



Entwicklung und Erprobung innovativer Technologien zur Steigerung des ökologischen und ökonomischen Nutzens einer autonomen Wasseraufbereitungsanlage

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert durch die Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)
unter dem Az: 37166/01

Verfasst von Kirstin Neumann, Anna Radcenko, Regina Martina Findling, Frank Grüneberg

Magdeburg, 31.01.2024

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **37166/01**Referat **23**

Fördersumme

87.318,-€

Antragstitel **Entwicklung und Erprobung innovativer Technologien zur Steigerung des ökologischen und ökonomischen Nutzens einer autonomen Wasseraufbereitungsanlage**

Stichworte

Laufzeit

17

Projektbeginn

02.06.2022

Projektende

31.10.2023

Projektphase(n)

7

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger

Inflotec GmbH
Ölweide 20
39114 Magdeburg

Tel **01623312621**

Fax

Projektleitung

Regina Martina Findling

Bearbeiter

Regina Martina Findling

Kooperationspartner

Hochschule Magdeburg Stendal
Breitscheidstr. 2
39114 Magdeburg

Tilia GmbH
Inselstraße 31
04103 Leipzig

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

In Anbetracht der wachsenden Weltbevölkerung und dem exzessiven Verbrauch von Süßwasser zu industriellen und landwirtschaftlichen Zwecken, ist zunehmend Wasserknappheit zu verzeichnen. Aktuell sind 10% der globalen Bevölkerung der Zugang zu Trinkwasser verwehrt. Ungleich höher, mit 28% fällt die Versorgung mit Zugang zu sauberem Wasser für die tägliche Hygiene aus. Ziel ist es das bisher ungenutzte Oberflächenwasser nutzbar zu machen.

In Kooperation mit der Hochschule Magdeburg–Stendal sollte eine autarke Wasseraufbereitungsanlage konstruiert und gebaut werden, anschließend sollten neue Einzelkomponenten - Filter und Katalysator – hinzugefügt werden, welche in Kombination mit einem Rückspül- und Rückführungssystem die Wasserqualität weiter erhöhen und die Wasseraufbereitungsanlage vor längeren Stillstandzeiten schützen. Die bisher verwendete Keramikmembran sollte durch einen Prototyp einer beschichteten Keramikmembran ersetzt werden. Diese Membran ist besonders resistent gegen Fouling und ist im Gegensatz zu gewickelten Membranen bzw. Umkehrosmosefiltern besonders langlebig. Eine Verlängerung der Lebensdauer sollte auch der Einsatz des Katalysators herbeiführen. Hierbei sollte das sogenannte MOLLIK-Verfahren angewendet werden. Damit die Wasseraufbereitungsanlage besonders nachhaltig und umweltschonend ist, sollte bei dem geplanten Rückspül- und Rückführungssystem darauf geachtet werden, dass diese ohne den Einsatz von Chemikalien erfolgen. Es wurde bereits während des Entwicklungsprozesses auf eine Materialwahl mit hoher Recyclingfähigkeit geachtet.

Die nachgewiesene Funktionalität ermöglicht, dass die Wasseraufbereitungsanlage an alle Bedingungen und ökologischen Herausforderungen angepasst werden kann. Durch eine Kooperation mit der Tilia GmbH sollte die Grundlage für die spätere technologische Verwertung der Projektergebnisse erarbeitet werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen des Projektes steht der Fokus auf der Entwicklung und der Erprobung innovativer Technologien zur Steigerung des ökologischen und ökonomischen Nutzens einer autonomen Wasseraufbereitungsanlage.

Im Rahmen der Projektlaufzeit sind nachfolgend die Aktivitäten durchgeführt wurden.

Im ersten Schritt erfolgte die Konstruktion und Bau der autarken Wasseraufbereitungsanlage und die Vermessung der Anlage hinsichtlich der Druckverhältnisse und Wasserqualität. Anschließend erfolgte ein Dauertest mit geimpftem Wasser, um ausreichend Daten und Informationen über den Istzustand zu erhalten.

Im nächsten Schritt wurden die Einzelkomponenten, wie beschichtete Membran und Katalysator aber auch das Rückspül- und Rückführungssystem integriert und anschließend ausreichend getestet.

Hierbei wurden insgesamt 6 Testfälle untersucht und in entsprechenden Modifikationsschritten dokumentiert und festgehalten. Folgende Modifikationen wurden getestet:

- Ergänzung „Purification-Anlage“ mit einem NF-Membranmodul
- Herausnahme UF Membranmodul und Parallel Test nur NF-Membranmodul mit UV-Desinfektion und MOL@LIK mit NF - Membranmodul mit UV- Membranmodul
- UF Membranmodul -+ Aktivkohle + UV-Desinfektion
- NF Membranmodul von inopor
- zwei NF Membranmodule parallel mit UV-Desinfektion ohne UF- Membranmodul
- UF-Membranmodul, Aktivkohle und UV-Desinfektion

In der Modifikation (UF-Membranmodul, Aktivkohle und UV-Desinfektion) wurde die Reihenfolge der Desinfektion und des Aktivkohlefilters verändert. Bei Einsätzen der mobilen Purification-Anlage in entlegenen Gebieten der Welt kann es unter Umständen zu Fehlern in der Anordnung der beiden Schritte durch Unwissenheit der Anwender kommen, sollte geprüft werden, ob dennoch die Anforderungen an die Wasserqualität gemäß Trinkwasserverordnung sichergestellt ist. Diese Versuche wurden kurz nach Beginn wieder außer Betrieb gesetzt, da sich zeigte, dass der Aktivkohlefilter zu einer Wiederverkeimung und Verschlechterung der Aufbereitungsqualität führte.

In jedem Modifikationsschritt wurden Proben mit vordefinierten Parametern (nach Trinkwasserverordnung) analysiert.

Im weiteren Schritt wurden die Ergebnisse nach jeder Modifikation zusammengefasst und Schlussfolgerungen gezogen.

In den mehrmonatigen Testbetrieben erfolgte eine ausreichende Testung der Wasseraufbereitungsanlage.

Auf Grundlage der Projektergebnisse wurde seitens der Tilia GmbH eine Grundlage für die spätere technologische Verwertung der Projektergebnisse erarbeitet.

Ergebnisse und Diskussion

Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass die Modifikationen der bestehenden Wasseraufbereitungsanlage eine sichere Trinkwasseraufbereitung zulassen. Eine Desinfektionsstufe am Ende der Aufbereitung ist stets vorzusehen.

Insgesamt existiert nun ein mobiles „Purification-System“, welches modular aufgebaut ist und an die jeweiligen Rohwässer angepasst zusammengestellt werden kann. Insgesamt sind alle Anlagenteile so aufgebaut, dass sie leicht zu bedienen sind und wenig Wartungsaufwand benötigt wird. Außerdem muss der Anlagenbetreiber keine gesonderte Ausbildung besitzen, sondern es reichen anwenderspezifische Einweisungen.

In den mehrmonatigen Testbetrieben wurde eine stabile Reinigungsleistung erzielt, wobei diese unter den in Deutschland üblichen klimatischen Randbedingungen erfolgte. Für den Einsatz in Klimazonen mit sehr hohen Temperaturen müssen noch weitere Vororttests durchgeführt werden, bevor eine sichere Trinkwasseraufbereitung nach Trinkwasserverordnung garantiert werden kann. Mikrobiologische Prozesse, die beim Fouling eine wesentliche Rolle auf Membranen spielen und bei der Lagerung von aufbereitetem Wasser bis zur Verwendung eine wesentliche Rolle spielen, sind stark temperaturabhängig.

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG Modifikation 1 - Ergänzung „Purification-Anlage“ mit einem NF-Membranmodul

Die Integration einer NF-Stufe hat gezeigt, dass diese zu einer deutlichen Verbesserung der erreichten Wasserqualität führt als die Ausgangsanlage ohne NF-Modul. Die Abstimmung des UF-Moduls mit dem NF-Modul ist allerdings sehr schwierig und führt damit zu einer schlechteren Handhabbarkeit. Außerdem kann es zu Betriebsstörungen führen, welche insbesondere im autarken Betrieb vermieden werden sollten, um eine verlässliche Trinkwasserherstellung sicherstellen zu können. Die mikrobiologischen Parameter nach Trinkwasserverordnung werden in dieser Konfiguration nicht dauerhaft eingehalten. Erst durch die nachgeschaltete UV-Behandlung ist die Einhaltung aller mikrobiologischen Parameter möglich.

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG Modifikation 2 - Herausnahme UF Membranmodul und Parallel Test nur NF-Membranmodul mit UV-Desinfektion und MOL@LIK mit NF - Membranmodul mit UV-Membranmodul

Durch den MOL@LIK konnte der Durchfluss der NF-Stufe um durchschnittlich 25% erhöht werden. D.h. es können größere Feedvolumenströme behandelt werden. Bei trübstoffhaltigem Wasser wird jedoch die Oberfläche des Katalysators bedeckt, wodurch die Wirkung eingeschränkt wird. D.h., der Katalysator sollte nur bei Wässern mit geringem Trübstoffgehalt eingesetzt werden bzw. die Trübstoffe müssen vor Kontakt mit dem Katalysator entfernt worden sein. Die erreichten Aufbereitungsergebnisse veränderten sich durch den Katalysator nicht. Es wurden die gleichen Rückhalte erzielt. Damit macht der Katalysatoreinsatz nur Sinn, wenn ein größerer Feedvolumenstrom bei gleichbleibender Filterfläche behandelt werden soll. In beiden Konfigurationen zeigte sich, dass eine nachgeschaltete UV-Behandlung notwendig ist, um sicher Trinkwasserqualität produzieren zu können, obwohl die NF-Stufe bereits über 90 % auch bei der mikrobiologischen Belastung reduziert.

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG Modifikation 3 – UF Membranmodul -+ Aktivkohle + UV-Desinfektion

Diese Konfiguration erbringt gegenüber der Ausgangsanlage eine Verbesserung der produzierten Wasserqualität und kann in entsprechenden Anwendungsfällen die NF-Stufe ersetzen. Eine nachgeschaltete Desinfektion ist weiterhin notwendig, insbesondere bezüglich der mikrobiologischen Parameter.

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG Modifikation 4 – NF Membranmodul von inopor

Hinsichtlich der Handhabbarkeit hat sich das NF-Membranmodul als nachteilig erwiesen, da die Keramikmembran nicht fest mit dem Gehäuse verbunden ist und beim Einsetzen in das Gehäuse Dichtungen eingesetzt werden müssen. Diese müssen als Ersatzteile vorgehalten werden und die Nutzer müssen den Einbau der Dichtungen zuverlässig garantieren. D.h., wenn die Dichtungen vergessen werden, ist die Wirkung des Moduls nicht mehr gegeben und es kann zu Undichtigkeiten kommen. Außerdem können die Dichtungen verschleifen, was zu Undichtigkeiten und Wirksamkeitseinschränkungen der Aufbereitung führt.

Das Edelstahlgehäuse ist sehr schwer und muss mit vielen Schrauben montiert werden, was durch die unhandliche Länge nicht trivial ist und von Unerfahrenen durchgeführt werden kann. Beim Einbau der Membran in das Gehäuse wird zwangsläufig die Permeatfläche berührt, wodurch es zu Verunreinigungen durch Keime kommen kann.

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG Modifikation 5 - zwei NF Membranmodule parallel mit UV-Desinfektion ohne UF- Membranmodul

Durch diese Konfiguration konnte ein höherer Feeddurchfluss erreicht werden. Das Aufbereitungsergebnis war sehr stabil. Die Laborergebnisse konnten bei beiden Feldversuchen bestätigt werden.

Im Projekt wurde bei der Modulform und Größe festgehalten, weil auf diese alle Anschlüsse und anderen Anlagenaggregate abgestimmt sind. Außerdem kann so auch im Fall der von notwendigen Wartungen und Membranreinigungszyklen an einer der NF-Module die Wasseraufbereitung dennoch aufrechterhalten werden. (Redundanz)

Durch Post-Modifikation der UF-Membran (Nanostone) mit Polyelektrolyten entsteht eine keramische Nanofiltrationsmembran (NF) mit einzigartigen Trenn- und Materialeigenschaften. Das System ermöglicht die sichere Aufbereitung selbst von schwer behandelbaren Wasserressourcen (z.B. Flusswasser, Abwasser, Regenwasser) in einem Aufbereitungsschritt. Sowohl Partikeln (z.B. Mikroplastik), Bakterien und Viren, als auch gelöste Wasserinhaltsstoffe (Organik, Salze) werden zurückgehalten. Herkömmliche NF-Membransysteme unterliegen grundsätzlich dem Problem des Foulings (Partikeln, Organik, Ausfällungen, Biofilm), d.h. dass die Membranen mit zunehmender Betriebsdauer durch Deckschichtbildung organischer sowie anorganischer Partikeln verblocken. Durch die Integration des MOL@LIK-Katalysator zeigte sich im Praxistests eine Verbesserung der Filtrationsleistung der Membranen durch konstante Filtrationsrate. Es wurden weniger Reinigungsintervalle und eine Verlängerung der Lebensdauer beobachtet.

Durch den MOL@LIK konnte außerdem der Durchfluss der NF-Stufe um durchschnittlich 25% erhöht werden. D.h. es können größere Feedvolumenströme behandelt werden.

Im Vergleich zu herkömmlichen Umkehrosmosemembranen wird für den Betrieb weniger Energie benötigt. Es zeigt sich durch den Einsatz einer modifizierten Keramikmembran eine Vereinfachung der Wasseraufbereitung durch Umsetzung der Rückspülbarkeit und Regenerierbarkeit der NF-Trennschicht (einstufiger Prozess wegen Fouling-Resistenz). Somit entfällt bzw. reduziert sich die Vorbehandlung des Wassers durch Mikrofiltration im Vergleich mit derzeitigen NF-Systemen (Ressourcen- & Energieeffizienz).

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Es sind folgende Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse geplant:

- Veröffentlichung der Ergebnisse in (inter)nationalen Fachzeitschriften und auf Konferenzen
- Wissenschaftliche Diskussion der Forschungsergebnisse und Know How-Transfer durch Vernetzung
- Beratungsfähigkeit durch Fortentwicklung/Übertragung der Projektergebnisse auf andere technische Lösungen der mobilen Wasseraufbereitung z.B. in Kooperation mit dem Technischen Hilfswerk und dem Wasser- und Schifffahrtsamt
- Veröffentlichungen und Präsentation auf Messen (wie IFAT - Weltleitmesse für Umwelttechnologien, Hannover Messe)
- Veröffentlichungen und Präsentation in bestehenden Netzwerken, wie Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom, Clean River Solutions
- Presse und Öffentlichkeitsarbeit
- Transfer der Untersuchungsergebnisse in bestehenden Plattformen aus dem Bereich der Wasserwirtschaft, wie beispielsweise Maritimes Cluster Norddeutschland e.V.

Fazit

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Modifikationen eine sichere Trinkwasseraufbereitung zulassen. Insgesamt existiert nun ein mobiles „Purification-System“, welches modular aufgebaut ist und an die jeweiligen Rohwässer angepasst zusammengestellt werden kann. Insgesamt sind alle Anlagenteile so aufgebaut, dass sie leicht zu bedienen sind und wenig Wartungsaufwand benötigt wird. Außerdem muss der Anlagenbetreiber keine gesonderte Ausbildung besitzen, sondern es reichen anwenderspezifische

Einweisungen. In den mehrmonatigen Testbetrieben wurde eine stabile Reinigungsleistung erzielt, wobei diese unter den in Deutschland üblichen klimatischen Randbedingungen erfolgte. Für den Einsatz in Klimazonen mit sehr hohen Temperaturen müssen noch weitere Vororttests durchgeführt werden, bevor eine sichere Trinkwasseraufbereitung nach Trinkwasserverordnung garantiert werden kann. Mikrobiologische Prozesse, die beim Fouling eine wesentliche Rolle auf Membranen spielen und bei der Lagerung von aufbereitetem Abwasser bis zur Verwendung eine wesentliche Rolle spielen, sind stark temperaturabhängig.

Das Zusatzmodul MOL@LIK-Katalysator hat aufgrund seines Wirkprinzips weniger Effekte auf die Reinigungsleistung als auf die mögliche zu behandelnde Feedmenge und damit auf die notwendige Membranoberfläche. Signifikant längere Standzeiten konnten nicht nachgewiesen werden.

Die Anlage wurde so konfiguriert, dass ein autarker Betrieb prinzipiell möglich ist, wenn regenerative Energien an der Anlage direkt erzeugt und verbraucht werden kann. Die modulare Gestaltung und der Einsatz unkomplizierter Anlagenaggregate und die auf ein Minimum reduzierte Steuerung und Regelung und Integration von sicherheitstechnischen Einrichtungen (z.B. eigenständige Notabschaltung bei zu hohem Anlagendruck) führen zu einer wartungsarmen Anlage, die nur wenige Eingriffe von außen benötigt. Diese sind derart, dass es nur geschultes aber kein besonders ausgebildetes Personal benötigt. Insgesamt handelt es sich um eine Low-Cost-Anlage, die durch ihre Modularität und den möglichen Adaptionen für weitere Anwendungsmöglichkeiten in Frage kommen und somit ein breites Anwendungsspektrum abdecken kann.

Das modifizierte Wasseraufbereitungssystem kann nahezu alle Oberflächenwässer aufbereiten, die chemisch unbedenklich sind. Ihre Stärken liegen hierbei in den Bereichen der flexiblen Anwendung, da es ihre modulare Bauweise ermöglicht, sich an die verschiedenen Anforderungen der Wasseraufbereitung anzupassen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Definitionen.....	11
1. Zusammenfassung.....	12
2. Einleitung.....	14
3. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse	18
3.1 Ist-Zustandserfassung der Ausgangsanlage hinsichtlich der Druckverhältnisse und Wasserqualität	18
3.1.1 Reinstwasserversuche.....	18
3.1.2 Ist-Zustandserfassung der Ausgangsanlage	20
3.2 Modifizierung der Anlage	22
3.2.1 Testfall 1a/b: Ergänzung „Purification-Anlage“ mit NF-Membranmodul.....	22
3.2.2 Testfall 2: Herausnahme UF-Membranmodul und Parallel-Test nur NF-Membranmodul mit UV-Desinfektion und MOL@LIK mit NF-Membranmodul und UV-Desinfektion	29
3.2.3 Testfall 3: UF- Membranmodul, Aktivkohle und UV-Desinfektion.....	35
3.2.4 Testfall 4: NF inopor- Membranmodul	39
3.2.5 Testfall 5: UF-Membranmodul, Aktivkohle und UV-Desinfektion	40
3.2.6 Testfall 6: Zwei NF- Membranmodule (parallel) mit UV-Desinfektion ohne UF Modul ...	41
3.2.7 Weitere Untersuchungen	42
3.3 Untersuchungen im Dauerbetrieb	44
3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	46
3.4.1 Ökologische Bewertung.....	46
3.4.2 Technische Bewertung	46
3.4.3 Ökonomische Bewertung.....	47
3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	48
4. Schaffung einer Grundlage für die spätere technologische Verwertung der Projektergebnisse und Marktanalyse	49
4.1 Vorgehensweise der Potentialanalyse.....	49
4.2 Theoretisches Potential der Inflotec-Anlagen	50
4.3 Technisches Potential der Inflotec-Anlagen.....	51
4.3.1 Technisches Potential in der chemiefreuen Trinkwasseraufbereitung (Angebotsseite)..	51
4.3.2 Technisches Potential im Hinblick auf die deutsche Gesetzgebung (Nachfrageseite) ...	52
4.4 Ökonomisches Potential der Inflotec-Anlagen.....	53
4.5 Marktpotential.....	54
5. Fazit.....	55
6. Literaturverzeichnis	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwendete RI-Zeichen (eigene Darstellung)	11
Abbildung 2: Ausgangslage (Bild: Radcenko)	15
Abbildung 3: Membranmodul der Nanostone Water GmbH (Bild: Radcenko)	16
Abbildung 4: AMA-Filter-Laboranlage der Hochschule Magdeburg-Standal (Bild: Neumann)	18
Abbildung 5: Ist-Zustand Reinstwasser (Ausgangszustand) – spezifischer Fluss und Permeant der unterschiedlichen Membranen bei Drücken von 2 bar bis 4,5bar	19
Abbildung 6: Schema der Ausgangsanlage (Skizze: Radcenko)	20
Abbildung 7: Aufbau der modifizierten Anlage für den Testfall 1 - Ergänzung eines NF-Moduls (Bild: Inflotec)	22
Abbildung 8: Aufbau der Ausgangsanlage ergänzt um eine Nanofiltrationsstufe (Skizze: Radcenko) ..	22
Abbildung 9: Abbaugrade der einzelnen Parameter - Testfall 1a	23
Abbildung 10: Permeanz vor und nach dem Versuch für Testfall 1a	23
Abbildung 11: Testfall 1 mit geänderter Retentatführung, entspricht Testfall 1b (Skizze: Radcenko) ..	25
Abbildung 12: Abbaugrade für ausgesuchte Parameter im Testfall 1b; erster Versuch nach 24 h Betrieb	25
Abbildung 13: Abbaugrade für ausgesuchte Parameter im Testfall 1b; Wiederholung nach 24 h Betrieb	26
Abbildung 14: Testwand 1 – Versuchsabschnitt 2a: Herausnahme UF-Modul nur noch NF-Modul in Betrieb (Skizze: Radcenko)	29
Abbildung 15: Testwand 2 – Versuchsabschnitt 2b mit eingebautem MOL®LIK -Katalysator (Skizze: Radcenko)	29
Abbildung 16: Flux NF-Stufe in Abhängigkeit vom Druck für den Testfall 2a (blau) und Testfall 2b (rot)	33
Abbildung 17: Permeanz vor und nach dem Versuch; Testfall 2a und 2b	33
Abbildung 18: Fließbild Testfall 3 UF-Membran mit Aktivkohlefilter	35
Abbildung 19: Flux-Verlauf UF-Membran Testfall 3; Tag 1	36
Abbildung 20: Beispiel einer Impulsrückspülung zur Reinigung der UF-Membran in Konfiguration Testfall 3	36
Abbildung 21: Fließbild Testfall 6: Parallelschaltung von 2 NF-Stufen (Skizze: Radcenko)	41
Abbildung 22: Rückhalt einzelner Stoffe in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration	43
Abbildung 23: Resideo: Wolftechnik modifiziert von Inflotec (Bild: Radcenko)	44
Abbildung 24: Potentialpyramide für die Inflotec Anlagen (eigene Darstellung nach Kaltschmitt, Streicher, und Wiese 2020)	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispielergebnisse Aufbereitung Flusswasser (Quelle: BA Radcenko); rot die nach TWVO überschrittenen Grenzwerte	21
Tabelle 2: Beispielergebnisse Aufbereitung Ablauf Kläranlage (Quelle: BA Radcenko); rot die nach TWVO überschrittenen Grenzwerte	21
Tabelle 3: Mikrobiologische Untersuchungsergebnisse Testfall 1a	24
Tabelle 4: Ergebnisse Mikrobiologische Untersuchungen im Testfall 1b nach 24 h Betrieb	27
Tabelle 5: Testfall 2a nur NF-Membran bei 2bar chemische Analysen (DF-Drahtfilter; NF Nanofiltration); rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO	30
Tabelle 6: Testfall 2b NF-Membran mit vorgeschaltetem MOL®LIK-Katalysator bei 2 bar chemische Analysen (DF-Drahtfilter; NF Nanofiltration); rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO	31
Tabelle 7: Mikrobiologische Parameter Testfall 2a und 2b bei 2 bar nach 216h (=9Tage) Betrieb; rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO	32
Tabelle 8: Testfall 2a und 2b bei 4 bar chemische Parameter	32
Tabelle 9: Ergebnisse chemische Parameter für Testfall 3; rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO	37
Tabelle 10: Mikrobiologische Parameter Testfall 3; rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO.....	38
Tabelle 11: Ergebnisauszug Inopor-NF-Membran	39
Tabelle 12: Ergebnisauszug für Labortests und Test Klärwerksablauf und Oberflächenwasser.....	41
Tabelle 13: Ergebnisübersicht	42

Abkürzungsverzeichnis

AK	Aktivkohle
LbL-beschichtet	Layer by Layer beschichtet (dt.: Schicht auf Schicht beschichtet)
MPS	Mobile Purification System (dt.: Mobiles Aufbereitungssystem)
NF-Membran	Nanofiltrationsmembran
PAH	Beschichtung
PSS	Beschichtung
TWVO	Trinkwasserverordnung
UF-Membran	Ultrafiltrationsmembran
UV	Ultraviolett

Definitionen

- Deckschicht: Ablagerung und Anhäufung von Zulauf-Bestandteilen auf der Membranoberfläche und / oder in den Poren der Membran; verursacht während des Prozesses einen irreversiblen Rückgang des Flux.
- Flux: Filtrationsrate von Permeat; gemessen in Litern pro Quadratmeter Membranfläche je Stunde (L/m²/h)
- Permeat: Filtrat; die (gefilterte) Flüssigkeit, die durch die Membran tritt
- Retentat: Konzentrat; die verbleibende Flüssigkeit
- Zulauf (Feed): Zu konzentrierende oder fraktionierende Lösung

Übersicht der in den Fließschemata verwendeten RI-Symbole:

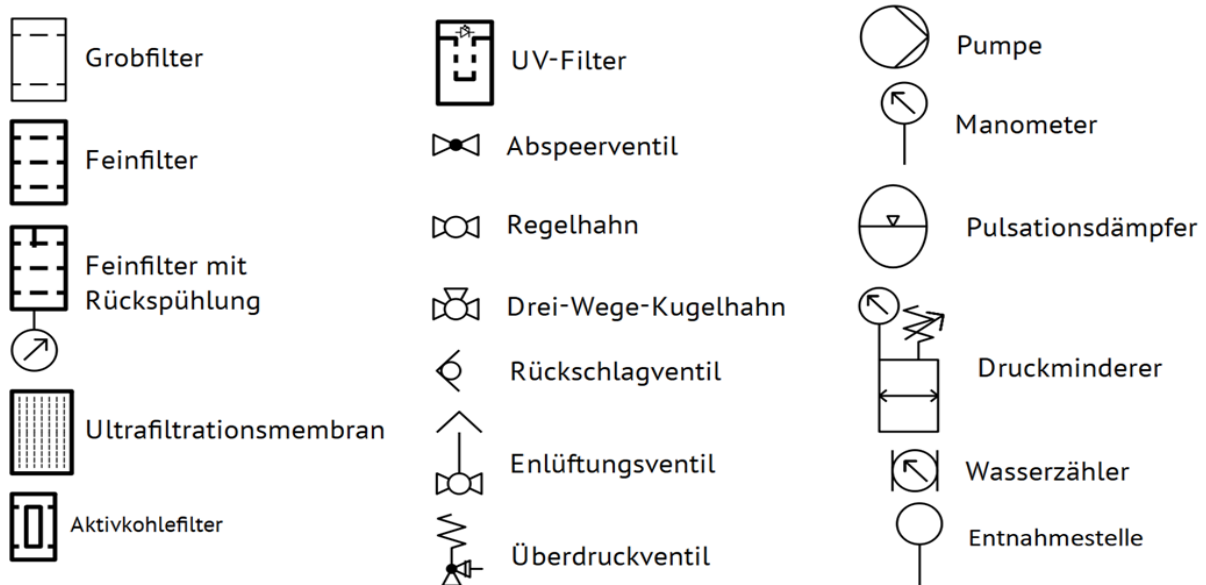


Abbildung 1: Verwendete RI-Zeichen (eigene Darstellung)

1. Zusammenfassung

Es wurde eine bereits entwickelte autarke Wasseraufbereitungsanlage so optimiert und angepasst, dass diese über einen ausreichend langen Zeitraum mit geringem Wartungs-aufwand sicher Wasser in Trinkwasserqualität produziert. Nach Aufnahme des Ausgangs-Zustandes hinsichtlich der Betriebseinstellungen und der Wasserqualität, wurde die bestehende Anlage einem Dauertest unterzogen. Danach wurden neue Einzelkomponenten, z.B. weitere Filter und / oder ein Katalysator hinzugefügt. In Kombination mit einem Rückspül- und Rückführungssystem sollten diese Zusatzkomponenten die Wasserqualität weiter erhöhen und die Wasseraufbereitungsanlage vor längeren Stillstandzeiten schützen. Die durchgeführten Optimierungen bei den Filtern betraf vor allem den Einsatz von modifizierten Keramikmembranen. In der Ausgangsanlage wurde eine einfache keramische Membran verwendet, welche durch einen Prototyp einer LbL-beschichteten Keramikmembran ergänzt wurde. Diese ist besonders resistent gegen Fouling und im Gegensatz zu gewickelten Membranen bzw. Umkehrosmosefiltern besonders langlebig. Die Ausgangsanlage erhielt damit eine weitere Filtrationsstufe, die durch die Beschichtung vom UF-Filtrationsbereich in den NF-Bereich gelangt. Hinzu kam der Einsatz eines leistungsfähigen langlebigen Metall-Katalysator aus Nickel, Chrom, Eisen und einer optimal abgestimmten Mineralschicht, der die Zyklus- und Nutzungsdauer der Membran verlängern und auch notwendige Reinigungszyklen reduzieren sollte. Die Besonderheit des MOL@LIK-Verfahrens für den Katalysator liegt in der strukturellen Behandlung von Wasser, wodurch gelöste Stoffe, auch bei technischer Beanspruchung des Wassers, in Lösung bleiben.

Es wurden folgende Konfigurationen untersucht: UF-NF-UV (Fall 1); NF-UV (Fall 2a); MOL@LIK-NF-UV (Fall 2b); UF-AK-UV (Fall 3); NFInopor-UV (Fall 4); UF-UV-AK (Fall 5) und 2NF parallel – UV (Fall 6). Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Die Kombination von UF mit NF erfüllt mit der nachgeschalteten UV-Behandlung die Anforderungen an das Trinkwasser nach TWVO. Aufgrund der schwer aufeinander abstimmbaren unterschiedlichen Membranstufen sollte diese Variante nur zum Einsatz kommen, wenn auf die UF-Stufe aufgrund der Beschaffenheit des Rohwassers nicht verzichtet werden kann. Diese Konfiguration erfordert einen erhöhten Wartungs- sowie Betriebsaufwand sowie gut geschultes Bedienpersonal.
- Die NF-Stufe erreicht sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der mikrobiologischen Anforderungen. Es kommt jedoch immer noch teilweise zu Grenzwertüberschreitungen. Deshalb ist immer eine nachgeschaltete UV-Behandlung bzw. ein anderes Desinfektions-verfahren notwendig, um die Trinkwasserqualität dauerhaft sicherzustellen.
- Die NF-Fläche muss an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden, um entsprechende Volumina aufzubereiten. Da auf standardisierte Modulgrößen zurückgegriffen wird ist hier die Parallel-Schaltung optimal. So sind flexible Einstellungen möglich und für Wartung/ Reinigung/ Revision besteht Redundanz.
- Der getestete MOL@LIK-Katalysator hat hinsichtlich des Reinigungseffektes der NF-Membran keinen signifikanten Einfluss. Aufgrund seiner Funktionsweise wird ein höherer Flux erreicht, weshalb die notwendige Membranfläche reduziert werden kann.

- Die NF-Membran der Firma Inopor erbringt prinzipiell sehr ähnliche Reinigungsleistungen, hat aber gegenüber der Nanostone-NF-Membran einige Nachteile. Dies bezieht sich auf das Handling, den Verbau sowie die Wartung/ Instandhaltung und den Betrieb.

Auf Basis der Versuchsergebnisse, kann so auch bei späteren Anwendungsanfällen die Wasseraufbereitungsanlage im späteren Einsatz an die jeweilig vorliegenden Bedingungen und ökologischen Herausforderungen angepasst werden. Die Projektergebnisse sollen mit der Tilia GmbH die Grundlage für eine spätere technologische Verwertung darstellen.

2. Einleitung

Die weiterwachsenden Weltbevölkerung, der exzessive Verbrauch von Süßwasser zu industriellen und landwirtschaftlichen Zwecken und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserverteilung führen weltweit zu zunehmender Wasserknappheit. Auch einige Länder Europas, wie zum Beispiel Spanien und teilweise auch Regionen in Deutschland werden zukünftig verstärkt mit dem Problem der Wasserknappheit konfrontiert sein. Insbesondere dann, wenn Grundwasservorkommen zu gering, erschöpft und/ oder kontaminiert sind. Aktuell sind 10 % der globalen Bevölkerung der Zugang zu Trinkwasser verwehrt (Rohde 2023). Ungleich höher, mit 28 % fällt die Versorgung mit und der Zugang zu sauberem Wasser für die tägliche Hygiene aus. In einigen Regionen müssen weite Strecken in Kauf genommen werden, um zur nächsten Trinkwasserquelle zu gelangen. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass es oftmals lokale Wasserquellen gibt, die aber wegen der Verunreinigungen ohne Aufbereitungstechnik nicht nutzbar sind, ist es dringend erforderlich entsprechende Aufbereitungstechniken zu entwickeln und zur Verfügung zu stellen.

Die Inflotec GmbH hat für dieses Problem verschiedene Offgrid-Systeme entwickelt. Die Anlagen zur Trinkwassergewinnung nutzen ausschließlich natürliche Energiequellen, so dass ein weitestgehend emissionsfreier Betrieb ohne notwendige energieinfrastrukturelle Eingriffe möglich ist. Die Systeme sind in der Lage, Oberflächenwässer verschiedener Ausgangs-qualitäten zu Trinkwasser aufzubereiten. Damit sind diese Systeme eine Alternative zur Trinkwassergewinnung für herkömmliche meist aufwändige Gewinnungstechniken, wie das Bohren von Brunnen, die insbesondere in wasserarmen Gebieten den Wasserspiegel nachhaltig senken. Negative Folgen für die Umwelt können vermieden werden. Die Inflotec-Systeme zeichnen sich durch eine schnelle Einsatzbereitschaft vor allem in abgelegenen Regionen mit schwacher Infrastruktur aus und besitzen insbesondere für den Krisen- und Katastrophenfall einen hohen Nutzwert. Durch die Nutzung natürlicher Energieressourcen ist eine unterbrechungsfreie Wasserförderung möglich. Weitere Vorteile sind durch den Einsatz von wartungsarmen Bauteilen die einfache Bedienbarkeit und Instandhaltung der Anlage.

Die Inflotec-Systeme können zukünftig vor dem Hintergrund, dass immer häufiger Mikroschadstoffe, wie z.B. Arzneimittelwirkstoffe, Hormone, Röntgenkontrastmittel, Pestizide, Mikroplastik und auch für den Menschen gefährlichen multiresistenten Keimen in Abwässer und damit auch Oberflächengewässern eingetragen und nachgewiesen (Abendblatt 2018) werden, auch in Deutschland durch Modifizierungen eine wichtige Reinigungstechnik sein.

Die konventionelle, biologische Abwasserreinigung können aufgrund ihrer Konfiguration und Betriebsweise die anthropogenen Spurenstoffe ohne zusätzliche Aufbereitungsschritte nicht vollständig eliminieren, so dass langfristig die Einführung der vierten Reinigungsstufe in Deutschland flächendeckend notwendig werden wird. Diese entlastet die Vorflutgewässer, deren natürliche Reinigungsleistungsfähigkeit bedingt durch den Klimawandel und den damit verbundenen immer längeren Trockenperioden stark eingeschränkt ist. Gerade in niederschlagsarmen Perioden kann der Anteil des eingeleiteten Abwassers am Oberflächenwasser bis zu 90 % und darüber hinaus betragen. (Anders 2016) Auftretende Starkniederschlagsereignisse führen dann durch damit verbundene Überschwemmungen dazu, dass anthropogene Spurenstoffe auf und in den Bodenkörper gelangen. Insbesondere für Oberflächenwässer, die der Trinkwasserversorgung dienen, ist das problematisch. Deshalb wurde in einigen

Bundesländern, z.B. Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen bereits die vierte Reinigungsstufe in Abwasserreinigungsanlagen großer Größenklassen verpflichtend eingeführt. Gerade auch im Hinblick auf die EU-Vorgaben zur Wasserwiederverwendung und für die Grundwasseranreicherung sowie Neuschaffung von Feuchtgebieten/ Mooren, die erhöhte Anforderungen an die Kläranlagenabläufe stellen, werden weitere Bundesländer zeitnah folgen.

Eine bereits erprobte Wasseraufbereitungsanlage der Firma Inflotec GmbH wurde im Rahmen des Projektes weiterentwickelt und mit verschiedenen Anlagenkomponenten ergänzt, um die Herstellung eines als Trinkwasser geeigneten Wassers sicherzustellen. Einzelne Modulergänzungen wurden erprobt, so dass ein Baukastensystem entstanden ist und die Anlage für den jeweils zukünftigen Einsatz an die dann vorliegenden Rahmenbedingungen angepasst werden kann. Neben der Ergänzung von Anlagenkomponenten wurde auch das Betriebsregime und das Rückspülsystem verändert und erprobt.

Die Wasseraufbereitungsanlage „Mobile Purification System“ (MPS) (vgl. Abbildung 2), bei der die zur Aufbereitung notwendigen Komponenten in einem Profilrahmen an Aluminiumverbund-Platten angeordnet sind, war zu Projektbeginn wie folgt in Reihenfolge der Filtrationsrichtung konfiguriert:

- Ansaugpumpe (Membran / Kolbenpumpe)
- Schwingungsausgleichbehälter
- Siebfilter aus Edelstahl als Vorreinigung in der Kaskadierung 100 µm und 50 µm
- Keramische Ultrafiltrationsmembran (30 nm, unbeschichtet)
- Aktivkohleblockfilter
- UV-Lampe
- Ansaugleitung
- Ableitung des Spülwassers



Abbildung 2: Ausgangslage (Bild: Radcenko)

Diese Konfiguration konnte keine sichere Trinkwasseraufbereitung hinsichtlich der mikrobiologischen Parameter sicherstellen, weshalb in der ersten Projektphase diese Anlage um weitere Komponenten ergänzt wurde:

- weiterer Siebfilter 5 µm: Dieser sollte der Überprüfung dienen, ob eine weitere Entfernung von Partikeln die Standzeit der UF-Membran verlängern kann.

- LbL-beschichtete Nanofiltrationsmembran (5 nm) als nachgeschaltete Behandlung der UF-Stufe und als Alternative zum Aktivkohlefilter
- MOL@LIK -Katalysator, der vor den keramischen Membranen angeordnet wird und durch seine Funktionsweise zur Verbesserung der Filtrationsleistung der Membranstufe dienen soll. Durch das Hinzufügen der genannten Komponenten vergrößerte sich jeweils die Aufbereitungsanlage.

Beschreibung der Wasseraufbereitungskomponente des bestehenden „Mobile Purification System“

Siebfilter:

Die Edelstahlsiebfilterkerzen werden zur Vorreinigung eingesetzt. Sie halten Partikel $>5\mu\text{m}$ zurück und verhindern damit das Zusetzen der Keramikmembrankanäle bzw. die Bildung einer zu starken Deckschicht auf der Membranoberfläche, welche die Filtrationsleistung beeinträchtigen würde. Die verschiedenen Abstufungen hintereinander ermöglichen ein gleichmäßiges Abtrennen der Partikel über die Filterkerzen und entlastet die jeweils folgende Stufe. An den Filtergehäusen befinden sich unten angeordnet stromlosschließende Magnetventile. Werden diese bei aufgebautem Druck schlagartig geöffnet, so wird die sich auf der Sieboberfläche gebildete Deckschicht durch eine Überspülung von oben nach unten abgelöst. Das Spülwasser mit den abgelösten Partikeln wird ins Entnahme-Gewässer zurückgeführt. Das Prinzip wird als Spill-down-Spülung bezeichnet.

UF-Membranmodul

Verwendet wird das Mikromodul des Herstellers Nanostone Water GmbH. Diese Module werden für R&D-Zwecke hergestellt und haben eine Größe von 30 cm. Damit sind sie insbesondere passend für sehr kleine Anlagen. Eine serielle Herstellung dieser Membranmodule für marktfertige Produkte wird in Kooperation von der Inflotec GmbH und der Nanostone Water GmbH als möglich eingeschätzt.

Die keramische Membran besteht aus Aluminiumoxid ($\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$) mit einer Porengröße von 30 nm. Die zwei Röhrenkanal-Paneele (vgl. Abbildung 3) sind fest in ein PVC-U Gehäuse verklebt. Die Filtrationsfläche beträgt $0,163 \text{ m}^2$.

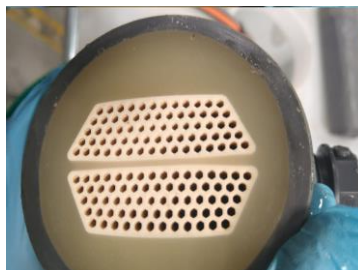


Abbildung 3: Membranmodul der Nanostone Water GmbH (Bild: Radcenko)

Mit diesem Membranmodul kann eine Ultrafiltration realisiert werden, die jedoch nicht ausreicht, um ein Trinkwasser gemäß der TWVO herzustellen, da sie nicht in der Lage ist, vollständig Keime, Mikroschadstoffe und dergleichen abzutrennen, die eine geringere Größe als 30nm haben.

UV-Lampe

Die UV-Lampe dient der Desinfektion und damit der Entkeimung, so dass das aufbereitete Wasser keimfrei ist und den Anforderungen bezüglich mikrobiologischer Parameter der TWVO genügt. Bei der eingesetzten UV-Lampe handelt es sich um das Modul Purion ©400. Die Lampe hat eine Lebensdauer von 10.000 Betriebsstunden und kann bis zu 380l/h bei 2-40°C behandeln. Die UV-Dosis beträgt 400J/m³. Diese Konfiguration reicht nicht aus, um Trinkwasserqualität in der Aufbereitung zu erreichen, weshalb folgende Modifizierungen an der Ausgangsanlage durchgeführt wurden:

- **Ergänzung Membranmodul 2:**

Der UF-Stufe wird ein zweites Membranmodul nachgeschaltet. Es handelt sich ebenfalls um ein Mikro-Modul von Nanostone Water GmbH. Dieses besitzt aber zusätzlich eine LbL-Beschichtung, welche aus mehreren Polyelektrolyten unterschiedlicher Polarisierung besteht, welche mittels Layer-by-Layer-Verfahren, welches von der Surflay Nanotec GmbH entwickelt wurde, aufgebracht wird. Durch diese Beschichtung wird ein Einsatz im Bereich der NF bei niedrigem Druck möglich. Ein hoher Anteil an Mikroschadstoffen kann zurückgehalten werden. (Projekt NaPoLy, HS MD-SDL, 2019-2022) Um die Standzeiten und den Prozess zuverlässig stabil zu halten soll zusätzlich zum zweiten Membranmodul ein Katalysator eingesetzt und getestet werden.

- **Integration des MOL@LIK-Katalysator:**

Das sogenannte MOL@LIK -Verfahren ist eine biozidfreie Technologie, die das Fouling, das Scaling und die Korrosion an Oberflächen reduziert. Den Katalysator bildet eine 20 µm dünne Metallfolie mit speziellen Halbleitereigenschaften aus einer Nickel-Chrom-Eisen-Legierung im Kern mit einer Deckschicht aus Nickel-Chrom-Eisen-Spinell. In Praxistests wurde eine Verbesserung der Filtrationsleistung der Membranen durch konstante Filtrationsrate, weniger Reinigungsintervalle und Verlängerung der Lebensdauer beobachtet (Koppe und Hesse 2019).

- **Betrieb nur mit NF und ohne UF-Stufe:**

Es wurde getestet, ob die UF-Stufe ggf. eingespart werden kann und nur die NF-Stufe bei entsprechend davorliegender Siebstufe stabil und in ausreichender Qualität Trinkwasser produzieren kann. Zudem wurde die Möglichkeit der Parallelschaltung zweier NF-Membranen zur Flexibilisierung der notwendigen Membranfläche untersucht.

Ausgehend von dem Ist-Zustand vorhandener Anlage, wurden die zusätzlichen Komponenten ergänzt und getestet. In Auswertung der Versuche, wurden durch weitere Anpassungen die Ergebnisse weiter verbessert. So wurde neben der Nanostone-NF-Membran auch eine der Firma inopor getestet sowie Möglichkeiten geprüft, um im Fall einer vorgeschalteten UF-Stufe den Permeatvolumenstrom der UF-Membran vollständig aufnehmen zu können. Außerdem wurde der Einsatz eines Aktivkohlefilters vergleichend untersucht. Die Anlage wurde für Kläranlagenablauf einer Großkläranlage sowie Oberflächenwasser (Elbwasser) auch im Langzeitversuch für drei unterschiedliche Konfigurationen erprobt, bei der auch der Rückhalt von Medikamentenrückständen untersucht wurde. Die einzelnen Komponenten wurden so getestet, dass sie entsprechend der dann vorliegenden Randbedingungen gezielt in die bestehende Ausgangsanlage integriert werden können. Es wurden Einsatzkriterien ermittelt und in der Anlagenbeschreibung für die Konfiguration hinterlegt.

3. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

3.1 Ist-Zustandserfassung der Ausgangsanlage hinsichtlich der Druckverhältnisse und Wasserqualität

3.1.1 Reinstwasserversuche

Zur Überprüfung der Permeabilität einer Membran wurde vor und nach Versuchen die Membran mit Reinstwasser beschickt. Die Gegenüberstellung der Permeabilitäten dient der indirekten Beurteilung des Zustandes einer Membran hinsichtlich möglicherweise abgetragener Beschichtung bzw. gebildeter Deckschichten und des Foulings und Scalings. Außerdem können damit verschiedene Membranmodule verglichen werden. Diese Versuche wurden im Abwasserlabor der Hochschule Magdeburg-Stendal an einer Filter-Anlage des Unternehmens amafilters durchgeführt. (vgl. Abbildung 4)



Abbildung 4: AMA-Filter-Laboranlage der Hochschule Magdeburg-Stendal (Bild: Neumann)

Alle NF-Membranen besaßen die gleiche LbL-Beschichtung. Es handelt sich um eine 8-fach-Beschichtung PAH/PSS. Diese wurde bereits in einem vorangegangenen Projekt der H2 hinsichtlich ihrer Eignung zum Rückhalt von ausgewählten Arzneistoffen und der weiteren Reinigung eines Kläranlagenablaufwassers getestet und wies eine sehr gute Performance auf. (vgl. Abbildung 5)

Alle im vorliegenden Projekt genutzten NF-Membranen waren fabrikneu und frisch beschichtet, stammen aber aus verschiedenen Chargen. Derzeit findet sich das Beschichtungsverfahren noch in der Entwicklungsphase, wodurch sich die Unterschiede bei den eingesetzten Membranen begründen lassen.

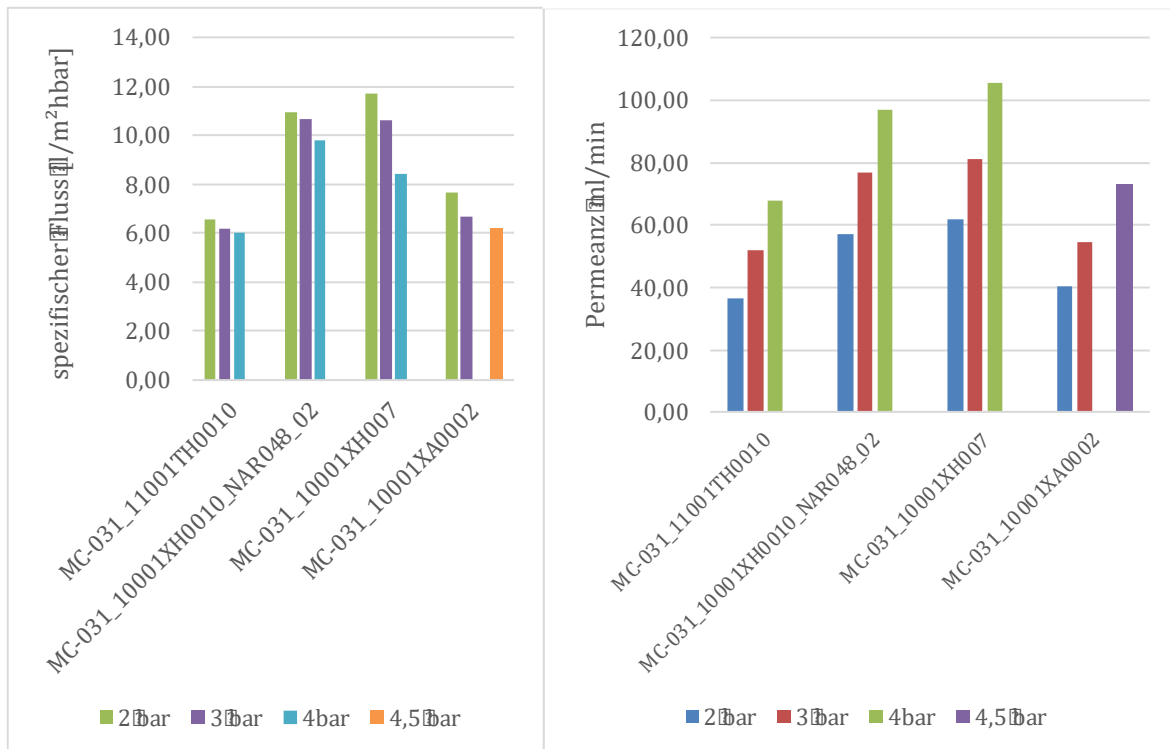


Abbildung 5: Ist-Zustand Reinstwasser (Ausgangszustand) – spezifischer Fluss und Permeanz der unterschiedlichen Membranen bei Drücken von 2 bar bis 4,5 bar

3.1.2 Ist-Zustandfassung der Ausgangsanlage

Die Ausgangsanlage (vgl. Abbildung 6) in der unter 2 beschriebenen Konfiguration, also ohne ergänzende Anlagenaggregate wie NF-Membran und MOL@LIK -Katalysator, wurde bereits vor Projektbeginn mit einem Flusswasser und einem Kläranlagenablauf betrieben und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit für eine sichere Trinkwasseraufbereitung wie im Antrag beschrieben getestet.

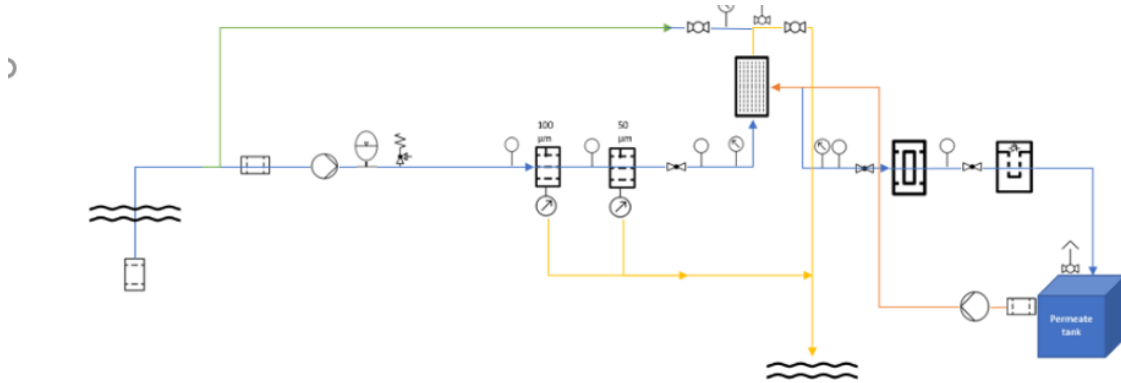


Abbildung 6: Schema der Ausgangsanlage (Skizze: Radcenko)

Hier zeigte sich, dass dieser Aufbau insbesondere hinsichtlich der mikrobiologischen Parameter (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 2) nicht geeignet war, um sicher aus unterschiedlichen Oberflächenwässern herstellen zu können. Bei den chemischen Parametern gab es lediglich geringfügige Überschreitungen bei Sulfat. Alle anderen Parameter wurden auch wenn es Überschreitungen im Rohwasser (Zufluss) gab durch die Anlagenausgangskonfiguration sicher auf Werte unterhalb der Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung reduziert.

Das bedeutet, dass die vorzunehmenden Veränderungen insbesondere auf die Reduzierung der mikrobiologischen Parameter abzielen müssen, um ein gesundheitlich unbedenkliches Trinkwasser zu erzeugen. Weitere Kriterien für Anlagenmodifikationen sind eine einfache Bedienung, ein geringer Wartungsaufwand bzw. einfache Wartungsmaßnahmen sowie eine möglichst zeitlich lange Prozessstabilität. Für einen autarken Betrieb ist zudem noch Voraussetzung, dass der Energieaufwand für den Reinigungsprozess möglichst gering ist, um diesen mit regenerativen Verfahren gewinnen und bereitstellen zu können.

Tabelle 1: Beispielergebnisse Aufbereitung Flusswasser (Quelle: BA Radcenko); rot die nach TWVO überschrittenen Grenzwerte

		Zulauf	Nach UF	Nach AK	Nach UV
E.coli	[KBE/100ml]	0	0	0	0
Enterokokken	[KBE/100ml]	0	0	0	0
Clostridium perfringens	[KBE/100ml]	44	0	0	0
Coliforme Bakterien	[KBE/100ml]	10	0	0	0
Koloniezahl bei 22°C	[KBE/ml]	7727	1955	3955	395
Koloniezahl bei 36°C	[KBE/ml]	5864	2173	5227	709
TOC	mg/l	8,35	5,1	4,88	5,04
DOC	mg/l	5,15	4,83	4,79	4,85
Chlorid	mg/l	142	142	141	n.b.

Tabelle 2: Beispielergebnisse Aufbereitung Ablauf Kläranlage (Quelle: BA Radcenko); rot die nach TWVO überschrittenen Grenzwerte

Mikrobiologie		Zuauf UF	Ablauf UF	Ablauf AK	Nach UV
E.coli	[KBE/100ml]	16000	0	0	0
Enterokokken	[KBE/100ml]	200	1	0	0
Clostridium perfringens	[KBE/100ml]	400	0	0	50
Coliforme Bakterien	[KBE/100ml]	48000	55	38	0
Koloniezahl bei 22°C	[KBE/ml]	32730	34100	30460	6180
Koloniezahl bei 36°C	[KBE/ml]	61360	42300	40000	7910
TOC	mg/l	14,4	10,5	10,22	9,77

3.2 Modifizierung der Anlage

3.2.1 Testfall 1a/b: Ergänzung „Purification-Anlage“ mit NF-Membranmodul

Testfall 1a:

Im ersten Versuch mit der Ausgangsanlage der Inflotec GmbH wurde ein Rohwasser nacheinander durch die drei Siebfilter-Abstufungen (100µm, 50µm und 5µm), darauffolgend über eine Ultrafiltrations-Membran (MC031 11001TJ0009) und eine Nanofiltration-Membran (MC-031 10001XH007) filtriert. (vgl. Abbildung 7) Abschließend erfolgte eine UV-Desinfektion.

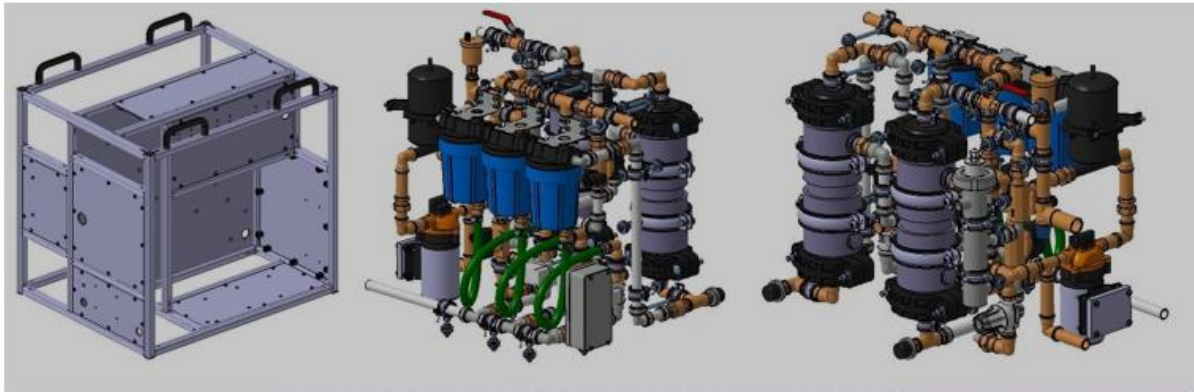


Abbildung 7: Aufbau der modifizierten Anlage für den Testfall 1 - Ergänzung eines NF-Moduls (Bild: Inflotec)

Der Druck an der Membran wird über ein Kugelhahnventil in der Retentatleitung und damit durch das Reduzieren des Volumenstroms an der ersten Membran eingestellt. Das Retentat der Ultrafiltration wurde direkt wieder über den NF-Retentatstrom vor die Beschickungs-Pumpe geführt, wobei ein Rückschlagventil verhindern sollte, dass die Fließrichtung entgegengesetzt stattfindet. (vgl. Abbildung 8) Die Beschickungspumpe fördert 176 L/h. Die Nanofiltration wird aber nur mit dem Filtrat-(Permeat-) Volumenstrom der Ultrafiltrationsstufe beschickt. Bei 2 bar beträgt dieser Volumenstrom ca. 33 L/h. Der Fluss der NF-Membran betrug 1,3l/h bei 2 bar.

Aufbau mit zwei Membranen

Filtrationsbetrieb

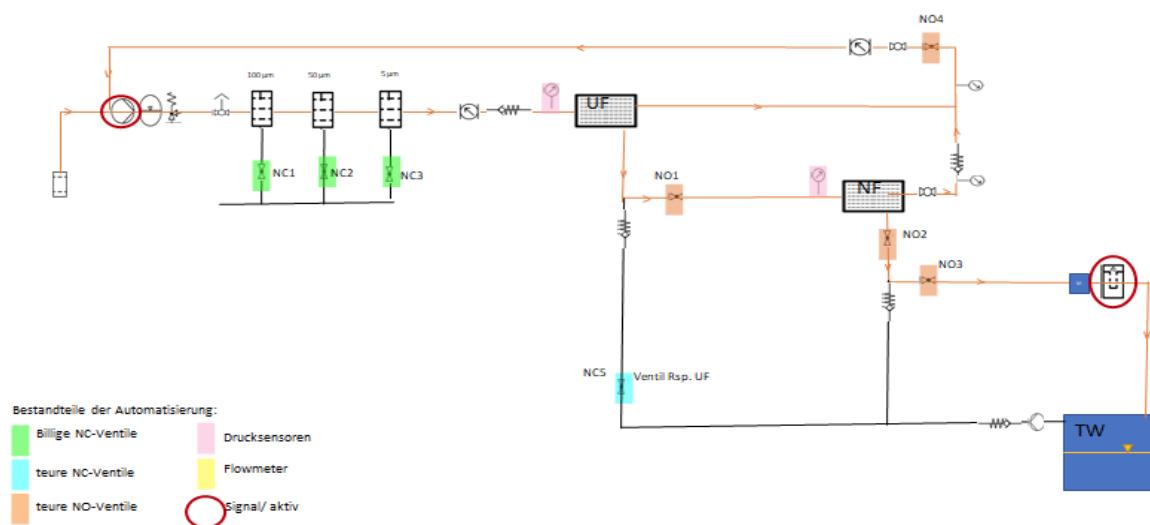


Abbildung 8: Aufbau der Ausgangsanlage ergänzt um eine Nanofiltrationsstufe (Skizze: Radcenko)

Als Rohwasser wurde das in den Ablaufschacht überlaufende Klarwasser aus einem Nachklärbecken eines kommunalen Klärwerks der Größenklasse 5 mit ca. 430.000 EW verwendet. Die Anlage wurde jeweils mindestens 24 Stunden bis zu 360 Stunden betrieben. Der unbeaufsichtigte Betrieb ist möglich, weil die Anlage mit einer Überdrucksicherung ausgestattet ist, die verhindert, dass die Anlage durch zu hohe Drücke beschädigt wird bzw. eine Gefahr für den Betreibenden entsteht. Das Überdrucksicherungsventil ist vor dem ersten Siebfilter angebracht und öffnet sich, um das Wasser aus der Anlage abzuleiten, wenn der Druck an dieser Stelle 6 bar übersteigt. In der Steuerung der Anlage ist zu dem als Abschaltkriterium für die Anlagenpumpe ein Druck von >5bar vor der ersten Membranstufe implementiert. Das ist auch für einen autarken Betrieb in späteren Anwendungen vorteilhaft.

Die erste Probe wurde nach fünf Stunden Filtrationszeit entnommen, da zum einen die Membran erst eingefahren werden muss und zum anderen die Versuche insbesondere auf die Langzeitstabilität abzielten. Eine weitere Probe wurde nach 24 Stunden analysiert. Die nach Trinkwasserverordnung festgelegten chemischen Parameter wurden in allen Teilstufen eingehalten, konnten jedoch bis auf wenige Ausnahmen jeweils weiter reduziert werden. Es wurden die Abbaugrade für die einzelnen untersuchten Parameter ermittelt. (vgl. Abbildung 9)

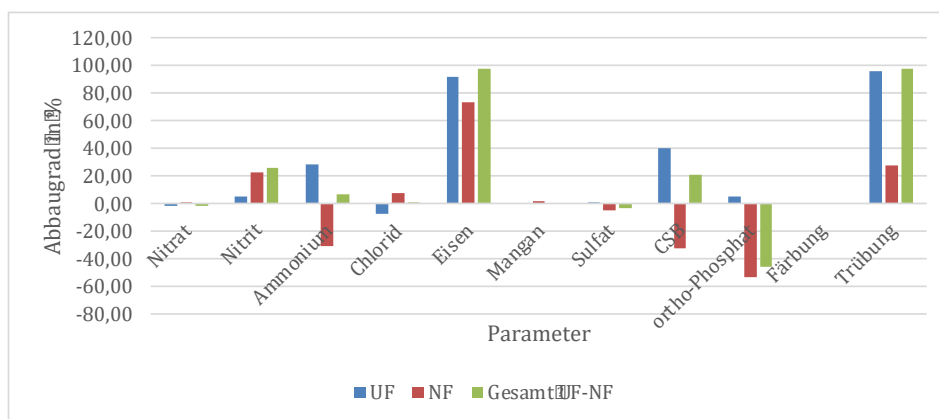


Abbildung 9: Abbaugrade der einzelnen Parameter - Testfall 1a

Die Anlage wurde nach 33 Stunden Betrieb abgeschaltet und der Versuch somit abgebrochen. Der Betrieb und die Ergebnisse zeigten nicht die erwarteten und erforderlichen Reinigungsleistungen. Die negativen Werte bei einigen Parametern ließen eine fehlerhafte Betriebsweise (Rentatführung) oder Membranprobleme (Verblockung) vermuten. Ein Hinweis auf eine Verblockung ergibt sich aus der Reduzierung des Reinstwasserflusses von 3,4 l/h vor dem Versuch (Ausgangszustand) auf 2,7 l/h nach dem Versuch bei 2 bar. (vgl. Abbildung 10)

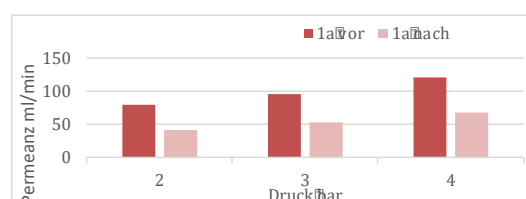


Abbildung 10: Permeanz vor und nach dem Versuch für Testfall 1a

Bei den mikrobiologischen Parametern (vgl. Tabelle 3) gab es ebenfalls Ergebnisse, die sich nicht richtig einordnen ließen. Hier zeigte die UF-Stufe eine fast 100%ige Eliminierung und in der NF stiegen diese Werte wieder an. Auffällig sind auch die Wiedererhöhung der Kolonien und Keime am Ablauf des Sammelbehälters. Ursachen hierfür sind Probleme bei der sterilen Probenahme bedingt durch die geringen Flüsse und den Bedarf an großen Probemengen. Außerdem kann die interne Kreislaufführung der Retentatströme zu Anreicherungen führen.

Tabelle 3: Mikrobiologische Untersuchungsergebnisse Testfall 1a

Mikrobiologie		Nach Siebfilter	Nach UF	Nach NF	Nach UV	Sammelbehälter
E.coli	[KBE/100ml]	80	0	0	0	0
Enterokokken	[KBE/100ml]	80	0	0	0	0
Pseudomonas aeruginosa	[KBE/100ml]	80	0	80	1	80
Clostridium perfringens	[KBE/100ml]	80	0	0	0	0
Coliforme Bakterien	[KBE/100ml]	80	0	0	0	0
Koloniezahl bei 22°C	[KBE/ml]	10000	0	1320	0	10000
Koloniezahl bei 36°C	[KBE/ml]	10000	1	1520	0	780
Legionella spec.	[KBE/100ml]	0	2	0	2	0
Geruch	[-]	erdig	erdig	leicht erdig	leicht erdig	leicht erdig
Temperatur vor Ort	[°C]	14,2	14,1	13,5	13,4	13,2

Testfall 1b

Der Retentatstrom der NF-Stufe wird nicht mehr dem UF-Retentatstrom zugegeben, sondern abgezogen bzw. in den IBC-Rohwasservorratsbehälter zurückgeführt wurde. (vgl. Abbildung 11) Der Retentatstrom der UF-Stufe wurde nun in den IBC-Rohwasservorratsbehälter geführt.

Der Versuch mit der geänderten Retentatstromführung wurde mit denselben NF- und UF-Membranmodulen durchgeführt. Die UF-Stufe wurde jedoch bei 4 bar betrieben und erreichte einen Flux von ca. 33l/h und die NF-Stufe wurde bei 2 bar betrieben, die einen Flux von 2l/h erreichte.

Zu Beginn dieses Versuches zeigte sich ein guter Rückhalt bei den untersuchten Parametern. Zum Ende des Versuches verschlechterten sich der Rückhalt, was so nicht erwartet wurde. Ursache hierfür kann die über Nacht ausgefallene Rückspülung der UF-Membran gewesen sein. Diese führt zu einer Verringerung des Permeatvolumenstroms und damit auch zur Verringerung des Feed-Volumenstroms für die NF-Stufe. Die erreichten Abbaugrade für die chemischen Parameter sind in Abbildung 12 dargestellt.

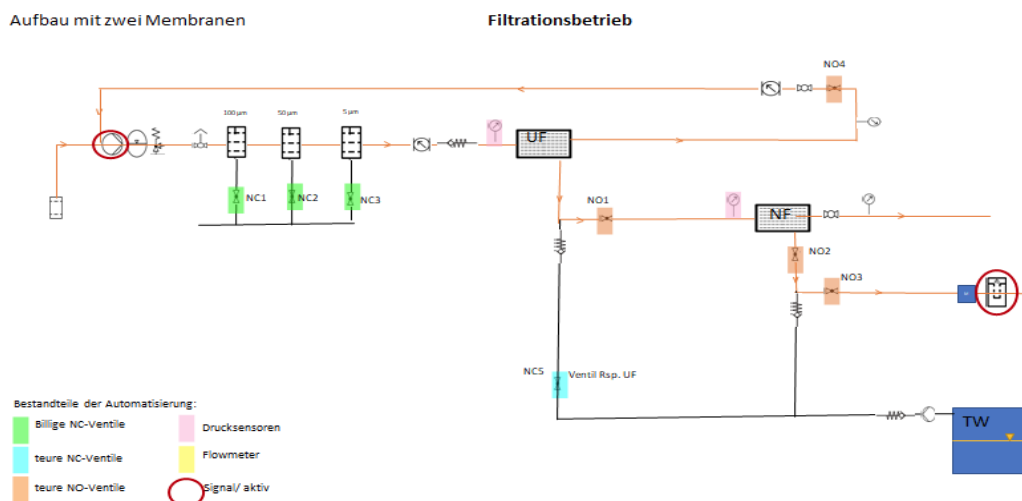


Abbildung 11: Testfall 1 mit geänderter Retentatführung, entspricht Testfall 1b (Skizze: Radcenko)

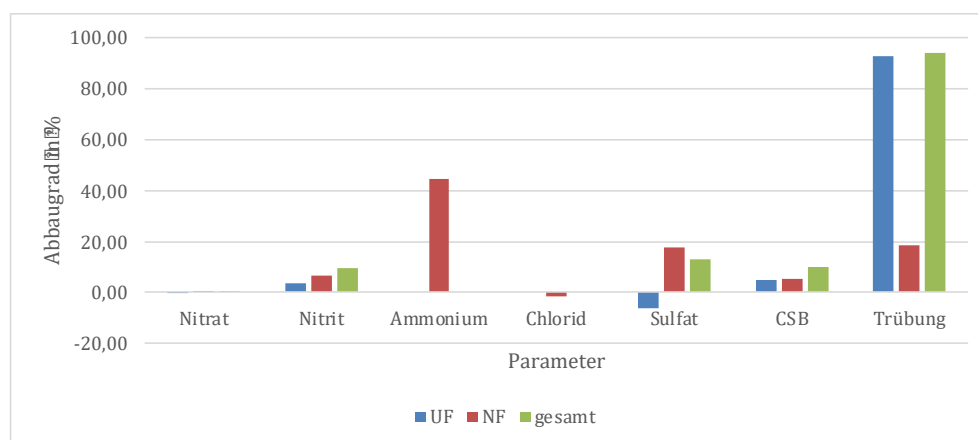


Abbildung 12: Abbaugrade für ausgesuchte Parameter im Testfall 1b; erster Versuch nach 24 h Betrieb

Der Versuch wurde wiederholt (vgl. Abbildung 13).

Es ist zu erkennen, dass die Hauptabbauleistung bei der NF-Membran liegt und die UF-Membran den geringsten Effekt hat. Deutlich wird auch, dass die Stickstoffverbindungen nur bedingt zurückgehalten werden können, wobei hierbei zu berücksichtigen ist, dass in den sehr niedrigen Messbereichen bei den genutzten Küvetten tests teilweise der Messfehlerbereich überlagernd wirkt.

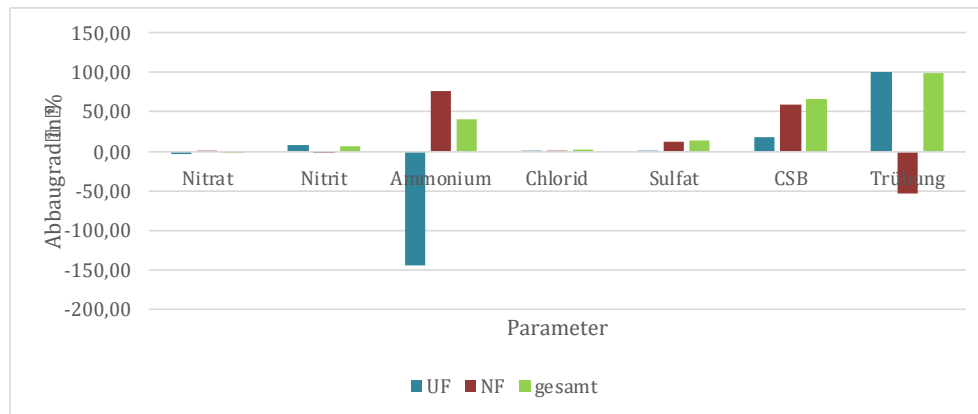


Abbildung 13: Abbaugrade für ausgesuchte Parameter im Testfall 1b; Wiederholung nach 24 h Betrieb

Die Ergebnisse der mikrobiologischen Parameter sind in der Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse Mikrobiologische Untersuchungen im Testfall 1b nach 24 h Betrieb

Mikrobiologie		Grenzwert nach TWVO	Nach Siebfilter	Nach UF	Nach NF	Nach UV
E.coli	[KBE/100ml]	0	80	0	0	0
Enterokokken	[KBE/100ml]	0	80	0	0	0
Pseudomonas aeruginosa	[KBE/100ml]	0	80	80	2	0
Clostridium perfringens	[KBE/100ml]	0	80	0	0	0
Coliforme Bakterien	[KBE/100ml]	100 (0- bei Abgabe in verschlossene Behälter)	80	0	0	0
Koloniezahl bei 22°C	[KBE/ml]	100	10000	10000	520	52
Koloniezahl bei 36°C	[KBE/ml]	100 (20 - bei Abgabe in verschlossene Behälter)	10000	10000	740	220
Legionella spec.	[KBE/100ml]	100	0	0	2	2
Geruch	[-] als Ton	3 bei 23 °C	erdig	erdig	leicht erdig	leicht erdig
Temp. vor Ort	[°C]		14,7	14,9	15,2	17

Tabelle 4 zeigt, dass die NF-Stufe einen hohen Anteil an der Reduktion von Koloniezahl und Pseudomonas aeruginosa hat, aber es nicht bis zu einer vollständigen Elimination ausreicht. Die nachträgliche UV-Desinfektion ist daher notwendig und hat den entsprechenden Eliminationseffekt und wirkt zudem noch langanhaltender nach. Das heißt, dass in der Anlagenkonfiguration immer eine nachgeschaltete Desinfektionsstufe vorgesehen werden muss, um ein gesundheitlich unbedenkliches Trinkwasser zu produzieren.

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG Modifikation 1

Die Integration einer NF-Stufe hat gezeigt, dass diese zu einer deutlichen Verbesserung der erreichten Wasserqualität führt als die Ausgangsanlage ohne NF-Modul. Die Abstimmung des UF-Moduls mit dem NF-Modul ist allerdings sehr schwierig und führt damit zu einer schlechteren Handhabbarkeit. Außerdem kann es zu Betriebsstörungen führen, welche insbesondere im autarken Betrieb vermieden werden sollten, um eine verlässliche Trinkwasserherstellung sicherstellen zu können. Die mikrobiologischen Parameter nach Trinkwasserverordnung werden in dieser Konfiguration nicht dauerhaft eingehalten. Einen großen, aber nicht ausreichenden Anteil hat die NF-Stufe, durch die bereits um 93-97,5% reduziert werden kann. Erst durch die nachgeschaltete UV-Behandlung ist die Einhaltung aller mikrobiologischen Parameter möglich.

Unter diesem Aspekt wird in einem nächsten Modifikationsschritt versucht, den Reinigungsprozess nur mit einer NF-Stufe ohne vorgeschaltete UF-Stufe, durchzuführen. (Abschnitt 3.2.2) Die nachgeschaltete UV-Behandlung bleibt aus den genannten Gründen bestehen.

3.2.2 Testfall 2: Herausnahme UF-Membranmodul und Parallel-Test nur NF-Membranmodul mit UV-Desinfektion und MOL®LIK mit NF-Membranmodul und UV-Desinfektion

Für eine weitere Modifikation der Anlage wurde die UF-Membranstufe entfernt. Es sollte getestet werden, ob mit der dreistufigen Behandlung mit Sieben bis auf 5 µm die NF stabil auf einem guten Reinigungsleistungsniveau betrieben werden kann. Durch den Bau einer Parallelanlage konnten nun zwei unterschiedliche Konfigurationen parallel getestet werden. So wurden im Versuchsabschnitt 2a die Konfiguration NF-Stufe mit UV-Nachbehandlung (vgl. Abbildung 14) und im Versuchsabschnitt 2b NF-Stufe mit vorgeschaltetem MOL®LIK-Katalysator-Modul und mit UV-Nachbehandlung (vgl. Abbildung 15) getestet.

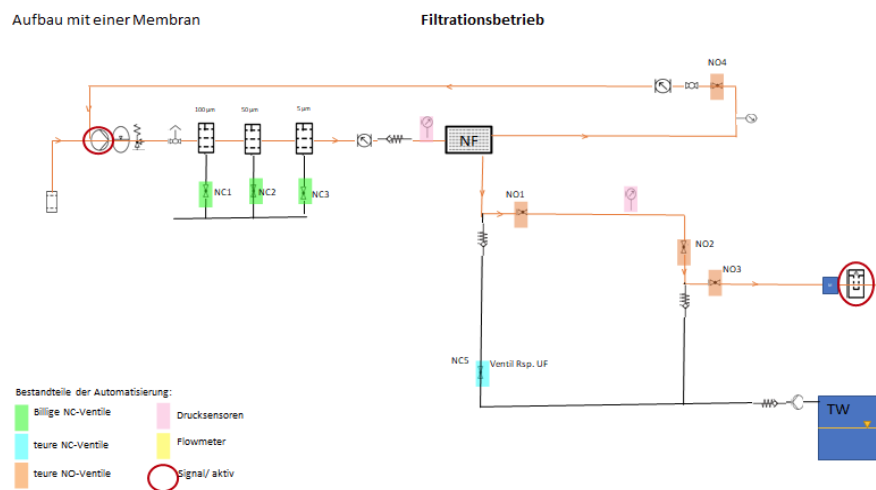


Abbildung 14: Testwand 1 – Versuchsabschnitt 2a: Herausnahme UF-Modul nur noch NF-Modul in Betrieb (Skizze: Radcenko)

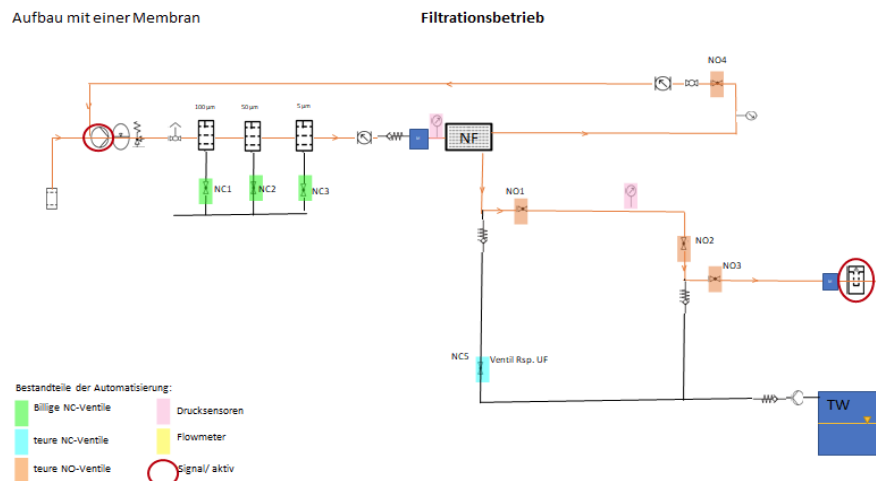


Abbildung 15: Testwand 2 – Versuchsabschnitt 2b mit eingebautem MOL®LIK -Katalysator (Skizze: Radcenko)

Im Versuchsabschnitt 2a wurde die NF-Membran MC031_10001XH0010_NAR048_02 eingesetzt. Im parallel ablaufenden Versuchsabschnitt 2b kam die NF-Membran MC031_11001TH0010 zum Einsatz. Der Feedvolumenstrom zur NF-Membran betrug kontinuierlich ca. 186 l/h. Die NF-Stufe wurde bei 2bar betrieben und es wurde ein Flux von 1,7 l/h erreicht.

Die Versuche an beiden Testwänden sowie die Probenahme und Analytik wurden parallel mit demselben Zulauf (Ablauf Kläranlage) durchgeführt. Bei einem Druck von 2 bar wurden die Anlagen insgesamt 240h (10 Tage) durchgängig betrieben. Die Analyse der chemischen Parameter wurde in regelmäßigen Abständen durchgeführt. (vgl. Tabelle 5)

Tabelle 5: Testfall 2a nur NF-Membran bei 2bar chemische Analysen (DF-Drahtfilter; NF Nanofiltration); rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO

	Grenzwert TWVO	DF 2a 2bar 5h	NF 2a 2bar 5h	DF 2a 2bar 24h	NF 2a 2 bar24h	DF 2a 2 bar 72h	NF 2a 2bar 72h	DF 2a 2bar 144h	NF 2a 2bar 144h	NF 2a 4bar 240h
Nitrat in mg/l NO ₃ -N	11,29	4,5	4,23	6,06	5,23					
Nitrit mg/l NO ₂ -N	0,15	0,08	0,085	0,221	0,150					
Ammonium mg/l NH ₄ -N	0,39	0,111	0,003	0,032	0,010					
Chlorid in mg/l	250	152	108	211	195	219	202	200	182	173
Eisen in mg/l	0,20			0,776	0,079					0,057
Mangan in mg/l	0,05			0,403	0,211					0,037
Sulfat in mg/l	250	193	91,4	315	101	424	189	195	38,2	
CSB in mg/l		69	6,54	95,1	4,68	73,7	8,55	37,3	2,83	2,45
Phosphat in mg/l PO ₄ -P		0,091	0,022	0,008	0,010					
Trübung in NTU	1	9,95	0,24	5,85	0,15	4,18	0,10	10,4	0,07	0,18
Elektrische Leitfähigkeit in MS/cm	2790	1585	1096	1746	1146	2000	1258	1415	1066	965
pH-Wert	6,5-9,5	7,2	7,5	7,1	7,5	7,3	7,5	7,6	7,9	7,4
TNB in mg/l						10,43	5,95	7,12	5,75	
TOC in mg/l						101	33,65	46,6	25,34	

Es wird deutlich, dass das Abtrennen von Partikeln >5µm durch die Siebfilterkaskade nicht ausreicht, Wasser in ausreichender Qualität herzustellen. Sich bildende Ablagerung führen zu Grenzwertüberschreitungen und machen deutlich, dass eine gezielte effektive Reinigung dieser Siebstufe notwendig ist. Die Nanofiltration reicht hinsichtlich der chemischen Parameter schon aus, Trinkwasserqualität zu erreichen. Im Testfall 2b war der MOL@LIK -Katalysator zwischen der Siebkaskade und der NF-Stufe geschaltet. Außer bei der Leitfähigkeit kein nennenswerter Effekt zu erkennen. (vgl. Tabelle 6) Die Ergebnisse der NF-Stufe sind in etwa gleich. Daraus ergibt sich, dass hinsichtlich der chemischen Parameter der Einsatz des MOL@LIK-Katalysators nicht unbedingt erforderlich ist.

Tabelle 6: Testfall 2b NF-Membran mit vorgeschaltetem MOL@LIK-Katalysator bei 2 bar chemische Analysen (DF-Drahtfilter; NF Nanofiltration); rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO

	Grenzwert TWVO	DF 2b 2bar 5h	NF 2b 2bar 5h	DF 2b 2bar 24h	NF 2b 2bar 24h	NF 2b 2bar 240h
Nitrat in mg/l NO ₃ -N	11,29	4,50	3,06			
Nitrit mg/l NO ₂ -N	0,15	0,035	0,020			
Ammonium mg/l NH ₄ -N	0,39	0,111	0,086	0,036	0,021	
Chlorid in mg/l	250	152	114	211	179	172
Eisen in mg/l	0,20					0,061
Mangan in mg/l	0,05					0,034
Sulfat in mg/l	250	193	95,1			
CSB in mg/l		42,3	5,80	160	6,37	3,89
Phosphat in mg/l PO ₄ -P		0,091	0,210			
Trübung in NTU	1	9,95	0,16	10,9	1,12	0,15
Elektrische Leitfähigkeit in MS/cm	2790	1278	840	1892	1211	1018
pH-Wert	6,5-9,5	7,5	7,7			7,466

Die Auswertung der mikrobiologisch relevanten Parameter (vgl. Tabelle 7) zeigt, dass die Nanofiltrationsstufe zwar deutlich die mikrobiologische Belastung reduziert, aber nicht ausreicht Trinkwasser in der geforderten Qualität herzustellen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Koloniezahlen bei 22°C und 36°C. Es ist also unbedingt eine UV-Behandlungsstufe bzw. eine andere Desinfektionsart nachzuschalten. Die UV-Behandlung hat den Nachteil, dass sich die Wassertemperatur bei der Behandlung erhöht (von 12,3°C auf 20°C), was hinsichtlich der Wiederverkeimung bei langen Lagerungs- bzw. Transportzeiten des produzierten Trinkwassers nachteilig sein kann.

Beide Konfigurationen wurden anschließend für 5 Tage (=120 Stunden) bei einem Druck von 4 bar betrieben, um ggf. Veränderungen hinsichtlich des Rückhalts feststellen zu können und so einen optimalen Betriebsdruck festlegen zu können. Auch hier wurden die chemischen Parameter analysiert. (vgl. Tabelle 8)

Es wurde kein signifikanter Effekt des MOL@LIK-Katalysators festgestellt. Insgesamt wurden bei beiden Testfällen verbesserte Rückhalte bei höherem Druck festgestellt, was zu einer sicheren Trinkwasserqualität führt.

Tabelle 7: Mikrobiologische Parameter Testfall 2a und 2b bei 2 bar nach 216h (=9Tage) Betrieb; rot – Grenzwertüberschreitung
nach TWVO

Mikrobiologischer Parameter	Einheit	TWVO	NF 2a 2bar 216h	UV 2a 2bar 216h	nach MOL@LIK 2b 2bar 216h	NF 2b 2bar 216h
E.coli	KBE/100ml	0	0	0	>80	0
Enterokokken	KBE/100ml	0	0	0	>80	0
Pseudomonas aeruginosa	KBE/250ml	0	0	0	>80	0
Clostridium perfringens	KBE/100ml	0	0	0	>80	0
Coliforme Bakterien	KBE/100ml	0	0	0	>80	0
Koloniezahl bei 22°C	KBE/ml	100	460	80	>10000	320
Koloniezahl bei 36°C	KBE/ml	100	820	0	<10000	2540
Legionella spec.	KBE/100ml	100	<2	<2	n.a.	n.a
Temperatur vor Ort			12,3	20	11,4	13,2

Tabelle 8: Testfall 2a und 2b bei 4 bar chemische Parameter

	Trinkwasser VO	NF 2a 4bar 5h	NF2a 4 bar 96h	NF 2b 4bar 5h	NF 2b 4bar 96h
Chlorid in mg/l	250	176		184	
Eisen in mg/l	0,20	0	0,011	0,002	0
Mangan in mg/l	0,05	0,024	0,023	0,032	0,02
Sulfat in mg/l	250	17,3	13,5	71,3	15,3
CSB in mg/l		2,13	1,03	3,65	1,02
Trübung in NTU	1	0,16	0,11	0,12	0,08
Leitfähigkeit in µS/cm	2790	895	869	999	843

Bei beiden Testfällen kann bei einem höheren Druck ein höherer Fluss erreicht werden, wodurch sich die Aufbereitungskapazität deutlich erhöht. (vgl. Abbildung 16)

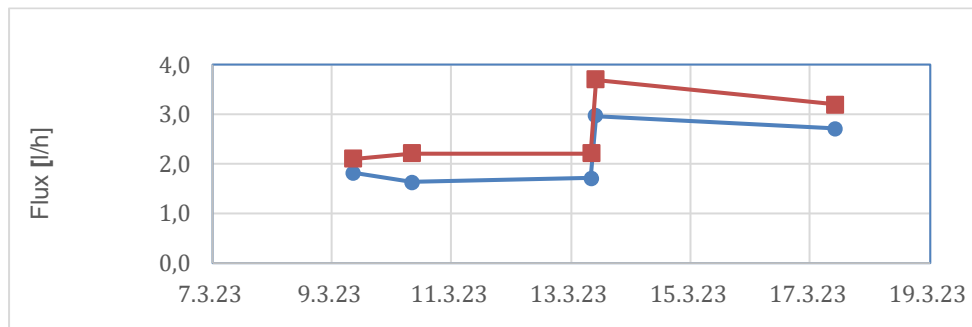


Abbildung 16: Flux NF-Stufe in Abhängigkeit vom Druck für den Testfall 2a (blau) und Testfall 2b (rot)

Nachteilig ist, dass der Flux innerhalb weniger Tage Betrieb zurückgeht, d.h. häufiger Reinigungszyklen vorzusehen sind, um Deckschichtbildungen und Fouling zu verhindern und die Funktionstüchtigkeit der Membran zu erhalten.

Die Konfiguration mit dem MOL®LIK-Katalysator erreicht in beiden Fällen einen durchschnittlich etwa um ¼ erhöhten Flux. Dabei ist zu beachten, dass die im Versuch verwendete Membran bei der Aufnahme des Ist-Zustandes eigentlich unterhalb der Membran im Testfall 2a genutzten Membran aufwies. (vgl. Abbildung 5) Die Permeanz wurde positiv durch den Katalysator beeinflusst. (vgl. Abbildung 17) Da die Reinigungsleistung gleich war, kann eine ggf. abgelöste LbL-Beschichtung nicht die Ursache sein, sondern lediglich das Katalysator-Wirkprinzip.

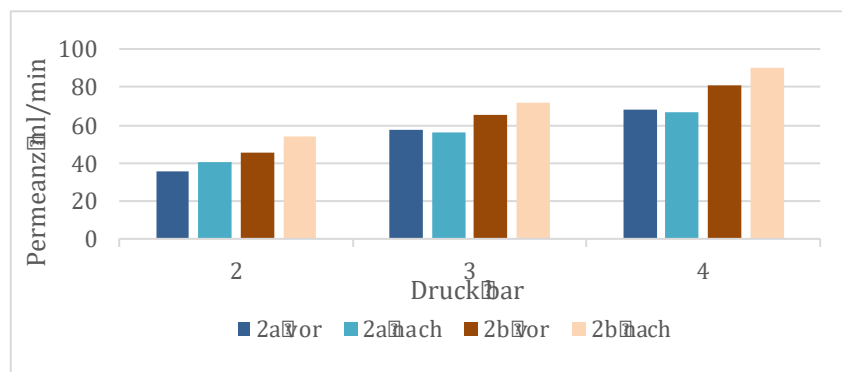


Abbildung 17: Permeanz vor und nach dem Versuch; Testfall 2a und 2b

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG FÜR DIE TESTFÄLLE 2a UND 2b

Der MOL®LIK ist baulich einfach in ein Filtergehäuse der Vorfilter integrierbar, d.h. es sind keine konstruktiven Änderungen an der Anlage notwendig. Durch den MOL®LIK konnte der Durchfluss der NF-Stufe um durchschnittlich 25% erhöht werden. D.h. es können größere Feedvolumenströme behandelt werden. Bei trübstoffhaltigem Wasser wird jedoch die Oberfläche des Katalysators bedeckt, wodurch die Wirkung eingeschränkt wird. D.h., der Katalysator sollte nur bei Wässern mit geringem Trübstoffgehalt eingesetzt werden bzw. die Trübstoffe müssen vor Kontakt mit dem Katalysator entfernt worden sein. Die erreichten Aufbereitungsergebnisse veränderten sich durch den Katalysator nicht. Es wurden die gleichen Rückhalte erzielt. Damit macht der Katalysatoreinsatz nur Sinn, wenn ein größerer Feedvolumenstrom bei gleichbleibender Filterfläche behandelt werden soll. Die Betriebsweise mit MOL®LIK verändert sich nicht, weil der Katalysator keine Barriere darstellt und somit es zu keinen Auswirkungen auf die Druckverhältnisse in der Anlage kommt

In beiden Konfigurationen zeigte sich, dass eine nachgeschaltete UV-Behandlung notwendig ist, um sicher Trinkwasserqualität produzieren zu können, obwohl die NF-Stufe bereits über 90 % auch bei der mikrobiologischen Belastung reduziert.

3.2.3 Testfall 3: UF Membranmodul, Aktivkohle und UV-Desinfektion

In einer weiteren Modifikation sollte getestet werden, ob anstatt der LbL-Beschichteten NF-Membran mit einem dem UF-Filter nachgeschaltetem Aktivkohlefilter ähnliche bzw. noch bessere Aufbereitungsergebnisse erzielt werden können. Vorteile eines AK-Filters sind die gute Bedienbarkeit und Verfügbarkeit in Form von Kartuschen, die leicht ausgetauscht werden können. Nachteilig ist der Abrieb und Ausstrag von Feinstpartikeln und die Anfälligkeit von Biofilmen bei längeren Stillstandzeiten. Die Nutzung einer UF-Membran anstatt einer NF-Membran führt zu geringerem Wartungsaufwand und geringeren Betriebs- und Investitionskosten. Zusätzlich wurde in dieser Testreihe die Wirkung verschiedener Reinigungsimpulse durch Impulsrückspülung getestet. Die Anlagenkonfiguration ist in Abbildung 18 dargestellt.

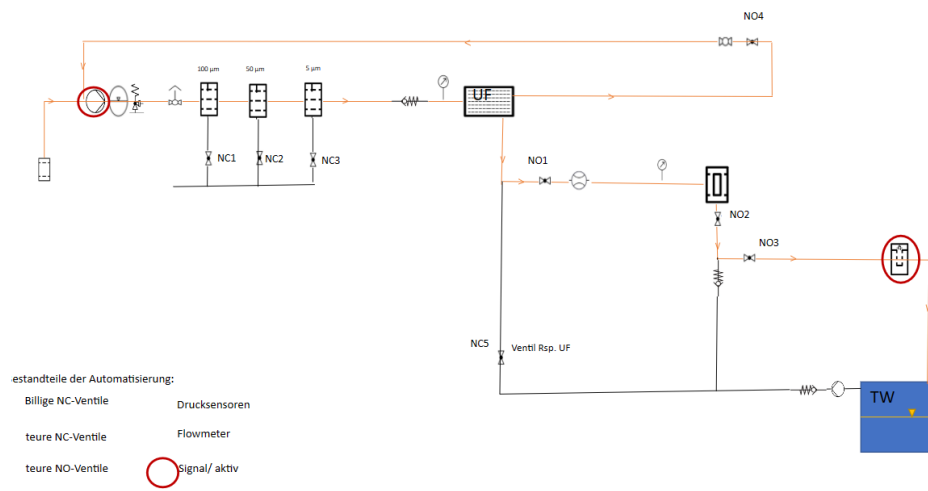


Abbildung 18: Fließbild Testfall 3 UF-Membran mit Aktivkohlefilter

Als Aktivkohlefilter kam die Kartusche der Firma Pentair aus der Serie PENTEK EP zum Einsatz. Das Filtermaterial besteht aus gebundenem PAC. Das PAC-Ausgangsmaterial sind Kokosshalen. Die Kartusche hat Endkappen aus Polypropylen, das Kartuschengehäuse aus Polyolefin und Netzgewebe. Laut Herstellerangaben haben diese Kartuschen eine hohe Schmutzaufnahmekapazität und sind hochwirksam hinsichtlich der Reduzierung von Geschmack, Geruch, Chlor-Geschmack und Chlor-Geruch. Der Einsatzbereich der Filterkartusche ist bei 4,4 -82,2°C und deckt damit den Bereich möglicher Rohwässer ab.

Es zeigte sich, dass innerhalb von 2 Stunden der Flux deutlich zurückging. (vgl. Abbildung 19). Deshalb wurden Impulsspülungen in regelmäßigen Abständen durchgeführt, um die Leistung der UF-Stufe konstant halten zu können. (vgl. Abbildung 20)

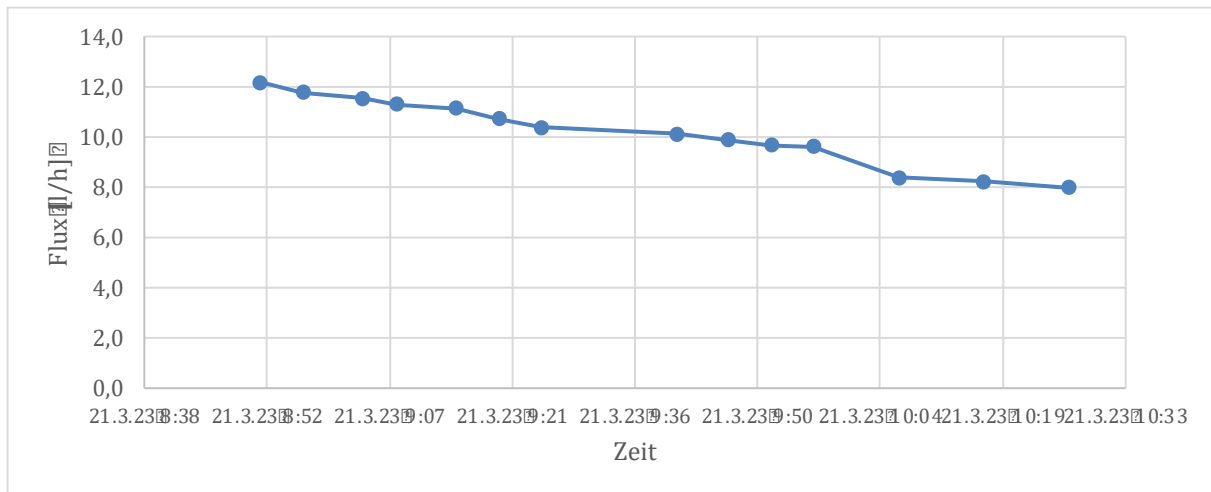


Abbildung 19: Flux-Verlauf UF-Membran Testfall 3; Tag 1

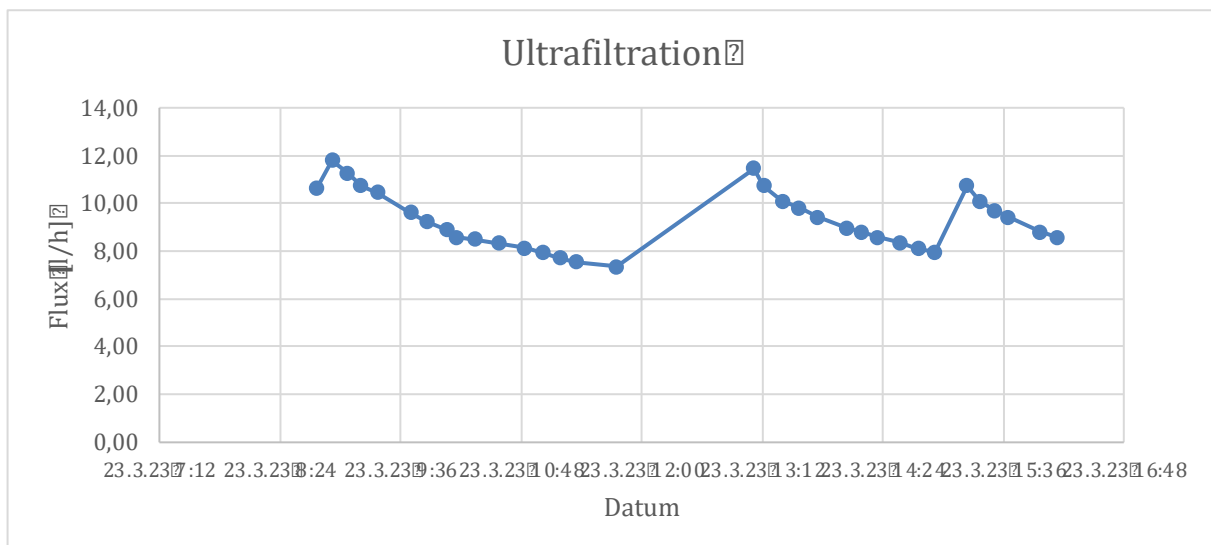


Abbildung 20: Beispiel einer Impulsrückspülung zur Reinigung der UF-Membran in Konfiguration Testfall 3

In Abbildung 20 ist deutlich zu erkennen, dass die Rückspülung nur kurzzeitig den Flux erhöht, der danach wieder kontinuierlich absinkt. Das bedeutet, dass in späteren Anwendungsfällen eine Steuerung und Regelung für eine automatische Impulsspülung vorgesehen werden muss. Diese muss robust und wartungsarm sein, damit ein autarker Betrieb möglich ist. Hierzu müssen für den jeweiligen Anwendungsfall die Flux-Grenzen ermittelt und festgelegt werden.

Die Grenzwerte nach Trinkwasserverordnung für die chemischen Überwachungsparameter konnten bereits durch die UF-Stufe bis auf Nitrit eingehalten werden. Der nachgeschaltete Aktivkohlefilter führte zu einer deutlichen Verbesserung, welche durch die UV-Behandlung nur noch minimal verbessert werden konnte. (vgl. Tabelle 9)

Tabelle 9: Ergebnisse chemische Parameter für Testfall 3; rot – Grenzwertüberschreitung nach TWVO

	Einheit	Trinkwasser VO	UF 3; 4,4bar 5h	AK 3; 4,4bar 5h	UF 3; 4,4bar 24h	AK 3; 4,4bar 24 h	AK 3; 4,4bar 192h	UV 3; 4,4bar 192h
Nitrat (NO ₃ -N)	mg/l	11,29	5,00	0,071	5,76	5,57	5,57	5,76
Nitrit (NO ₂ -N)	mg/l	0,15	0,421	0,108	0,002	0,082	0,082	0,002
Ammonium (NH ₄ -N)	mg/l	0,39	0,065	0,056	0,008	0,001	0,001	0,008
Chlorid (Cl ⁻)	mg/l	250						
Eisen	mg/l	0,20	0,043	0,000	0,067	0,024	0,024	0,067
Mangan	mg/l	0,05	0,043	0,045	0,048	0,052	0,052	0,048
Sulfat SO ₄ ²⁻	mg/l	250	181	156	191	190	190	191
CSB	mg/l		28,5	1,54				
ortho-Phosphat	mg/l		0,036	0,102	0,016	0,049	0,049	0,016
Färbung	1/m	0,50						
Trübung	NTU	1,00	0,11	0,09	0,16	0,12	0,12	0,16
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm	2790	1270	1193	1303	1296	1296	1303
pH-Wert		6,5-9,5	7,2	7,9	7,9	7,6	7,6	7,9

Bezüglich der mikrobiologischen Parameter zeigte sich, dass der Aktivkohlefilter allein die Grenzwerte nach TVWO nicht sicherstellen kann und demzufolge eine weitere Desinfektionsstufe notwendig bleibt. (vgl. Tabelle 10) Die in dem Falle genutzte UV-Behandlung erbrachte die Leistung und wird wegen der geringen Wartungsintensität und der einfachen Bedienbarkeit als Bestandteil in einer Trinkwasseraufbereitung weiterhin vorgesehen werden.

Tabelle 10: Mikrobiologische Parameter Testfall 3; rot – Grenzwertüberschreitung nach TVWO

			AK 3; 4,4bar 24 h	UV 3; 4,4bar 24h
E.coli	KBE/100ml	0	0	0
Enterokokken	KBE/100ml	0	0	0
Pseudomonas aeruginosa	KBE/250ml	0	0	0
Clostridium perfringens	KBE/100ml	0	0	0
Coliforme Bakterien	KBE/100ml	0	0	0
Koloniezahl bei 22°C	KBE/ml	20	600	0
Koloniezahl bei 36°C	KBE/ml	100	820	0

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG FÜR DEN TESTFALL 3

Diese Konfiguration erbringt gegenüber der Ausgangsanlage eine Verbesserung der produzierten Wasserqualität und kann in entsprechenden Anwendungsfällen die NF-Stufe ersetzen. Eine nachgeschaltete Desinfektion ist weiterhin notwendig, insbesondere bezüglich der mikrobiologischen Parameter.

3.2.4 Testfall 4: NF inopor- Membranmodul

Gegenstand des Projektes war auch der Vergleich zu anderen keramischen Membranen als die genutzte der Firma Nanostone. Es wurde im Testfall 4 die UF-Membran des Typs Ultrafiltration inopor® ultra der Firma Inopor, einem führenden deutschen Unternehmen im Bereich keramischer Membranen, eingesetzt. Diese Membranmodul hat eine Länge von 0,5m, besitzt 19 Kanäle und weist eine Filterfläche von 0,179 m² auf. Die Porengröße liegt bei 5nm. Der Membranträger besteht aus α -Al₂O₃ und die Membran aus TiO₂. Die Membran ist nicht in einem Modul fest vergossen, sondern wird in ein Edelstahlgehäuse eingebaut. Die Filtration verläuft von innen nach außen. Die inopor-Membran wurde bei einem Druck von 4,4 bar über fünf Monate in verschiedenen Wochenabschnitten betrieben. Zwischenzeitlich wurde sie auch für potenzielle neue Anwendungsfelder wie von Gärrestwässern getestet. Die Messergebnisse waren vergleichbar zur Nanostonemembran wie der Ergebnisauszug (vgl. Tabelle 11) zeigt.

Tabelle 11: Ergebnisauszug Inopor-NF-Membran

		1TF 4, 4,4bar	2 TF4 4,4bar	TF4 4,4bar
Nitrat	[mg/l]	4,6		6,02
Nitrit	[mg/l]	0,060		
Ammonium	[mg/l]	0,012		1,01
Chlorid	[ppm oder mg/l]	172		150
Eisen	[mg/l]	0,026		
Mangan	[mg/l]	0,083		
Sulfat	[mg/l]	191		15,7
CSB	[mg/l]	16	2,97	
Zink	[mg/l]	2,650		
Trübung	[NTU]			0,14
Elektrische Leitfähigkeit	[μ S/cm]	1278		7,57

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG FÜR DEN TESTFALL 4

Hinsichtlich der Handhabbarkeit hat es sich als nachteilig erwiesen, dass die Keramikmembran nicht fest mit dem Gehäuse verbunden ist und beim Einsetzen in das Gehäuse Dichtungen eingesetzt werden müssen. Diese müssen als Ersatzteile vorgehalten werden und die Nutzer müssen den Einbau der Dichtungen zuverlässig garantieren. D.h., wenn die Dichtungen vergessen werden, ist die Wirkung des Moduls nicht mehr gegeben und es kann zu Undichtigkeiten kommen. Außerdem können die Dichtungen verschleifen, was zu Undichtigkeiten und Wirksamkeitseinschränkungen der Aufbereitung führt. Das Edelstahlgehäuse ist sehr schwer und muss mit vielen Schrauben montiert werden, was durch die unhandliche Länge nicht trivial ist und von Unerfahrenen durchgeführt werden kann. Beim Einbau der Membran in das Gehäuse wird zwangsläufig die Permeatfläche berührt, wodurch es zu Verunreinigungen durch Keime kommen kann. Zudem können die versiegelten Stirnflächen beim Einbau leicht gegen das Gehäuse stoßen und Bruchstücke entstehen, die das Aufbereitungsergebnis beeinträchtigen können. Die festvergossene Bauform der Firma Nanostone hat hier Vorteile.

3.2.5 Testfall 5: UF- Membranmodul, Aktivkohle und UV-Desinfektion

In dieser Modifikation wurde die Reihenfolge der Desinfektion und des Aktivkohlefilters verändert. Bei Einsätzen der mobilen Purification-Anlage in entlegenen Gebieten der Welt kann es unter Umständen zu Fehlern in der Anordnung der beiden Schritte durch Unwissenheit der Anwender kommen, sollte geprüft werden, ob dennoch die Anforderungen an die Wasserqualität gemäß Trinkwasserverordnung sichergestellt ist. Diese Versuche wurden kurz nach Beginn wieder außer Betrieb gesetzt, da sich zeigte, dass der AK-Filter zu einer Wiederverkeimung und Verschlechterung der Aufbereitungsqualität führte.

3.2.6 Testfall 6: Zwei NF-Membranmodul (parallel) mit UV-Desinfektion ohne UF-Modul

In einer letzten Modifikation wurden als Membranaufbereitungsstufe die Nanofiltration gewählt. Zur Sicherstellung größerer aufzubereitender Volumenströme war es notwendig, die Membranfläche und damit Reinigungskapazität zu erhöhen. Dies kann zum einen durch größere Module oder durch die Parallelschaltung mehrerer Module realisiert werden. Die realisierte Parallelschaltung ist im Fließbild (vgl. Abbildung 21) dargestellt. Der Betriebsdruck lag bei 2 bar. Jede Membran wurde mit ca. 120l/h beaufschlagt, d.h. der Zulaufvolumenstrom von 240m³/h wurde hälftig aufgeteilt.

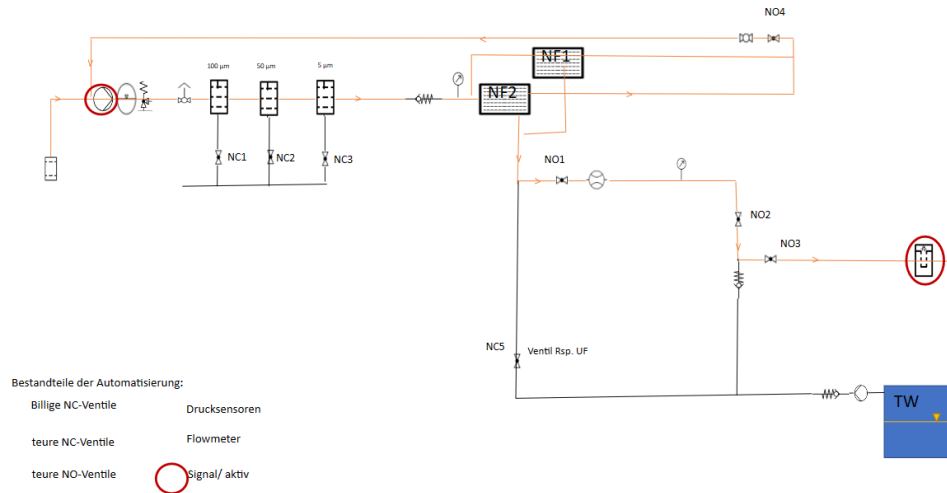


Abbildung 21: Fließbild Testfall 6: Parallelschaltung von 2 NF-Stufen (Skizze: Radcenko)

Diese Anlagenkonfiguration wurde zunächst im Labor und später im Feldversuch für einen Klärwerksablauf und ein Oberflächenwasser getestet.

Tabelle 12: Ergebnisauszug für Labortests und Test Klärwerksablauf und Oberflächenwasser

Parameter	Einheit	Labor	Labor	Klärwerk 31.7.		Flusswasser
		NF2	NF2	NF1	NF2	NF2
Nitrat	[mg/l]	5,03	5,03			
Nitrit	[mg/l]	0,019	0,019	0,01		
Ammonium	[mg/l]			0,03		
Chlorid	[mg/l]	138	138	148	150	260
Eisen	[mg/l]	0,002	0,002			
Mangan	[mg/l]			0,021	0,021	0,01
Sulfat	[mg/l]	23,8	23,8			
CSB	[mg/l]	1,34	1,34	1,91	2,43	1,22
Phosphat	[mg/l]			0,021	0,037	
Zink		0,194	0,194			
Trübung	[NTU]			0,1	0,13	0,17
Elektrische Leitfähigkeit	[µS/cm]	813	813	782	775	775
pH-Wert	[-]	7,614	7,614	8,192	8,253	8,1

ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG FÜR DEN TESTFALL 6

Durch diese Konfiguration konnte ein höherer Feeddurchfluss erreicht werden. Das Aufbereitungsergebnis war sehr stabil. Die Laborergebnisse konnten bei beiden Feldversuchen bestätigt werden.

Im Projekt wurde bei der Modulform und Größe festgehalten, weil auf diese alle Anschlüsse und anderen Anlagenaggregate abgestimmt sind. Außerdem kann so auch im Fall der von notwendigen Wartungen und Membranreinigungszyklen an einer der NF-Module die Wasseraufbereitung dennoch aufrechterhalten werden. (Redundanz) Einzige vorzunehmende Veränderung ist die Installation einer stärkeren Pumpe, um den Flux und den Betriebsdruck gewährleisten zu können.

3.2.7 Weitere Untersuchungen

In einem weiteren Versuchsabschnitt wurde der Rückhalt ausgesuchter Medikamentenrückstände sowie der TOC-Rückhalt aus einem Kläranlagenablauf untersucht. In dieser Phase wurden die einzelnen Konfigurationen parallel getestet. Gleichzeitig wurde überprüft, ob vom MoliK-Katalysator ggf. Metallionen abgeschieden und ins Wasser gelangen können, was die Aufbereitungsqualität beeinflussen kann. Tabelle 13 zeigt die Ergebnisübersicht. Chrom als Bestandteil des Katalysators wurde auch analysiert, aber es konnten keine Abbaugrade ermittelt werden, weil alle Werte unterhalb der Nachweisgrenze (<10Mg/l) des beauftragten Labores lagen. Gleiches gilt teilweise für Eisen. Hier lag die Nachweisgrenze bei <100µg/l. Bei den Versuchen K3-K5 traf das auch auf Eisen (untere Nachweisgrenze) und Nickel (untere Nachweisgrenze <10µg/l) zu.

Tabelle 13: Ergebnisübersicht

		Fe	Ni	Diclofenac	Sulfamatoxazol	TOC
		%	%	%	%	%
K1	2NF			93,2	93,5	100,0
	Molik+2NF	70,0	-107,0	90,5	88,0	89,0
K2	UF			2,4	3,2	
	Molik + UF	15,9	-162,5	13,7	-10,3	13,7
K3	UF+NF			93,1	92,1	86,8
	UF+NF			92,4	94,0	
	Molik+UF+NF			91,8	91,9	86,5
K4	Inopor			92,4	94,0	
K5	UF+AK			99,6	97,3	

Für Chrom konnten keine Werte ermittelt werden, da es ersichtlich ist, dass der MoliK-Katalysator Nickelionen einträgt. Damit sollte bei einer Trinkwasseraufbereitung möglichst auf diesen Katalysator verzichtet werden. Der Vorteil der höheren Flussraten sollte hier nicht ausschlaggebend sein, denn diese erreicht man auch durch größere Membranflächen, also parallel geschaltete Module. Beim Medikamentenrückhalt sind keine signifikanten Verbesserungen nachgewiesen worden. Dieser liegt tendenziell eher unter den Ergebnissen ohne Katalysator.

Außerdem ist zu erkennen, dass die UF-Membran nicht ausreicht, zuverlässig Medikamentenrückstände zurückzuhalten. Dies ist erst mit NF-Membranen oder AK-Filter möglich, wobei letztere noch etwas bessere Rückhalte zeigen (+ca. 6%). Die Abbildung 22 stellt die Ergebnisse noch einmal grafisch dar.

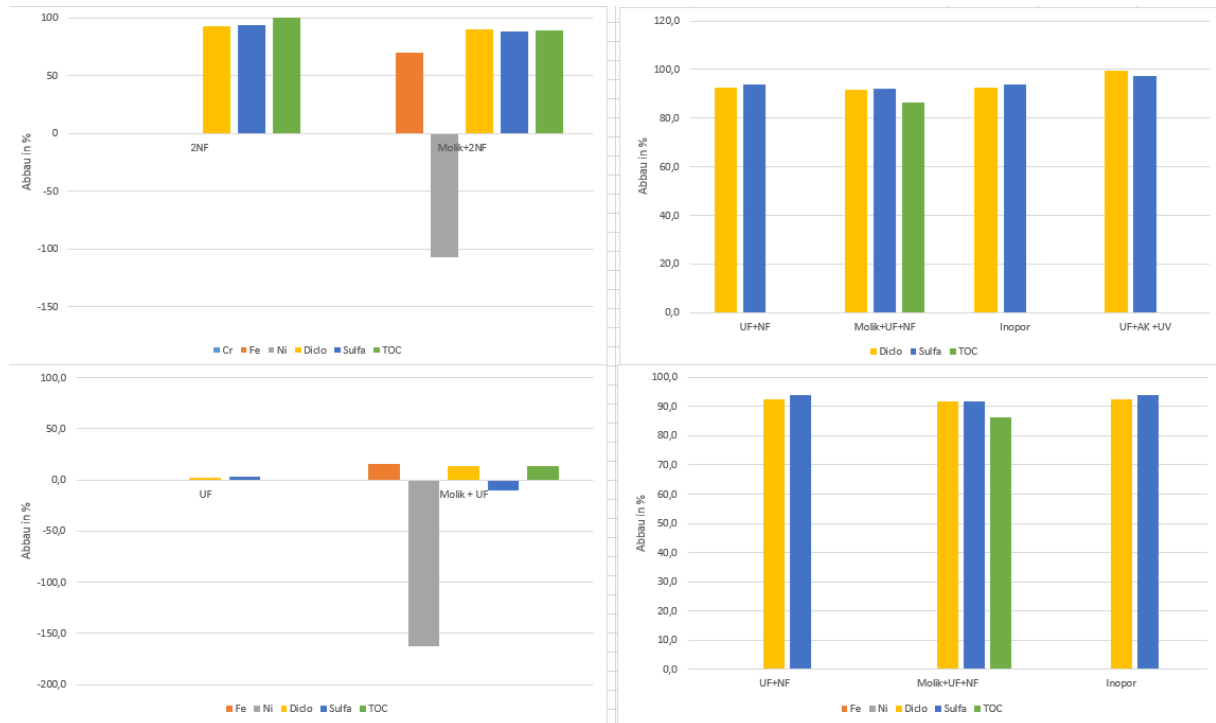


Abbildung 22: Rückhalt einzelner Stoffe in Abhängigkeit der Anlagenkonfiguration

Bezüglich des Medikamentenrückhalts sind alle Konfigurationen, die eine NF-Stufe oder eine AK-Filter enthalten wirkungsvoll. Welche Modulkombination im jeweiligen Anwendungsfall zum Einsatz kommt, hängt von den dann vorliegenden Randbedingungen ab.

3.3 Untersuchungen im Dauerbetrieb

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Prozessstabilität über einen längeren Betriebszeitraum sowie die Entwicklung des Rückhalts verschiedener Parameter über diesen Dauerbetrieb zu ermitteln. Hieraus können dann Reinigungszyklen, notwendige Wartungsintervalle und -aufgaben abgeleitet werden.

Spülung der Vorfilter

Die Siebfilter von Resideo besitzen eine Spülautomatik mit Zeitschaltuhr. Dabei wird nach dem Spin-Down-Prinzip mit Rohwasser der Filterkuchen abgeschert und aus dem System ausgeleitet. Diese Spülwirkung war nicht ausreichend und die sich gebildete Deck-(Filterkuchen-)schicht konnte wegen der zu geringen Geschwindigkeit nicht ausreichend abgeschert werden.

Deshalb wurden die Ventile ausgetauscht, welche sich bei Ansteuerung schlagartig öffnen. Dabei tritt ein höherer Impuls auf, der die Abscherung effektiver ermöglicht. Im Betrieb wurde festgestellt, dass ein starkes Hinauszögern der Reinigungsintervalle ein Verfestigen des Filterkuchens nach sich zieht, welcher dann nicht mehr so leicht gelöst werden kann. Das Spülintervall wurde in Auswertung der Versuchsergebnisse standardmäßig auf 01:00 h festgelegt, kann aber jederzeit individuell angepasst werden. Durch den Ventiltausch wurde der Verbau von Resideo-Filtern mit vorgefertigter Spülautomatik (vgl. Abbildung 23) war in der in der Beschaffung teurer als die eigene Zusammensetzung der passenden Ventile und das Bohren der Öffnung in das Filtergehäuse. Vor dem Hintergrund eine möglichst einfache und sehr kostengünstige Anlage zur Trinkwasseraufbereitung anbieten zu können, wurden deshalb die Resideo-Filter so ersetzt.



Abbildung 23: Resideo: Wolftechnik modifiziert von Inflotec (Bild: Radcenko)

Diese Modifikation hat sich hinsichtlich Performance und Stabilität bewährt und wird nun standardmäßig so verbaut.

Anpassung Rückspülung

Die Rückspülung der Membranstufen dient der Verlängerung der Betriebszeiten und dem Reduzieren von Stillstandzeiten durch notwendige Reinigungszyklen mittels Reinigungslösungen wie z.B. Zitronensäure.

Durch das Rückspülen mit Spülimpulsen entstehen Strömungsverhältnisse an der Membranoberfläche und in der Membran, die Ablagerungen lockern und abtragen können. Verblockungen können so ohne Chemikalieneinsatz im Betrieb gelöst bzw. verhindert werden. Auf diesen Aspekt wurde bereits unter Kapitel 3.2.3 eingegangen. Der Flux wird als Leitparameter genutzt. Ab einem bestimmten Wert werden mehrere Impulse gegeben, so dass sich die Deckschicht löst und wieder der Ausgangsflux erreicht wird. Die Häufigkeit der Impulsgebung ist abhängig von der Feedqualität und des Membrantyps. Auf diese Weise kann die Standzeit eines Membranmoduls deutlich verlängert werden.

Die vorgenommenen Optimierungen werden standardmäßig in die Wasseraufbereitungsanlage integriert und können in Abhängigkeit spezieller Randbedingungen wie z.B. die Rohwasserbeschaffenheit, Aufstellbedingungen und Verfügbarkeit von befähigtem Bedienpersonal weiter angepasst werden.

3.4 Ausführliche ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.4.1 Ökologische Bewertung

Durch den Einsatz einer keramischen Membran und deren Modifikation ist eine ressourceneffiziente Wasseraufbereitung möglich. Im Vergleich zu einer herkömmlichen Umkehrosmosemembran wird weniger Energie benötigt. Außerdem haben die NF Membran den Vorteil, dass sie rückspülbar sind.

Das System ist außerdem im Vergleich zu kommerziell verfügbaren polymeren NF-Membranen rückspülbar, regenerierbar und langlebig. Des Weiteren kommt es zur Steigerung der Rohstoffeffizienz durch längere Standzeiten der keramischen Membranen im Vergleich zu polymeren Membranen. Daraus folgt die Vermeidung von Abfällen, Herstellungskemikalien und Betriebsmitteln von NF Polymer-Modulen.

3.4.2 Technische Bewertung

Untersuchung der technologischen Leistungsfähigkeit der keramischen Membran, einschließlich Filtrationsrate, Rückhalteeffizienz und Langzeiteffekte. Durch Post-Modifikation

mit Polyelektrolyten entsteht eine keramische Nanofiltrationsmembran (NF) mit einzigartigen Trenn- und Materialeigenschaften. Das System ermöglicht die sichere Aufbereitung selbst von schwer behandelbaren Wasserressourcen (z.B. Flusswasser, Abwasser, Regenwasser) in einem Aufbereitungsschritt. Sowohl Partikeln (z.B. Mikroplastik), Bakterien und Viren, als auch gelöste Wasserinhaltsstoffe (Organik, Salze) werden zurückgehalten.

Herkömmliche NF-Membransysteme unterliegen grundsätzlich dem Problem des Foulings (Partikeln, Organik, Ausfällungen, Biofilm), d.h. dass die Membranen mit zunehmender Betriebsdauer durch Deckschichtbildung organischer sowie anorganischer Partikeln verblocken.

Durch die Integration des MOL®LIK-Katalysator zeigte sich im Praxistests eine Verbesserung der Filtrationsleistung der Membranen durch konstante Filtrationsrate. Es wurden weniger Reinigungsintervalle und eine Verlängerung der Lebensdauer beobachtet.

Durch den MOL®LIK konnte außerdem der Durchfluss der NF-Stufe um durchschnittlich 25% erhöht werden. D.h. es können größere Feedvolumenströme behandelt werden.

3.4.3 Ökonomische Bewertung

Im Vergleich zu herkömmlichen Umkehrosmosemembranen wird für den Betrieb weniger Energie benötigt. Außerdem ist eine Rückspülung möglich.

Es zeigt sich durch den Einsatz einer modifizierten Keramikmembran eine Vereinfachung der Wasseraufbereitung durch Umsetzung der Rückspülbarkeit und Regenerierbarkeit der NF-Trennschicht (einstufiger Prozess wegen Fouling-Resistenz). Somit entfällt bzw. reduziert sich die Vorbehandlung des Wassers durch Mikrofiltration im Vergleich mit derzeitigen NF-Systemen (Ressourcen- & Energieeffizienz).

Verlängerung der Membran-Lebensdauer im Vergleich zu herkömmlichen NF-Polymer Modulen. Dadurch Reduktion von Herstellungskemikalien, Betriebschemikalien und Abfallströmen, die mit kommerziellen NF-Systemen verbunden sind (Ressourceneffizienz). Senkung des spezifischen Energiebedarfs durch bessere Kontrolle des Foulings.

3.5 Darlegung der Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Inflotec entwickelt und baut dezentrale, energieeffiziente und ressourcenschonende Systeme zur Wasseraufbereitung, insbesondere zur Trinkwassergewinnung, Abwasserbehandlung und Nutzung von Brauchwasser für landwirtschaftliche Zwecke. Die Verwertung und Übertragung der Ergebnisse soll entsprechend in den Bereichen Trinkwasser, Brauchwasser und Abwasser erfolgen, vorerst in den Marktsegmenten, die bereits von Inflotec abgedeckt werden. Hierbei konzentriert sich Inflotec zunächst auf den europäischen Raum. Langfristig sind Märkte in Afrika, Asien und Südamerika im Fokus, da hier großer Bedarf an dezentralen, flexiblen Filtrationseinheiten besteht. Für die Verwertung wird zwischen verschiedenen Anwendungsfeldern unterschieden, wie Krisen- und Katastrophenhilfe, Städte/Gemeinden/Kommunen sowie Schwellen- und Entwicklungsländer. Die Breite des kommerziellen Marktes von dezentralen Filtrationssystemen wird unterteilt in den Outdoor-Bereich (Tiny-House, Hausboot, Caravan, Campingplätze, Gartensparte) und den Hausbereich (Untertischanlagen, SMART-House) für die Trinkwassergewinnung sowie Aufbereitung von Grau- und Bewässerungswasser.

Es sind folgende Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse geplant:

- Veröffentlichung der Ergebnisse in (inter)nationalen Fachzeitschriften und auf Konferenzen
- Wissenschaftliche Diskussion der Forschungsergebnisse und Know How-Transfer durch Vernetzung
- Beratungsfähigkeit durch Fortentwicklung/Übertragung der Projektergebnisse auf andere technische Lösungen der mobilen Wasseraufbereitung z.B. in Kooperation mit dem Technischen Hilfswerk und dem Wasser- und Schiffsamt
- Veröffentlichungen und Präsentation auf Messen (wie IFAT - Weltleitmesse für Umwelttechnologien, Hannover Messe)
- Veröffentlichungen und Präsentation in bestehenden Netzwerken, wie Netzwerk Technologiekompetenz Fluss-Strom, Clean River Solutions und
- Presse und Öffentlichkeitsarbeit
- Transfer der Untersuchungsergebnissen in bestehenden Plattformen aus dem Bereich der Wasserwirtschaft, wie beispielsweise Maritimes Cluster Norddeutschland e.V.

4. Schaffung einer Grundlage für die spätere technologische Verwertung der Projektergebnisse und Marktanalyse

4.1 Vorgehensweise der Potentialanalyse

Das Potential der Inflotec Anlagen wird im Bottom-Up Verfahren analysiert. Dabei wird die Technologie der Inflotec-Anlagen anhand der, aus der Literatur bekannten vier Potentialarten untersucht (Kaltschmitt, Streicher, und Wiese 2020).

Das theoretische Potential betrachtet, welche nutzbaren Einsatzmöglichkeiten für die Anlagen der Inflotec GmbH in Frage kommen. Dabei werden keine technischen und ökonomischen Einschränkungen berücksichtigt. Im Falle der Inflotec Anlagen bedeutet dies, dass alle globale Trinkwasserbedürfnisse mit Zugang zu Wasserquellen jeglicher Art in die Betrachtung einbezogen werden. Daher entspricht dieses Potential dem gesamten Trinkwasserbedarf weltweit.

Das technische Potential beschreibt hingegen, die für die Einsatzmöglichkeiten technische Grenzen der Anlagen. Dazu wird der Stand der Inflotec Anlagen zum Zeitpunkt der Untersuchung berücksichtigt, etwaige Weiterentwicklungen im Anschluss an den Betrachtungszeitraum haben keinen Einfluss auf die Analyse. Das technische Potential wird dabei mit zwei unterschiedlichen Ansätzen betrachtet, von Seiten des Angebots und der Nachfrage, für das technische Potential. Für die Inflotec GmbH bedeutet dies, dass die Anlagen entsprechend ihrer konstruktiven Bauweise auf mechanische Aufbereitung beschränkt sind, was einer technischen Nachfrage für vollumfängliche Trinkwasseraufbereitung, die auch auf chemische Aufbereitung zurückgreift, gegenübersteht.

Das ökonomische Potential beschreibt darauffolgend, wie das beschriebene technische Potential unter den gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen wirtschaftlich genutzt werden kann. Als Besonderheit muss hier für die Inflotec GmbH, der differenzierte Betrachtungsraum hervorgehoben werden. Die Mindestunterscheidung erfolgt in der Betrachtung des nationalen und internationalen Raums. In speziellen Fällen werden aber auch einzelne Regionalräume betrachtet. Für die Inflotec Anlagen stehen hierbei vor allem die regionalen Betriebskosten den regionalen Trinkwasserkosten gegenüber.

Das Marktpotential beschreibt die zu erwartende Nutzung innerhalb eines Betrachtungszeitraums und Untersuchungsgebiets. Der erwartbare Einsatz ist dabei meist geringer als das ermittelte ökonomische Potential, da hier verschiedenen Faktoren als Ein- und Beschränkungen wirken. Für die Inflotec Anlagen sind dies zum Beispiel Normrestriktionen, Konkurrenzanlagen und -anbieter, sowie Vertriebsfragen auf Seiten der potentiellen Kunden, als auch auf Seiten von Inflotec als Anbieter.

Die einzelnen Potentialarten der Inflotec Anlagen sind zusammenfassend in aufgeführt. In der Pyramide werden die Beziehungen der verschiedenen Potentialarten zueinander dargestellt und wie diese aufeinander aufbauen. Das Marktpotential an der Spitze repräsentiert dabei das real nutzbare Potential der Anlagen, was unter den gegebenen Marktbedingungen aus technischer und ökonomischer Sicht machbar ist.

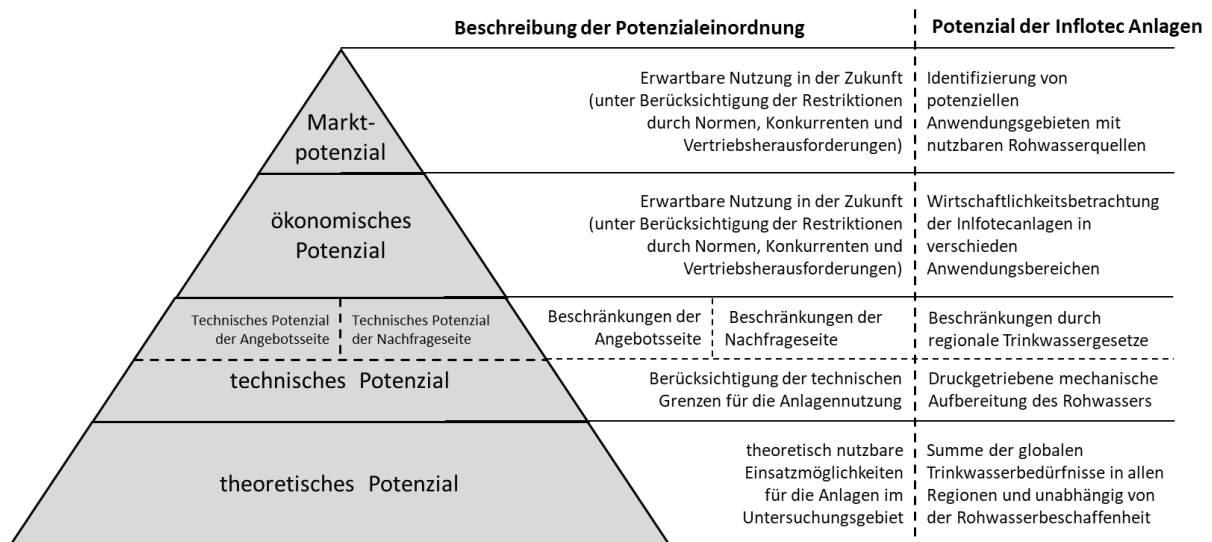


Abbildung 24: Potentialpyramide für die Inflotec Anlagen (eigene Darstellung nach Kaltschmitt, Streicher, und Wiese 2020)

4.2 Theoretisches Potential der Inflotec-Anlagen

Der Zugang zu sauberem Wasser wird für mehr und mehr Menschen zu einer immer größeren Herausforderung. Global gibt es immer mehr Menschen, denen der Zugang zu sauberem Wasser nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung steht. Laut UNICEF besteht aktuell für ca. 771 Millionen Menschen weltweit keine Grundversorgung mit Trinkwasser (Rohde 2023)

Die Prognosen für die Versorgung mit sauberem Wasser zeigt dabei eine zukünftige Verschlechterung auf. Schätzungen der Weltorganisation für Meteorologie bestätigen: „5 Milliarden Menschen werden im Jahr 2050 für mindestens einen Monat keinen Zugang zu genügend sauberen Wasser haben“ (World Meteorological Organization 2021).

Diese Unterversorgung mit Trinkwasser entsteht nicht durch unzureichend zur Verfügung stehende Rohwasserquellen, sondern durch unzureichend saubere Rohwasserquellen. Es besteht daher ein Defizit in der Aufbereitung dieser, aus Kostengründen oder dem Zugang zu entsprechender benötigter Technologie. Ebenso entsteht eine Trinkwasserunterversorgung durch infrastrukturelle Probleme, wie der unzureichenden Bereitstellung von Anschlüssen an bestehende Trinkwassernetze durch z.B. Zersiedelung im ländlichen Raum.

Hier besteht weltweit ein enormes theoretisches Potential für den Einsatz der Inflotec Anlagen, da diese auf Grund ihrer Bauweise nahezu überall mobil eingesetzt werden können und ihr modularer Aufbau sie in die Lage versetzt, mit nahezu jeder Rohwasserqualität umzugehen. Zusätzlich ist der Betrieb durch den Einsatz von erneuerbaren Energien, wie PV-Modulen unabhängig von einer lokalen Energieversorgung weitreichend möglich.

4.3 Technisches Potential der Inflotec-Anlagen

Der Einsatz der Inflotec-Anlagen wird durch das Designkonzept, Trinkwasseraufbereitung ohne Chemikalieneinsatz in der Auswahl der Rohwässer angebotsseitig eingeschränkt. Weiterhin wird der theoretisch globale Einsatz der Inflotec-Anlagen durch internationale und nationale Gesetzgebungen, wie Verordnungen und Richtlinien, nachfrageseitig eingeschränkt. Im aktuellen Abschnitt werden die wichtigsten technischen Einschränkungen herausgearbeitet, bevor darauffolgend die gesetzlichen Restriktionen am Beispiel Deutschlands dargestellt werden.

4.3.1 Technisches Potential in der chemiefreuen Trinkwasseraufbereitung (Angebotsseite)

Die Trinkwasseranlagen der Inflotec GmbH können nahezu alle Oberflächenwässer aufbereiten, die chemisch unbedenklich sind. Ihre Stärken liegen hierbei in den Bereichen der flexiblen Anwendung, da es ihre modulare Bauweise ermöglicht, sich an die verschiedenen Anforderungen der Wasseraufbereitung anzupassen.

Einschränkungen bestehen durch den Verzicht von chemischen Mittel zur Wasseraufbereitung. Das bedeutet, das Rohwässer, deren chemische Inhaltsstoffe die Grenzwerte der angewendeten Gesetzgebung nicht einhalten nicht als Rohwasser für die Wasseraufbereitung durch die Inflotec-Anlagen genutzt werden können.

Im Umkehrschluss bedeutet dies auch, dass alle theoretischen potenziellen Rohwasserquellen einer umfassenden Vorabprüfung unterzogen werden müssen, bei welcher eine vollumfängliche Analyse aller Parameter, der jeweilig zuständigen Verordnung, durchgeführt werden muss, um zu gewährleisten, dass eine Trinkwasseraufbereitung durch die Inflotec Anlagen möglich ist.

Aber auch der Einsatz im Sonderbereich der Grauwasseraufbereitung in Hausinstallationen wäre denkbar. Hier besteht ein enorm großes technisches Potential das aktuell nur in einem sehr geringen Maß abgedeckt wird. Die technischen Einschränkungen kämen hier nur sehr geringfügig zum Tragen, da Grauwasser, entstanden durch den häuslichen Gebrauch von Trinkwasser nicht sehr stark in seiner chemischen Beschaffenheit beeinflusst wird. Es handelt sich um also verschmutztes Trinkwasser, das chemisch stabil ist und somit von den Inflotec Anlagen aufbereitet werden kann.

4.3.2 Technisches Potential im Hinblick auf die deutsche Gesetzgebung (Nachfrageseite)

Wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, können die Inflotec Anlagen keine chemisch bedenklichen Gewässer zur Trinkwasseraufbereitung nutzen. Die chemische Bedenklichkeit ist dabei stark von den angewendeten Verordnungen abhängig.

In Deutschland ist die Trinkwasserverordnung als bestimmender Faktor für die Grenzwerte der Wasserparameter maßgebend. Das bedeutet, dass die Rohwässer den Grenzwerten der chemischen Bestimmung der deutschen Trinkwasserverordnungen entsprechen müssen um als geeignet eingestuft zu werden, um durch die Inflotec Anlagen genutzt werden können.

Für den Einsatz als Grauwasseraufbereitungsanlage gilt die Trinkwasserverordnung nicht, was die gesetzlichen Restriktionen für die Inflotec Anlagen lockert und gleichzeitig das technische Potential nachfrageseitig stark erweitert.

4.4 Ökonomisches Potential der Inflotec-Anlagen

Die Kosten für die Inflotec Anlagen belaufen sich fast ausschließlich auf die Investitionskosten für die Bereitstellung der Anlagen. Auf Grund der mechanischen Reinigung fallen fast keine Kosten für Betriebsmittel an. Die laufenden Kosten beziehen sich Großteiles auf die Bereitstellung der benötigten elektrischen Energie für die Pumpen und die UV-Lampen. Wird dieser benötigte Strom durch erneuerbare Energie bereitgestellt, wie bspw. Photovoltaik, dann reduzieren sich die Betriebskosten auf nahezu null.

Gerade für Bereiche, in denen der Zugang zu Trinkwasser durch hohe Kosten gekennzeichnet ist, ergibt sich ein ökonomisches Potential für die Inflotec-Anlagen. Das können im internationalen Bereich Entwicklungsländern sein, da hier, auf Grund von fehlender Infrastruktur hohe Transportkosten die Trinkwasserkosten beeinflussen. Im nationalen Bereich können diese Bereiche in Katastrophenfällen zu finden sein. Auch hier steigen die Kosten zur Bereitstellung von Trinkwasser mit den verbundenen hohen Transportkosten.

Im nationalen Betrachtungsraum sind im Normalfall die Trinkwasserkosten durch örtlichen Wasserversorger so gering, dass ein Einsatz der Inflotec Anlagen kaum ein ökonomisches Potential aufweist. Im Sonderfall wie z.B. nach Katastrophenfällen und ähnlichen Szenarien können die Inflotec Anlagen jedoch als kurzfristige Übergangslösung eingesetzt werden, um eine kostengünstige und alternative Trinkwasserversorgung sicherzustellen. Etablierte Systeme des THW veranschlagen ca. 1,1 Eurocent pro Liter (Bundesministerium für Justiz 2021) für die reine Trinkwasseraufbereitungsanlage.

Im Marktsegment der Trinkwasseraufbereitungsanlagen agieren bereits einige starke internationale Player mit entsprechenden Systemen, die denen der Inflotec Anlagen ähneln, wie die Containeranlagen zur Trinkwasseraufbereitung der MENA WATER GmbH (Mena Water 2024).

Der Einsatz als Grauwasseraufbereitungsanlage zeigt aktuell kein ökonomisches Potential auf, da die Trinkwasserkosten mit 0,2 Eurocent pro Liter (Statistisches Bundesamt 2023) aktuell so gering sind, dass aus rein wirtschaftlicher Sicht kein Nutzen aus der Wiederverwendung von gebrauchtem Trinkwasser entsteht. Zusätzlich sind bereits Anbieter in diesem noch kleinen Marktsegment vertreten, die bereits druckgetriebene, wie die Inflotec Anlagen, als auch drucklose Anlagen anbieten, welche durch eine höhere Stabilität bei geringeren Kosten wirtschaftlich attraktiver sind.

Alle Anbieter von potenziellen Konkurrenzanlagen haben gemein, dass sie seit einiger Zeit in ihrem jeweiligen Segment am Markt vertreten sind und somit bereits über eine etablierte Vertriebsstruktur verfügen.

4.5 Marktpotential

Die Inflotec Anlagen können national und international zur Trinkwasseraufbereitung eingesetzt werden, sind jedoch durch die nationalen und internationalen Trinkwasservorgaben in ihrer Anwendungsfähigkeit als Trinkwasseraufbereitungsanlagen eingeschränkt.

Die Einsetzbarkeit der Inflotec Anlagen zur Trinkwasseraufbereitung muss daher durch das Herausarbeiten eines Unique-Selling-Points (USP) geschärft werden, um potentiellen Kunden die Anwendungsvorteile der Inflotec Anlagen zu verdeutlichen. Hierdurch erfolgt zudem eine klare Abgrenzung zu aktuellen Konkurrenten am Markt, die aktuell noch fehlt.

Dieser USP sowie die Abgrenzung zur Konkurrenz muss anschließend durch verstärkte Vertriebsaktivitäten am Markt fundiert und verstetigt werden. Der Vertrieb ist essenziell, um sich am Markt zu etablieren und sich gleichzeitig gegenüber bereits angesiedelten Anbietern durchzusetzen.

Die Inflotec Anlagen können auch zur Grauwasseraufbereitung eingesetzt werden. Hier besteht jedoch aktuell kein nennenswertes ökonomisches Potential für druckgetriebene Anlagen. Durch die Trinkwasserversorger kommen nur sehr geringe Kosten auf die Verbraucher zu.

Unter dem Aspekt des Klimawandels und der steigenden Energiekosten, sowie der immer mehr in den Fokus tretenden nachhaltigen Verwendung von Wasser kann sich dieses Marktsegment in den kommenden Jahren oder Jahrzehnten jedoch schlagartig öffnen und enorme ökonomische Potentiale offenbaren, welche jedoch ebenfalls durch einen geschärften USP und verstärkte Vertriebsaktivitäten ausgeschöpft werden müssen.

5. Fazit

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Modifikationen eine sichere Trinkwasseraufbereitung zulassen. Eine Desinfektionsstufe am Ende der Aufbereitung ist stets vorzusehen. Bewährt hat sich die UV-Behandlung. Damit ist eine Trinkwasserproduktion mit dem mobilen Purification-System möglich.

Insgesamt existiert nun ein mobiles „Purification-System“, welches modular aufgebaut ist und an die jeweiligen Rohwässer angepasst zusammengestellt werden kann. Insgesamt sind alle Anlagenteile so aufgebaut, dass sie leicht zu bedienen sind und wenig Wartungsaufwand benötigt wird. Außerdem muss der Anlagenbetreiber keine gesonderte Ausbildung besitzen, sondern es reichen anwenderspezifische Einweisungen.

In den mehrmonatigen Testbetrieben wurde eine stabile Reinigungsleistung erzielt, wobei diese unter den in Deutschland üblichen klimatischen Randbedingungen erfolgte. Für den Einsatz in Klimazonen mit sehr hohen Temperaturen müssen noch weitere Vororttests durchgeführt werden, bevor eine sichere Trinkwasseraufbereitung nach Trinkwasserverordnung garantiert werden kann. Mikrobiologische Prozesse, die beim Fouling eine wesentliche Rolle auf Membranen spielen und bei der Lagerung von aufbereitetem Abwasser bis zur Verwendung eine wesentliche Rolle spielen, sind stark temperaturabhängig.

Im Rahmen des Projektes wurde die „Purification-Anlage“ der Firma Inflotec auch bei Gärrestwässern getestet. Dabei sind vielversprechende neue Anwendungsmöglichkeiten entstanden, die im Nachgang zum Projekt weiterverfolgt werden sollen.

Das Zusatzmodul MOL®LIK-Katalysator hat aufgrund seines Wirkprinzips weniger Effekte auf die Reinigungsleistung als auf die mögliche zu behandelnde Feedmenge und damit auf die notwendige Membranfläche. Signifikant längere Standzeiten konnten nicht nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse in den Versuchen zeigen auch, dass der Aktivkohlefilter eine Alternative zur NF-Stufe sein kann, man also je nach Anwendungsfall entscheiden muss, welche Konfiguration eingesetzt werden sollte.

Die Anlage wurde so konfiguriert, dass ein autarker Betrieb prinzipiell möglich ist, wenn regenerative Energien an der Anlage direkt erzeugt und verbraucht werden kann. Die modulare Gestaltung und der Einsatz unkomplizierter Anlagenaggregate und die auf ein Minimum reduzierte Steuerung und Regelung und Integration von sicherheitstechnischen Einrichtungen (z.B. eigenständige Notabschaltung bei zu hohem Anlagendruck) führen zu einer wartungsarmen Anlage, die nur wenige Eingriffe von außen benötigt. Diese sind derart, dass es nur geschultes aber kein besonders ausgebildetes Personal benötigt. Insgesamt handelt es sich um eine Low-Cost-Anlage, die durch ihre Modularität und den möglichen Adaptionen für weitere Anwendungsmöglichkeiten in Frage kommen und somit ein breites Anwendungsspektrum abdecken kann.

6. Literaturverzeichnis

- Bundesministerium für Justiz. 2021. „THWAbV - Verordnung über die Abrechnung von Unterstützungsleistungen des Technischen Hilfswerks“. 13. Oktober 2021. <https://www.gesetze-im-internet.de/thwabrv/BJNR466700021.html>.
- Kaltschmitt, Martin, Wolfgang Streicher, und Andreas Wiese, Hrsg. 2020. *Erneuerbare Energien: Systemtechnik · Wirtschaftlichkeit · Umweltaspekte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61190-6>.
- Koppe, Jan, und Marietta Hesse. 2019. „MEMBRANE SYSTEMS AND WATER STRUCTURES“. *Environmental Engineering and Management Journal*.
- Mena Water. 2024. „Trinkwasser Kompaktanlage SafeDrink | Kompaktanlagen“. 2024. <https://mena-water.eu/anlagen/trinkwasser/>.
- Rohde, Tim. 2023. „Weltwassertag 2023: Fakten zu Wasserknappheit & Sauberkeit | UNICEF“. 20. März 2023. <https://www.unicef.de/informieren/aktuelles/blog/-/weltwassertag-2023-zehn-fakten-ueber-wasser/275338>.
- Statistisches Bundesamt. 2023. „Entgelt für die Trinkwasser-versorgung in Tarifgebieten nach Tariftypen“. Statistisches Bundesamt. 27. März 2023. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/tw-08-entgelt-trinkwasserversorgung-tarifgeb-nach-tariftypen-2020-2022-land-bund.html>.
- World Meteorological Organization. 2021. *Progress on the Level of Water Stress*. Geneva: FAO and UN Water. <https://doi.org/10.4060/cb6241en>.