



Bau eines einfachen Membranfiltrationsgerätes (Prototyp) zur Aufbereitung von Trinkwasser aus Oberflächenwasser für kleine Personengruppen in Notsituationen ohne Fremdenergie

1. Projektphase, Az. 23860/01-23

– Endbericht –



Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. A. Waldhoff

Projektleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. F.-B. Frechen

Kassel, September 2006



Universität Kassel
Fachbereich Bauingenieurwesen
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG	1
2 VERFAHRENSTECHNIK DER PILOTANLAGE	4
3 VORUNTERSUCHUNGEN ZUR MEMBRANTECHNIK.....	6
3.1 Membrantechnik	6
3.2 Untersuchte Membranen	9
3.3 Versuchsstand 1	10
3.3.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitversuch.....	13
3.3.2 Stoffliche Leistungsfähigkeit.....	17
3.4 Versuchsstand 2	19
3.4.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitversuch.....	20
3.4.2 Stoffliche Leistungsfähigkeit in Bezug auf den Rückhalt auf Bakterien	23
3.4.3 Gewählte Membran für den Pilotanlageneinsatz	23
4 KONSTRUKTION DER PILOTANLAGE.....	25
4.1 Anlagenform	25
4.2 Anlagendetails	28
4.3 Hinweise zum Gehäusewerkstoff	31
4.4 Hinweise zur Membrandämpfung und Membrandämmung	31
4.5 Hinweise zum Sieb/Rechen.....	33
4.6 Hinweise zu den Piktogrammen	34
4.7 Berücksichtigte Erweiterungsmöglichkeiten	36
4.7.1 Anlagenortung im Einsatz	36
4.7.2 Adsorption	37
4.7.3 Nachgeschaltete Desinfektion.....	37
4.7.4 Erweiterung für den Dauerbetrieb	38
4.8 Die fertig gestellte Pilotanlage.....	38
4.8.1 Daten der Pilotanlagenvarianten.....	38
4.8.2 Stückliste und Explosionszeichnung	39
4.8.3 Illustrationen.....	40
5 ABGRENZUNG ZUM STAND DER TECHNIK.....	43
6 WEITERENTWICKLUNG, FORSCHUNGSBEDARF.....	47

Seite

7	MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE	49
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	50
9	LITERATURVERZEICHNIS.....	52

ANHANG

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Notfallszenario und Lösungsansatz.....	3
Tabelle 2:	Eigenschaften der untersuchten Membranen / Membranmodule – Kennwerte ..	10
Tabelle 3:	Rechnerische Feststoffbeladung der Membran über die erste Versuchshälfte...	16
Tabelle 4:	Rechnerische Feststoffbeladung der Membranen über die Versuchsdauer	22
Tabelle 5:	Mikrobiologische Untersuchung 2006, Versuchsstand 2.....	23
Tabelle 6:	Siebe und Rechen	33
Tabelle 7:	Anlagenvarianten, Eigenschaften.....	38
Tabelle 8:	Stückliste der Pilotanlage (vorläufige Ausführung).....	39
Tabelle 9:	Übersicht ausgewählter Vergleichsprodukte	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anzahl an Naturkatastrophen und der dadurch entstandene Schaden weltweit (nach GTZ 2006)	1
Abbildung 2:	Verfahrenstechnik der Pilotanlage mit Erweiterungsmöglichkeiten	5
Abbildung 3:	Trenngrenzen von Membranverfahren (Theilen 2003).....	6
Abbildung 4:	Klassifizierung von Membranen (nach Rautenbach 1997).....	7
Abbildung 5:	Membran- und Modulbauformen	8
Abbildung 6:	Untersuchte Membranmodule	9
Abbildung 7:	Verfahrensfließbild Versuchsstand 1 (anschauliche Darstellung)	11
Abbildung 8:	Verfahrensvereinfachung Versuchsstand 1 (anschauliche Darstellung)	12
Abbildung 9:	R+I Fließschema Versuchsstand 1, vereinfachtes Verfahren (Darstellung gem. DIN 28004)	13
Abbildung 10:	Bach „Ahna“ auf dem Gelände der Universität Kassel, Schlämmkorn aus der Ahna, gesiebtetes Schlämmkorn für die Versuchsdurchführung.....	14
Abbildung 11:	Konditioniertes Rohwasser, Filtrations- und Permeatsammelbehälter der Versuchsanlage 1.....	14
Abbildung 12:	Hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitversuch, Versuchsstand 1	15
Abbildung 13:	Membran nach 6 Tagen Versuchsbetrieb, Versuchsstand 1.....	15
Abbildung 14:	Membranreinigung nach 6 Tagen Versuchsbetrieb, Versuchsstand 1.....	16

	Seite
Abbildung 15:	Mikrobiologische Untersuchungen 2002 und 2005, Versuchsstand 1..... 18
Abbildung 16:	R+I Fließschema Versuchsstand 2 (Darstellung gem. DIN 28004)..... 19
Abbildung 17:	Ansicht Versuchsstand 2 (li.) und Beispiel für die Anordnung der Membranmodule im Filtrationsbehälter (re.)..... 20
Abbildung 18:	Vorlage- und Filtrationsbehälter, Permeatabläufe Versuchsstand 2 20
Abbildung 19:	Hydraulische Leistung im Langzeitversuch, Versuchsstand 2 21
Abbildung 20:	Membranen nach 3,5 Tagen Versuchsbetrieb, Versuchsstand 2..... 22
Abbildung 21:	Erste Designstudie der Pilotanlage 26
Abbildung 22:	Pilotanlagenvarianten I und II in kurzer und langer Ausführung (Vorderansicht), Ausschnitt aus technischer Zeichnung 26
Abbildung 23:	6 Pilotanlagen auf einer Standard Flachpalette, Ansicht (li.) und Draufsicht (re.), Ausschnitt aus technischer Zeichnung 27
Abbildung 24:	Anlagenvariante I in langer Ausführung (Längsschnitt), Ausschnitt aus technischer Zeichnung 28
Abbildung 25:	gedämmte Membran, Fallversuch aus 2 m Höhe..... 32
Abbildung 26:	Deformiertes Dämmmaterial, gerissene Permeatsammelleitung, geschweißte Sammelleitung..... 32
Abbildung 27:	Öffnungsgeometrie Loch, Masche, Spalt (nach Schier 2006)..... 33
Abbildung 28:	Vorsiebe und Feinrechen der Pilotanlage 34
Abbildung 29:	Piktogramme 1-4 der Pilotanlage 34
Abbildung 30:	Zusätzliches Piktogramm 2 für Pilotanlagevariante I - kurz und Variante II – kurz und lang 35
Abbildung 31:	Zusätzliche schriftliche Ergänzung in verschiedenen Sprachen 36
Abbildung 32:	2-D-Explosionszeichnung (Anlagenvariante I in langer Ausführung), Ausschnitt aus technischer Zeichnung..... 40
Abbildung 33:	Pilotanlage in PVC-Glas (Darstellung ohne Piktogramme) 41
Abbildung 34:	Pilotanlage in PVC-blau (Darstellung ohne Piktogramme)..... 41
Abbildung 35:	Pilotanlage mit Piktogrammen – verschiedene Ansichten..... 41
Abbildung 36:	Einsetzen von Membrandämpfung und Membranmodul..... 42
Abbildung 37:	Einbau Permeathahn, Permeatleitung und obere Membrandämpfung 42
Abbildung 38:	Einbau Membranabdeckung, Vorsieb, Aufsatz Gehäuseoberteil 42

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG

Laut „Welt-Wasser-Entwicklungsbericht“ stellt sich in vielen Teilen der Welt die Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser in ausreichender Qualität und Quantität als sehr problematisch dar (UNESCO 2003, 2006). Verstärkt wird dieser Zustand durch Naturkatastrophen, die in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen (vgl. Abbildung 1).

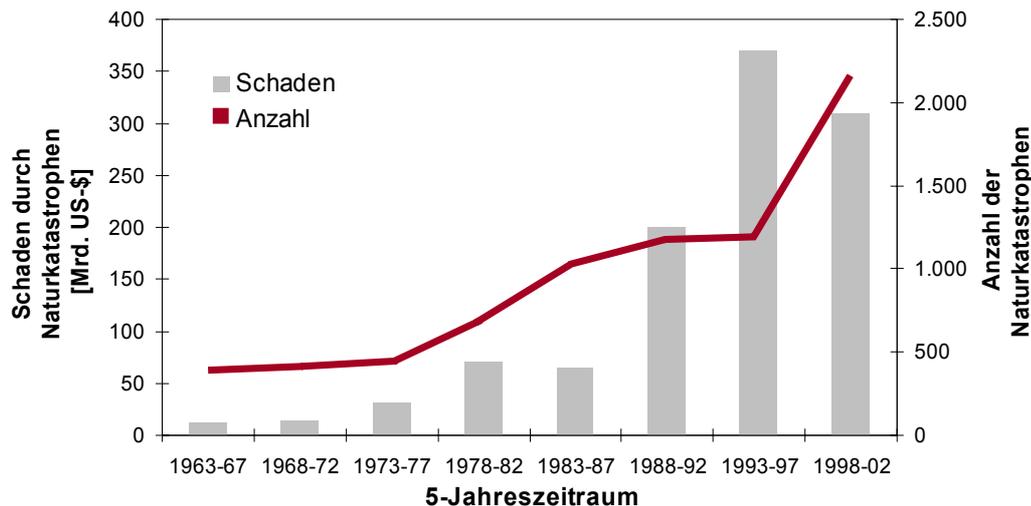


Abbildung 1: Anzahl an Naturkatastrophen und der dadurch entstandene Schaden weltweit (nach GTZ 2006)

Hygienisch nicht einwandfreies Trinkwasser kann in Katastrophenfällen, wie Erdbeben, Überflutungen, Erdrutschen und Wirbelstürmen zu Durchfallerkrankungen, fieberhaften Infekten bis hin zu Epidemien führen. Meist sind die Kinder am stärksten betroffen. Eine hohe Kindersterblichkeit ist die übliche Folge.

Die in der mobilen Notversorgung üblicherweise eingesetzten Trinkwasseraufbereitungsanlagen dienen in der Regel der Versorgung größerer Menschenmengen im Bereich mehrerer tausend Personen aufwärts. Sie zeichnen sich durch einen hohen Technisierungsgrad sowie einen entsprechenden Personal-, Energie- und Zusatzstoffbedarf für die Gewährleistung eines störungsfreien Betriebes aus (vgl. Köster et al. 2005, Merkl 2000). Vom Auftreten eines Notfalles bis zur Inbetriebnahme derartiger Anlagen können üblicherweise mehrer Tage vergehen. Entlegene Gebiete können gerade im Katastrophenfall aber nicht oder nicht schnell genug versorgt werden, da die oben beschriebenen Anlagen dort mangels Auslastung nicht aufgestellt werden. Hier hilft dann nur der Wassertransport von entfernter aufgestellten Anlagen, welcher aufwendig, wenig sinnvoll und je nach Zuwegung schwierig bis unmöglich ist.

Die bereits heute angebotenen, auf Filtration basierenden Anlagen kleineren Typs, die zur Versorgung entlegener Gebiete mit Trinkwasser grundsätzlich eher geeignet wären, können jedoch nur kleine Gruppen bis maximal 20 Personen mit Trinkwasser versorgen (vgl. Kapitel 5,

Reise/Expeditionsfilter und Tropffilter). Markt verfügbare Feldfilter für die Versorgung von mehreren 100 Personen erscheinen in Ihrer technischen Ausführung wiederum sehr aufwendig und in der Bedienung kompliziert (vgl. Kapitel 5).

Im Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft wird die Aufbereitung von Rohwasser (meist Oberflächen- / Flusswasser) durch Membranfiltration untersucht. Dabei stehen die Entfernung von Trübstoffen und die Hygienisierung im Vordergrund.

Im Rahmen dieses Projektes wird eine Pilotanlage zur Trinkwasseraufbereitung mit Mikrofiltrationsmembran zur Versorgung von 50 bis 200 Personen gebaut, mit der die beschriebene Versorgungslücke geschlossen werden soll. Dabei wird ein Basis-Trinkwasserbedarf gemäß WHO (World Health Organization) von 7 Litern pro Person und Tag angesetzt (WHO 2005, No. 9). Ein einfacher mechanischer Aufbau, einfacher Transport, einfache Inbetriebnahme und Betrieb sollen diese Anlage zu einem zuverlässigen „Hilfsmittel zur Selbsthilfe“ in einem Katastrophenszenario machen. Dabei stehen ein energieautarker Betrieb, sowie ein schnellstmöglicher Transport der betriebsfähig gelagerten Module von Stunden ins Einsatzgebiet im Vordergrund. Die Möglichkeit, eine derartige Anlage vom Flugzeug oder Helikopter aus mit Fallschirmen absetzen zu können, wird diskutiert.

Parallel zur Anlagenentwicklung werden Piktogramme entworfen, die die Nutzung der Anlage auf möglichst einfache Weise erklären. Für die Entwicklung und den Bau des Prototypen sowie der Entwicklung der Piktogramme werden 6 Monate veranschlagt. In Fortführung der Entwicklung wird im Rahmen zukünftiger Projekte beabsichtigt, mehrere Prototypen unter möglichst realistischen Betriebsbedingungen im Rahmen von Versuchen im In- und Ausland zu erproben, um letztlich die Anlage zur Serienreife zu führen.

Je einfacher ein Verfahren, desto geringer müssen die Anforderungen an das aufbereitete Wasser sein. Im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften der Anlage erscheint auf der Grundlage der bisherigen Untersuchungen der Rückhalt von Feststoffen (AFS) und der weitestgehende Rückhalt von Bakterien und Viren technisch realisierbar. Als Orientierungspunkt für die Mindestqualität eines derart aufbereiteten Wassers wird die Richtlinie über die Qualität der Badegewässer (Kommission der EG 1976, 2002) und die Standards der NATO für Trinkwasser in Notfällen und Feldeinsätzen, STANAG N°2136 (NATO 2002), vorgeschlagen. Ein salziges oder gar toxisches Rohwasser wird unter den beschriebenen Umständen nicht aufzubereiten sein.

Dieser Anlagentyp dient dann ausschließlich dem Katastrophenfall, in dem es keine andere Alternative zur Trinkwasseraufbereitung gibt, das heißt, eine aufwendigere Technik samt Personal erreicht nicht die Hilfsbedürftigen. Diese müssen für eine Übergangszeit von wenigen Tagen – bis eine geregelte Versorgung hergestellt ist – ihr Trinkwasser selber aufbereiten. Daher ist die geplante Anlage für den Betrieb über mehrere Tage ausgelegt. Mit zunehmender Betriebsdauer verblockt die Filtereinheit und muss gegebenenfalls getauscht werden, falls nach wie vor keine Alternative zur Trinkwasseraufbereitung geschaffen werden konnte. In diesem Fall wird die komplette

Anlage getauscht und die eingetauschte Filtereinheit für den nächsten Einsatz regeneriert. Der Anlageneinsatz könnte somit auch die teilweise praktizierte, aber sehr aufwendige Verteilung von Wasser in Plastikflaschen (bottled water) in den ersten Tagen nach einer Katastrophe (Socher et al. 2006) erübrigen.

Zusammenfassend werden in Tabelle 1 die aus einem fiktiven Notfallszenario abgeleiteten Aufgaben aufgelistet, die die Serienanlage zur Gänze und der zu entwickelnde Prototyp bereits zum Teil erfüllen sollen.

Tabelle 1: Notfallszenario und Lösungsansatz

Notfallszenario / Wasserversorgungsproblem	Lösungsansatz
Keine elektrische Energie verfügbar	Nutzung von Gravimetrie (+ Muskelkraft)
Keine sonstigen Betriebsstoffe verfügbar	Nutzung der Membranfiltration
Kein Fachpersonal vor Ort, so dass Selbsthilfe ermöglicht werden muss	Keine beweglichen Teile Nur eine Verfahrensführung möglich Fehlbedienung ist konstruktiv auszuschließen Verfahren muss über Piktogramme leicht verständlich sein
Zeitdruck direkt nach Auftreten des Versorgungsproblems	Kein aufwendiger Anlagenaufbau und Inbetriebnahme, weil Module betriebsfertig gelagert werden Keine Einhausung notwendig
Keine Transportmöglichkeit über Land verfügbar	Absetzen aus der Luft durch leichte kompakte Bauweise muss ermöglicht werden Anlage soll von einer Person tragbar sein
Rohwasserqualität (meist Oberflächenwasser) ist stark schwankend	Zu erreichende Qualität: Permeat soll mindestens keimfrei und feststofffrei sein

Durch einen modularen Aufbau der geplanten Anlage ist es denkbar, diese schließlich auch technisch mit weiteren Verfahrensschritten zu ergänzen bis hin zu einer kontinuierlich arbeitenden, mit elektrischer Energie betriebenen Trinkwasseraufbereitungsanlage. Orientierungspunkt für die Qualität des aufbereiteten Rohwassers können dann die europäische Richtlinie zur Trinkwasserqualität (Kommission der EG 1998), die Empfehlungen der WHO (WHO 1993, 1996, 1997) bzw. die deutsche Trinkwasserverordnung (Bundesgesetzblatt 2001) sein. Diese verfahrenstechnischen Ergänzungen sind nicht Teil des vorliegenden Projektes. Möglichkeiten zur Anlagenerweiterung werden jedoch bei der Planung berücksichtigt.

2 VERFAHRENSTECHNIK DER PILOTANLAGE

Die verfolgte Verfahrenstechnik beruht auf gravimetrisch betriebener Membranfiltration, wobei im Betrieb auf eine Deckschichtkontrolle verzichtet wird (siehe Kapitel 3.3). Ergänzt wird die Membranfiltration durch eine vorgeschaltete Grobstoffabtrennung in der Form eines Siebes oder Rechen (siehe Kapitel 4.5), um die Membran zu schützen. Membranfiltration und Grobstoffabtrennung bilden den verfahrenstechnischen Kern der Pilotanlage. Ziel ist es, die Nutzung der Anlage derart zu vereinfachen, dass es lediglich möglich ist, das verunreinigte Wasser lediglich in eine Öffnung an der Anlagenoberseite einzufüllen und an der Unterseite aufbereitet zu entnehmen.

Die Empfehlung der WHO für die Trinkwasseraufbereitung zur Sofortversorgung direkt nach Auftreten eines Notfalles (WHO 2005, No. 5) sieht für den Regelfall die folgenden Verfahrensschritte für die Wasseraufbereitung, z.B. in Haushalten, vor. Je nach Rohwasserqualität müssen nicht alle Verfahrensschritte notwendig sein.

1. Vorfiltration durch ein Textil (nach Möglichkeit Baumwollstoff)
2. Speicherung und Sedimentation (nach Möglichkeit für mindestens zwei Tage)
3. Filtration durch ein poröses Medium (wie Sand, Keramik)
4. Desinfektion (wie Abkochen, Chlorung, Solardesinfektion)

Durch die Nutzung der Membranfiltration in der Pilotanlage werden diese vier, teilweise aufwendigen, Schritte in einem Verfahrensschritt, unabhängig von der Rohwasserqualität, zusammengefasst. Die Membranfiltration ermöglicht es somit das Verfahren sehr stark zu vereinfachen und bildet somit die Grundlage für den Lösungsansatz gemäß Tabelle 1.

Im Vorfeld zu diesem Projekt wurde diskutiert, ob weitere Verfahrensstufen in der Pilotanlage sinnvoll sein könnten. Dazu zählt eine chemische Desinfektion (z.B. „Chlorschleuse“) nach der Membranpassage als ergänzend redundante Maßnahme zum Bakterien- und weiteren Virenrückhalt. Zusätzlich könnte durch eine entsprechende Langzeitwirkung des Desinfektionsmittels eine Wiederverkeimung des Wassers durch verschmutzte Gefäße und falsche Lagerung vermieden werden. Weitere Hinweise dazu sind in Kapitel 4.7.3 aufgeführt.

Weiterhin denkbar erscheint derzeit für die Aufbereitung gering feststoffbelasteter Rohwässer die Vorschaltung einer Adsorptionsstufe (z.B. Kornkohlefilter), die auch zum Schutz der Membran beitragen kann (siehe Hinweise in Kapitel 4.7.2).

In Abbildung 2 sind die verfolgten verfahrenstechnischen Stufen und die berücksichtigten Erweiterungsmöglichkeiten der Pilotanlage dargestellt.

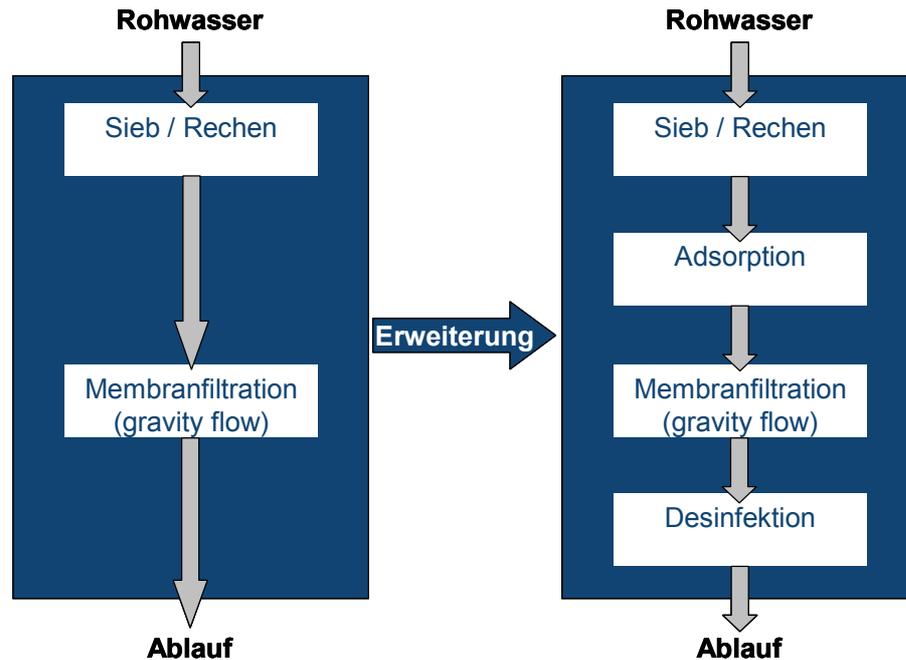


Abbildung 2: Verfahrenstechnik der Pilotanlage mit Erweiterungsmöglichkeiten

Adsorptions- und chemische Desinfektionsstufe werden im Rahmen dieses Projektes für den Einsatz in der Pilotanlage lediglich planerisch vorgesehen. Dies geschieht durch entsprechende Halterungen in der Anlage, die somit, im Bedarfsfall, modular erweiterbar ist.

Das Erfordernis und die technische Machbarkeit einer modularen Anlagenerweiterung werden in zukünftigen Feldversuchen zu prüfen sein (siehe Kapitel 6) und sind nicht Teil dieses Projektes.

3 VORUNTERSUCHUNGEN ZUR MEMBRANTECHNIK

Die Membrantechnik etabliert sich in zunehmenden Maß in der mobilen Notfallversorgung. Mikro- und Ultrafiltration sowie Umkehrosmose sind auf dem Markt verfügbar (siehe Tabelle 9, Kapitel 5). Vor allem die Möglichkeit einer leichten und kompakten Bauweise, die Zusammenfassung von Phasenseparation und Entkeimung in einem Verfahrensschritt und der geringe Chemikalienverbrauch (zur Reinigung) sind Hauptgründe für diese Entwicklung (vgl. Köster et al. 2005). Aus den gleichen Gründen basiert die entwickelte Pilotanlage auf Membranfiltration (siehe Kapitel 2), wobei im Vorfeld des Anlagenbaus verschiedene Membrantypen auf Ihre Eignung hin untersucht wurden.

Um zu erläutern, welche Art der Membrantechnik untersucht wurde, wird zunächst ein kurzer Überblick über Trenngrenzen von Membranverfahren, sowie die Klassifizierung und die Bauformen von Membranen gegeben.

3.1 Membrantechnik

Einen Überblick über die Trenngrenzen und die erforderliche transmembrane Druckdifferenz zum Betrieb der Membranverfahren ist in Abbildung 3 dargestellt.

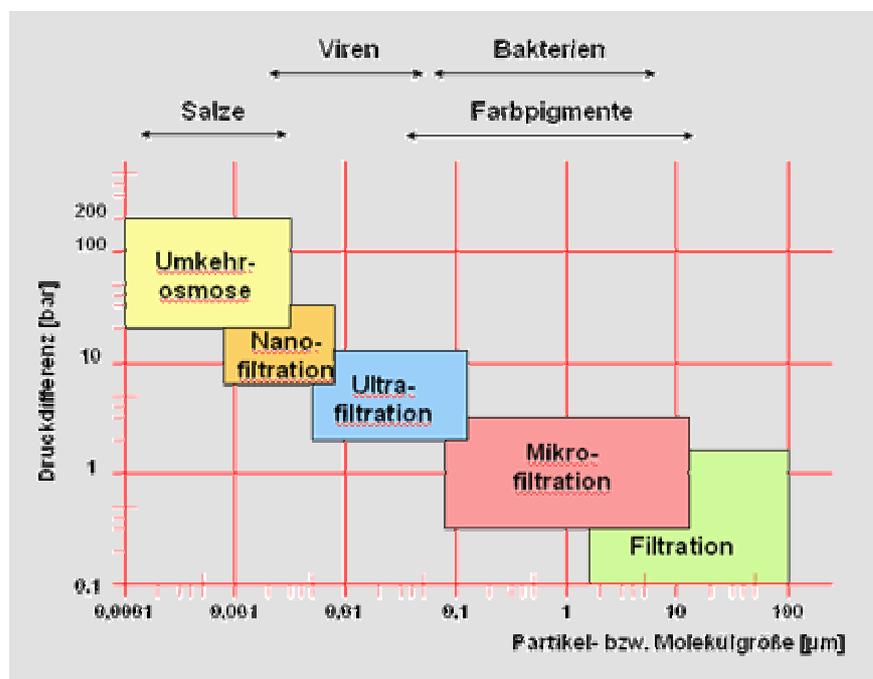


Abbildung 3: Trenngrenzen von Membranverfahren (Theilen 2003)

Wie bereits erläutert, soll aufgrund der Einfachheit des angestrebten Verfahrens, die Mindestqualität des aufbereiteten Wassers in Bezug auf die Hygienebelastung der Richtlinie über die Qualität

der Badegewässer entsprechen (Kommission der EG 1976, 2002). Außerdem soll der Rückhalt von Feststoffen und Trübstoffen gewährleistet werden.

Die Mikro- und Ultrafiltration für den Rückhalt von Bakterien in Oberflächenwasser und kontaminiertem Grund- und Quellwasser kann heute als Stand der Technik angesehen werden (Gimbel et al. 2003, Lipp 2005), was durch mehrjährige Untersuchungen des Bakterienrückhalts an einer Mikrofiltrationsmembran durch das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft bestätigt wurde (Frechen et al. 2005, Waldhoff 2005).

Für den beschriebenen Einsatzfall bieten sich somit die Ultrafiltration und die Mikrofiltration an. Allerdings ist die erforderliche transmembrane Druckdifferenz für eine Ultrafiltration für den angestrebten gravimetrischen Betrieb meist zu groß, so dass eine kompakte Bauweise aufgrund einer zu großen erforderlichen Anlagenhöhe nicht gewährleistet werden könnte. Zudem entsprechen Ultrafiltrationsmembranen aufgrund ihrer meist filigranen Struktur nicht dem Anspruch einer robusten Anlagenausführung. Aus diesen Gründen wurde bereits in der Voruntersuchung zum Pilotanlagenbau ausschließlich das Prinzip der Mikrofiltration verfolgt.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist der Werkstoff aus dem die Membran hergestellt ist. In Abbildung 4 wird eine Klassifizierung von Membranen gegeben.

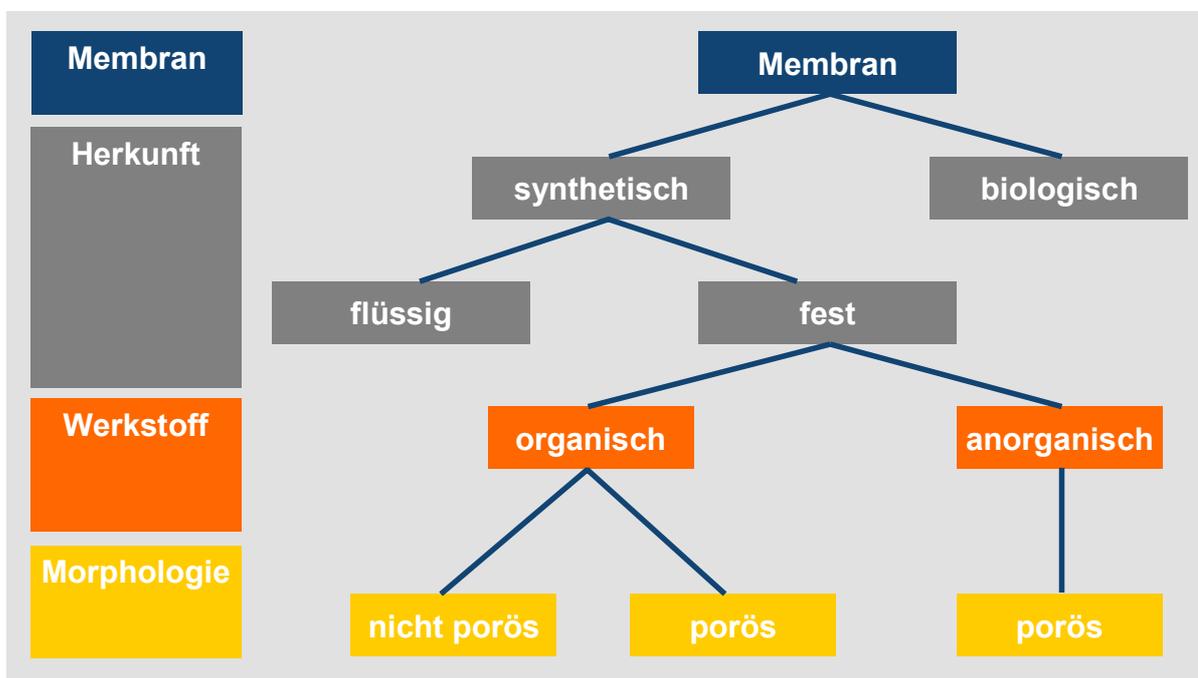


Abbildung 4: Klassifizierung von Membranen (nach Rautenbach 1997)

Untersucht wurden für den Einsatz in der Pilotanlage sowohl organische, aus einem Polymer bestehende, poröse Membranen, als auch eine anorganische, aus einem keramischen Werkstoff bestehende Membran.

Weiterhin unterscheiden sich Membranen durch Ihre Form und die Art des Membranmoduls gemäß Abbildung 5.

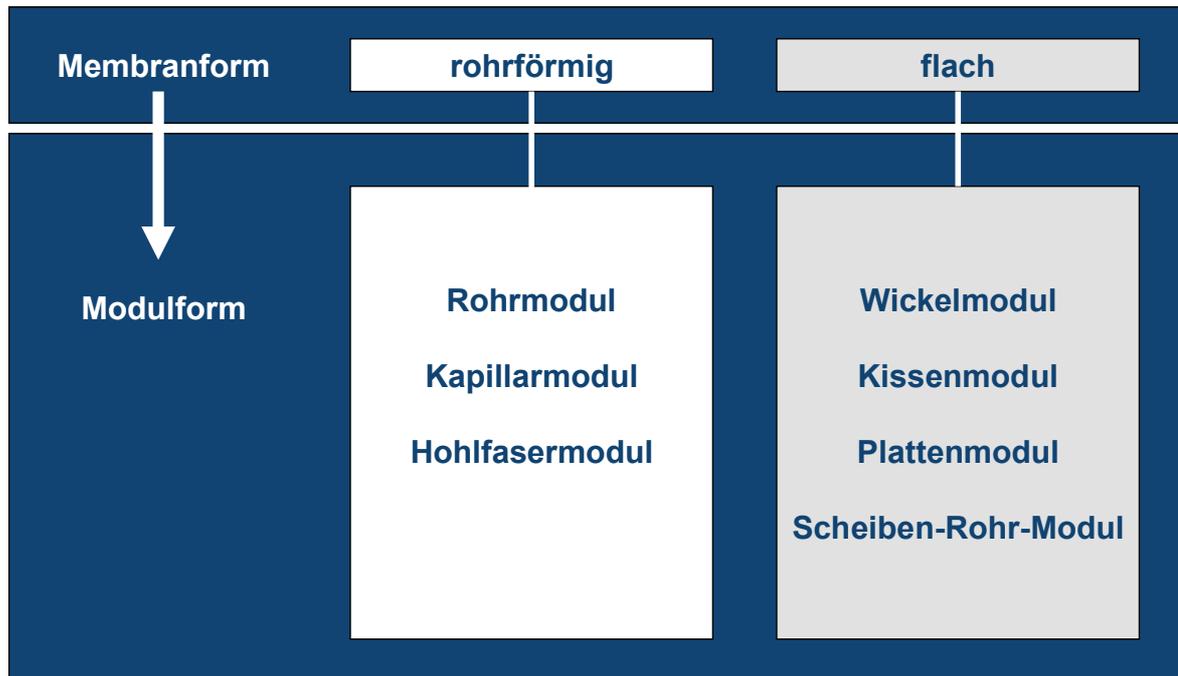


Abbildung 5: Membran- und Modulbauformen

Grundsätzlich erscheinen für den Einsatz in der Pilotanlage rohrförmige und flache Membranen geeignet. Die Bauformen der Module wurden nach den Kriterien Robustheit, Verstopfungssicherheit bei hoher Feststoffbelastung, guter Zugänglichkeit der Membranfläche und damit vereinfachter Membranreinigung ausgewählt.

Hohlfasermodule weisen i.d.R. bei einem Faserdurchmesser von 0,08 mm bis 0,5 mm (Melin et al. 2003) keine Membranstützschicht auf, weshalb sie für den mobilen Einsatz zu beschädigungsanfällig erscheinen. Die meist sehr robust ausgebildeten Rohr-, Wickel-, Kissen- und Scheibenrohrmodule erscheinen dahingegen aufgrund ihrer geschlossenen Bauweise zu verstopfungsanfällig gegenüber hohen Feststoffbelastungen.

Aus diesen Gründen wurden Kapillarmodule (üblicher Durchmesser 0,5 mm bis 5 mm) und Plattenmodule untersucht, die in das Filtrationsmedium eingetaucht werden.

3.2 Untersuchte Membranen

Das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft hat zur Demonstration und Überprüfung verschiedener Funktionsprinzipien zwei Testanlagen in Form von Versuchsständen erstellt, im Weiteren Versuchstand 1 und 2 genannt.

In Versuchsstand 1 (siehe Kapitel 3.3) werden seit Mai 2001 Untersuchungen an einem Polymermembran-Kapillarmodul der Bezeichnung ZeeWeed[®] 10, kurz ZW[®] 10, der Zenon GmbH (Hilden) durchgeführt. Die Membran besitzt eine nominale Porenweite von 400 nm und wird daher im Weiteren mit ZW[®] 10-400 bezeichnet.

Versuchsstand 2 (siehe Kapitel 3.4) wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes aufgebaut. Für die Untersuchungen in dieser Versuchsanlage wurden die folgenden Membranen gemäß den in Kapitel 3.1 geschilderten Kriterien ausgesucht:

- Ein weiteres ZW[®] 10-Modul der Zenon GmbH (Hilden), allerdings mit einer nominalen Porenweite von 100 nm, bezeichnet als ZW[®] 10-100
- Ein Polymermembran-Plattenmodul der Bezeichnung siClaro[®] FM6, Porenweite 100 nm, der MARTIN Systems AG (Sonneberg)
- Das neu entwickelte Keramikmembran-Plattenmodul der Bezeichnung Nanopore[®] F21/30/110, Porenweite 80 nm, der ItN Nanovation GmbH (Saarbrücken)

In Bezug auf die nominale Porenweite sind die untersuchten Membranen somit nahezu identisch. Betriebstechnisch unterscheidet sich das siClaro[®] FM6-Modul von den anderen Membranen dadurch, dass es nicht für einen Rückspülbetrieb geeignet ist. In Abbildung 6 sind die untersuchten Membranmodule dargestellt.

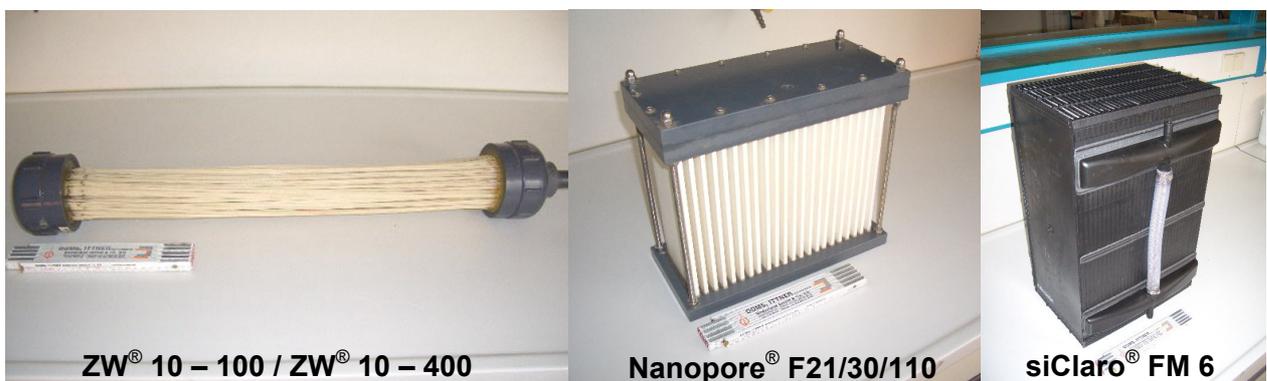


Abbildung 6: Untersuchte Membranmodule

Die untersuchten Membranmodule wurden von den Herstellern / Vertreibern dem Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft im Rahmen dieses Projektes kostenlos zu Verfügung gestellt.

In Tabelle 2 sind die Eigenschaften der Membranen und der Membranmodule aufgelistet.

Tabelle 2: Eigenschaften der untersuchten Membranen / Membranmodule – Kennwerte

Hersteller/Vertrieb			Zenon GmbH	Zenon GmbH	Martin Systems	ItN Nanovation GmbH
Modulbezeichnung			ZW 10 - 400	ZW 10 - 100	siClaro FM 6	NANOPORE F 21/30/110
Einsatz in Versuchsanlage			1	2	2	2
	Kurz	Einheit				
Membranherkunft	-	-	synthetisch, fest	synthetisch, fest	synthetisch, fest	synthetisch, fest
Membranwerkstoff aktive Schicht	-	-	organisch PVDF	organisch PVDF	organisch PES	anorganisch Aluminiumoxid α -Al ₂ O ₃
Werkstoff Stützschiicht	-	-	PVDF	PVDF	PP-Flies (PE-ummantelt)	Aluminiumoxid α -Al ₂ O ₃
Morphologie	-	-	porös	porös	porös	porös
Membranstruktur	-	-	asymmetrisch	asymmetrisch	asymmetrisch	asymmetrisch
Hydrophile Eigenschaften	-	-	eingeschr. dauerh. hydrophil	eingeschr. dauerh. hydrophil	eingeschr. dauerh. hydrophil	dauerhaft hydrophil
pH-Bereich (Beständigkeit)	-	-	5 - 9	5 - 9	1 - 14	1 - 14
Maximale Temperatur (Beständigkeit)	T _{max}	C°	40	40	95	300
Chlorbeständigkeit	-	ppm	1000	1000	2000	2000
Nominaler Porendurchmesser	d _{Pore, nom.}	nm	400	100	100	80
Mittlerer Porendurchmesser	d _{Pore}	nm	100	35	35	80
Porosität	ε	[-]	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	0,3 - 0,4
Membranform	-	-	rohrförmig	rohrförmig	flach	flach
Modulform	-	-	Kapillar	Kapillar	Plattenmembran	Plattenmembran
Ausführung	-	-	getaucht	getaucht	getaucht	getaucht
Membranmodulfläche	A _{Membr.}	m ²	0,85	0,85	6,0	1,13
Max. Transmembrane Druckdifferenz	TMD	bar	0,65	0,65	0,7	10,0
Membranrückspülung	-	-	ja	ja	nein	ja
Material Modulrahmen	-	-	PVC	PVC	PE	PVC
Modulgewicht	m _{Modul}	kg	2,3	2,3	7,5	11,0
Modulmaße	Breite	mm	110	110	313	330
	Höhe	mm	750	750	515	290
	Tiefe	mm	-	-	223	150
Modulvolumen	V _{Modul}	m ³	0,007	0,007	0,036	0,014
spez. Membranmodulgewicht	m _{Modul} /A _{Membr.}	kg/m ²	2,7	2,7	1,3	9,7
Packungsdichte	A _{Membr.} /V _{Modul}	m ² /m ³	119	119	167	79

3.3 Versuchsstand 1

An Versuchsstand 1 wurden verschiedene Verfahrensweisen erprobt, um eine transmembrane Druckdifferenz ohne den Einsatz elektrischer Energie zu erzeugen. Des Weiteren wurden orientierende Versuche zur Bestimmung der stofflichen Leistungsfähigkeit, quantifiziert über den Rückhalt von Bakterien, und der hydraulischen Leistungsfähigkeit, quantifiziert über die Permeabilität, des

Membranmoduls durchgeführt. Dazu wurden Rohwässer verschiedener Güte mit der Anlage aufbereitet. Zeiten des Nichtbetriebes wurden genutzt, um Lagerungseinflüsse auf die Membran zu untersuchen. Zudem wurden die möglichen Abmessungen einer zu erstellenden Pilotanlage ermittelt. In Abbildung 7 ist der Versuchsstand anschaulich dargestellt. Versuchsaufbau und Versuchsbetrieb wurden aus Eigenmitteln des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft finanziert.

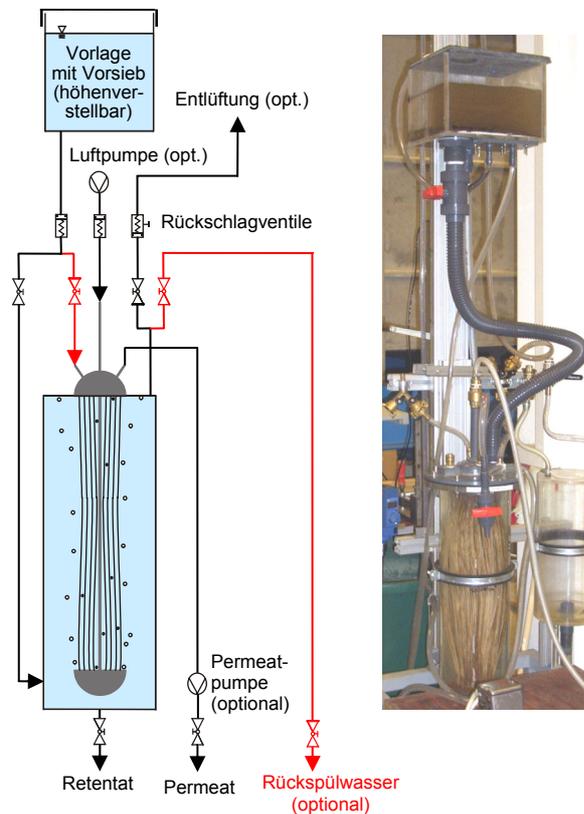


Abbildung 7: Verfahrensfliessbild Versuchsstand 1 (anschauliche Darstellung)

Die Membran ist in einem druckfesten Rohr aus organischem Glas – im Weiteren als Filtrationsbehälter bezeichnet – eingesetzt. Die transmembrane Druckdifferenz wird mittels Gravitation durch einen in der Höhe variablen Überfallbehälter bis maximal 200 mbar erzeugt. Mit einer Handluftpumpe kann der Filtrationsvorgang optional durch die Bildung eines cross-flow, in Abbildung 7 durch Luftblasen angedeutet, für den erhöhten Deckschichtabtrag auf der Membran unterstützt werden. Gleichzeitig kann der Lufteintrag dazu genutzt werden, den Innendruck des Filtrationsbehälters und damit den Membranfluss kurzzeitig zu erhöhen.

Optional kann der Permeatabzug mit einer Handpumpe (Kolbenpumpe) durchgeführt werden. Eine weitere Möglichkeit des Permeatabzugs – im Anlagenfließbild nicht dargestellt – besteht in der Nutzung einer Doppelhubpumpe in Verbindung mit einem druckfesten Permeatsammelbehälter. Der Permeatsammelbehälter ist auf der Fotografie im rechten Teil von Abbildung 7 neben dem Filtrationsbehälter erkennbar. Die Doppelhubpumpe wird druckseitig an den Filtrationsbehälter angeschlossen, um die gleiche Aufgabe wie die bereits beschriebene Handluftpumpe zu erfüllen.

Saugseitig wird die Pumpe an den Permeatsammelbehälter angeschlossen, um diesen in Unterdruck zu versetzen. Auf diese Weise kann mit einem Pumpenhub ein sehr hoher Transmembrandruck bei gleichzeitiger Deckschichtkontrolle auf der Membran erzeugt werden.

Der Einlauf des Vorlagebehälters ist mit einem Feinsieb der Maschenweite 1 mm ausgestattet, um eventuell vorhandene Grobstoffe in dem zu behandelnden Rohwasser vor der Membran abzusieben. Eine Rückspülung der Membran mit Permeat ist optional durchführbar. Um die gewünschte Einfachheit des Verfahrens beizubehalten, verfügt die Versuchsanlage in diesem Aufbau über keine weiteren Verfahrensschritte, wie z.B. Vorfilter oder Adsorptionsfilter. Der Anlagendurchfluss wird über einen induktiven Durchflussmesser, die Feststoffkonzentration in der Filtrationskammer wird über eine inline-Streulichtsonde kontinuierlich aufgezeichnet. Des Weiteren werden pH-Wert, Temperatur und Leitfähigkeit von Rohwasser und Permeat mittels inline-Sonden messtechnisch erfasst.

Wie bereits beschrieben, sollen ein einfacher mechanischer Aufbau, einfacher Transport, einfache Inbetriebnahme und einfacher Betrieb die zu entwickelnde Anlage zu einem zuverlässigen „Hilfsmittel zur Selbsthilfe“ in einem Katastrophenszenario machen. Aus diesem Grund wurde im Laufe der Untersuchungen die Verfahrensführung des Versuchsstandes 1 immer weiter vereinfacht, indem auf die bei der Membranfiltration i.d.R. übliche Deckschichtkontrolle durch Membranbelüftung, die unterdruckbetriebene Permeatförderung und die Möglichkeit zur Membranrückspülung verzichtet wurde. In Abbildung 8 sind die Vereinfachungen dargestellt.

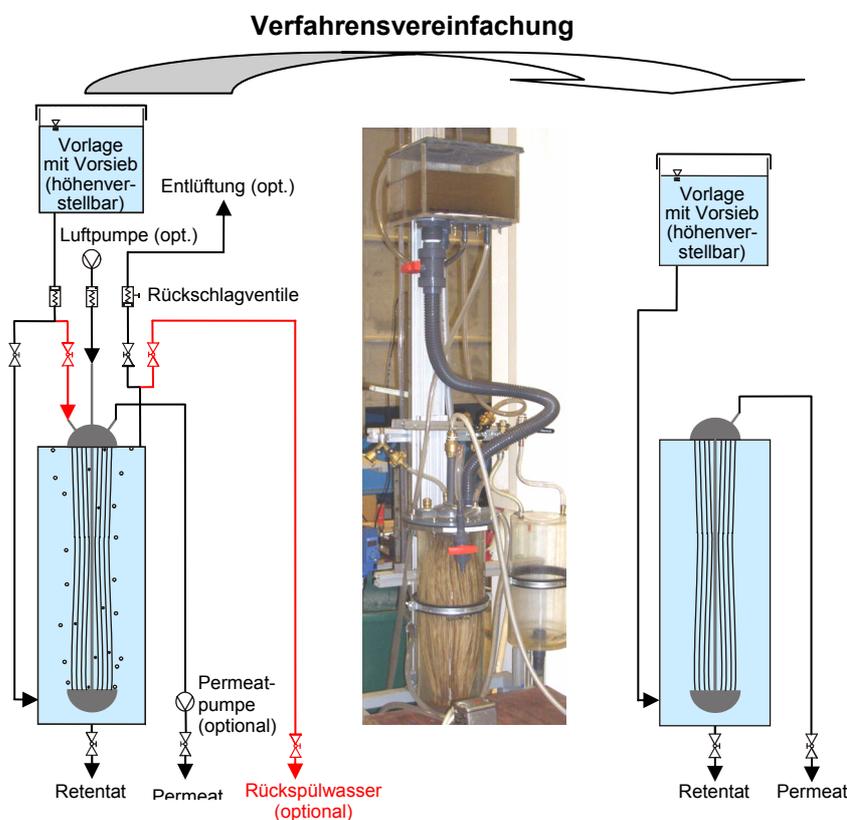


Abbildung 8: Verfahrensvereinfachung Versuchsstand 1 (anschauliche Darstellung)

Durch den Verzicht auf die Deckschichtkontrolle wird ein reiner „dead-end“ Betrieb der Membran realisiert (Melin et al. 2003). Mit der vereinfachten Verfahrensführung wurden verschiedene Langzeituntersuchungen durchgeführt, um zu untersuchen, über welchen Zeitraum Rohwasser mit unterschiedlichen Feststoffgehalten mit einer rein gravimetrisch betriebenen Mikrofiltrationsmembran ohne Deckschichtkontrolle behandelt werden kann, bevor die Membran verblockt. In Abbildung 9 ist das Verfahrensfließbild des entsprechenden Versuchsaufbaus dargestellt. Der statische Transmembrandruck (TMD), eingestellt über die Höhe des Überfallbehälters, ist in seinem Verlauf über die Anlagenhöhe dreiecksförmig veranschaulicht.

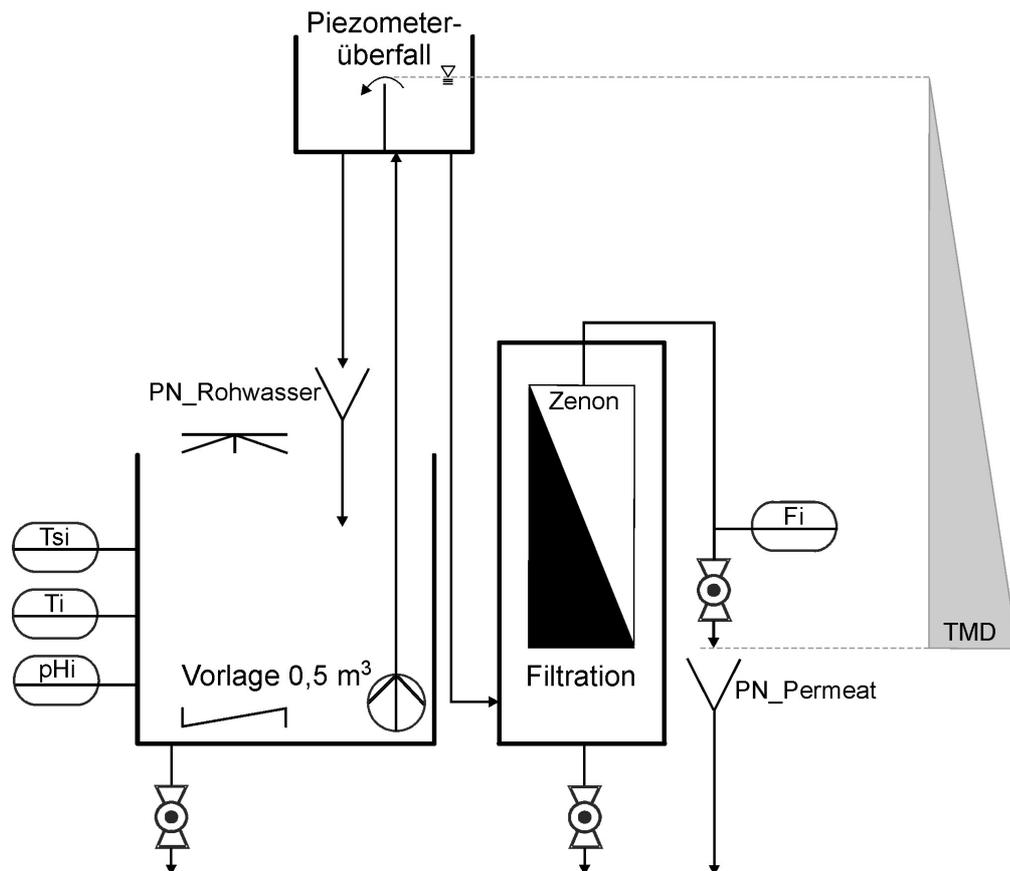


Abbildung 9: R+I Fließschema Versuchsstand 1, vereinfachtes Verfahren (Darstellung gem. DIN 28004)

Die Untersuchungen wurden mit Oberflächenwasser aus dem institutsnahen Bach „Ahna“, mit Feststoffen versetztem Trinkwasser und dem Ablauf Nachklärung (ANK) der Zentralkläranlage Kassel durchgeführt.

3.3.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitversuch

An dieser Stelle sei ein Versuch zur Bestimmung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membran in Abhängigkeit der Feststoffbelastung des Rohwassers dargestellt. Dieser Versuch

wurde mit konditioniertem Leitungswasser durchgeführt. Dazu wurde Schlämmkorn aus der „Ahna“ entnommen, getrocknet und die Kornfraktion > 1 mm abgesiebt. In Abbildung 10 sind das Schlämmkorn und die Entnahmestelle dargestellt.



Abbildung 10: Bach „Ahna“ auf dem Gelände der Universität Kassel, Schlämmkorn aus der Ahna, gesiebttes Schlämmkorn für die Versuchsdurchführung

Die so aufbereiteten Feststoffe wurden abgewogen und in definierten Mengen dem Trinkwasser in einem voll durchmischten Vorlagebehälter, aus dem die Versuchsanlage beschickt wird, zugegeben. Dabei wurde eine Höchstkonzentration an Feststoffen im Rohwasser von maximal 1000 mg/L eingestellt. In Abbildung 11 sind das so konditionierte Rohwasser, der Filtrationsbehälter und der sich füllende Permeatsammelbehälter dargestellt. Das Permeat wird in dieser Versuchsanordnung schließlich wieder in den Vorlagebehälter zurückgeführt und dort erneut mit Feststoffen angereichert.



Abbildung 11: Konditioniertes Rohwasser, Filtrations- und Permeatsammelbehälter der Versuchsanlage 1

Vor Versuchsbeginn wurde die Membran mechanisch und chemisch gereinigt und somit in einen neuwertigen Zustand versetzt. Der Membranfluss wurde über 13 Tage bei einem konstanten Transmembrandruck von 150 mbar aufgezeichnet. In Abbildung 12 ist das Versuchsergebnis dargestellt. Messtechnisch erfasst wurden Momentanwerte in einem Intervall von einer Minute.

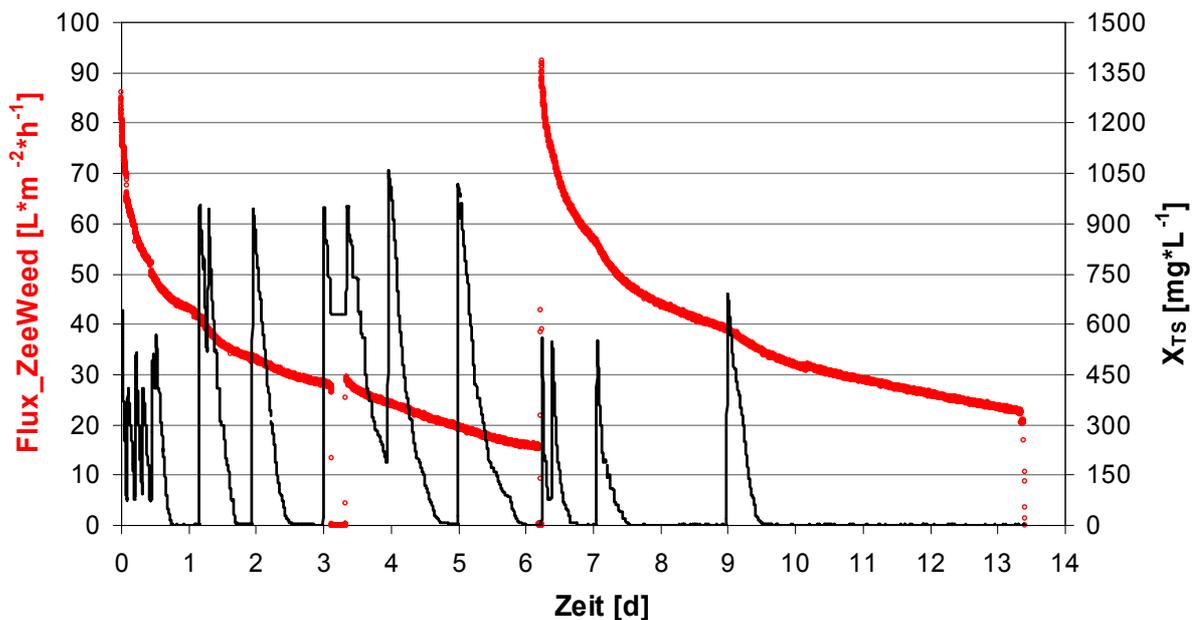


Abbildung 12: Hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitversuch, Versuchsstand 1

Dargestellt sind der Membranflux, normiert auf 1 m^2 Membranfläche und die Feststoffkonzentration des Rohwassers X_{TS} . Die Temperatur des Rohwassers lag, durch die konstante Atmosphäre in der Versuchshalle vorgegeben, zwischen 19°C und 22°C .

Der Flux nimmt direkt nach Inbetriebnahme der Membran durch die Deckschichtbildung stark ab. Aufgrund der nicht vorhandenen Deckschichtkontrolle erhöht eine Filtrationspause am dritten Untersuchungstag die Filtrationsleistung erwartungsgemäß nicht. Am sechsten Tag sinkt der Flux unter ein Niveau von $20 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, woraufhin der Versuch unterbrochen und die Membran mechanisch gereinigt wurde. In Abbildung 13 ist die Membran vor der Reinigung dargestellt.



Abbildung 13: Membran nach 6 Tagen Versuchsbetrieb, Versuchsstand 1

Nach der Membranreinigung, dargestellt in Abbildung 14, wurde die Filtration mit einer

verminderten Feststoffbelastung fortgesetzt, so das nach weiteren sechs Tagen Versuchsbetrieb der Flux über ein Niveau von 20 L/(m²*h) lag (siehe Abbildung 12).



Abbildung 14: Membranreinigung nach 6 Tagen Versuchsbetrieb, Versuchsstand 1

Über die gesamte Dauer des Versuches sank die Filtrationsleistung in erheblichem Maß. Theoretisch wird der Durchfluss bis zur vollständigen Verblockung der Membran auf 0 L/s absinken. Ein nahezu konstanter Fluss, hervorgerufen dadurch, dass sich die Deckschicht aufgrund des konstanten Transmembrandrucks nicht weiter verdichtet und gleichzeitig auch nicht weiter vergrößert, weil ab einer bestimmten Dicke die äußeren Feststoffe der Deckschicht durch die Erdanziehungskraft abfallen, wurde nicht erreicht. Um die Leistungsgrenze der Membran und somit eine Bemessungsgröße ermitteln zu können, muss die Feststoffbelastung noch weiter erhöht werden, was im Rahmen dieses Projektes in Versuchsstand 2 durchgeführt wurde (siehe Kapitel 3.4.1).

Grundsätzlich wird nach derzeitigem Kenntnisstand eine weitere Membranverblockung durch Fouling aufgrund der geringen Betriebszeit der Membran über mehrere Tage ausgeschlossen. Auch das Risiko einer Membranverblockung durch Scaling wird aufgrund der nicht vorhandenen Membranbelüftung und damit möglicher Fällungsreaktionen bislang als gering eingeschätzt.

Ergänzend ist die rechnerische Feststoffbelastung der Membran bezogen auf 1 m² Membranfläche über die erste Hälfte des Langzeitversuches in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Rechnerische Feststoffbelastung der Membran über die erste Versuchshälfte

Untersuchungsdauer [d]	Feststoffbelastung [g/m ²]
1	265
2	547
3	672
6	1.218

Hauptergebnis dieses Versuches war, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit einer gravimetrisch betriebenen Mikrofiltration bei einem Transmembrandruck, der eine kompakte Bauweise einer Anlage in Bezug auf die Gesamthöhe zulässt, für den gedachten Einsatzfall grundsätzlich als ausreichend erscheint. In der ersten Versuchshälfte (6 Tage) bis zur Membranreinigung wurden mit der relativ kleinen Membranfläche von $0,85 \text{ m}^2$ unter den eingestellten Randbedingungen bereits ca. 3.700 L Wasser in kontinuierlichem Betrieb aufbereitet. Durch eine Vergrößerung der Membranfläche bis zu einem Maß, dass die Anlage noch von einer Person tragbar ist (vgl. Anforderungen gemäß Kapitel 1 Tabelle 1), lässt sich diese Leistung grundsätzlich steigern.

Angemerkt sei, dass die Temperatur des Rohwassers während des Versuches relativ hoch war (s.o.). Bei geringeren Temperaturen ist mit einer kleineren Filtrationsleistung aufgrund der geringeren Viskosität des aufzubereitenden Wassers zu rechnen. Dieser Einfluss ist in den geplanten Feldversuchen mit der Pilotanlage zu untersuchen (vgl. Kapitel 6).

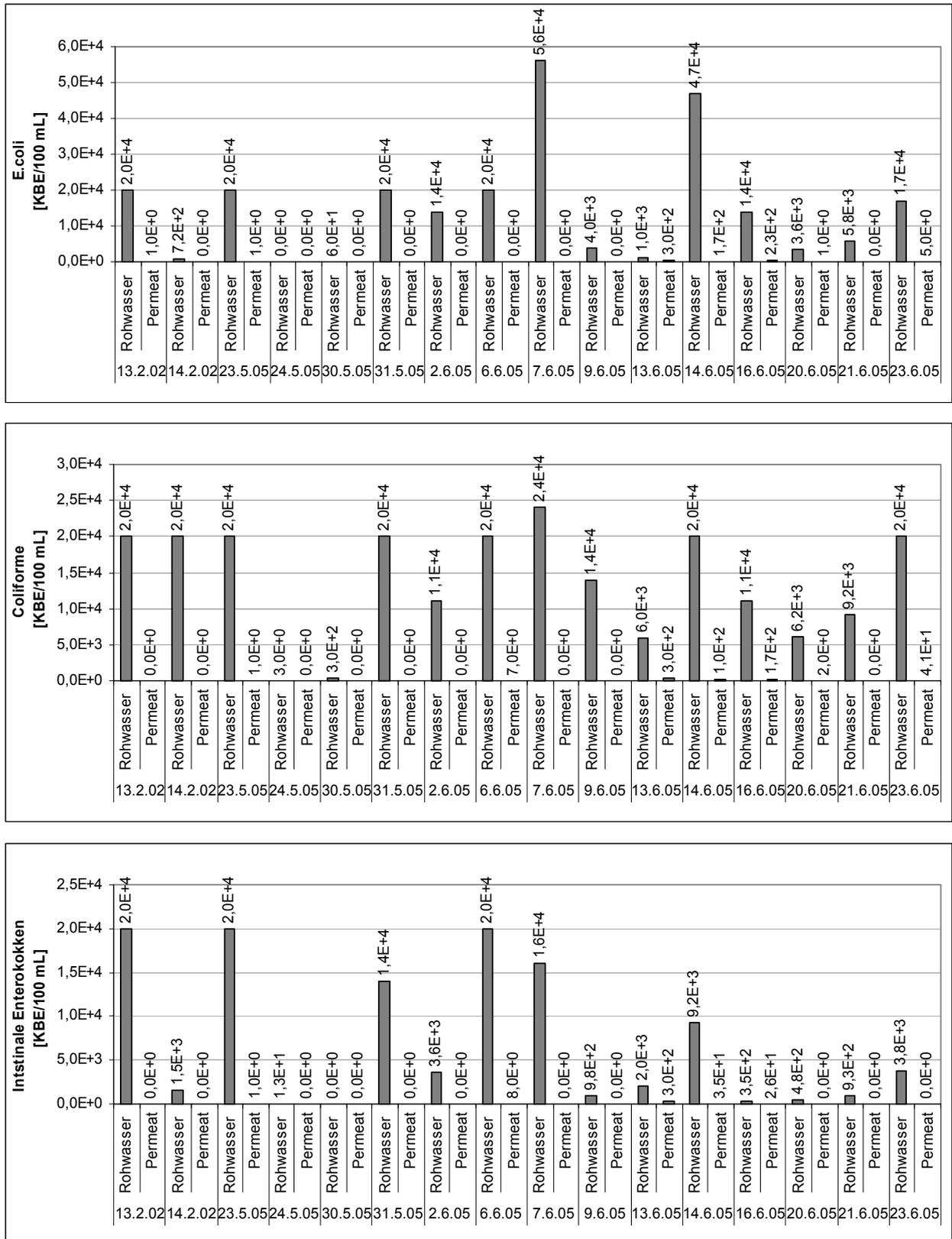
3.3.2 Stoffliche Leistungsfähigkeit

Wie bereits erwähnt wurde die stoffliche Leistungsfähigkeit der Membran über den Rückhalt von Bakterien in mehreren Filtrationsversuchen bestimmt. Diese Versuche wurden über mehr als drei Jahre mit Oberflächenwasser aus der „Ahna“ inklusive Mischwasseranteilen aus der Kanalisation sowie mit Ablauf Nachklärung (ANK) der Kläranlage Kassel mit dem Ergebnis durchgeführt, dass im Regelbetrieb zu jeder Zeit ein ausreichender Bakterienrückhalt nachgewiesen werden konnte (Frechen et al. 2005). Untersucht wurde auf die Indikatororganismen *Escherichia coli* (E.coli), *Enterobacter cloacae* (Coliforme), *Enterococcus durans* (intestinale Enterokokken) und vereinzelt auf Salmonellen, vertreten für pathogene Keime.

Während der Untersuchungszeit wurde das Membranmodul nicht gereinigt, erhöhten Druckstößen (über die Spezifikation hinaus) ausgesetzt und derart gelagert, dass sich ein dichter Biofilm auf der Membran etablierte. Während sich dadurch die hydraulische Leistungsfähigkeit der Membran erwartungsgemäß kontinuierlich verringerte blieb die Barrierewirkung gegenüber den untersuchten Mikroorganismen erhalten.

Heute wird die Mikro- und Ultrafiltration für den Rückhalt von Bakterien in Oberflächenwasser und kontaminiertem Grund- und Quellwasser als Stand der Technik angesehen (Gimbel et al. 2003, Lipp 2005). Die Untersuchungen des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft stützen diese Ansicht und bilden die Grundlage dafür, dass in der Pilotanlage eine Mikrofiltration eingesetzt wird.

In Abbildung 15 sind Ergebnisse aus den Filtrationsversuchen dargestellt.



E.coli: Membranfiltration, Chromocult-NKS (Hersteller: Sartorius AG)

Coliforme: Membranfiltration, Chromocult-NKS (Hersteller: Sartorius AG)

Intestinale Enterokokken: Membranfiltration, Azid.NKS (Hersteller: Sartorius AG)

Abbildung 15: Mikrobiologische Untersuchungen 2002 und 2005, Versuchsstand 1 (Frechen et al. 2005)

Eine Ausnahme stellen die Untersuchungen vom 13.6.2005, 14.6.2005 und 16.06.2006 dar, in denen durch einen Störfall die Permeatleitung verkeimt wurde, was eine leicht erhöhte Bakterienanzahl im Ablauf der Anlage zur Folge hatte. Diese Keimbelastung reduzierte sich im laufenden Betrieb nach Aufhebung des Störfalles selbstständig auf das Ausgangsniveau, ohne sterilisierende Maßnahmen an der Permeatleitung durchführen zu müssen. Festzuhalten bleibt, dass die untersuchte Verfahrenstechnik für den beschriebenen Einsatzfall für den weitestgehenden Keimrückhalt geeignet erscheint. Untersuchungen zum Rückhalt ausgesuchter Viren (Enteroviren, Hepatitis A + E Virus, Rotaviren, u.a.) sollten zukünftig durchzuführen.

3.4 Versuchsstand 2

Der Aufbau von Versuchsstand 2 ähnelt dem von Versuchsstand 1, ist jedoch für die parallele Untersuchung von drei Membranmodulen ausgelegt. Außerdem wird der Transmembrandruck teilweise über eine Unterdruckleitung an den Membranabläufen gebildet. Diese Lösung wurde gewählt, um auf einen kostspieligen Hochbehälter, in dem ein Überstau der Membranen von 1,50 m möglich ist, verzichten zu können. In Abbildung 16 ist das Verfahrensfließbild des Versuchstandes und der idealisierte Transmembrandruck (TMD) dargestellt. Abbildung 17 zeigt eine Ansicht der Anlage und ein Beispiel zur Anordnung der Membranmodule im Filtrationsbehälter.

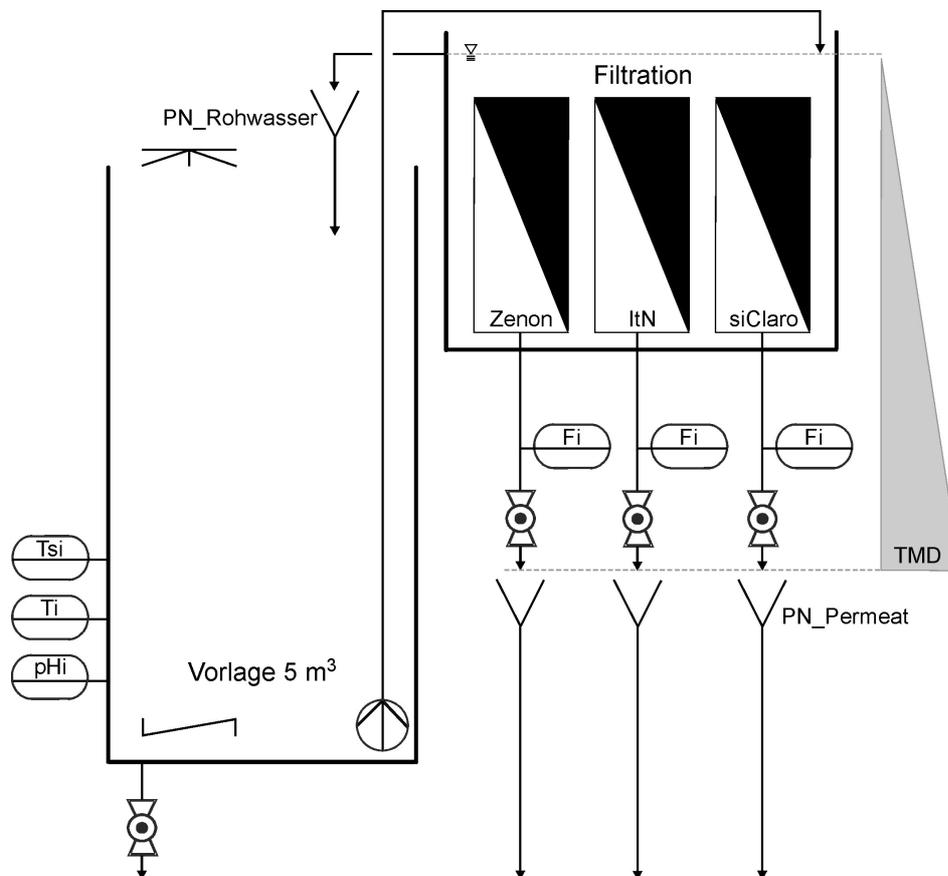


Abbildung 16: R+I Fließschema Versuchsstand 2 (Darstellung gem. DIN 28004)

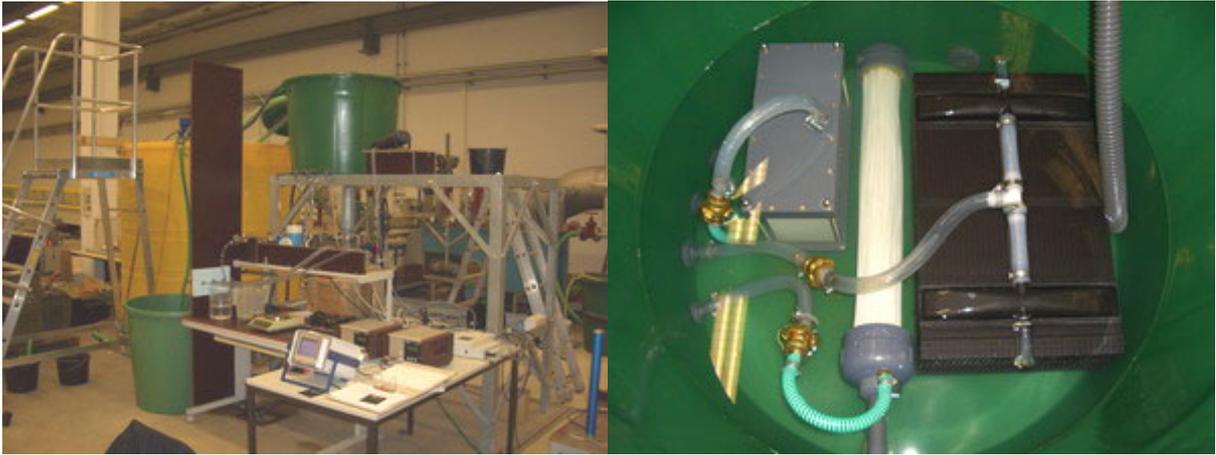


Abbildung 17: Ansicht Versuchsstand 2 (li.) und Beispiel für die Anordnung der Membranmodule im Filtrationsbehälter (re.)

3.4.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit im Langzeitversuch

Die Art der durchgeführten Versuche war nahezu identisch zu dem in Kapitel 3.3.1 beschriebenen Versuch mit dem Unterschied, dass eine wesentlich höhere Feststoffmenge dem Rohwasser zugegeben wurde. Feststoffart und Feststoffaufbereitung waren identisch zum Vorgängerversuch. Eingesetzt wurden fabrikneue Membranen. Der Transmembrandruck wurde auf konstant 150 mbar eingestellt. In Abbildung 18 sind der Vorlagebehälter direkt nach Feststoffzugabe, der Filtrationsbehälter, gefüllt mit konditioniertem Rohwasser, und das ablaufende Permeat der drei untersuchten Membranmodule dargestellt.



Abbildung 18: Vorlage- und Filtrationsbehälter, Permeatabläufe Versuchsstand 2

In Abbildung 19 ist das Versuchsergebnis bezogen auf den Permeatflux und die Feststoffkonzentration im Rohwassers über die Zeit dargestellt.

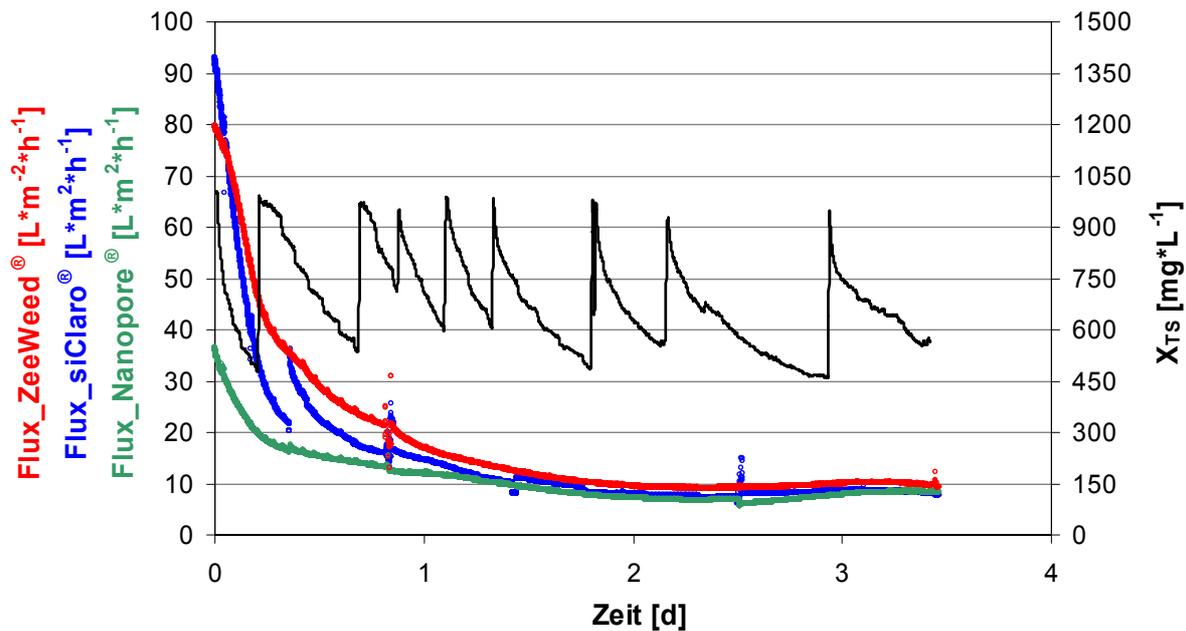


Abbildung 19: Hydraulische Leistung im Langzeitversuch, Versuchsstand 2

Mit Ausnahme der keramischen Membran (Nanopore[®]) liegt der Permeatfluss der polymeren Membranen auf einem vergleichbaren Niveau wie in dem zuvor beschriebenen Versuch am Versuchsstand 1. Aufgrund der wesentlich höheren Feststoffbeladung (vgl. Tabelle 3, Kapitel 3.3.1, mit Tabelle 4, unten) des Rohwassers sinkt der Fluss aller Membranen wesentlich schneller ab gegenüber dem Vorgängerversuch und erreicht bereits nach 1,5 Tagen ein niedriges Niveau von ca. 10 L/(m²·h). In den folgenden 2 Tagen bleibt jedoch dieses Niveau, trotz weiterer Feststoffdosierung, an allen Membranen nahezu erhalten. Nach 3,5 Tagen wurde der Versuch schließlich beendet.

Bis zu diesem Zeitpunkt wurden beispielsweise mit der polymeren Plattenmembran (siClaro[®]) ca. 10.700 L Wasser aufbereitet. Der Versatz in der Flusskurve dieser Membran nach 8,5 Stunden Versuchsbetrieb ist darauf zurückzuführen, dass sich ungewollt Luft aus dem Membranmodul in der Permeat-Unterdruckleitung gesammelt hat, was zu einer Verringerung des effektiven Transmembrandruckes führte, woraufhin die Leitung entlüftet wurde. Entlüftungen wurden nach 20, 35 und 60 Stunden vorsorglich wiederholt, auch wenn sich mit fortschreitender Versuchsdauer nur noch sehr geringe Mengen Luft sammelten. Ob eine Membranentlüftung in der Pilotanlage erforderlich wird, ist in Feldversuchen zu überprüfen. Eine derartige Vorrichtung könnte in Form einer, innerhalb des Anlagengehäuses, hoch geführten Standleitung, die an die Permeatleitung anschließt, ausgebildet werden. Dabei ist ein Schmutzeintrag durch die Entlüftungsleitung in den Permeatablauf konstruktiv zu verhindern.

Ergänzend zu den Erläuterungen der hydraulischen Leistungsfähigkeit ist die rechnerische Feststoffbeladung in dem durchgeführten Langzeitversuch bezogen auf 1 m² Membranfläche in Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 4: Rechnerische Feststoffbeladung der Membranen über die Versuchsdauer

Untersuchungsdauer [d]	Feststoffbeladung [g/m²]
1	907
2	1.418
3	1.690

Die Membranen nach Versuchende zeigt Abbildung 20.

*Abbildung 20: Membranen nach 3,5 Tagen Versuchsbetrieb, Versuchsstand 2*

Basierend auf diesem Versuch wird die hydraulische Minimalleistung bei sehr hoher Feststoffbelastung und dem gegebenen Transmembrandruck der untersuchten Membranen bei einem Betrieb über mehrere Tage mit $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ angenommen. Dieser Laborwert wird, ohne bisherige Feldversuche, vorläufig als Bemessungsgröße (Minimalleistung) für die Pilotanlage herangezogen.

Derzeit wird diskutiert, den Ablauf der Pilotanlage mechanisch auf diese Minimalleistung zu drosseln. Dadurch könnte zwar in der Summe wesentlich weniger Rohwasser in den ersten Einsatztagen aufbereitet werden. Demgegenüber wird dem Anwender jedoch zum Nutzungsbeginn kein übermäßiger Ertrag suggeriert, der in den Folgetagen unter Umständen nicht eingehalten werden kann. Außerdem wird derzeit davon ausgegangen, dass durch eine Drosselung der Membran die Gesamtbetriebsdauer der Anlage pro Einsatz durch die geringere Membranbelastung verlängerbar ist, was jedoch erst in zukünftigen Feldversuchen bestätigt werden sollte.

In Bezug auf die in Kapitel 2 erwähnte mögliche Anlagenerweiterung um eine chemische Nachdesinfektion wäre ein relativ konstanter Anlagenablauf für eine mechanische Dosierung eines Desinfektionsmittels ebenfalls von Vorteil (siehe auch Kapitel 4.7.3).

3.4.2 Stoffliche Leistungsfähigkeit in Bezug auf den Rückhalt auf Bakterien

In Bezug auf den Rückhalt von Bakterien wurden die Membranen in einem einmaligen Versuch mit dem Ablauf der Nachklärung Kassel beaufschlagt, um die Ergebnisse aus den vorangegangenen Filtrationsversuchen an Versuchsstand 1 (siehe Kapitel 3.3.2) zu bestätigen und die fabrikneuen Membranen auf Ihre Unversehrtheit hin zu überprüfen.

Das die Voruntersuchungen an Versuchsstand 1 bestätigende Ergebnis ist in Tabelle 5 dargestellt. An allen untersuchten Membranen wird ein weitestgehender Bakterienrückhalt erzielt.

Tabelle 5: Mikrobiologische Untersuchung 2006, Versuchsstand 2

Datum	Probe	E.coli KBE/100mL	Coliforme KBE/100mL	Intest. Enterokokken KBE/100mL
12.06.2006	Rohwasser	4,0E+04	8,8E+04	2,4E+04
	Permeat Zenon®	0,0E+00	2,0E+00	0,0E+00
	Permeat siClaro®	1,0E+00	0,0E+00	1,0E+00
	Permeat Nanopore®	3,0E+00	0,0E+00	3,0E+00

E.coli: Membranfiltration, Colichrom-NKS (Hersteller: Dr. Möller & Schmelz GmbH)

Coliforme: Membranfiltration, Colichrom-NKS (Hersteller: Dr. Möller & Schmelz GmbH)

Intestinale Enterokokken: Membranfiltration, Azid-NKS (Hersteller: Sartorius AG)

3.4.3 Gewählte Membran für den Pilotanlageneinsatz

Der hergeleitete Bemessungsansatz von 10 L/(m²*h) Minimalleistung bei 150 mbar Transmembrandruck gilt für alle untersuchten Membranen. Allerdings wird die generelle hydraulische Leistungsfähigkeit der keramischen Membran unter den eingestellten Randbedingungen aufgrund des geringeren Maximalflusses gegenüber den polymeren Membranen geringer eingestuft.

In Bezug auf die Pilotanlage wird neben einer möglichst großen hydraulischen Leistungsfähigkeit auch eine möglichst kompakte und leichte Bauweise gefordert (siehe Kapitel 1). Ein Maximum an verfügbarer Membranfläche je Modulvolumen, quantifiziert durch die Packungsdichte, und ein minimales Modulgewicht sind daher ebenfalls entscheidend.

Hier weist das polymere Plattenmembranmodul (siClaro®) Vorteile auf, ausgedrückt in der größten Packungsdichte bei gleichzeitig geringstem Gewicht je m² Filterfläche. (vgl. Kapitel 3.2, Tabelle 2), weshalb dieses Membranmodul für den Einbau in die Pilotanlage ausgewählt wurde. Allerdings wird die Pilotanlage so konzipiert, dass auch andere Membransysteme für Feldversuche eingesetzt werden können, um für eine Serienanwendung das Optimum zu finden.

An dieser Stelle denkbar ist der Einsatz von bislang nicht in der Trinkwasseraufbereitung

eingesetzten Membranmaterialien (z.B. Metall) und die Modifizierung vorhandener Membranmodule in Bezug auf Packungsdichte, Stabilität und Gewicht.

Das gewählte Membranmodul weist eine Filterfläche von 6 m^2 auf. Bei der sicherheitsbedachten Bemessung auf $10 \text{ L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ und einem angenommenen Betrieb von 12 h/d könnten mindestens 720 L/d Wasser aufbereitet werden. Bei einem Basistrinkwasserbedarf von $7 \text{ L}/(\text{E} \cdot \text{d})$ ¹ gemäß WHO (WHO 2005, No. 9) könnten somit mindestens 100 Personen über mehrere Tage versorgt werden.

Angemerkt sei, dass das gewählte Membranmodul bei gleichen Außenmaßen auch mit 11 m^2 Filterfläche verfügbar ist, was durch einen enger gehaltenen Membranplattenabstand und somit einer größeren Packungsdichte erreicht wird. Dieses Modul wurde zunächst nicht in die durchgeführten Voruntersuchungen eingebunden, weil bislang vermutet wird, dass, bei hoher Feststoffbelastung ohne Deckschichtkontrolle, Verstopfungen des Moduls aufgrund der großen Packungsdichte auftreten können. Diese Vermutung soll in Feldversuchen unter Realbedingungen geprüft werden (siehe Kapitel 6). Stellt sich dabei das dichter gepackte Modul als geeignet heraus, würde dies theoretisch die Leistungsfähigkeit der Pilotanlage nahezu verdoppeln, was allerdings auch eine Erhöhung des Gesamtgewichtes der Anlage um 5 kg nach sich zöge.

¹ 3-4 L/(E*d) für Trinken; 2-3 L/(E*d) für Lebensmittelzubereitung

4 KONSTRUKTION DER PILOTANLAGE

4.1 Anlagenform

Form und Größe der Pilotanlage wurden in Abhängigkeit der zu erfüllenden Funktionen gewählt. Da die Membran gravimetrisch betrieben wird und keine beweglichen Teile besitzen soll, muss die Anlagenhöhe einen ausreichenden Transmembrandruck gewährleisten. Je höher die Anlage, umso größer ist die hydraulische Leistungsfähigkeit. Begrenzt wird die Anlagenhöhe durch die Handhabbarkeit, die Transportfähigkeit, das Gesamtgewicht, die Standfestigkeit und die Stabilität. Dahingehend wurde unter diesen Kriterien eine Maximalhöhe der Anlage von 160 cm gewählt. Vor allem, weil das Rohwasser durch den Benutzer von oben in die Anlage eingefüllt werden muss, erscheint eine größere Höhe nicht Ziel führend.

Die Grundfläche der Anlage wurde in Abhängigkeit eines günstigen Packmaßes für den Transport auf einer Standard Flachpalette der Ausführung 800 mm * 1200 mm (gem. DIN EN 13382), der Tragbarkeit durch eine Person und der erforderlichen Fläche für die Membranfiltration samt Peripherie, wie Permeatleitung und Permeatablauf gewählt. Darüber hinaus wurde Platz für eine mögliche Desinfektionsschleuse vorgesehen. Unter diesen Kriterien wurde eine maximale Grundfläche von 400 mm * 400 mm gewählt. Dieses Maß ermöglicht es zudem, dass gegebenenfalls neben dem zum Einsatz kommenden siClaro[®]-Modul, auch andere, derzeit auf dem Markt erhältliche, Membranfiltrationsmodule einsetzbar sind.

Aus den Höhen- und Grundmaßen ergibt sich eine Säulenform, die in Ihrem Querschnitt eckig, z.B. quadratisch, oder rund, z.B. kreisförmig, ausgebildet werden kann. Für die Pilotanlage wurde zunächst eine eckige Querschnittsform gewählt, weil die Anlage dadurch besser gepackt/gestapelt werden kann, die Tragbarkeit durch eine Person, z.B. auf dem Rücken, eher gewährleistet erscheint, und nicht zuletzt, weil das zum Einsatz kommende Membranmodul eine eckige Grundform vorgibt (vgl. Abbildung 6, Kapitel 3.2). Für eine Serienanlage soll aber grundsätzlich eine runde Querschnittsform, aufgrund statischer Vorteile, nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Damit das Membranmodul, das Vorsieb und eventuelle Anlagenerweiterungen in die Pilotanlage leicht einsetzbar und für Wartungszwecke herausnehmbar sind, wurde für das Anlagengehäuse eine Zweiteilung gewählt. In ein Unterteil soll das Membranmodul von oben eingeschoben werden, während das Vorsieb in ein Anlagenoberteil von unten eingesetzt werden kann. Außerdem ermöglicht eine Zweiteilung das Unterteil für den größeren statischen Wasserdruck und ein mögliches Absetzen der Anlage aus der Luft robuster auszubilden, wohingegen das Oberteil zur Gewichtseinsparung filigraner konstruiert werden kann.

Aufgrund der hier aufgeführten Kriterien ist eine erste Designstudie der Pilotanlage entstanden, welche in Abbildung 21 dargestellt ist.

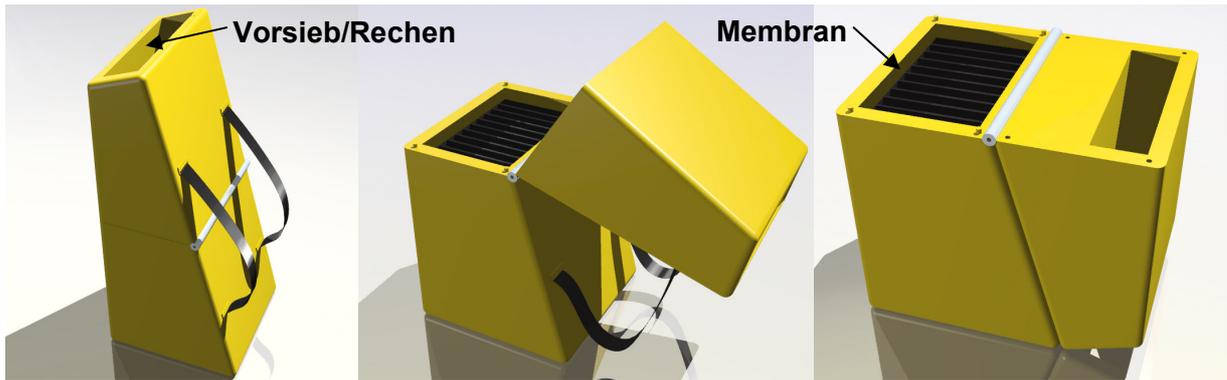


Abbildung 21: Erste Designstudie der Pilotanlage

Aufbauend auf dieser Studie wurden mehrere Modifikationen bis zum Enddesign der Anlage durchgeführt. So wurde beispielsweise auf den aufwendigen Klappmechanismus verzichtet und eine Steckvariante verfolgt. Das Unterteil wurde zur Platzeinsparung nicht angeschrägt. Die Möglichkeit, die Anlage auf dem Rücken transportieren zu können wurde beibehalten, ergänzt um Trageschlaufen an der Seite. Zudem wurde die Anlage für größere Stabilität und Standsicherheit um Standfüße ergänzt.

Die Zweiteilung der Anlage ermöglichte einen modularen Anlagenaufbau bestehend aus einem Unterteil und verschiedenen Oberteilen mit unterschiedlicher Höhe und Form. In Abbildung 22 ist die Vorderansicht der Pilotanlage in verschiedenen Varianten maßstäblich dargestellt. Anlagendetails werden im Weiteren erläutert.

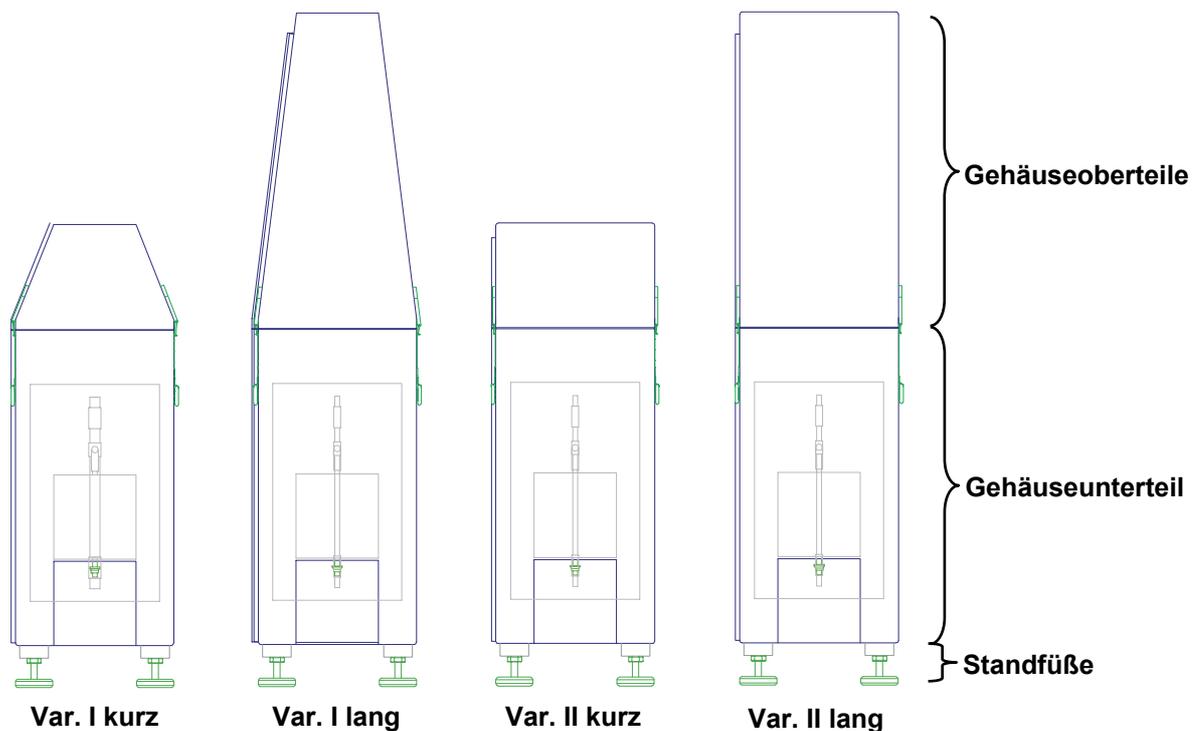


Abbildung 22: Pilotanlagenvarianten I und II in kurzer und langer Ausführung (Vorderansicht), Ausschnitt aus technischer Zeichnung

Die Abbildung ist den technischen Zeichnungen zum Bau der Pilotanlage entnommen. Die Plots, sowie die Digitalfassung der technischen Zeichnungen sind diesem Endbericht beigelegt. Im Anhang sind die beigelegten technischen Zeichnungen aufgelistet.

Verwirklicht wurde die Pilotanlage in zwei Varianten. Der oben geschrägten Variante I in kurzer und langer Ausführung und der geraden Variante II, ebenfalls kurz oder lang ausgeführt. Dadurch ergeben sich letztlich vier Anlagentypen. Die lange Variante verfügt über eine Gesamtbauhöhe von 1600 mm, die kurze Variante von 1100 mm, wobei die Standfüße eine Höhe von 100 mm liefern. Die kurze Variante wurde zusätzlich gewählt um die Vorteile einer kleinen Bauweise mit hoher Standsicherheit, großer Stabilität, geringem Packmaß und geringerem Gewicht dem Nachteil einer geringeren hydraulischen Leistungsfähigkeit der Anlage in Feldversuchen gegenüberstellen zu können.

Die geschrägte Ausführung ermöglicht bei Vollfüllung der Anlage eine Schwerpunktverlagerung nach unten und somit eine höhere Standsicherheit gegenüber der geraden Ausführung. Die gerade Ausführung ermöglicht demgegenüber eine größere Aufnahme an Wasservolumen, so dass im Betrieb weniger häufig Wasser in die Anlage nachgefüllt werden muss.

Die Standfüße wurden nicht als Ausstellfüße konzipiert, was für die Standsicherheit der relativ hohen und schlanken Anlagenform je nach Einsatzfall erforderlich werden kann. Zunächst sollen die Füße fest mit der Anlage verschraubt werden, um bewegliche Teile zu vermeiden. In Feldversuchen wird schließlich geprüft, ob auf diese Weise eine sichere Handhabung der Anlagenvarianten gewährleistet werden kann.

Wie bereits erwähnt ergibt sich die relativ schlanke Grundform u.a. aus einem möglichst günstigen Packmaß in Bezug auf eine Standard Flachpalette. Die gewählten Anlagenmaße ermöglichen es auf einer Palette der Grundfläche 800 mm * 1200 mm sechs Anlagen ohne Raumverlust unterzubringen. In Abbildung 23 ist eine derart bepackte Palette dargestellt.

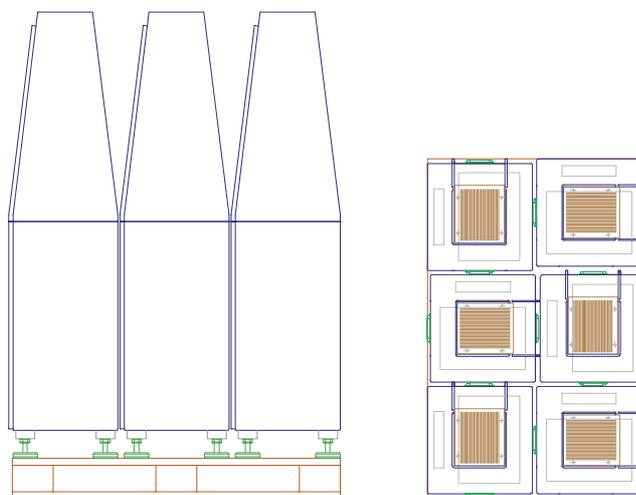


Abbildung 23: 6 Pilotanlagen auf einer Standard Flachpalette, Ansicht (li.) und Draufsicht (re.), Ausschnitt aus technischer Zeichnung

In der langen Variante besitzen das Gehäuseoberteil und das Gehäuseunterteil die gleiche Höhe. Auf diese Weise kann in nicht verbundenem Zustand der beiden Teile eine geringe Packhöhe bei gleichzeitig optimaler Raumnutzung für den Transport gewährleistet werden.

4.2 Anlagendetails

Anlagendetails und Maße sind den beigelegten technischen Zeichnungen zu entnehmen. In Abbildung 24 ist beispielhaft ein Längsschnitt durch Anlagenvariante I (lange Ausführung) dargestellt.

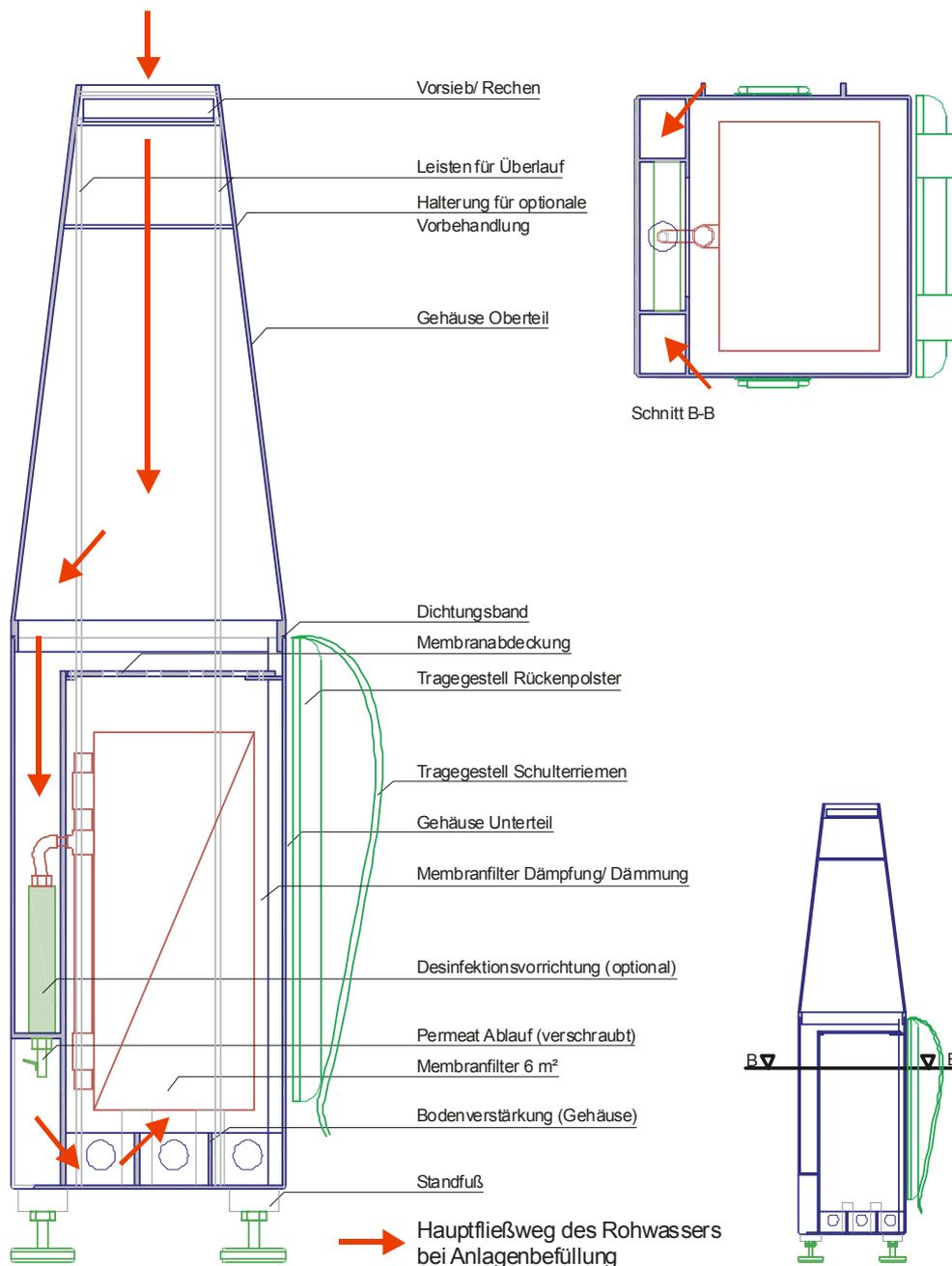


Abbildung 24: Anlagenvariante I in langer Ausführung (Längsschnitt), Ausschnitt aus technischer Zeichnung

Rötlich dargestellt ist die Lage des Membranmoduls innerhalb des Anlagengehäuses. Aus dem Modul heraus führt die Permeatleitung zunächst in eine Vorrichtung für eine mögliche Nachdesinfektion (grüner Behälter). Daran angeschlossen ist ein außen liegender Permeathahn zur Entnahme des aufbereiteten Wassers. Der Permeathahn ist, um ihn vor mechanischer Einwirkung zu schützen, in das Anlagengehäuse eingebettet. Die Pilotanlage verfügt über einen Permeatablauf. Die Möglichkeit mindestens zwei Abläufe für das parallele Befüllen zweier Gefäße einzusetzen ist gegeben.

Der Hahn wird in das Anlagenunterteil in einen Behälteranschluss (1/2“ Innengewinde) eingeschraubt von außen mit einem Überwurf (1“ Außengewinde) mit dem Anlagengehäuse verbunden. Danach wird das Membranmodul von oben in das Anlagenunterteil eingeschoben und die Permeatleitung mittels Verschraubung an die optional einsetzbare Desinfektionsvorrichtung oder direkt an den Permeathahn angeschlossen (siehe Abbildung 36 bis Abbildung 38, Kapitel 4.8.3). Der Permeathahn ist selbsttätig schließend, damit nur nach Bedarf filtriert wird. Die Permeatleitung ist flexibel ausgebildet und entspricht den Prüfkriterien gemäß DVWG 270 (DVGW 1999) für den Trinkwasserbereich.

Je höher der Permeatablauf angeordnet ist, umso komfortabler wird das Abfüllen des aufbereiteten Wassers in ein Gefäß. Mit zunehmender Höhe werden jedoch der resultierende statische Transmembrandruck und damit die hydraulische Leistung der Anlage reduziert. Hier musste ein Kompromiss gefunden werden. Der Permeatablauf wurde 300 mm (inkl. Standfüßen) über der Aufstandsfläche der Anlage angeordnet, so dass beispielsweise größere Flaschen unter dem Ablauf Platz finden. Die dargestellten Voruntersuchungen zur Bestimmung der hydraulischen Leistungsfähigkeit der Membranen (siehe Kapitel 3.3.1 und 3.4.1) wurden bei einem Transmembrandruck von 150 mbar durchgeführt. Durch die Höherlegung des Anlagenablaufes konnte dieser Wert in der Pilotanlage nicht erreicht werden. Andernfalls hätte die Gesamtbauhöhe der Anlage vergrößert werden müssen, was das Einfüllen des Rohwassers wesentlich erschweren würde und daher nicht realisiert wurde. In der langen Anlagenausführung (vgl. Abbildung 22) mit einer Bauhöhe von 1600 mm resultiert ein maximaler Transmembrandruck von 130 mbar, in der kurzen Ausführung mit der Bauhöhe von 1100 mm kann ein Maximaldruck von 80 mbar bereit gestellt werden. Die dadurch resultierende hydraulische Leistungsfähigkeit wird in Feldversuchen zu untersuchen sein.

Angemerkt sei, dass die hydraulische Leistung der Anlagen durch den Anschluss eines Schlauches an den Permeatablauf erhöht werden kann, sofern dieser als Saugleitung abschüssig verlegt wird. Da jedoch bewusst auf bewegliche Anlagenteile verzichtet werden soll (vgl. Kapitel 1), wird zunächst auch auf eine derartige Zusatzausrüstung der Pilotanlage verzichtet, aber nicht gänzlich ausgeschlossen.

Zwischen Membranmodul und Gehäuse besteht rundum ein Abstand von 30 mm. Dieser Raum wird durch ein Dämmmaterial ausgefüllt, um die Membran vor Stößen und eventuell vor extremen Witterungseinflüssen schützen zu können (siehe Kapitel 4.4).

Die Bodenplatte der Anlage ist durch eine Wabenstruktur verstärkt, um die Last aus den Standfüßen auf das Gehäuse übertragen zu können. Dieser Anlagenteil wird gleichzeitig als Sammelraum für abgesetzte Feststoffe genutzt. Außerdem wird sich dort Restwasser sammeln – die Anlage kann sich nicht vollständig entleeren – was bewirkt, dass die resultierende Feuchtigkeit innerhalb der Anlage ein Austrocknen der Polymermembran und damit eventuell verbundene Membranschäden verhindert. Die angesprochene Membrandämmung / Membrandämpfung wird die Feuchtigkeit länger in der Anlage zurückhalten und somit unterstützend wirken.

Oberhalb der Membran ist eine Membranabdeckung angebracht. Diese verhindert ein aufschwimmen des Membranmoduls und wirkt als Sichtblende für den Benutzer, um die Motivation die Anlage zu öffnen und damit gegebenenfalls zu beschädigen möglichst gering zu halten. Außerdem bewirkt die Abdeckung, dass mit dem Rohwasser eingefüllte Feststoffe nicht direkt an die Membran gelangen, sondern zunächst um die Membran herum geleitet werden, und sich nach Möglichkeit im unteren Teil der Anlage absetzen (siehe Fließweg, rote Pfeile). Die Abdeckung wird mit Rändelschrauben fixiert und kann somit mit geringem Aufwand herausgenommen werden.

Ober- und Unterteil der Anlage werden fest miteinander verbunden. Eine in das Oberteil eingelassene Dichtung aus Polyurethan (PU) verhindert das Austreten von Wasser und einen damit verbundenen Druckverlust auf die Membran. Die Verbindung erfolgt zug- und druckfest verschraubt. Alternativ erhält die Pilotanlage Schnellspannverschlüsse, um in Feldversuchen Ober- und Unterteil mit geringem Aufwand voneinander lösen zu können. In das Oberteil sind, in der langen Ausführung, zusätzliche Halterungsschienen für eine optionale verfahrenstechnische Vorbehandlung integriert (siehe Kapitel 4.7.2).

Um Grobstoffe aus der Anlage fern zu halten, kann in den Einlauf der Anlage ein Sieb oder ein Rechen eingesetzt werden (siehe Kapitel 4.5). Dieses Einsetzteile wird von innen mit Rändelschrauben fixiert und kann somit von außen durch den Benutzer nicht gelöst werden. Es ist schräg angeordnet. Überströmendes Wasser und Grobstoffe werden so zu einem Anlagenüberlauf geleitet, der seitlich an der Anlage herunter führt. Dadurch soll verhindert werden, dass Rohwasser an den Anlagenablauf gelangt.

An der gegenüberliegenden Seite des Anlagenablaufes sind Trageriemen angeordnet, so dass die Anlage auf dem Rücken wie ein Rucksack getragen werden kann. Seitlich davon, im Schnitt nicht zu sehen, befinden sich zusätzlich Handtragelassen, die auch zur Transportsicherung verwendet werden können. Zusätzlich sind an den Anlagenoberteilen Kran-Ösen angebracht, an denen die Anlage aufgehängt und von oben herab gelassen werden kann. Feldversuche müssen zeigen, ob diese Transportvorrichtungen zu modifizieren sind.

Die Tragevorrichtungen dienen zum Transport der Anlage in ungefülltem Zustand. In gefülltem Zustand soll/kann die Anlage nicht transportiert werden (siehe Massenangaben Tabelle 7, Kapitel 4.8.1). Zum schnellen Entleeren wird die Pilotanlage zukünftig für Feldversuche um einen, von außen nicht direkt sichtbaren, Bodenablass ergänzt.

4.3 Hinweise zum Gehäusewerkstoff

Bei der Materialwahl für die Pilotanlage standen die Kriterien Verarbeitung, Stabilität, Gewicht und toxikologische Unbedenklichkeit im Vordergrund. Nach Recherchen boten sich Edelstahl (1.4301), Polyvinylchlorid (PVC) und Polypropylen (PP) an. Aus Kostengründen wurde für die Einzelanfertigung auf Metall verzichtet und PVC gewählt, welches gegenüber PP den Vorteil besitzt, dass es auch transparent lieferbar ist und für Erweiterungsarbeiten leicht geklebt werden kann. Ein etwas erhöhtes Anlagengewicht gegenüber einer Ausführung in PP mit der geringeren Dichte wurde dabei in Kauf genommen.

Die PVC-Einzelteile wurden aus 6 mm starken, extrudierten Platten auf Maß geschnitten und miteinander warm verschweißt (3-4 mm Schweißdraht). Schweißnähte und Kanten wurden anschließend abgezogen, geglättet und poliert.

Hergestellt wurden auf diese Weise eine Anlage aus PVC-Glas (Produktbezeichnung: SIMONA PVC-Glas) in der Variante I in langer und kurzer Form (siehe Abbildung 33, Kapitel 4.8.3) und eine Anlage in blauem PVC (Produktbezeichnung: SIMONA PVC-TF) in der Variante I und II, ebenfalls in langer und kurzer Ausführung (siehe Abbildung 34, Kapitel 4.8.3). Die transparente Anlage dient in erster Linie als Demonstrationsobjekt und ermöglicht die Visualisierung von Strömungsversuchen. Die Anlage aus PVC-blau ist leicht verstärkt und kann, ergänzt mit Messtechnik, für Feldversuche heran gezogen werden.

Für die Gehäusefertigung einer Serienanlage bieten sich nach derzeitigem Kenntnisstand Edelstahl, Aluminium eloxiert, Glasfaserkunststoff (GFK), PP, glasfaserverstärktes PP, Polystyrol (PS) und Acrylnitril-Butadien-Styrol brandgeschützt (ABS V0) an. Materialrecherchen wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Werkstofftechnik, Universität Kassel, durchgeführt. Material und Fertigungsweise werden in entscheidendem Maß von der zu fertigen Stückzahl abhängen. Die Hauptforderung ist eine maximale Gehäusestabilität bei minimalem Gewicht. Aus derzeitiger Sicht wird dahin gehend für die Fertigung einer kleineren Stückzahl von beispielsweise 10 Anlagen für Feldversuche im Rahmen einer Folgeprojektphase (siehe Kapitel 6) GFK favorisiert. Für eine große Stückzahl in Serienproduktion erscheint derzeit glasfaserverstärktes PP, verarbeitet im Rotationssinterverfahren, am günstigsten. In einer Serienfertigung kann der Gehäusewerkstoff, beispielsweise mit dem Ziel einer besseren Erkennbarkeit (Signalwirkung) der Anlage, beliebig eingefärbt werden. Parallel wird zu prüfen sein, ob Gehäusebestandteile auch aus bereits auf dem Markt erhältlichen Komponenten, wie z.B. Aluminiumboxen oder Schachtrohren, die Herstellkosten senken können.

4.4 Hinweise zur Membrandämpfung und Membrandämmung

Um Aufschluss darüber zu gewinnen, in welcher Stärke das Membranmodul zum Schutz vor mechanischer Einwirkung gedämpft werden sollte, wurden einfache Fallversuche aus 2 m Höhe durchgeführt. Dazu wurde das Membranmodul mit handelsüblicher, wasserfester Baudämmung

(schwer entflammbare, wasserfeste Polystyrol Extruderschaumplatten) in unterschiedlichen Stärken von 50 mm bis 10 mm verkleidet und in eine weiche Außenhülle aus Karton verpackt. Anschließend wurde das Modul aus verschiedenen Lagen aus 2 m Höhe auf einen Betonboden fallen gelassen. In Abbildung 25 ist die Versuchsdurchführung illustriert.



Abbildung 25: gedämmte Membran, Fallversuch aus 2 m Höhe

Die Versuche hatten zum Ergebnis, dass bei einer Dämmung mit einer Stärke von weniger als 20 mm Risse am Membranmodul auftraten. Dabei nahm die Membranfläche keinen Schaden. Die Permeatsammelleitung riss jedoch auf, was das Modul im Einsatzfall unbrauchbar machen würde. Anschließend konnte das Modul durch warm schweißen repariert werden. In Abbildung 26 ist das Membranmodul in defektem und repariertem Zustand dargestellt. Für einen möglichen Serieneinsatz wird zu prüfen sein, ob die Sammelleitung baulich verstärkt werden kann.

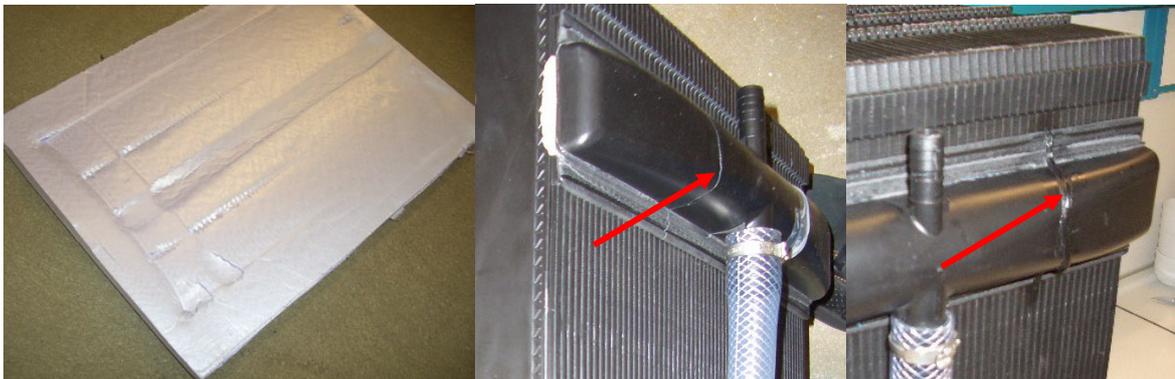


Abbildung 26: Deformiertes Dämmmaterial, gerissene Permeatsammelleitung, geschweißte Sammelleitung

Als Konsequenz aus diesen Versuchen wurde eine Dämmungsstärke von 30 mm gewählt, um welche die Grundfläche der Pilotanlage vergrößert wurde. Das getestete Dämmmaterial wurde ebenfalls in die Pilotanlage eingesetzt. Für eine Serienanlage wird die Art der Dämpfung zu optimieren sein. Dahingehend denkbar sind vorgefertigte elastische Formteile aus PP- oder PE-Schaum. Eine Aufhängung des Membranmoduls im Anlagengehäuse an Federn wurde aufgrund der schlechten Handhabbarkeit ausgeschlossen.

Mit der gewählten Dämpfung wird davon ausgegangen, dass im Einsatzfall das Membranmodul gegen größere Stöße durch z.B. ein Absetzen aus der Luft geschützt ist. Voraussetzung dafür ist, dass das Anlagengehäuse der Belastung standhält. Anzunehmen ist, dass das Pilotanlagengehäuse aus PVC diesen Anforderungen nicht zur Gänze gerecht wird. Fallversuche mit der Gesamtanlage wurden aus Kostengründen für eine eventuelle Reparatur nicht durchgeführt. In einer Serienfertigung müssten die im vorigen Kapitel erwähnten Materialien, möglichst in gestanzter, gezogener oder gespritzter Form, herangezogen werden.

Als Zusatzeffekt soll das Dämmmaterial die Membran zumindest temporär auch vor extremen Witterungseinflüssen schützen und einem Trockenfallen der Polymermembran entgegen wirken (siehe Kapitel 4.2). Somit werden die Funktionen Membrandämpfung und Membrandämmung durch eine Anlagenkomponente übernommen.

4.5 Hinweise zum Sieb/Rechen

Um Grobstoffe aus der Anlage und somit von der Membran fern zu halten, verfügt die Pilotanlage über ein vor geschaltetes Sieb bzw. einen Rechen. Für die Ausführung kommen gemäß Abbildung 27 die Öffnungsgeometrie Loch, Masche oder Spalt in Frage.

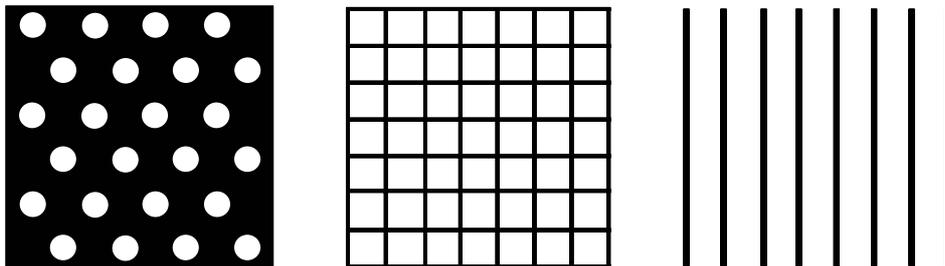


Abbildung 27: Öffnungsgeometrie Loch, Masche, Spalt (nach Schier 2006)

Um in Feldversuchen ermitteln zu können, welche Öffnungsgeometrie die verfahrenstechnisch günstigste Variante darstellt, wurden Vorsiebe jeder Art aus Edelstahl (1.4301) angefertigt. Die Anschlüsse der einzelnen Bauteile sind identisch, so dass sie in jedes Anlagenoberteil eingesetzt werden können. In Tabelle 6 sind die gewählten Ausführungen aufgelistet und in Abbildung 28 dargestellt.

Tabelle 6: Siebe und Rechen

Bezeichnung (gem. DIN 19595)	Öffnungs- geometrie	Bezug Öffnungsweite	Öffnungsweite [mm]	Materialstärke [mm]	Material Bezeichnung
Grobsieb	Masche	Kantenlänge	1,0	0,5	1.4301
Grobsieb	Masche	Kantenlänge	2,0	0,8	1.4301
Grobsieb	Loch	Lochdurchmesser	1,5*	1,0	1.4301
Feinrechen	Spalt	Stababstand	2,0	2,0	1.4301

* Das Lochfeld besitzt eine Diagonale von 2,5 mm

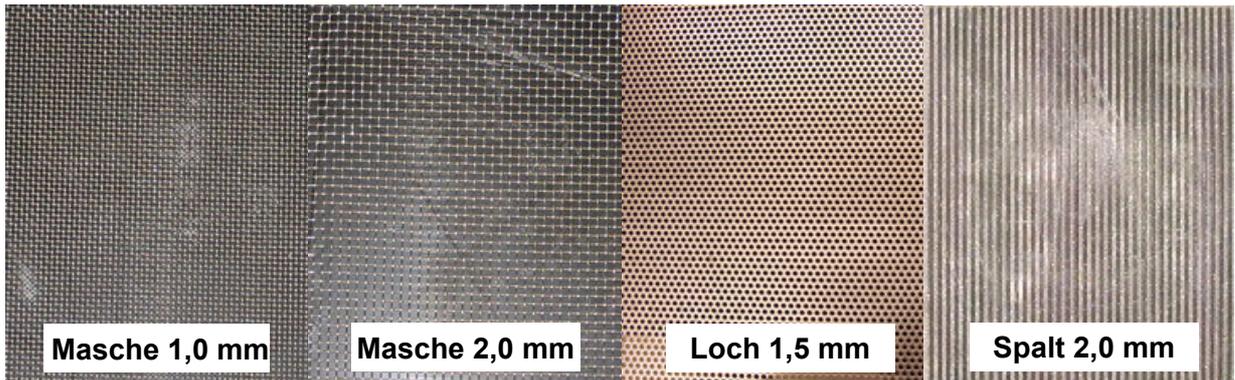


Abbildung 28: Vorsiebe und Feinrechen der Pilotanlage

4.6 Hinweise zu den Piktogrammen

Parallel zur Pilotanlagenentwicklung wurden Piktogramme entworfen, die die Nutzung der Anlage auf möglichst einfache Weise erklären sollen. Die Piktogrammentwicklung wurde zusammen mit der Firma Grafikwerk Eulen, Bochum, durchgeführt, die über weitgehende Erfahrungen auf diesem Gebiet verfügt.

Die Aufgabe bestand in der Entwicklung von Piktogrammen, die die Nutzung der Pilotanlage einfach und kulturell übergreifend erklären. Dazu wurden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft die darzustellenden Abläufe erarbeitet. Dargestellt werden sollte, wie das verunreinigte Wasser gesammelt, in die Anlage eingefüllt, und anschließend in aufbereiteter Form entnommen werden kann. Schließlich muss dem Nutzer suggeriert werden, dass entnommene Wasser trinken zu können. Es muss demnach deutlich werden, dass die Anlage zur Wasseraufbereitung dient, also ausschließlich positiven Nutzen für den potentiellen Anwender besitzt.

In Abbildung 29 ist das Resultat der Entwicklungsarbeit in Form von vier Piktogrammen, hervorgegangen aus verschiedenen Entwurfs- und Korrekturstadien, dargestellt.

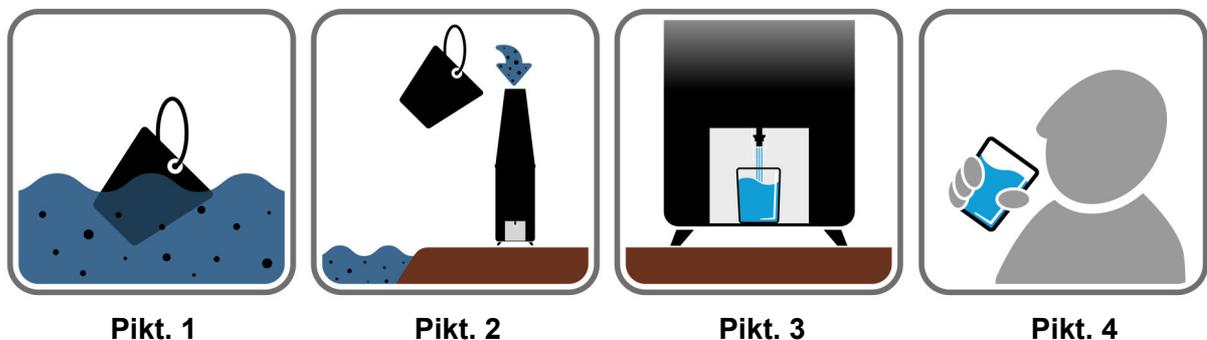


Abbildung 29: Piktogramme 1-4 der Pilotanlage

Ein Auszug aus dem Gestaltungskonzept:

Für die Darstellung der einzelnen Abläufe ist ein vereinfachender Illustrationsstil gewählt ohne wichtige Details zu vernachlässigen, siehe z.B. den Abfüllhahn auf Piktogramm 3.

In Piktogramm 4 ist der Mensch, der das gefilterte Wasser trinkt, bewusst in einer ethnisch neutralen Form und Farbe dargestellt.

Die genutzten Farben sind aus der Natur entnommen, um sie so allgemein verständlich zu halten. Blau für Wasser und Braun für die Erde / den Untergrund. Die künstlichen Objekte (Eimer, Filtrationsgerät) sind in Schwarz dargestellt, um die Anzahl der Farben gering zu halten und auch keine Farben zu zeigen, die evtl. in verschiedenen Kulturkreisen eine andere Bedeutung haben.

Dadurch, dass in jedem Piktogramm immer wieder ein Element des Vorangegangenen auftaucht (verunreinigtes Wasser in Pikt. 1, 2 – Untergrund in Pikt. 2, 3 – Wasserglas in Pikt. 3, 4), bekommt die Reihe einen optischen Fluss und erhöht somit die Verständlichkeit der Nutzung der Anlage.

grafikwerk eulen, August 2006

Die Piktogramme wurden als wetterfeste Aufkleber mit einer Fläche von jeweils 60*60 mm gefertigt und jeweils an den Anlagenoberteilen gut sichtbar positioniert.

Ein wesentliches Element zum Verständnis der Anlage ist, dass diese selbst auf den Piktogrammen dargestellt wieder erkannt wird. Daher wurde Piktogramm 2 den jeweiligen Anlagenvarianten I und II in kurzer und langer Form (vgl. Abbildung 22, Kapitel 4.1) angepasst. In Abbildung 30 sind die resultierenden Varianten von Piktogramm 2 dargestellt.



Abbildung 30: Zusätzliches Piktogramm 2 für Pilotanlagevariante I - kurz und Variante II – kurz und lang

Verfahrenstechnische Grenzen der Anlage, in der Form, das ohne Anlagenerweiterung (siehe Kapitel 4.7) kein toxisches oder ölhaltiges Wasser und auch kein Salzwasser aufbereitet werden kann/sollte, wurde nicht in die Darstellung der Piktogramme aufgenommen. Eventuelle Warnhinweise in Bildform wurden als zu missverständlich erachtet und könnten dazu führen, dass die Anlage vom potentiellen Anwender nicht für den positiven Nutzen erkannt wird.

Daher wurden ergänzend zu den Piktogrammen Schriftfelder mit einer kurzen, prägnanten Aussage entwickelt, die die verfahrenstechnischen Grenzen der Anlage involviert. Ob derartige schriftliche Ergänzungen zum Einsatz kommen sollten, wird derzeit diskutiert.

Für Demonstrationszwecke wurden die Schriftfelder in den Sprachen mit der größten Anzahl an Muttersprachlern, Hochchinesisch, Englisch, Hindi, Spanisch und Arabisch, ergänzt um Deutsch, in Form von Aufklebern erstellt. In Abbildung 31 sind die Schriftfelder dargestellt.

Do not fill with salty, oily or toxic water.

No rellenar agua salada, que contenga aceite, ni tóxica.

Kein salziges, ölhaltiges oder giftiges Wasser einfüllen.

不能注入含盐、含油或有毒的水。

لا تعبئ ماء يحتوي على الملح أو الزيت أو مواد سامة.

नमकीन, तेलिया और ज़हरीला पानी मत भर देना

Abbildung 31: Zusätzliche schriftliche Ergänzung in verschiedenen Sprachen

Die Wirkung der Piktogramme und gegebenenfalls auch der Schriftfelder wird in zukünftigen Feldversuchen zu testen sein. Fest steht, dass mit der Weiterentwicklung der Pilotanlage auch die Piktogramme weitere Entwicklungsstufen erfahren werden.

4.7 Berücksichtigte Erweiterungsmöglichkeiten

4.7.1 Anlagenortung im Einsatz

Nach Einsatz in dem beschriebenen Notfallszenario sollten die Anlagen wieder eingeholt werden. Anschließend kann die Membran auf Schäden untersucht und für den nächsten Einsatz durch eine mechanische und chemische Reinigung regeneriert werden. Um die Anlagen einerseits wieder zu finden und andererseits während des Einsatzes Kenntnis darüber zu haben, wie viele Anlagen sich an welchem Ort befinden, wird vorgeschlagen die Einheiten mit einem Ortungssystem zu versehen. Vorbehaltlich der Kosten und Reichweiten bieten sich GPS-Systeme in Verbindung mit der Datenübertragung zur Ortung über GSM / Funk oder reine Funksysteme, ohne Nutzung von Satellitensignalen, an.

4.7.2 Adsorption

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt ist es denkbar, für weniger Feststoff belastete Rohwässer eine vorgeschaltete Adsorptionsstufe in die Anlage zu integrieren. Der Einsatz von Aktivkohlen als Adsorbens in der Wasseraufbereitung ist vielfältig. Die Intention zu einem möglichen Einsatz in der Pilotanlage besteht hauptsächlich in der Möglichkeit eventuell im Rohwasser enthaltene Mineralölkohlenwasserstoffe zu binden, was letztlich auch zum Schutz der Polymermembran dient. Denkbar erscheint hier ein vor geschalteter Kornkohlefilter. Für die Untersuchungen zur Auswahl entsprechender Aktivkohlen können die Kriterien nach DVGW Arbeitsblatt W 240 (DVGW 1987) herangezogen werden. Angemerkt sei jedoch, dass durch jede weitere Verfahrensstufe in der Anlage der maximal verfügbare Transmembrandruck und damit die hydraulische Leistung der Membran verringert werden.

Eine mögliche Adsorptionsstufe wurde im Rahmen dieses Projektes für den Einsatz in der Pilotanlage lediglich durch entsprechende Halterungen im Gehäuseoberteil der langen Anlagenausführung vorgesehen. Das Erfordernis und die technische Machbarkeit einer modularen Anlagenerweiterung werden in zukünftigen Feldversuchen zu prüfen sein (siehe Kapitel 6) und sind nicht Teil dieses Projektes.

4.7.3 Nachgeschaltete Desinfektion

Eine zusätzlich in der Pilotanlage vorgesehene Erweiterungsmöglichkeit stellt eine chemische Desinfektion nach der Membranpassage als ergänzend redundante Maßnahme zum Bakterien- und weiteren Virenrückhalt dar. Zusätzlich könnte durch eine entsprechende Langzeitwirkung des Desinfektionsmittels eine Wiederverkeimung des Wassers durch verschmutzte Gefäße und falsche Lagerung vermieden werden. Geeignet erscheint nach derzeitigem Kenntnisstand der Einsatz von Chlor und Chlorverbindungen, die in einer großen Bandbreite an Produkten marktverfügbar sind. Aktuelle Entwicklungen von katalytisch wirkenden Desinfektionsmitteln sind zu prüfen.

Problematisch stellt sich in Bezug auf die Desinfektion eine ausreichende Kontaktzeit und das Einhalten von geforderten Minimal- und Maximalkonzentrationen an Chlor im aufbereiteten Wasser, z.B. nach DVGW W 290 (DVGW 2005), dar. Der Anlagendurchsatz ist i.d.R. nicht konstant, sondern sinkt über die Betriebsdauer durch die Deckschichtbildung auf der Membran stetig ab (siehe 3.4.1). Um eine einfache mechanische Zudosierung bei Einhaltung zulässiger Zugabemengen realisieren zu können wäre ein relativ konstanter Anlagendurchfluss von Vorteil. Dahingehend könnte die in Kapitel 3.4.1 geschilderte Abflussdrosselung sinnvoll sein.

Mit einer chemischen Desinfektion könnte zusätzlich die Forderung des NATO-Standards für Trinkwasser in Notfällen und Feldeinsätzen, STANAG N°2136 (NATO 2002) nach einer Mindestkonzentration von $> 0,2 \text{ mg Cl}_2/\text{L}$ im aufbereiteten Wasser, wenn keine mikrobiologischen Analysen möglich sind, erfüllt werden. Die Chlorkonzentration kann in solchen Fällen schnell mit dem dpd (diethyl paraphenylene diamine) - Indikatorrest bestimmt werden (WHO 2005, No. 11).

4.7.4 Erweiterung für den Dauerbetrieb

Die Pilotanlage ist modular aufgebaut. Durch mehrere technische Erweiterungen ist es denkbar, die Anlage über den temporären Katastropheneinsatz hinaus in ein Konzept für den Dauerbetrieb einzubinden. Dafür werden mindestens erforderlich:

- ☞ Deckschichtkontrolle:
Feinblasige Membranbelüftung mittels Kompressor oder Luftpumpe (ausreichend Platz ist in der Pilotanlage für die Belüfter vorgesehen, Kompressor oder Luftpumpe stehen extern)
- ☞ Filtrationsunterbrechung:
Temporärerer Schließen der Permeatleitung mittels Magnetventil oder mechanisch. Zyklusbeispiel (Standardeinstellung für siClaro®-Modul): 700 Sekunden Filtration (= Permeatleitung geöffnet), gefolgt von 100 Sekunden Filtrationstop (= Permeatleitung geschlossen).
- ☞ Permeatsammelbehälter

Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, die Membran nicht gravimetrisch, sondern mittels Membranpumpe zu betreiben. Möglich sind beispielsweise eine einfache Kreiselpumpe (keine Verdrängungspumpe) oder eine handbetriebene Schlauchpumpe. Sofern das Membranmodul dafür ausgelegt ist, kann dann auch eine Membranrückspülung realisiert werden. Betriebs- und verfahrenstechnisch eröffnen sich hier viele Möglichkeiten. Wichtig erscheint jedoch vor allen Dingen, dass eine derartige Anlage für den Dauereinsatz energieautark betrieben werden kann. Ein vollständig mechanischer Betrieb bei geringerer hydraulischer Leistung oder der Einsatz regenerativer Energien wie Solar- oder Windenergie sind denkbar.

4.8 Die fertig gestellte Pilotanlage

4.8.1 Daten der Pilotanlagenvarianten

In Tabelle 7 werden die durch den modularen Aufbau kombinierbaren Anlagenvarianten mit Angaben Nutzvolumen und Gewicht aufgelistet. Gewichts- und Volumenangaben sind gerundet.

Tabelle 7: Anlagenvarianten, Eigenschaften

Variante (Nr.)	Beschreibung (Form)	Gehäuse (Material)	H _{ges} [mm]	TMD _{max.} [mbar]	m _{Gehäuse} [kg]	m _{Anlage} [kg]	m _{gefüllt} [kg]	V _{Nutz} [L]
I	geschrägt kurz	PVC Glas	1100	80	25	33	115	82
I	geschrägt lang	PVC Glas	1600	130	30	38	160	122
I	geschrägt kurz	PVC blau	1100	80	25	33	115	82
I	geschrägt lang	PVC blau	1600	130	30	38	160	122
II	gerade kurz	PVC blau	1100	80	26	34	130	96
II	gerade lang	PVC blau	1600	130	33	41	205	164

In Bezug auf das Gesamtgewicht der Anlage sei angemerkt, dass durch den Einsatz anderer Materialien (siehe Kapitel 4.3) für eine mögliche Serienproduktion Potential zur Verringerung besteht.

4.8.2 Stückliste und Explosionszeichnung

In Tabelle 8 sind die einzelnen Komponenten der Pilotanlage in derzeitiger Ausführung, d.h. zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Endberichtes, in einer Stückliste angegebenen.

Tabelle 8: Stückliste der Pilotanlage (vorläufige Ausführung)

Position	Bezeichnung	Einbau	Beschreibung/Bezeichnung	Anzahl
1	Gehäuseoberteil		PVC-Glas / PVC-blau, 6mm Extruderplatten, geschweißt	1
2	Gehäuseunterteil		PVC-Glas / PVC-blau, 6mm Extruderplatten, geschweißt	1
3	Vorsieb / Rechen	Gehäuseoberteil	1.4301, 200*200mm, Loch/Masche/Rechen (optional)	1
4	Dichtungsband	Gehäuseoberteil	Polyurethan, 8 mm, ca. 1,6 m lang, rund, verklebt	1
	Gehäuseverbindung	Gehäuseober/unterteil	1.4301, Schnellspanner verstellbar	2
5	Membranabdeckung	Gehäusesunterteil	PVC-Glas / PVC-blau, 6mm Extruderplatte, 300*300 mm	1
6	Membranmodul (MF)	Gehäusesunterteil	Polymerplattenmembran (siClaro®FM 6), 6 m ²	1
7	Membrandämpfung	Gehäusesunterteil	Polystyrolschaum, 30 mm Extruderplatten, ca. 0,8 m ²	1
8	Membranauflager	Gehäusesunterteil	Polystyrolschaum, 30 mm Extruderplatten, ca. 0,4 m ²	4
9	Permeatleitung	Gehäusesunterteil	PVC Trinkwasserschlauch, 1/2", ca. 0,3 m	1
10	Schlauchschellen	Gehäusesunterteil	1.4301, 16-27 mm	4
11	Desinfektionsvorrichtung (opt.)	Gehäusesunterteil	PVC-Glas / PVC-grau, 5 mm Extruderplatten geschweißt	1
12	Sicherheitsschnellkupplung	Gehäusesunterteil	1.4301	1
13	Schnellkupplung	Gehäusesunterteil	1.4301, 1" IG	1
14	Behälteranschluss mit Dichtung	Gehäusesunterteil	PVC, 1" (an Drehbank modifiziert)	1
15	Fitting	Gehäusesunterteil	PVC, 1":1/2" (an Drehbank modifiziert)	1
16	Permeathahn	Gehäusesunterteil	Kugelhahn mit Automativerschluß, 1/2" AG	1
17	Trageriemen Rückseite	Gehäusesunterteil	Schulteriemen	2
18	Rückenpolster	Gehäusesunterteil	Kunstleder, PP-Schaum, PVC-Platte, 380*500 mm	1
18	Tragegriffe Seite	Gehäusesunterteil	1.4301, gelenkig	2
19	Standfüße	Gehäusesunterteil	M 16 Gewindestangen mit Kunststofffuß	4
20	Piktogramme	Gehäuseoberteil	Aufkleber (Folie, UV-beständig)	12
21	Schriftzüge	Gehäuseoberteil	Aufkleber (Folie, UV-beständig)	2
22	Schrauben	Standfüße	M 16, 1.4301	4
23		Schulteriemen	M 6, 1.4301	6
24		Rückenpolster	M 8, 1.4301	4
25		Tragegriffe Seite	M 8, 1.4301	8
26		Vorsieb/Rechen	M 6, 1.4301	4
27		Membranabdeckung	M 6, 1.4301	4
28		Gehäuseverbindung	M 8, 1.4301	10

Für eine bessere Übersicht über die einzelnen Anlagenkomponenten und den Anlagenaufbau, ist in Abbildung 32 eine Explosionszeichnung der Anlagenvariante I abgebildet. Plot und Digitalfassung der Zeichnung sind dem Endbericht beigelegt.

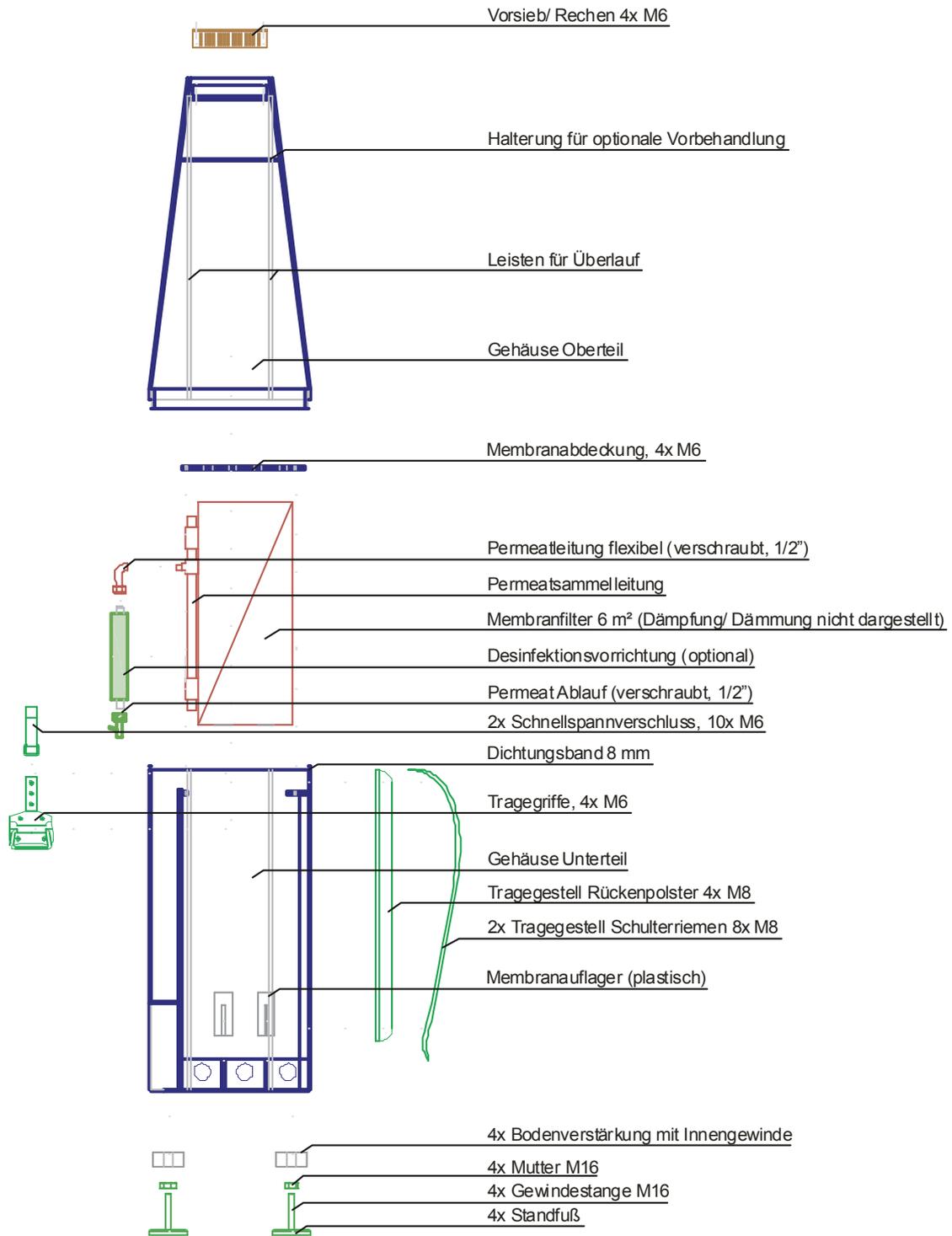


Abbildung 32: 2-D-Explosionszeichnung (Anlagenvariante I in langer Ausführung), Ausschnitt aus technischer Zeichnung

4.8.3 Illustrationen

In Abbildung 33 ist die fertiggestellte Demonstrationsanlage aus PVC-Glas in den hergestellten Varianten, ohne Piktogramme, dargestellt. Die Anlagenversion für Feldversuche aus PVC-blau zeigt Abbildung 34.



Abbildung 33: Pilotanlage in PVC-Glas (Darstellung ohne Piktogramme)



Abbildung 34: Pilotanlage in PVC-blau (Darstellung ohne Piktogramme)

In Abbildung 35 sind verschiedene Ansichten der Pilotanlage mit Piktogrammen dargestellt.



Abbildung 35: Pilotanlage mit Piktogrammen – verschiedene Ansichten

In den Abbildung 36 bis Abbildung 38 wird die Endmontage der Pilotanlage illustriert.



Abbildung 36: Einsetzen von Membrandämpfung und Membranmodul



Abbildung 37: Einbau Permeathahn, Permeatleitung und obere Membrandämpfung



Abbildung 38: Einbau Membranabdeckung, Vorsieb, Aufsatz Gehäuseoberteil

5 ABGRENZUNG ZUM STAND DER TECHNIK

Das Spektrum mobiler Trinkwasseraufbereitungssysteme reicht heute von einfachen Reisefiltern, i.d.R. auf keramischer Mikrofiltrationsmembran basierend, bis hin zu hoch technisierten Containeranlagen, die als letzte Verfahrensstufe eine Umkehrosmoseeinheit aufweisen. Mobile Lösungen können heute über nahezu jede Aufbereitungsstufe wie in großtechnischen Wasseraufbereitungsanlage verfügen (vgl. Merkl 2000).

Bei genauer Betrachtung können die angebotenen Systeme zwischen den handbetriebenen Reise/Expeditionsfiltern und den gravimetrisch betriebenen Tropffiltern für die Grundversorgung bis maximal 20 Personen, den so genannten Feldfiltern für die Versorgung einiger 100 Personen und den höher technisierten, elektrisch betriebenen Anlagen für die Versorgung von bis zu mehreren 1000 Personen unterschieden werden. Eine Auswahl an Reisefiltern / Expeditionsfiltern wurde durch das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft für Vergleichsuntersuchungen eigen finanziert angeschafft.

In Tabelle 9 wird ein Überblick über die derzeit verfügbare Verfahrenstechnik, gegliedert nach Herstellern, gegeben, wobei die angegebene Produktpalette keinen Anspruch auf Vollständig besitzt. Die aufgelisteten Produkte sind für Ihren Bestimmungszweck gut geeignet. Nach derzeitigem Kenntnisstand erfüllt jedoch keine Anlage die gestellten Anforderungen, wie sie aus dem in Kapitel 1 geschilderten Lösungsansatz hervorgehen, zur Gänze.

Oftmals sind die Bedienung und die Inbetriebnahme aufgrund von beweglichen Einzelkomponenten relativ kompliziert. Vergleichbare Kleingeräte verfügen über relativ geringe Filterflächen von mehreren Quadratcentimetern, was sie für die Aufbereitung feststoffbelasteter Rohwasser aufgrund der hohen Verstopfungsanfälligkeit ausschließt. Dahingegen basiert das hier vorgestellte Konzept auf einer einfachen Bedienung ohne bewegliche Komponenten bei einer Filterfläche von mehreren Quadratmetern. Dieses Konzept weist keines der derzeit marktverfügbaren Systeme auf.

Konkret basiert das verfolgte Konzept auf den folgenden Merkmalen:

- A** Möglichst einfacher Aufbau
- B** Erreichen von i.d.R. Badegewässerqualität des Anlagenablaufes
- C** Grundversorgung von 50 bis 200 Personen
- D** Bedienbar auch von Analphabeten durch Piktogrammbeschreibung
- E** Fehlbedienung konstruktiv ausgeschlossen
- F** Leichte, aber dennoch robuste Ausführung
- G** Keine Fremdenergie nötig
- H** Keine Chemikalien nötig

- I Betriebsfertig lagerbar, daher schnellste Verfügbarkeit
- J Auf Standardpalette transportierbar, daher schnellst möglicher, einfacher Transport in das Einsatzgebiet
- K Durch Hubschrauber (ggfs. Fallschirm) im Einsatzgebiet absetzbar
- L Tragbar durch eine Person
- M Wiederverwendung möglich

Neben dem Überblick über die derzeit verfügbare Verfahrenstechnik ist Tabelle 9 um eine Spalte (Bemerkung) ergänzt, in der die Kürzel (A-M) der aufgelisteten Merkmale eingetragen sind, die das jeweilige Produkt nach derzeitiger Kenntnis nicht aufweist.

Tabelle 9: Übersicht ausgewählter Vergleichsprodukte

Hersteller	Produkte Verfahren	Bemerkg.	Illustration
Elga Berkefeld (Marktführer für Katastrophenhilfe) Quelle: www.berkefeld.de	Top Lite Tropffilter, Keramik + Silber eingebettet + Aktivkohle (AK) bis 4 L/h	C, D, E, F	
	FF 250, FF 500 Feldfilter, Keramik + Silber eingebettet + AK bis 500 L/h	A, D, E, (G), (I)	
	TWA 3, 6, 10 Chemische Desinf. Flockung / Fällung Adsorption (AK) Anschwemmfiltration bis 10 m³/h	A, C, D, E, F, G, H, I, (K), L	
	BERU / BERRO Vorfilter + Ultrafiltration (UF) + Umkehrosm. (RO) bis 400 m³/d	A, C, D, E, F, G, I, (K), L	
Katadyn (Marktführer für Reisefilter) Quelle: www.katadyn.ch Katadyn	Drip Tropffilter, Keramik + Silber eingebettet + AK bis 4 L/h	C, D, E, F	

Hersteller	Produkte Verfahren	Bemerkg.	Illustration
Katadyn (Fortsetzung)	Pocket Reisefilter, Keramik bis 1 L/min	C, D	 <p>Bemerkung: Beispielfhaft für verschiedene Reisefilter zahlreicher Hersteller angegeben / abgebildet.</p>
	Expedition Feldfilter, Keramik + Silber eingebettet + AK bis 240 L/h	A, C, D, E	
Interservice Water Technology Quelle: www.dws30.com	DWS 30 AK + MF für 800 L	A, C, D, E	
Tropicare Quelle: www.filtrix.com	Filtrix Filterstrohalm, MF	C, E, M	
Egner Quelle: www.thw-trinkwasser.de	AF 8 Aufstromfiltration, Flockungfiltration + AK bis 8 m ³ /h	A, C, D, E, F, G, H, I, (K), L	
Kärcher Quelle: www.karchervps.com	WTC RO bis 10 m ³ /h	A, C, D, E, F, G, I, (K), L	
Krupp Quelle: www.thw-trinkwasser.de	Krupp 8-10 Filter mit Lavakies + Kunstharz + AK (fest verlastet)	A, C, D, E, F, G, H, I, L	
Lenntech Quelle: www.lenntech.com	Ölabscheidung + Sedimentation + Sandfiltration + RO + Ionentausch bis 100 m ³ /h	A, C, D, E, F, G, H, I, (K), L	Keine Abbildung erhältlich

Hersteller	Produkte Verfahren	Bemerkg.	Illustration	
<p>TESLA</p> <p>Quelle: www.tesla.cz</p>	<p>VIWA</p> <p>Inklusive mobiler PET-Flaschen- Bläseerei bis 5 m³/h</p>	<p>A, C, D, E, F, G, H, I, (K), L</p>		
<p>Zenon</p> <p>Quelle: www.zenon.com</p>	<p>ROWPU</p> <p>UF +RO bis 5 m³/h</p>	<p>A, C, D, E, F, G, I, (K), L</p>		

6 WEITERENTWICKLUNG, FORSCHUNGSBEDARF

Mit der gebauten Pilot- und Demonstrationsanlage soll die Entwicklung einer serienreifen Anlage initiiert werden. Diese Anlagen sollen es in einem Katastrophenszenario ermöglichen, pro Stück für bis zu 200 Personen Trinkwasser ausreichender Qualität extrem kurzfristig über eine Dauer von mehreren Tagen zur Verfügung zu stellen, bis reguläre Hilfskräfte eine Notfalltrinkwasserversorgung aufgebaut haben oder eine geregelte Trinkwasserversorgung wieder hergestellt werden kann.

Die Fortführung dieses Projektes besteht daher in einem zweiten Schritt, in dem der mit dem Prototyp beschrittene technologische Weg weiterentwickelt, näher erprobt und die Anlage schließlich zur Serienreife geführt werden kann.

Die in den vorangegangenen Kapiteln teilweise bereits erwähnten, sich i.d.R. gegenseitig bedingenden Aspekte zur Anlagenoptimierung werden im Folgenden aufgelistet.

Konstruktive Aspekte:

- Gehäuseaufbau, Gehäusematerial, Gewicht (siehe Kapitel 4.3)
- Standsicherheit, Anlagenschwerpunkt, Standfüße (siehe Kapitel 4.1)
- Anlagenhöhe und hydraulische Leistungsfähigkeit (siehe Kapitel 4.1 und 4.2)
- Transportvorrichtungen (siehe Kapitel 4.2)
- Farbgebung des Gehäuses für Erkennbarkeit / Signalwirkung (siehe Kapitel 4.3)
- Membranwahl, Membranweiterentwicklung (siehe Kapitel 3.4.3)
- Membrandämpfung, Membrenschutz (siehe Kapitel 4.4)
- Membranentlüftung (siehe Kapitel 3.4.1)
- Drosselung des Anlagenablaufes (siehe Kapitel 3.4.1)
- Vorsieb, Rechen (siehe Kapitel 4.5)
- Weiterentwicklung der Piktogramme (siehe Kapitel 4.6)
- Anlagenortung (siehe Kapitel 4.7.1)
- Anlagenerweiterung um eine Permeatsaugleitung (siehe Kapitel 4.2)
- Verfahrenstechnische Erweiterungen (siehe Kapitel 4.7.2 und 4.7.3)
- Erweiterung für den Dauerbetrieb (siehe Kapitel 4.7.4)

Betriebs- und verfahrenstechnische Aspekte:

- Leistungsfähigkeit hydraulisch

- Leistungsfähigkeit bzgl. Rückhalt von Bakterien und Viren
- Leistungsfähigkeit bzgl. Rückhalt von problematischen Inhaltsstoffen
- Anlagenhandling
- Betriebsweisen
- Betriebsdauer
- Prozessstabilität – Einflüsse von:
 - Rohwasserqualität
 - extreme Witterungseinflüsse
 - Membranfouling und Scaling
 - Lagerung und Nichtbetrieb
 - Trockenfallen der Membran
 - Fehlbetrieb
- Lebensdauer
- Logistik des Anlageneinsatzes
- Transport
- Überwachungsstrategien
- Redundanz des Verfahrens
- Risikoabschätzung eines Anlagenversagens durch Membranbeschädigung oder Membranverblockung
- Risikoabschätzung eines Anlagenversagens durch unsachgemäße Handhabung
- Wasserverteilung, Wasserspeicherung
- Motivation zur Nutzung der Anlage, Psychologie, Gruppendynamik

In der Regel wird die Anlage im verfolgten Anwendungsfall von fachfremden Personen unter starker körperlicher und psychischer Belastung, die zudem in einer Gruppe agieren müssen, betrieben. In dieser Situation muss die Anwendung der Anlage zunächst akzeptiert und als sinnvoll erkannt werden. Aspekte, die auch bei technischer Machbarkeit einen erfolgreichen Anlageneinsatz stark gefährden können. Soziokulturelle und umweltpsychologische Untersuchungen zur Anlagenanwendung sind daher in Folgeuntersuchungen von extremer Wichtigkeit.

Die genannten Aspekte sind unter möglichst realen Bedingungen mit mehreren zu bauenden Pilotanlagen unterschiedlicher Modifikation im Rahmen eines wissenschaftlichen Testprogramms im In- und Ausland zu untersuchen. Die Untersuchungen eines derartigen Folgeprojektes zeichnen sich durch eine große Interdisziplinarität aus. Hilfsorganisationen und Fachdisziplinen wie Soziologie, Psychologie, Ethnologie und Medizin sind mit einzubeziehen.

7 MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER VORHABENSERGEBNISSE

Die Pilotanlage wird der Deutschen Bundesstiftung öffentlich präsentiert. Dazu werden Vertreter von Hilfsorganisationen, Anlagenbau und Politik eingeladen, um in einem anschließenden Fachgespräch das Projektergebnis zu diskutieren.

Des Weiteren wurde eine Kurzfassung des Projektes für die „4th IWA International Membranes Conference, 15th-17th May 2007 Harrogate, England“ eingereicht. Ein Bescheid über die Annahme steht noch aus.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In Rahmen dieses Projektes wurde eine Pilotanlage zur Aufbereitung von Trinkwasser aus Oberflächenwasser für die Grundversorgung von Gruppen mit 50 bis 200 Personen in Notsituationen entwickelt und gebaut. Den verfahrenstechnischen Kern bildet eine gravimetrisch betriebene Mikrofiltrationsmembran mit 6 m² effektiver Filterfläche in Verbindung mit einer vorgeschalteten Grobstoffabtrennung. Dadurch werden der weitestgehende Rückhalt von Feststoffen und von Bakterien und Viren realisiert.

Entstanden sind zwei Anlagen, deren Bauhöhe durch unterschiedliche Aufsätze variiert werden kann, was zu unterschiedlichen hydraulischen Leistungen führt. Eine der Anlagen ist transparent ausgebildet. Sie dient als Demonstrationsobjekt und kann für die Durchführung von Strömungsversuchen herangezogen werden, während die andere Anlage, farblich gehalten und leicht verstärkt, die Grundlage für zukünftige Feldversuche schafft. Detaillierte Konstruktionspläne liegen diesem Bericht bei.

Wesentliche Anlagenmerkmale sind:

- Möglichst einfacher Aufbau
- Erreichen von i.d.R. Badegewässerqualität des Anlagenablaufes
- Bedienbar auch von Analphabeten durch Piktogrammbeschreibung
- Fehlbedienung konstruktiv ausgeschlossen
- Leichte, robuste Ausführung
- Keine Fremdenergie nötig
- Keine Chemikalien nötig
- Betriebsfertig lagerbar, daher schnellste Verfügbarkeit
- Auf Standardpalette transportierbar, daher schnellst möglicher, einfacher Transport in das Einsatzgebiet
- Durch Hubschrauber (ggfs. Fallschirm) im Einsatzgebiet absetzbar
- Tragbar durch eine Person
- Wiederverwendung möglich

Diese Merkmale bilden die Grundlage für die verfolgte Anwendung in einem Notfallszenario: Die Hilfsbedürftigen müssen für eine Übergangszeit von wenigen Tagen – bis eine geregelte Versorgung hergestellt ist – ihr Trinkwasser selber aufbereiten. Die Pilotanlage ist somit für den Betrieb über mehrere Tage, auch bei hoher Feststoffbelastung des zur Verfügung stehenden Rohwassers, ausgelegt. Dazu wurden im Vorfeld des Pilotanlagenbaus Vorversuche unter Laborbedingungen durchgeführt, in denen verschiedene Membrantypen untersucht wurden.

Zunächst in die Pilotanlage eingebaut wurde eine nach bisherigen Kenntnissen am geeigneten erscheinende Markt verfügbare polymere Plattenmembran. Das Anlagengehäuse ist jedoch so ausgebildet, dass auch andere Membransysteme eingesetzt werden können.

Generell ist die Anlage modular aufgebaut und dadurch verfahrenstechnisch erweiterbar. Eventuellen Erweiterungsmöglichkeiten wurde durch bereits vorgesehene Freiräume und Halterungen im Anlagengehäuse Rechnung getragen.

Die verfolgte Zielsetzung konnte mit der gebauten Pilotanlage umgesetzt werden. Zukünftig soll das Anlagengehäuse derart weiterentwickelt werden, dass es einem Abwurf aus der Luft standhält. Außerdem wird in der weiteren Entwicklung das Gesamtgewicht der Anlage zu optimieren sein.

Parallel zum Anlagenbau wurden Piktogramme entwickelt, die die Nutzung einfach und kulturell übergreifend erklären. Jeder Mensch soll dadurch in die Lage versetzt werden, die Anlage richtig zu betreiben, wobei ein Fehlbetrieb konstruktiv ausgeschlossen werden kann.

Mit dem Bau der Pilotanlage soll eine intensive Weiterentwicklung bis zur Serienreife der Anlage initiiert werden. Kernpunkte dieser Entwicklungsarbeit, die hauptsächlich auf der Basis von Feldversuchen durchzuführen sein wird, gehen aus diesem Bericht hervor.

Die Perspektive besteht darin, dass zukünftig Serienanlagen von nationalen und internationalen Hilfsorganisationen, nichtstaatlichen wie auch staatlichen Stellen weltweit für den Einsatz in Katastrophenfällen vorgehalten werden.

Aufgestellt:

Kassel, den 27.09.2006

Univ.-Prof. Dr.-Ing. F.-B. Frechen

Dipl.-Ing. A. Waldhoff

9 LITERATURVERZEICHNIS

DIN 28004/1 (1988)

Fließbilder verfahrenstechnischer Anlagen, Begriffe, Fließbildarten, Informationsinhalt. Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Nachfolgedokument: DIN EN ISO 10628.

DIN 28004/3 (1988)

Fließbilder verfahrenstechnischer Anlagen, Graphische Symbole. Normenausschuss Chemischer Apparatebau (FNCA) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Normenausschuss Zeichnungswesen (NZ) im DIN. Nachfolgedokument: DIN EN ISO 10628.

DIN 19595/2 (2002)

Kläranlagen – Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen. Teil 2: Besondere Baugrundsätze für Einrichtungen zum Abtrennen und Eindicken von Feststoffen. Normenausschuss Wasserwesen (NAW) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 13382 (2003)

Flachpaletten für die Handhabung von Gütern – Hauptmaße. Normenausschuss Verpackungswesen (NAVp) im DIN deutsches Institut für Normung e.V.

DVGW Arbeitsblatt W 240 (1987)

Beurteilung von Aktivkohlen für die Wasseraufbereitung. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn.

DVGW Arbeitsblatt W 270 (1999)

Vermehrung von Mikroorganismen auf Werkstoffen für den Trinkwasserbereich – Prüfung und Bewertung. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn.

DVGW Arbeitsblatt W 290 (2005)

Trinkwasserdesinfektion – Einsatz- und Anforderungskriterien. Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V., Bonn.

Bundesgesetzblatt (2001)

Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001), seit 1. Januar in Kraft.

Frechen F.-B., Waldhoff A. (2005)

Water supply from surface waters with a small gravity flow membrane filtration unit for use in cases of disasters. Manuscript for the international Conference on Wastewater Reclamation and Reuse for Sustainability, WRRS 2005, Nov. 8.-11.2005, Jeju Island, Korea.

Gimbel R., Hagemeyer G. (2003)

Anforderungen an die Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung. In: Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. Begleitbuch zur 5. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, 30.09.-1.10.2003.

GTZ – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (2006)

Anzahl der Naturkatastrophen und der dadurch entstandene Schaden weltweit. Diagramm entnommen von: <http://www.gtz.de/de/themen/uebergreifende-themen/nothilfe/1817.htm>.

Köster S., Baumgarten S. (2005)

Einsatz der Membrantechnik zur mobilen Aufbereitung von Trinkwasser in Katastrophenfällen. In: Membrantechnik in der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. Begleitbuch zur 6. Aachener Tagung Siedlungswasserwirtschaft und Verfahrenstechnik, 26.10.-27.10.2005.

Kommission der EG (1976)

Richtlinie 76/160/EWG des Rates über die Qualität der Badegewässer, zuletzt geändert 1991.

Kommission der EG (1998)

Richtlinie (98/83/EC) des Rates über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch.

Kommission der EG (2002)

Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Qualität der Badegewässer.

Lipp P. (2005)

Membranfiltration in der öffentlichen Wasserversorgung. Tagungsunterlagen der Membrantage in Osnabrück 21.06.-23.06.2005. Gemeinschaftstagung der DWA und DVGW.

Melin T., Rautenbach R. (2003)

Membranverfahren – Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. 2. Auflage Springer Verlag Berlin.

Merkel G. (2000)

Trinkwasser-Notversorgung unter besonderer Berücksichtigung militärischer und ziviler Aspekte, Berichte aus der Wassergüte- und Abfallwirtschaft Nr. 160, Technische Universität München.

NATO Standardization Agency – NSA (2002)

Standardization Agreement, STANAG N°2136 (Edition 4). Minimum Standards of water potability during field operations and in emergency situations.

Pinnekamp J. (2006), Herausgeber

Membrantechnik für die Abwasserreinigung, Band 1, 2. aktualisierte Auflage. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. FiW Verlag Aachen.

Rautenbach R. (1997)

Membranverfahren – Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung. Springer Verlag Berlin.

Schier W. (2006)

Mechanische Abwasserbehandlung bei Membranbelebungsanlagen. Vortrag anlässlich der Kasseler Membrantage. Gemeinschaftstagung von DVGW und DWA.

Socher M., Träckner J., Biel R., Reinhold R., Krebs P. (2006)

Integrierte Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung in Katastrophengebieten – Anforderungen und Lösungsansätze. KA Abwasser Abfall (53) 9, S. 921-926.

Theilen, U. (2003)

Beschreibung des Membranbelebungsverfahrens. Membrantage in Bonn 2003. Vortragsunterlagen.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO (2003)

The United Nations World Water Development Report, Water for People Water for Life. www.unesco.org

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization – UNESCO (2006)

The United Nations World Water Development Report 2, Water a shared responsibility. www.unesco.org

Waldhoff, A. (2005)

Water supply from surface waters with a small gravity flow membrane filtration unit for use in cases of disasters. 1st National Young Researchers Conference “Emerging Pollutants and Emerging Technologies“. Poster Exhibition. Aachen.

World Health Organization. (1993)

Guidelines for drinking-water quality, Volume 1: Recommendations. 2nd edition, Geneva.

World Health Organization. (1996)

Guidelines for drinking-water quality, Volume 2: Health criteria and other supporting information. 2nd edition, Geneva.

World Health Organization. (1997)

Guidelines for drinking-water quality, Volume 3: Surveillance and control of community systems. 2nd edition, Geneva.

World Health Organization. (2005)

Technical Notes for Emergencies No. 5: Emergency treatment of drinking water at point of use, www.who.int

World Health Organization. (2005)

Technical Notes for Emergencies No. 9: Minimum water quantity needed for domestic use in emergencies, www.who.int

World Health Organization. (2005)

Technical Notes for Emergencies No. 11: How to measure residual in water, www.who.int

Anhang

Liste beigelegter technischer Zeichnungen der Pilotanlage.

Bezeichnung	Maßstab	Menge (Plot)	Format (digital)
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Az 23860_Datum	-	-	dwg 2005, dxf
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Schnitte_1:2_Datum	1:2	1	pdf
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Schnitte Var.I_1:5_Datum	1:5	1	pdf
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Ansichten Var.I_1:5_Datum	1:5	1	pdf
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Varianten_1:5_Datum	1:5	1	pdf
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Packmaß_1:10_Datum	1:10	1	pdf
FG_SiWaWi_DBU_Pilot_Explosion_1:5_Datum	1:5	1	pdf