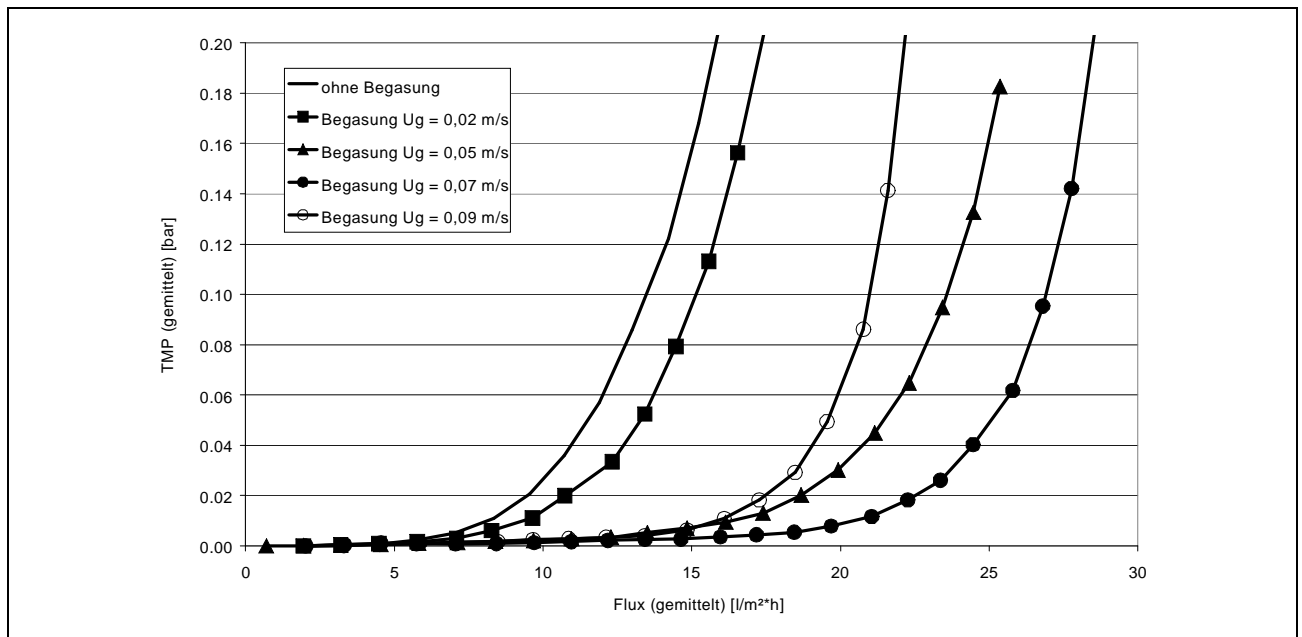


Bild 8-22: Verlauf des TMP für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten U_g für eine Querstromgeschwindigkeiten von 0,3 m/s

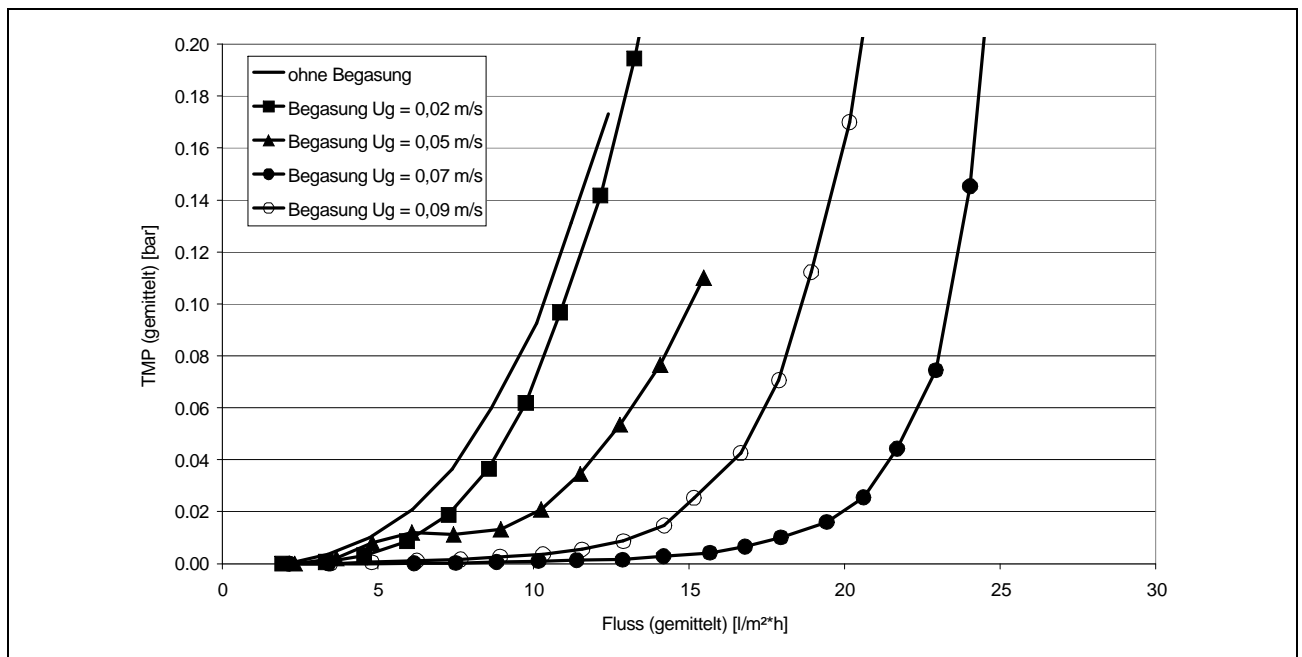


Bild 8-23: Verlauf des TMP für verschiedene Gasleerrohrgeschwindigkeiten U_g für eine Querstromgeschwindigkeiten von 0,4 m/s

Ab einer Gasleerrohrgeschwindigkeit von mehr als $U_g = 0,07$ m/s verringert sich der Permeatfluss bei vergleichbarem TMP. Dieses Verhalten wurde für alle drei vermessenen Querstromgeschwindigkeiten (20, 30 und 40 cm/s) festgestellt.

Im Weiteren wurde untersucht, ob der Permeabilitätsverlust bei steigender Querstromgeschwindigkeit durch eine Klassierung der Partikel in der Deckschicht begründet sein kann. Dazu wurden zunächst durch CFD-Simulationen die Geschwindigkeitsprofile der einphasigen Strömung von belebtem Schlamm im Membranspalt ermittelt. Für die Berechnung der Viskosität η_F in Abhängigkeit von der Scherrate diente die Gleichung 8-1, welche auf Messungen mit einem Rotationsviskosimeter basierte.

$$- \eta_F = 81,4 \left(\frac{dw_x}{dy} \right)^{-0,5776} \quad \text{Gleichung 8-1}$$

Anschließend wurden die hydrodynamischen Kräfte berechnet, welche für den An- bzw. Abtransport von Partikeln zur Membran verantwortlich sind. Die Ermittlung der Liftkraft auf sphärische Partikel, die an der Membran anliegen, erfolgte mit der Gleichung 8-2 von Rubin (1977). Die Werte für die Wandschubspannung τ_w lieferten die entsprechenden CFD-Simulationen. Die Liftkraft wirkt normal von der Membran in Richtung der Kernströmung und wird durch die höhere Geschwindigkeit auf der Seite des Partikels hervorgerufen, die der Membran abgewandt ist.

$$- F_L = 0,761 \frac{\tau_w^{1,5} d_P^3 \rho^{0,5}}{\eta_F} \quad \text{Gleichung 8-2}$$

Die Schleppkraft der Filtratströmung stellt die Gegenkraft zur Liftkraft dar und wirkt während der Filtration in Richtung normal zur Membran.

$$- F_Y = 3 \pi \eta_F d_P v_F \quad \text{Gleichung 8-3}$$

In Bild 8-24 sind die Liftkraft sowie die Schleppkraft der Filtratströmung bei einem Permeatvolumenstrom von 20 L/(m² h) in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich der kritische Partikeldurchmesser, unterhalb dessen ein Antransport zur Membran erfolgt, mit steigender Querstromgeschwindigkeit verringert. Die Gleichung 8-3 zeigt, dass der Widerstand einer Deckschicht Δp_{DS} aus kleineren Partikeln aufgrund des geringeren hydraulischen Durchmessers d_h ansteigt. Dies bestätigt die Vermutung, dass der Permeabilitätsverlust bei Steigerung der Querstromgeschwindigkeit von 20 auf 40 cm/s durch eine Klassierung, d.h. eine Verringerung des mittleren Partikeldurchmessers in der Deckschicht verursacht wird. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen belegen, dass bei der Bestimmung der optimalen hydrodynamischen Bedingungen die Effekte einer Klassierung der Deckschicht berücksichtigt werden müssen.

$$- \Delta p_{DS} = \zeta \frac{\rho_F v_F^2}{2} \frac{h}{d_h} \quad \text{Gleichung 8-4}$$

Da sich die Strömungsverhältnisse in der Testzelle (Lauflängen, Blasengröße, usw.) von denen in größeren Anlagen deutlich unterscheiden, können die ermittelten optimalen Überströmbedingungen nicht direkt auf Anlagen in größerem Maßstab übertragen werden.

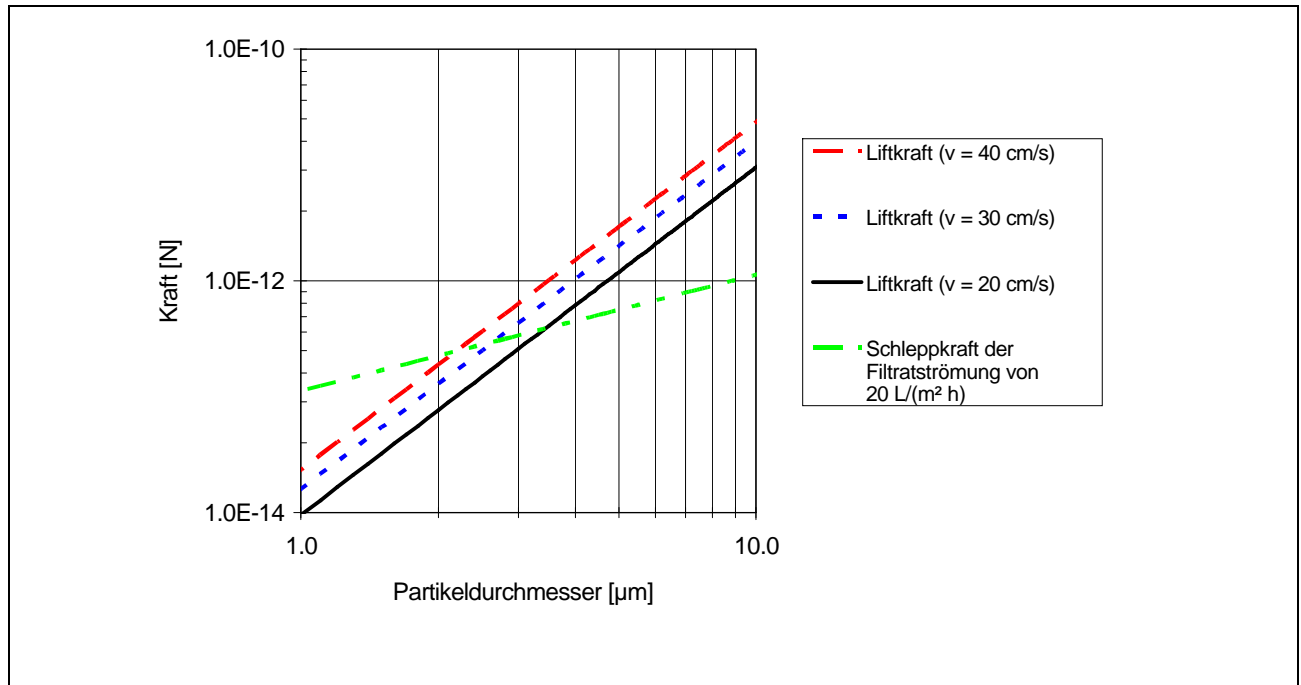


Bild 8-24: Logarithmische Darstellung hydrodynamischer Kräfte in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser für einen Permeatfluss von 20 L/(m² h)

8.3 Untersuchung des Blasenauftiegs zwischen den Platten

Um die Frage nach dem optimalen Abstand zwischen den Membranplatten und der verwendeten Blasengröße zu beantworten erfolgten numerischen Simulationen der Strömung zwischen den Membranplatten. Diese wurden mit der CFD-Software FLUENT und der Volume of Fluid Methode (VOF) durchgeführt. Als Bewertungskriterium diente die maximale Wandschubspannung in der Nähe bzw. im Nachlauf der aufsteigenden Blasen. Zur Validierung der numerischen Ergebnisse wurden die Aufstiegsgeschwindigkeiten von Einzelblasen im Bereich von 3 bis 15 mm Durchmesser zwischen Platten mit einem Abstand zwischen 3 und 11 mm in ruhendem Wasser mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Bild 8-25 im Vergleich zu den Werten für frei aufsteigende Luftblasen in Wasser dargestellt.

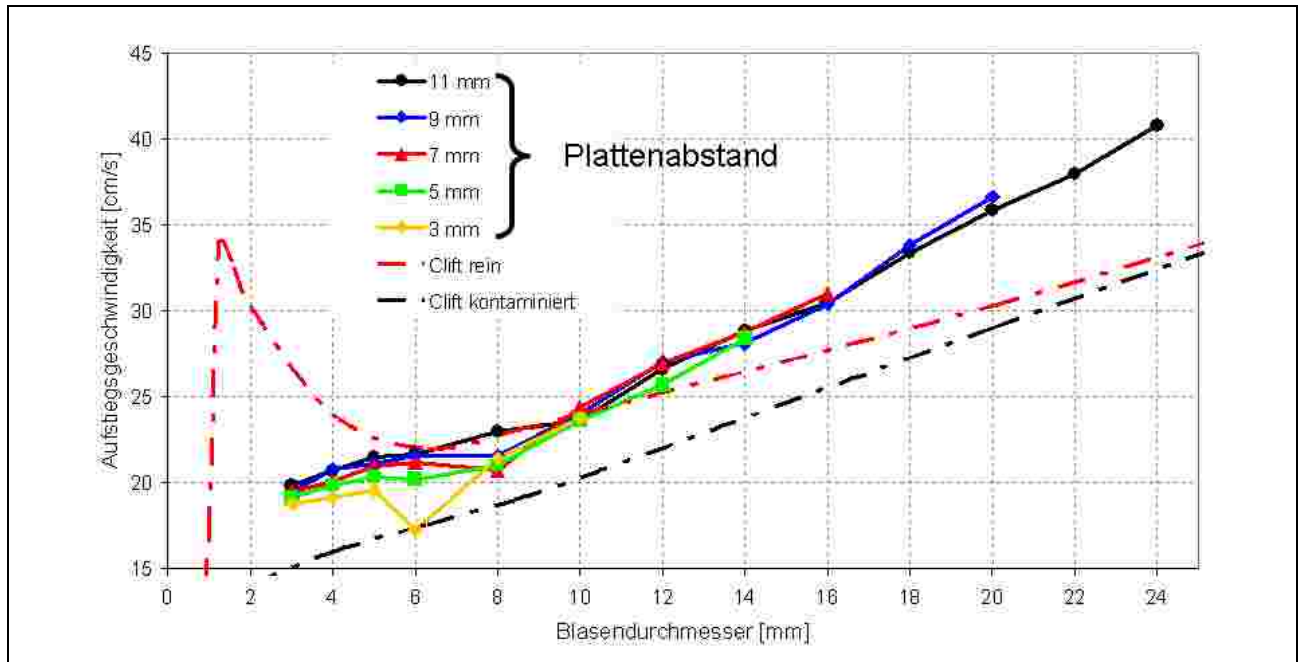


Bild 8-25: Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen zwischen parallelen Platten im Vergleich zu freien Blasen (Clift 1978)

Für Blasen bis ca. 10 mm Durchmesser überwiegen die Reibungskräfte an den Membranplatten und bremsen die Blasen deutlich unter das Geschwindigkeitsniveau frei aufsteigender Blasen. Mit zunehmendem Blasendurchmesser verliert sich der Einfluss des Plattenabstandes und der Blasendurchmesser wird zum dominierenden Faktor für die Aufstiegsgeschwindigkeit. Im Spalt zwischen den Platten bilden Blasen ab einem Durchmesser von ca. 10 mm eine deutlich günstigere Form mit einem geringeren Strömungswiderstand aus (Bild 8-26).

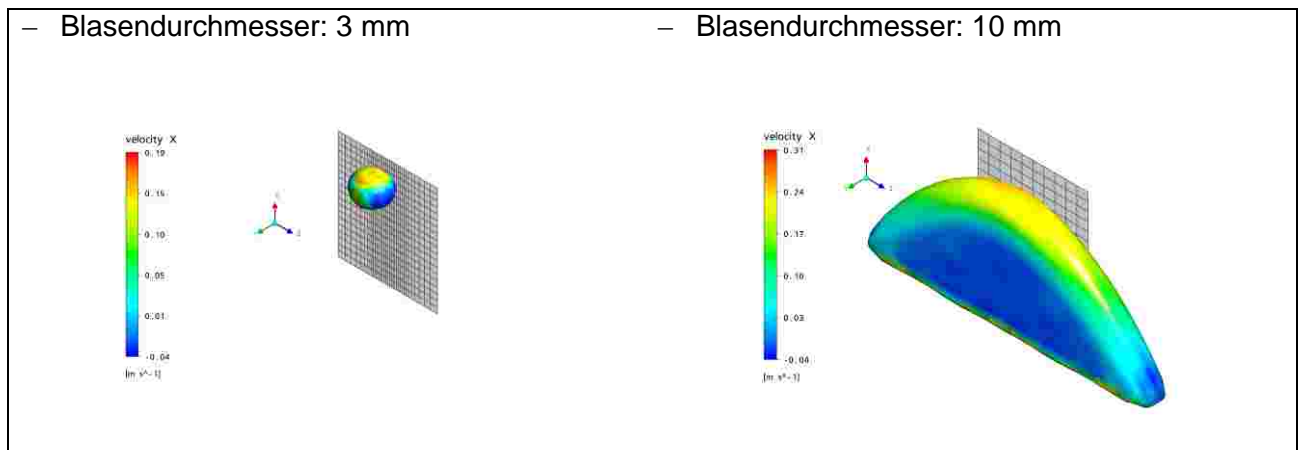


Bild 8-26: Darstellung der Blasenform sowie der vertikalen Geschwindigkeit für einen Plattenabstand von 3 mm

Der Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Aufstiegsgeschwindigkeiten im Bild 8-27 zeigt, dass die Simulationen den Blasenanstieg qualitativ korrekt wiedergeben. Die deutlichen Abweichungen insbesondere für einen Blasendurchmesser von 7 mm sind durch die zu geringe Gitterauflösung und durch die Beschränkung des Rechengebietes auf ein Winkelsegment von 90° begründet. Durch die verwendeten Symmetrieebenen wird in den Simulationen die Pendelbewegung der Blasen verhindert.

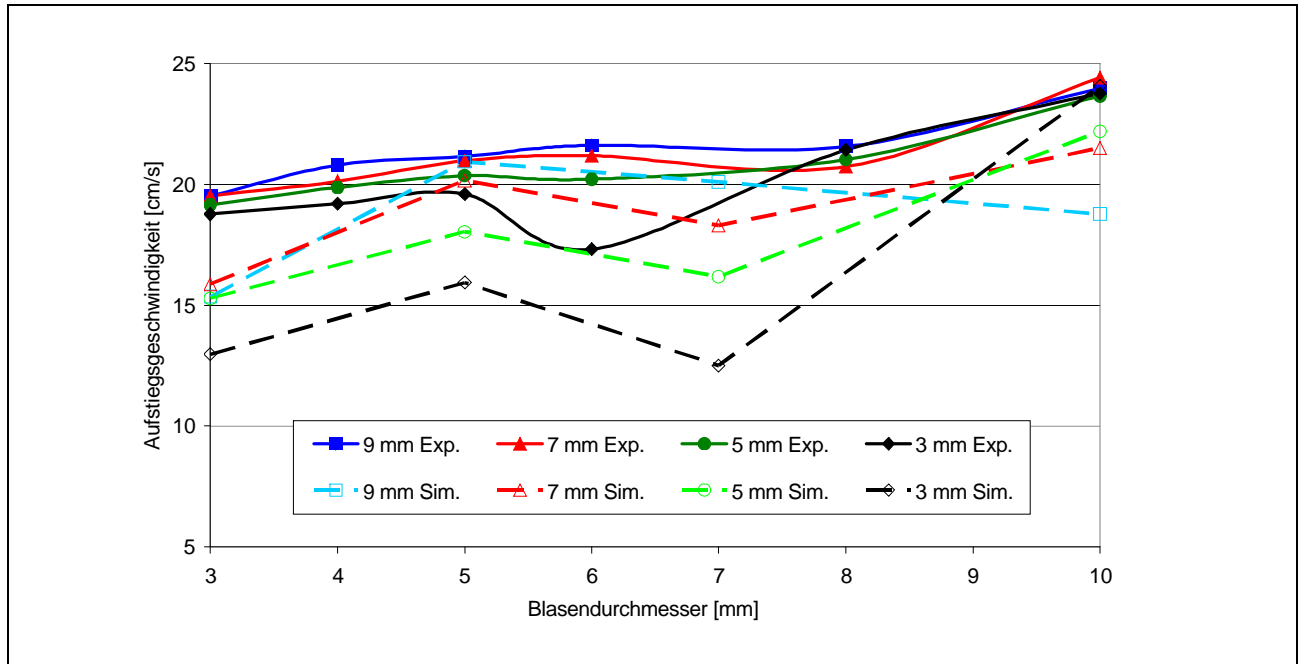


Bild 8-27: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Aufstiegsgeschwindigkeiten der Blasen zwischen parallelen Platten

Aus den numerischen Strömungssimulationen geht hervor, dass hinsichtlich der für die Abreinigung relevanten Wandschubspannung zwei unterschiedliche Phänomene auftreten. Für kleine Blasen wird die Wandschubspannung durch eine abwärts gerichtete Geschwindigkeit im Wasserfilm zwischen Membran und Blase hervorgerufen. Große Blasen liegen mit abnehmendem Plattenabstand flächig an der Membran an und verursachen horizontale Verdrängungsströmungen sowie einen stark ausgeprägten Nachlauf. Der Ort der höchsten Wandschubspannung verlagert sich an den unteren Blasenrand und den Nachlauf. Im Nachlauf treten hohe, aufwärtsgerichtete Geschwindigkeiten auf und rufen hohe Wandschubspannungen hervor, wodurch sich bei der Überlagerung mit der aufwärts gerichteten Zirkulationsgeschwindigkeit im Airlift-Schlaufenreaktor die Abreinigungswirkung dieser Blasen verstärken sollte. Für kleinere Luftblasen ergibt sich aus der Überlagerung der Zirkulationsströmung im Reaktor mit der abwärtsgerichteten Filmgeschwindigkeit eine Reduzierung der Wandschubspannung.

Gegenüber dem momentan verwendeten Plattenabstand von 7 mm ergeben sich aus den numerischen Simulationen, dargestellt in Bild 8-28, um über 300% höhere Wandschubspannungen für einen Plattenabstand von 5 mm und einem Blasendurchmesser von ebenfalls 5 mm. Eine

weitere Reduzierung des Plattenabstandes auf 3 mm würde eine weitere, geringfügige Steigerung der Scherkräfte nach sich ziehen. Allerdings ist dieser geringe Abständen aus konstruktiven Gründen nicht sicher einzustellen und besonders anfällig für Spaltverblockungen durch faserige Bestandteile im Abwasser. Bei einem reduzierten Plattenabstand von 5 mm sollten mittelgroße Blasen von 5 mm Durchmesser zur Deckschichtkontrolle eingesetzt werden. Neben der besseren Abreinigungswirkung wird durch die erhöhte Packungsdichte die Wirtschaftlichkeit des MBR gesteigert.

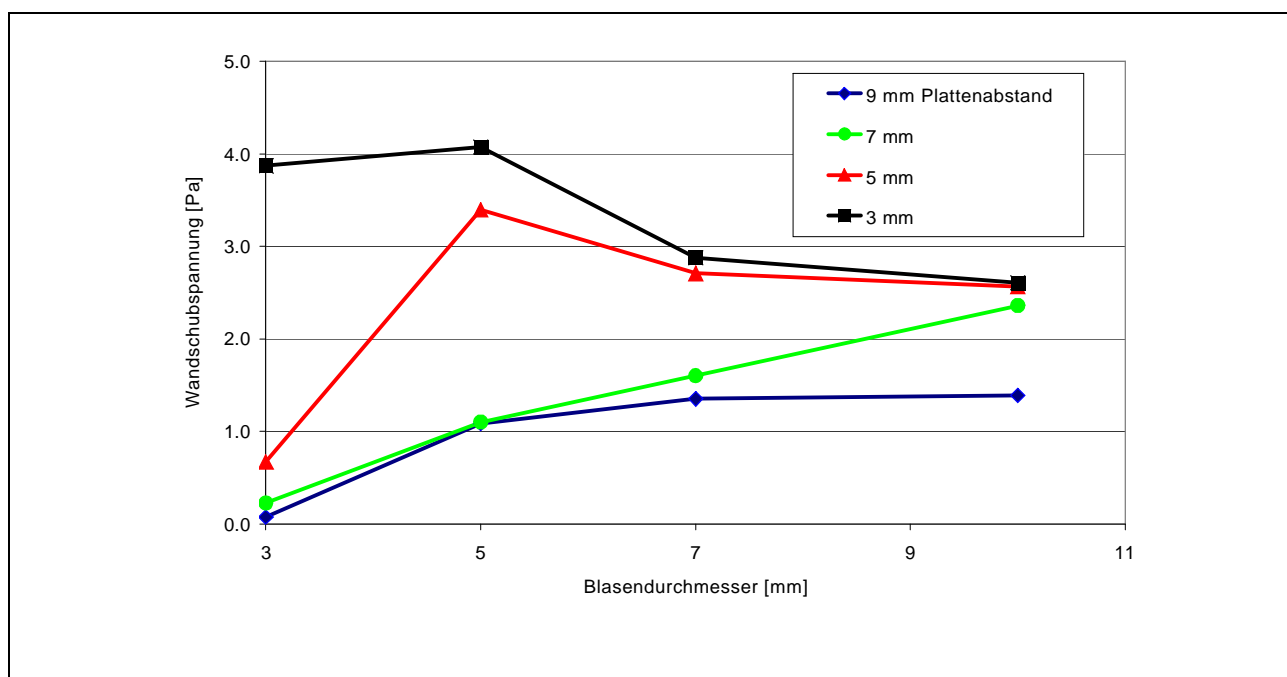


Bild 8-28: Ergebnisse der numerischen Simulationen für die maximale Wandschubspannung in Abhängigkeit vom Plattenabstand und der Blasengröße.

8.4 Mathematische Modellierung der Zirkulationsströmung

Die im Antrag formulierte Zielstellung, eine Optimierung der Reaktor- oder der Modulgeometrie durch die Kopplung zwischen der numerischen Strömungssimulation und einem evolutionärem Optimierungsalgorithmus zu realisieren, wurde wegen des hohen Zeitaufwandes dieser Methode und der begrenzten Aussagekraft der zu erwartenden Ergebnisse nicht umgesetzt. Stattdessen wurde ein mathematisches Modell erstellt, mit dem die Zirkulationsströmung im Reaktor in Abhängigkeit von den geometrischen Abmessungen sowie den Betriebsparametern vorhergesagt werden kann. Der Vorteil des mathematischen Modells besteht insbesondere darin, dass nach Abschluss des Projektes ohne weitere zeitaufwendige CFD-Simulation eine systematische Optimierung mit vergleichsweise geringem Aufwand durchgeführt werden kann.

Basierend auf dem von Chisti (1988) veröffentlichten Modell für die Berechnung der Zirkulationsströmung in Schlaufenreaktoren ohne Einbauten wurden Erweiterungen für die Konfiguration mit Plattenmembranmodulen in der Aufstiegsregion formuliert. Diese sind in dem Berechnungsschema in Bild 8-29 grün dargestellt.

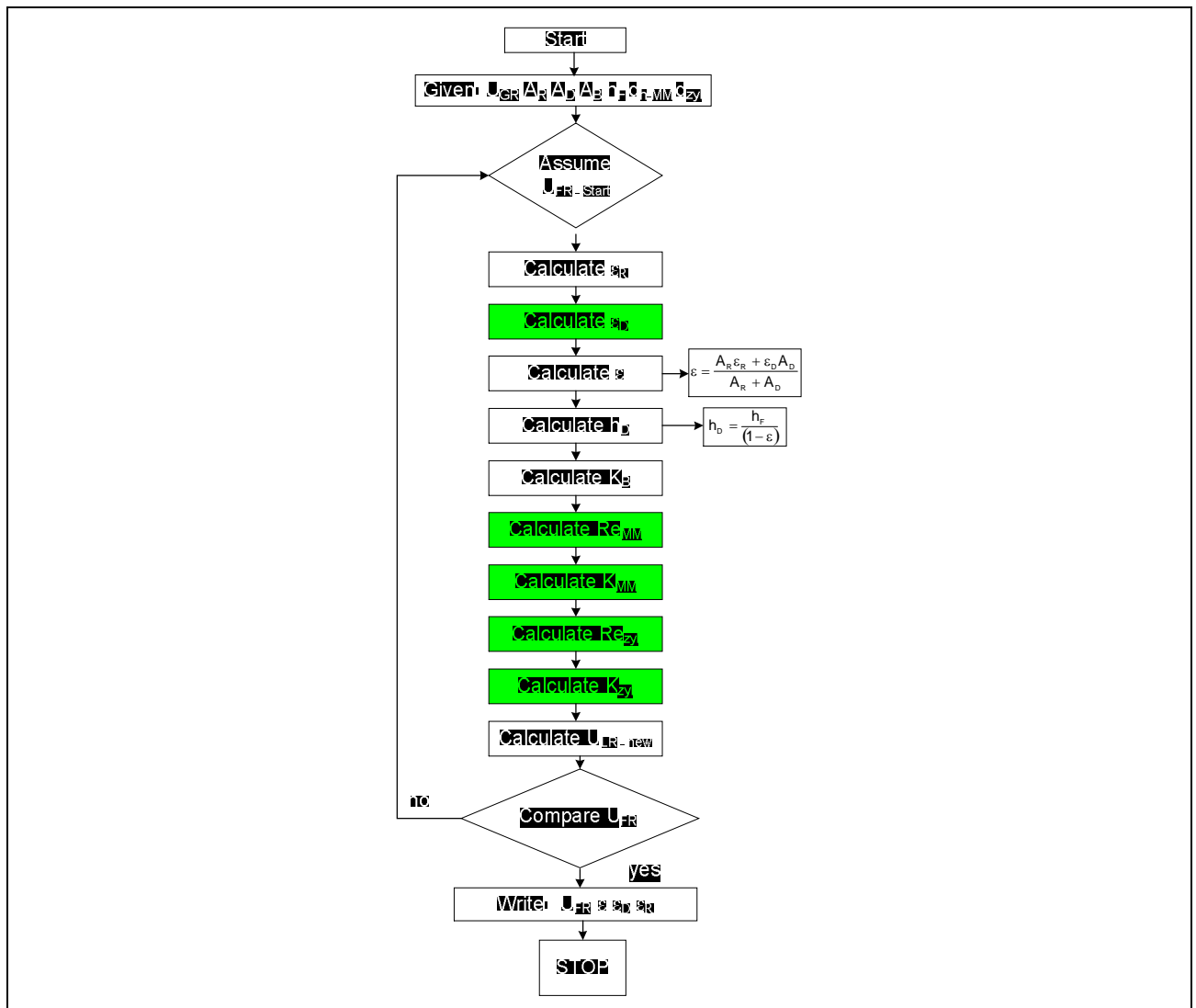


Bild 8-29: Erweitertes Berechnungsschema zur Bestimmung der Zirkulationsgeschwindigkeit in Schlaufenreaktoren mit Membranmodulen

Eine wesentliche Modifikation des mathematischen Modells von Chisti betrifft die Ermittlung des Gasgehalts in der Abstiegsregion des Schlaufenreaktors. Die numerischen und experimentellen Untersuchungen zeigten, dass die von Chisti verwendete Gleichung 8-5 für den Gasgehalt in der Abstiegsregion zu starken Abweichungen bei der Berechnung der Zirkulationsgeschwindigkeit in Membranbioreaktoren führt.

$$\epsilon_D = 0,89 \epsilon_R \quad \text{Gleichung 8-5}$$

Die ermittelten Werte für den Gasgehalt ϵ_D fallen im Vergleich zu Chisti wesentlich geringer aus. Als Ursache dafür sind bei der Anwendung in Membranbioreaktoren die größeren Querschnittsflächen im Downcomer sowie die größere Blasen für die Deckschichtkontrolle zu nennen. Außerdem bewirkt der Widerstand des Membranmoduls eine weitere Reduzierung des Gasgehalts im Downcomer, da eine geringere Zirkulationsströmung weniger Gas in die

Abstiegsregion mitführt. In Bild 8-30 ist dieser Aspekt durch den unterschiedlichen Gasgehalt für den Fall mit und ohne Membranmodul dargestellt.

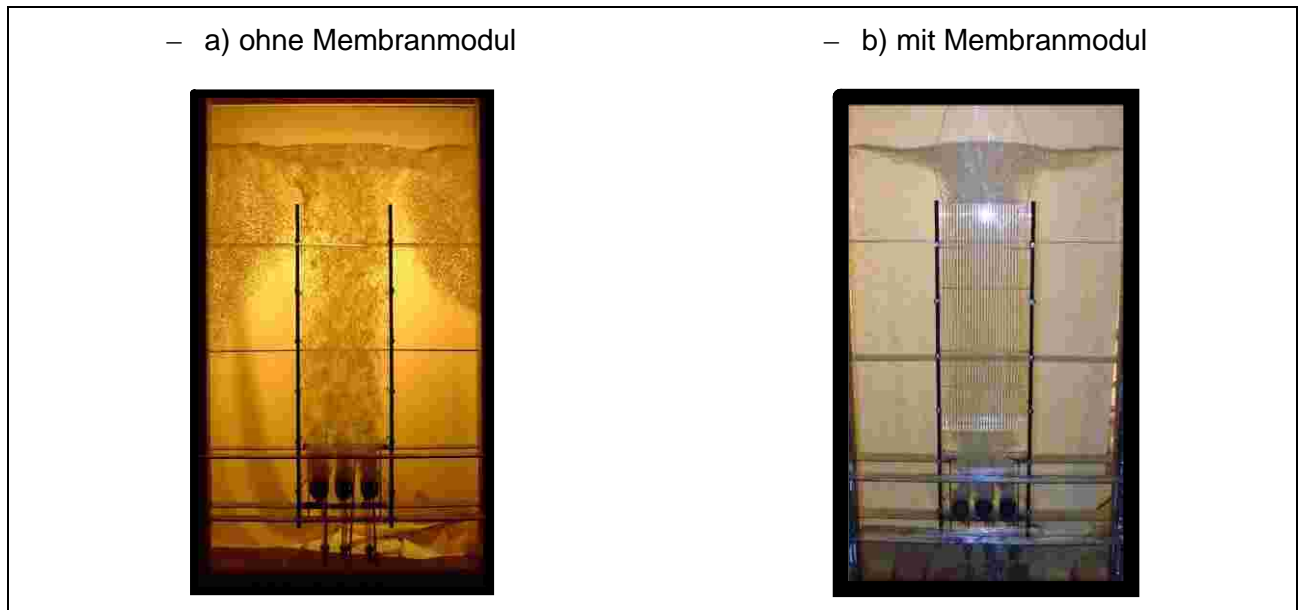


Bild 8-30: Gasgehalt im Schlaufenreaktor für den Fall ohne und mit Membranmodul für eine Gasleerrohrgeschwindigkeit von 0,0234 m/s

In dem neuen Ansatz für den Gasgehalt in der Abstiegsregion ε_D wird nun das Verhältnis der Aufstiegsgeschwindigkeit der Gasblasen u_{BL} zur mittleren Geschwindigkeit der Flüssigkeit berücksichtigt. Die Auswertung systematischer Gashaltsmessungen im Downcomer des quasi 2-dimensionalen Reaktormodells führte zu Gleichung 8-6. Der Gasgehalt im Downcomer wurde dabei mit der Differenzdruckmethode für verschiedene Flächenverhältnisse ermittelt.

$$\varepsilon_D = 0,016 \left(\frac{U_{FR}}{u_{BL} \frac{A_D}{A_R}} \right)^{1,48} \varepsilon_R^{0,032} \quad \text{Gleichung 8-6}$$

Die Berechnung der Aufstiegsgeschwindigkeit der Blasen u_{BL} erfolgte unter der Annahme geringer Gasleerrohrgeschwindigkeiten kleiner 0,05 m/s mit der Gleichung 8-7 wie für die größte stabile Einzelblase.

$$u_{BL} = 1,24 \sqrt[4]{\frac{\Delta\rho \cdot g \cdot \sigma_F}{\rho_F^2}} \quad \text{Gleichung 8-7}$$

Der Gasgehalt im Riser ε_R wurde mit der Gleichung 8-8 von Hills (1976) abgeschätzt.

$$\varepsilon_R = \frac{U_{GR}}{0,24 + 1,35(U_{GR} + U_{FR})^{0,93}} \quad \text{Gleichung 8-8}$$

Um den Strömungswiderstand des Membranmoduls Δp_{MM} in Abhängigkeit von dessen Abmessungen zu bestimmen, wurden Gleichung 8-9 bis Gleichung 8-15 benutzt. Dabei galt aufgrund des geringen Gasgehalts die Annahme, dass der Widerstand des Membranmoduls nur durch die flüssige Phase verursacht wird.

$$\Delta p_{MM} = K_{MM} \frac{\rho_L}{2} u_{MM}^2 \frac{l_{MM}}{d_h} \quad \text{Gleichung 8-9}$$

Der hydraulische Durchmesser des Membranmoduls lässt sich aus dem Abstand d_{MM} der Membranplatten sowie deren Breite B bestimmen.

$$d_h = 4 \frac{V_{durchstr\ddot{o}mt}}{A_{benetzt}} = 4 \frac{A_{frei} l_{MM}}{n_{MP} 2(d_{MM} l_{MM} + B l_{MM})} = 2 \frac{d_{MM} B}{(d_{MM} + B)} \quad \text{Gleichung 8-10}$$

Die Berechnung des Widerstandsbeiwertes des Membranmoduls K_{MM} erfolgt in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re , welche mit der lokalen Geschwindigkeit der flüssigen Phase im Modul u_{MM} gebildet wird.

$$u_{MM} = \frac{\dot{V}_{FR}}{(1-\varepsilon_R) A_{MM}} = U_{FR} \frac{A_R}{(1-\varepsilon_R) A_{MM}} \quad \text{Gleichung 8-11}$$

$$Re = u_{MM} \frac{d_h}{\nu_F} = \frac{U_{FR} A_R}{(1-\varepsilon_R) A_{MM}} \frac{d_h}{\nu_F} \quad \text{Gleichung 8-12}$$

$$K_{MM} = 0.0054 + \left(\frac{0.3964}{Re^{0.3}} \right) \quad \text{für } \langle 2 \cdot 10^4 < Re < 2 \cdot 10^6 \rangle$$

$$K_{MM} = (100 Re)^{-1/4} \quad \text{für } \langle 2.3 \cdot 10^3 < Re < 10^5 \rangle \quad \text{Gleichung 8-13}$$

Durch Multiplikation des Druckverlustes des Membranmoduls Δp_{MM} mit dem Volumenstrom der Flüssigkeit ergibt sich die Energiedissipation der Strömung durch das Membranmodul \dot{E}_{MM} . Um diesen Term wird nun die von Chisti (1988) aufgestellte Energiebilanz für die stationäre Zirkulation in einem Schlaufenreaktor erweitert. In der Gleichung 8-14 sind dann neben dem Energieeintrag durch die Belüftung des Schlaufenreaktors \dot{E}_I alle wesentlichen Dissipationsterme enthalten.

$$\dot{E}_I = \dot{E}_R + \dot{E}_D + \dot{E}_B + \dot{E}_{MM} \quad \text{Gleichung 8-14}$$

Nach Umstellen Gleichung 8-14 ergibt sich die gesuchte Vorschrift zur Berechnung der Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit im Riser. Im Unterschied zu dem Ansatz von Chisti besteht in

Gleichung 8-15 jedoch eine Abhängigkeit der Zirkulationsgeschwindigkeit von den geometrischen Parametern des Membranmoduls.

$$U_{FR} = \left(\frac{2 g h_D (\varepsilon_R - \varepsilon_D)}{K_B \left(\frac{A_R}{A_D} \right)^2 \frac{1}{(1 - \varepsilon_D)^2} + K_{MM} \frac{1}{2} \left(\frac{A_R}{A_{MM}} \right)^2 \frac{l_{MM} (d_{MM} + B)}{d_{MM} B}} \right)^{0.5}$$

Gleichung 8-15

Für die Widerstandszahl K_B der Strömungsumlenkung am Boden des Schlaufenreaktors wurde von Chisti (1988) die empirisch bestimmte Korrelation (Gleichung 8-16) verwendet.

$$K_B = 11,4 \left(\frac{A_D}{A_{AB}} \right)^{0,79}$$

Gleichung 8-16

Mit dem entwickelten mathematischen Modell konnte die Zirkulationsgeschwindigkeit in guter Übereinstimmung mit den experimentellen bzw. numerisch ermittelten Werten berechnet werden. In Bild 8-31 sind die Ergebnisse der Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit im Riser U_{FR} für den Fall mit Membranmodul und einem Plattenabstand von 7 mm dargestellt. Das Verhältnis der Querschnittsflächen des Downcomers zum Riser beträgt hier $A_D/A_R = 2$. Im Vergleich zu den Ergebnissen des ursprünglich von Chisti entwickelten Modells ist eine deutliche bessere Annäherung an die experimentell bestimmten Werte zu erkennen. Ursache für diese Verbesserung sind sowohl die Berücksichtigung des Widerstandes des Membranmoduls, als auch die genauere Berechnung des Gasgehaltes in der Abstiegsregion, welche im Bild 8-32 dargestellt ist. Hier sind für den Fall mit Membranmodul mit einem Plattenabstand von 7 mm sowie für verschiedene Flächenverhältnisse die Gasgehalte im Downcomer im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen dargestellt. Die Darstellung der Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeiten im Riser im Bild 8-33 zeigen den Einfluß des Plattenabstandes im Membranmodul für ein Flächenverhältnis von $A_D/A_R = 2$. Als Referenz dienen hier die Ergebnisse der CFD-Simulationen die für einen Plattenabstand von 7 mm annähernd mit den experimentellen Werten übereinstimmen.

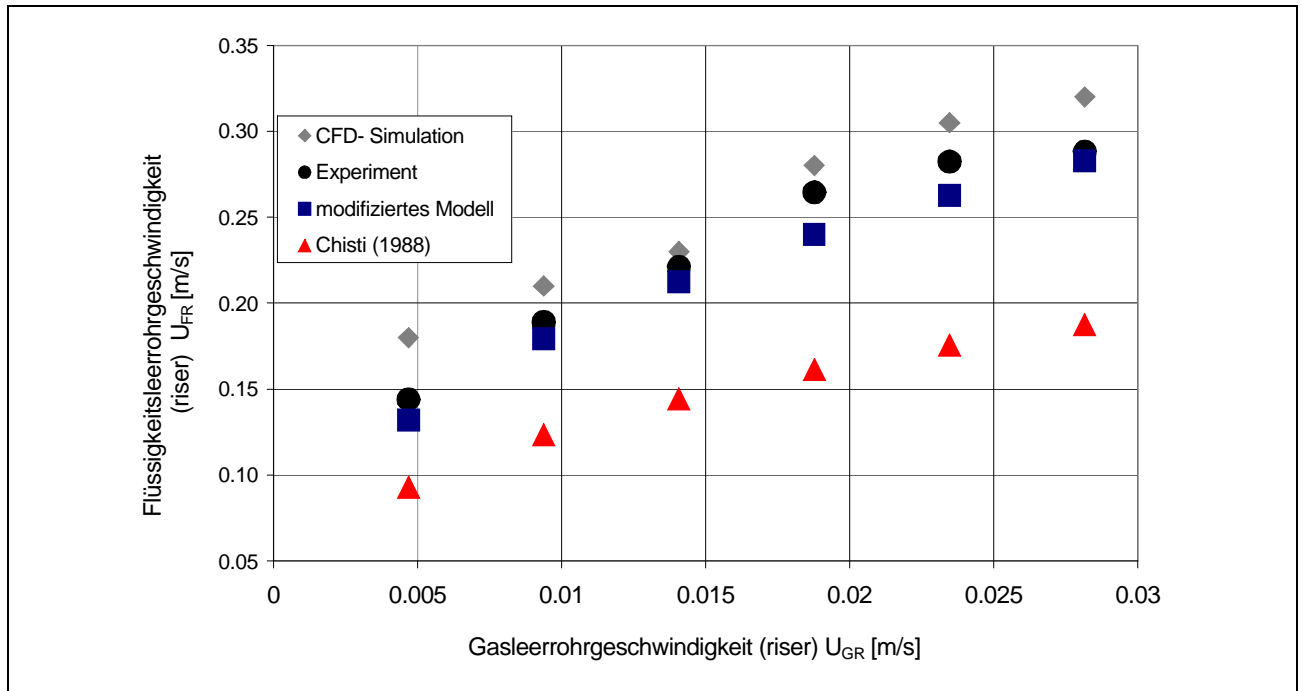


Bild 8-31: Vergleich der Ergebnisse für die Flüssigkeitsleerrohrgeschwindigkeit im Riser für den Fall mit Membranmodul mit einem Plattenabstand von 7 mm und einem Flächenverhältnis von $AD/AR = 2$

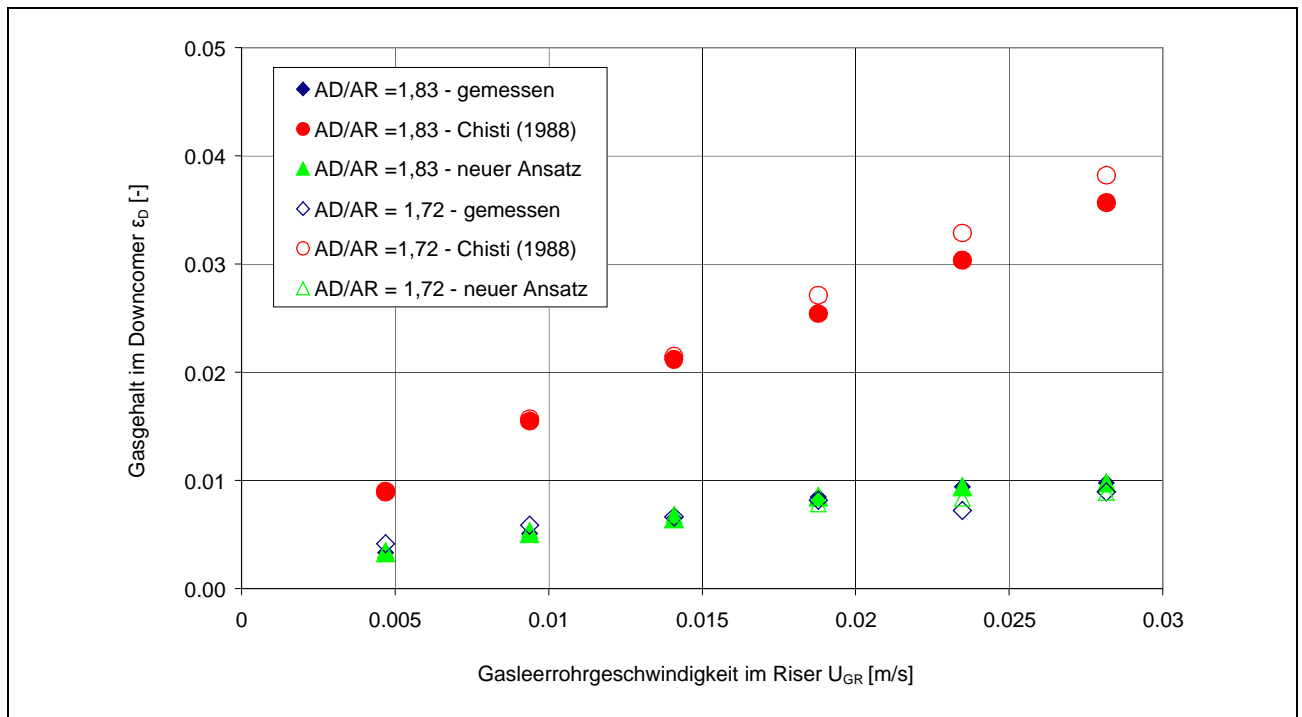


Bild 8-32: Ergebnisse der neuen Korrelation für den Gasgehalt im Downcomer im Vergleich zum Ansatz von Chisti sowie zu den experimentellen Werten (Plattenabstand 7 mm, Flächenverhältnis $AD/AR = 2$)

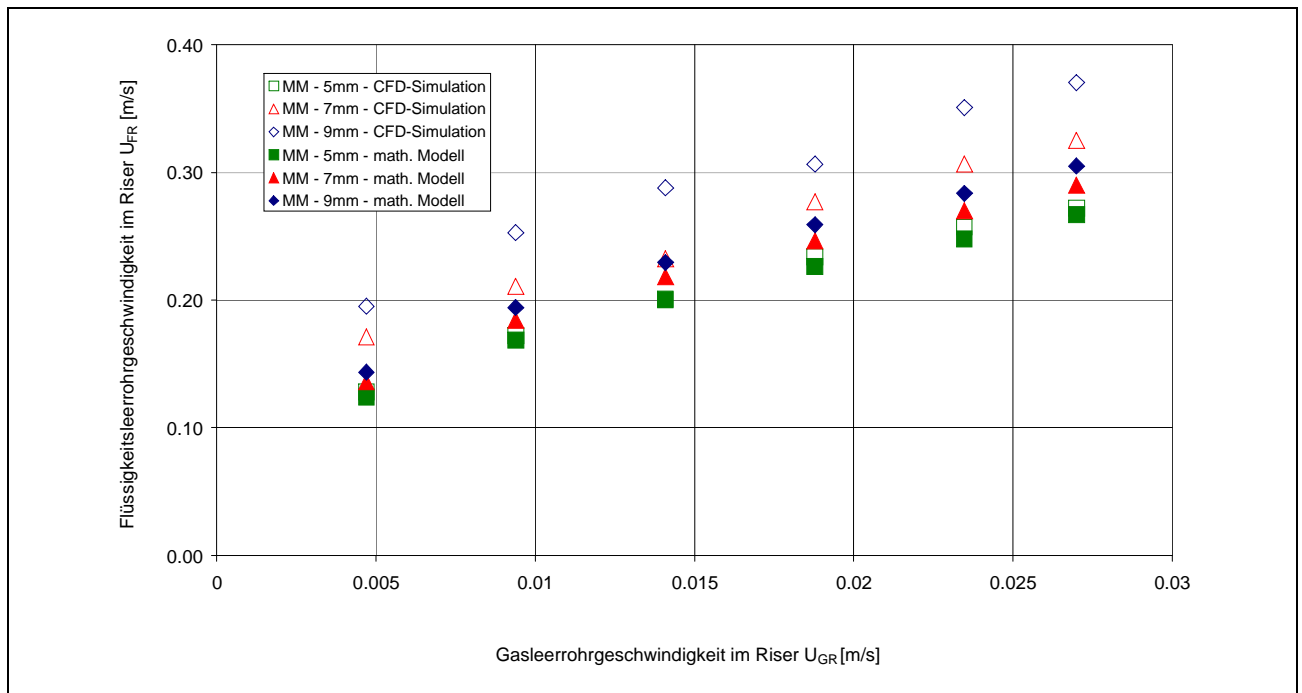


Bild 8-33: Ergebnisse der numerischen Simulation für Membranmodule mit verschiedenen Plattenabständen im Vergleich zum mathematischen Modell (Flächenverhältnis AD/AR = 2)

9 Umsetzung der Untersuchungsergebnisse in der Modulproduktion

Während es sich bei den im Abschlussbericht Phase I vorgestellten Membranmodulen um Prototypen bis 42 m² (A 40) Membranfläche handelte, wurden bis dato Weiterentwicklungen der Prototypen mit Membranflächen bis zu 70 m² (M 70) betrieben. Im Folgenden werden Weiterentwicklungsmaßnahmen bzgl. der Modulfertigung und Modulgeometrie beschrieben.

9.1 Modulfertigung

Technische Weiterentwicklungen der Membraneinzelkomponenten bzgl. der Fertigung und Materialbeschaffenheit sind in Tabelle 9-1 aufgezeigt:

Tabelle 9-1 Technische Änderungen/Weiterentwicklungen in der Modul-fertigung bzw. Materialwahl

Membrantaschen-material	Membrantaschen-spacer	Membrantaschen-verschluss	Membrantaschen-verguss
Wechsel des Membranmaterials	Verbesserung der Biegesteifigkeit und Porosität	Wechsel des Laminierungsverfahrens von Klebung auf Verschweißung	Material mit höherer Shore-Härte

Die bis dato eingesetzte Polyphenolharz Membran wies im Filtrationsbetrieb infolge der dynamischen Beanspruchungen eine unzureichende Zugfestigkeit auf, wodurch es zu Bruchstellen in der Membran infolge Materialermüdung und damit zu einem Membrandefekt kam. Dadurch wurde eine Substitution des Membranmaterials erforderlich, weshalb in den derzeitigen Prototypen eine PVDF-Flachmembran eingesetzt und betrieben wird.

Ursprünglich wurden PP Spacer mit Vlies zur Filtratableitung eingesetzt. Zwei auf der Ober- und Unterseite der Membrantasche eingesetzte Streifen aus PP sorgten für den definierten Abstand des Membranmaterials zueinander und unterstützen die Biegesteifigkeit der Membrantasche. Allerdings zeigte sich im Betrieb, dass mit den oben- und untenliegenden Streifenspacern keine ausreichende Biegesteifigkeit erreicht werden konnte. Daher wurde zur Erhöhung der Biegesteifigkeit der Membrantaschen und Sicherstellung des definierten Plattenabstandes über der gesamten Membranfläche eine durchgehende Hohlkammerplatte eingesetzt. Die erforderliche Porosität zur Filtratableitung erfolgt maschinell über eine Lochung der Platte.

Der Membrantaschenverschluss wurde anfänglich über eine Verbundklebung von Membranmaterial und Spacer hergestellt. Die eingesetzte Polyphenolharz-Membran ließ aufgrund ihrer Materialbeschaffenheit kein alternatives Verbundverfahren außer der Klebung zu. Durch den Austausch der Polyphenolharz-Membran und Einsatz der PVDF-Membran eröffneten sich alternative Möglichkeiten zur Herstellung eines Verbundes von Spacer und Membran wie z.B. eine thermoplastische Verbindung durch Verschweißung der Materialien. So wird derzeit der Verschluss der Membrantaschen über eine Verschweißung der Materialien hergestellt.

Die Zusammenfassung der Membrantaschen zu einer Moduleinheit erfolgt über den Verguss der Einzelmembrantaschen. Hierfür wurde bislang ein Standard-Polyurethan-System (PUR) eingesetzt. Im Filtrationsbetrieb zeigte sich allerdings, dass das eingesetzte PUR-System nicht ausreichend formstabil war. Daher wurde das alte PUR-System durch ein selbst entwickeltes PUR-System mit höherer Shore-Härte ersetzt und wird derzeit in den Prototypen verwendet.

9.2 Modulkonstruktion

Das Membranmodul ist im Filtrationsbetrieb permanent mechanischen Beanspruchungen z.B. die Dynamik der ausgebildeten Walzenströmung durch die Belüftung ausgesetzt. Daher wurde im Rahmen der Weiterentwicklung besonderer Augenmerk auf die Beständigkeit der Einzelkomponenten gegen mechanische und dynamische Beanspruchung gerichtet. Besonders gilt dies für verklebte Einzelkomponenten wie z.B. den Filtratabzug. Hierzu wurde über die gesamte Projektdauer nach Einzelkomponenten gesucht, die in vergleichbaren Applikationen als Stand der Technik eingesetzt und derzeit in den Prototypen angewendet werden.

9.3 Modulgeometrie

Die Modulgeometrie der Prototypen und hier vordergründig die Wahl der Membranflächengröße richtet sich nach den in aufgeführten Applikationen:

Tabelle 9-2 Wahl der Modulgeometrie

Kleinkläranlagen	Schiffskläranlagen	Großtechnische Anwendungen
Prototyp M06	Prototyp M20	Prototyp M70

Durch die technische Weiterentwicklung der Taschenfertigungsanlage ist es möglich, Membrantaschen mit unterschiedlichen Höhen automatisiert zu fertigen und damit die oben genannten Prototypen mit Membranflächen von 6, 20 und 70 m² in Fließbandfertigung herzustellen.

Weiterhin wurden bei der Modulgeometrie berücksichtigt, dass die Einzelmodule konstruktiv miteinander zu mehrstöckigen Modulen z.B. als Doppelstock-Module ausgeführt, verbunden und betrieben werden können.

Eine Möglichkeit zur filtratseitigen Entleerung der Membranmodule ist ebenfalls eine konstruktive Weiterentwicklung die Modulgeometrie betreffend.

10 Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Im Rahmen dieses Projektes erfolgt der Nachweis der Wirtschaftlichkeit des Filtrationsmoduls über die Ermittlung der Herstellkosten und der Betriebskosten, wobei sich die Ermittlung der Betriebskosten lediglich auf die Modulbelüftung, Reinigungsaufwand sowie die Standzeit bezieht.

10.1 Ermittlung der Modulkosten

Die Herstellungskosten eines Prototyp M 70-Moduls mit 70 m² Membranfläche liegen zwischen 50 €/m² und 55 €/m², je nach Losgröße. Hierbei sind die Kosten für das Belüftermodul sowie für die konstruktive Einbindung des Moduls nicht enthalten.

10.2 Bemessung der Anlage im großtechnischen Maßstab

Auf Grundlage der im Rahmen dieses Projektes ermittelten Ergebnisse leiten sich für eine großtechnische Bemessung die in Tabelle 10-1 genannten Kenngrößen für die Behandlung von kommunalem Abwasser in einer MBR-Applikation ab:

Tabelle 10-1 Abgeleitete Kenngrößen zur Bemessung einer großtechnischen MBR-Anlage

Prototyp M70 002 mit 70 m² Membranfläche		
Betriebsart: Flussregelung		
Parameter	Kenngröße	Bemessungsgröße
Spez. Fluss	L/(m ² *h)	25
Spez. Fluss in Spitzenlast	L/(m ² *h)	46
Lauf-Pausen-Zeit	Min/Min	8/2
Modulbelüftung	Nm ³ /h	30
Vorsiebung	mm	2
Modulzuschaltung und - abschaltung	-	Zulaufproportional
Rückspülung mit Filtrat	täglich	bis Modulvöllfüllung mit p ≤ 50 mbar
Maintenance cleaning	1x wöchentlich	bis Modulvöllfüllung mit p ≤ 50 mbar

10.3 Kalkulation der Betriebskosten

Im Vergleich zur konventionellen Behandlung liegen die höheren Betriebskosten der MBR-Applikation vor allem in:

- Maßnahmen zur Deckschichtkontrolle
- der Membranreinigung
- den Membranersatzkosten

Eine Abschätzung der Betriebskosten für den Prototyp M70 002 mit 70 m² Membranfläche kann im Rahmen dieses Projektes lediglich über den Vergleich zweier Modulgeometrien erfolgen:

- Prototyp M70 002 als Einstockmodul (70 m²)
- Prototyp M 70 002 als Doppelstockmodul (140 m²)

Im Folgenden soll exemplarisch auf Basis eines spezifischen Schmutzwasseranfalls von 150 L/(E*d) eine Abwassermenge für 10.000 E mit dem Prototyp M70 002 in einer MBR-Applikation behandelt werden.

Tabelle 10-2 Zulaufhydraulik Beispiel

Abwassermenge gesamt	1500 m ³ /d
Qmittel	62,5 m ³ /h
Qspitze mit qs = 12 h/d	125 m ³ /h

Hieraus resultiert bei einer Abwassermenge von 125 m³/h bei einem Nettofluss von 30 L/(m²*h) eine erforderliche Membranfläche von 4200 m², entsprechend 60 Prototypen M70 002. Für die Abwassermenge von 62,5 m³/h ist bei einem Nettofluss von 20 l/(m²*h) eine Membranfläche von 3125 m² erforderlich, entsprechend 45 M70 002 Modulen (gewählt 46 Module). Daraus ergibt sich für den Spitzenlastfall, dass alle Module filtrieren, während in Normallast Einzelstockmodule bzw. Doppelstockmodule abgeschaltet werden. Für die Modulbelüftung werden 30 Nm³/h veranschlagt.

Tabelle 10-3 Modulbedarf sowie zugehöriger Luftbedarf

	M70 002 Einstockmodul	M 70 002 Doppelstockmodul
Spitzenlast	60 Module in Filtration Luftbedarf: 1800 Nm ³ /h	30 Doppelstock in Filtration Luftbedarf: 900 Nm ³ /h
Normallast	46 Module in Filtration Luftbedarf: 1380 Nm ³ /h	23 Doppelstock in Filtration Luftbedarf: 690 Nm ³ /h

Bei Einsatz eines Drehkolbengebläses für die Modulbelüftung mit $\Delta p = 500$ mbar sind die in Tabelle 10-4 aufgeführten elektrischen Leistungen nötig:

Tabelle 10-4 Leistungsbedarf zur Modulbelüftung

Luftvolumen	M70 002 Einstockmodul	M 70 002 Doppelstockmodul
Spitzenlast	44 kWh	21 kWh
Normallast	33 kWh	15 kWh

Leistungsdaten bezogen auf Aertzner Drehkolbengebläse

Hieraus resultiert ein spezifische Leistungsaufnahme der Modulbelüftung zur Deckschichtkontrolle wie in Tabelle 10-5 dargestellt:

Tabelle 10-5 Spezifischer Leistungsbedarf bezogen auf die Filtratmenge

kW/m³_{Filtrat}	M70 002 Einstockmodul	M 70 002 Doppelstockmodul
Spitzenlast	0,325	0,168
Normallast	0,528	0,240

Eine Anwendung des Betriebskonzeptes der 1x wöchentlichen Rückspülung bis zur Vollenfüllung der Module mit einer Natriumhypochlorit-Reinigungslösung erfordert bei einer Konzentration der Reinigungslösung von 200 ppm eine Menge von 77 mL pro Einzelmodul M70 002. Daraus ergibt sich für 60 M 70 002 Module eine Menge von ca. 5 Liter/Woche sprich 260 L/a für das maintenance cleaning.

Für eine Insitu-Intensivreinigung der Module mit einer Konzentration von 1.000 ppm NaOCl sind 385 mL pro Modul M 70 002, entsprechend einer Gesamtmenge von 23 L für alle Module erforderlich. Der Betrieb der M 70-Prototypen in der großtechnischen Anlage Xanten-Vynen zeigte bislang, dass eine Intensivreinigung in etwa alle 3 Monate erforderlich ist. Auf Grundlage dessen sind 4 Intensivreinigungen pro Jahr erforderlich, wodurch sich eine Menge von ca. 100 L Reinigungslösung für die Intensivreinigung ergibt.

Zusammenfassend liegt der Bedarf für maintenance cleaning (200 ppm) und Intensivreinigung (1.000 ppm) bei ca. 400 L Reinigungslösung/a.

Prototypen M70 sind seit 2005 in der großtechnischen MBR-Anlage Xanten-Vynen in Betrieb. Bis dato ist somit eine Standzeit von 2 Jahren unter realen Betriebsbedingungen nachgewiesen. Eine Aussage zu den Membranersatzkosten kann im Rahmen dieses Projektes lediglich über eine Abschätzung der Membranstandzeit erfolgen. Untersuchungen der Membrantaschen der Prototypen aus Xanten-Vynen zeigten keine Schädigungen der Membranoberfläche und des Membrantaschenverschlusses, so dass durchaus von einer Standzeit von 5 Jahren ausgegangen werden kann. Es wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich hier um eine Abschätzung handelt. Mit 50 €/m² und einer Standzeit von 5 Jahren ergibt sich hieraus ein Betrag von 7 Cent/(a*m³_{Abwasser})

11 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erprobung der entwickelten Filtrationsmodule wurde von der A3 Water Solutions GmbH eine halbtechnische MBR-Anlage gebaut. Die Behandlung von kommunalem Abwasser erfolgte mit dem Prototyp M70 002 unter Realbedingungen. Dabei wurden verschiedene Betriebskonzepte im Hinblick auf

- hydraulische Leistungsfähigkeit mit hydraulischen Lastphasen
- Regelparameter des hydraulischen Betriebs
- Maßnahmen zur Aufrechterhaltung des Filtratflusses
- Belüftungsstrategie zur Optimierung des Energiebedarfs
- Insitu-Reinigung als maintenance und recovery-cleaning.

Die Ergebnisse der o.g. Betriebskonzepte sind 6.3 zu entnehmen. Zusammenfassend lässt sich auf Grundlage der ermittelten Versuchsergebnisse festhalten, dass mit dem Prototyp M70 002 ein

leistungsfähiges und wirtschaftliches Membranmodul entwickelt worden ist. Deutliches Potential zur weiteren Reduzierung des Energiebedarfs für die Deckschichtkontrolle liegt in der entwickelten Modulgeometrie des Prototypen M70 002, mit der die Einzelmodule verfahrenstechnisch günstig miteinander kombiniert werden können.

Weiterer Untersuchungsbedarf liegt in dem Betriebskonzept des druckgeregelten Filtrationsbetriebs. Hier muss zukünftig ein Verfahren zur Bestimmung des Bemessungsflusses in Abhängigkeit des zu behandelten Abwassers und der transmembranen Druckdifferenz entwickelt werden.

Weiterhin müssen im Hinblick auf die AOX-Problematik geeignete Substituenten für die Reinigungskemikalie Natriumhypochlorit gefunden werden.

Für die Vorhersage der Zirkulationsgeschwindigkeit in Schlaufenreaktoren mit Plattenmembranmodulen wurde parallel zur Erstellung eines mathematischen Modells Strömungsmessungen in der halbtechnischen MBR-Anlage durchgeführt (vgl. Kapitel 6). Bei den Strömungsuntersuchungen wurden folgenden Aspekte betrachtet:

- erforderliche Belüftungsrate für die Modulbelüftung
- Viskositätseinfluss des zu filtrierenden Mediums
- Modifikation der Belüftungseinheit
- Modifikation der Modulposition im Reaktor
- Geschwindigkeiten im Abströmbereich (downcomer).

Dabei konnte festgestellt werden, dass höhere Belüftungsraten eine unterproportionale Steigerung in den Geschwindigkeiten zur Folge hat. Eine hohe Belüftungsrate garantiert damit nicht unbedingt eine bessere Abreinigung der Membranoberfläche. Die Ergebnisse der Messungen in belebtem Schlamm konnten die Erkenntnisse der erhöhten Viskosität durch Glycerin (Phase I des Projektes) bestätigen und zeigten eine Vergleichmäßigung der Moduldurchströmung bei rund 35% geringeren Geschwindigkeiten. Für die vormals durchgeführten in einer ähnlich viskosen Glycerin-Lösung wurde ein etwas geringere Geschwindigkeitsreduktion von 30% erzielt. Mit dem Ziel, den Lufteintrag unter dem Modul zu vergleichmäßigen wurden verschieden Einbauten im Aufströmkanal vorgenommen (Lochblech im Aufströmkanal oder Leitbleche auf den Membranbelüftern). Der erhoffte positive Effekt einer gleichmäßigeren Moduldurchströmung konnte nicht erzielt werden. Des Weiteren wurde das Modul im Reaktor an verschiedenen Stellen positioniert, so dass sich der Querschnitt des downcomer-Bereiches neben dem Modul vergrößerte bzw. bis auf fast Null verringerte. Modulanordnungen an der Wand oder direkt neben einem anderen Modul führten zu Rückströmungen im Modul. Da die Rückströmungen aufgrund von Energieverlusten immer geringer ausfallen, ist hier eine schlechtere Moduldurchströmung zu erwarten. Messungen im downcomer zeigten allgemein die aus der Theorie von Schlaufenreaktoren bekannte abwärtsgerichtete Strömung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass im gesamten Reaktor eine Zirkulationsströmung vorhanden ist. Daneben wurden nicht

erwartete aufwärtsgerichtete Strömungen im downcomer festgestellt, die wahrscheinlich durch im downcomer befindliche Luftblasen erzeugt werden. Die Strömungsenergie im downcomer reicht nicht aus, um die Luftblasen bis zum Reaktorboden zu befördern.

Das entwickelte mathematische Modell für die Vorhersage der Zirkulationsgeschwindigkeiten im Reaktor ermöglicht die systematische Optimierung nach Vorgabe der Beschränkungen für die Optimierungsparameter. Der Ansatz wurde zunächst für wässrige Lösungen hergeleitet, der Einfluss einer höheren Viskosität muss noch systematisch untersucht werden. Erste experimentelle und numerische Ergebnisse ergaben bei der Verwendung von belebtem Schlamm eine Reduzierung der Zirkulationsgeschwindigkeit gegenüber Wasser von ca. 30%. Die Untersuchungen des Blasenanstiegs zwischen ebenen Platten zeigten eine Steigerung der Wandschubspannung von über 300% bei einer Reduzierung des Plattenabstandes auf 5 mm gegenüber den gegenwärtig verwendeten 7 mm. Mit der weiteren Verringerung des Plattenabstandes auf 3 mm steigt zwar die Wandschubspannung noch moderat an, allerdings erhöht sich die Gefahr der Spaltverblockung durch faserige Anteile im Abwasser. Für den Plattenabstand von 5 mm wurden die höchsten Wandschubspannungen für Blasen mit einem Durchmesser von 5 mm ermittelt. Diese Ergebnisse wurden für Luftblasen in ruhendem Wasser berechnet. Die Untersuchungen für Blasen in zirkulierendem Belebtschlamm stehen noch aus.

In den Versuchen mit der Membrantestzelle wurde der kritische Fluss für verschiedene Querstromgeschwindigkeiten und Belüftungsstärken gemessen. Für die Flüssigkeitsgeschwindigkeiten von 20, 30 und 40 cm/s wurde der höchste kritische Fluss jeweils für eine Gasleerrohrgeschwindigkeit von 0,07 m/s ermittelt. Eine weitere Steigerung des Belüftungsvolumenstroms führt zu einem Sinken des kritischen Flusses. Für die Versuche ohne Begasung wurde mit dem Ansteigen der Flüssigkeitsgeschwindigkeit ebenfalls ein Absinken des kritischen Flusses beobachtet. Dieses Verhalten wird auf eine Klassierung von Partikeln in der Deckschicht zurückgeführt. Durch die Berechnung der hydrodynamischen Kräfte für Partikeln unterschiedlicher Größe wurde das Absinken des kritischen Partikeldurchmessers bei steigender Flüssigkeitsgeschwindigkeit bestätigt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Kombination aus praktischen Betriebsversuchen, Geschwindigkeitsmessungen und mathematischer Modellierung einen vielseitigen Ansatz für die Entwicklung von Modulen und deren Betriebskonzepten darstellt. Die Untersuchungen konnten neue auf dem Gebiet der Strömungslehre aufzeigen und Hilfestellung beim Betrieb von Membranbioreaktoren geben. Es wurde bei den Untersuchungen deutlich, wie komplex die Strömungsverhältnisse in einem solchen Reaktor sind und dass hier – genau wie auf dem Gebiet der herkömmlichen „Schlaufenreaktoren“ – immer noch weiterer Forschungsbedarf besteht.

Literatur

- Blasius 1913** Blasius, H.: Das Ähnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten. Forschungsarbeiten des VDI, Bd. 113
- Blenke 1979** Blenke, Heinz: Loop Reactors. Springer Verlag, 1979
- Chisti 1988** Chisti, M.Y.; Halard, B.; Moo-Young, M.: Liquid circulation in airlift reactors. Chemical Engineering Science, Vol. 43, No. 3 (1988), pp. 451-457
- Chisti 1989** Chisti, M.Y: Airlift Bioreactors. Elsevier Applied Science, London - New York 1989
- Hills 1976** Hills, J.H.: The Operation of a Bubble Column at High Throughputs I. Gas Holdup Measurements, Chemical Engineering Journal, 1976, Vol.12, pp.89-99
- MUNLV NRW 2002** MUNLV NRW – Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2002): Abwasserreinigung mit Membrantechnik – Membraneinsatz im kommunalen und industriellen Bereich. MUNLV, Düsseldorf
- Nikuradse 1933** Nikuradse, J.: Strömungsgesetze in rauhen Rohren Forschungsheft des VDI, Bd. 361
- Nortek 1997** Nortek: ADV Operation Manual. September 1, 1997
- Tacke 2007** Tacke, D.; Pinnekamp, J.; Prieske, H.; Kraume, M.: Membrane bioreactor aeration: investigation of the velocity flow pattern. Proceedings of 2nd IWA National Young Water Professionals Conference, 4.-6. Juni 2007, Berlin, ISBN 978-3-9811684-0-2
- Rubin 1977** Rubin, G.: Widerstands- und Auftriebsbeiwerte von ruhenden kugelförmigen Partikeln in stationären, wandnahen laminaren Grenzschichten. Dissertation, TH Karlsruhe, 1977