



FH MÜNSTER
University of Applied Sciences



IWARU Institut für
Infrastruktur · Wasser ·
Ressourcen · Umwelt

Vergleich von Systemen zur dezentralen Wasseraufbereitung in ländlichen Regionen ohne Zugang zu einwandfreiem Trinkwasser (TriWaSys)

Untersuchung mit synthetischem Grund- und Oberflächenwasser unter Laborbedingungen sowie praktischen Anwendungen in Uganda (Gulu)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
Gefördert unter dem Az: 37657/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning
Ramona Hinz M.Sc.
Dörthe Sievers M.Sc.
Thorsten Schmitz M.Eng.

Steinfurt
August 2023

Wissenschaftliche Leitung und Bearbeitung	
Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning (Leitung) Ramona Hinz M.Sc. Dörthe Sievers M.Sc. Thorsten Schmitz M.Eng.	FH Münster University of Applied Sciences Institut für Infrastruktur · Wasser · Ressourcen · Umwelt (IWARU) Stegerwaldstraße 39 48565 Steinfurt Tel: +49 (0) 2551 9-62163 Fax: +49 (0) 2551 9-62771 Mail: gruening@fh-muenster.de
Wissenschaftliche Begleitung	
Prof. Dr. Joachim Gardemann Dr. Hella Runge	FH Münster University of Applied Sciences
Assoziierte Partner	
academy for humanitarian action Akademie der Ruhr-Universität GmbH Suttner-Nobel-Allee 4 (Opelring 1) 44803 Bochum-Laer Fachlicher Ansprechpartner (WASH) Prof. Dr. Joachim Gardemann FH Münster - Kompetenzzentrum Humanitäre Hilfe Johann-Krane-Weg 23 48149 Münster E-Mail: gardemann@fh-muenster.de	Centre for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST) Marcio Botto Knowledge & Research Advisor B12-6020 2 Street SE, Calgary, Alberta T2H 2L8 Canada +1 403 243 3285 ext. 223 E-Mail: mbotto@cawst.org
arche noVa - Initiative für Menschen in Not e.V. Mathias Anderson Weißeritzstraße 3 01067Dresden Tel: +49 351 481984-61 Mathias.anderson@arche-nova.org	Wasserrucksack PAUL The WaterBackpack Company GmbH Prof. Dr. Franz-Bernd Frechen Weg in der Aue 36 34128 Kassel E-Mail: paul@waterbackpack.org
Lichtstrahl Uganda e.V. Merschkamp 30 48155 Münster E-Mail: kontakt@lichtstrahl-uganda.de	What a bird Lars Trappe und Kristin Skibba Brock 25 D-48329 Havixbeck E-Mail: info@what-a-bird.com
Technik ohne Grenzen e.V. Dr. Frank Neumann Richard-Strauß-Str. 38 91315 Höchstadt E-Mail: info@teog.de	bNovate Markus Gössling Otto-Hahn-Straße 23-25 33442 Herzebrock-Clarholz E-Mail: markus.goessling@bnovate.eu

Projektkennblatt

der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	37657/01-23 37657/02-23	Referat	23	Fördersumme	48.914 € 12.694 €
Antragstitel	<p>Vergleich von Systemen zur dezentralen Wasseraufbereitung in ländlichen Regionen ohne Zugang zu einwandfreiem Trinkwasser (TriWaSys) - Untersuchungen mit synthetischem Grund- und Oberflächenwasser unter Laborbedingungen sowie praktischen Anwendungen (Teil 1)</p> <p>Ergänzende Untersuchungen für Leistungs- und Betriebsvergleiche von Systemen zur dezentralen Aufbereitung unterschiedlicher Rohwässer zu trinkbarem Wasser in Entwicklungsländern (Teil 2)</p>				
Stichworte	Dezentrale und mobile Wasseraufbereitung, Keimreduktion, Helmintheneier, Trübung, Schwermetallrückhalt				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
14 Monate	03.08.2021	06.12.2022	2		
Zwischenberichte	Nicht gefordert				
Bewilligungsempfänger	FH Münster University of Applied Sciences Institut für Infrastruktur · Wasser · Ressourcen · Umwelt (IWARU) Prof. Dr.-Ing. Helmut Grüning Stegerwaldstraße 39 48565 Steinfurt			Tel	02551 9-62163
				Fax	02551 9-62271
				Projektleitung	Prof. Dr. Helmut Grüning
				Bearbeiter	Ramona Hinz M.Sc. Dörthe Sievers M.Sc. Thorsten Schmitz M.Eng.
Kooperationspartner	Prof. Dr. Joachim Gardemann (FH Münster) Dr. Hella Runge (FH Münster) Lichtstrahl Uganda e.V. (Münster)				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<ul style="list-style-type: none"> • Auswahlkriterien für dezentrale Trinkwasseraufbereitungssysteme für den Einsatz in Entwicklungsländern sowie Krisenregionen • Vergleichende Untersuchung zur Wirkung mobiler Systeme (Rückhalt von Helmintheneiern, Bakterien, gelösten Ionen) 					

- Beurteilung betrieblicher Bedingungen (Wartungsaufwand, Nutzerfreundlichkeit) und Kosten

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

- 1) Interviews mit Vereinen, Organisationen, Firmen und Produktherstellern und anschließende Auswahl von Systemen/Produkten.
- 2) Aufbau eines Versuchsstandes (technischer Maßstab) im Technikum der FH Münster (Campus Steinfurt) zur Untersuchung mit synthetischem Rohwasser (stoffliche Belastungen exemplarisch für Grundwasser und Oberflächenwasser)
- 3) Untersuchungen des Rückhaltes von Helmintheneiern (repräsentatives Quarmehl), Bakterien (E. coli-K12-Stamm). Nachweis mit Durchflusszytometrie und mit kultivierungsabhängigen Verfahren (KBE).
- 4) Bilanzierung der Zu- und Abläufe hinsichtlich des Rückhaltes ausgewählter Parameter (pH-Wert, Leitfähigkeit, Organik, Trübung, Färbung, Eisen, Mangan, Nitrat, Fluorid, Arsen).
- 5) Untersuchungen unter Realbedingungen in Uganda (Lichtstrahl Uganda e.V. in Gulu). Untersuchung verschiedener Grund- als auch Oberflächenwässer. Information der Bevölkerung durch Schulungen vor Ort zur erforderlichen Trinkwasserhygiene.

Vergleichende Gegenüberstellung sämtlicher Analyseergebnisse mit Erfahrungen zur Anwendbarkeit unter realen Bedingungen in einer Übersichtsmatrix.

Ergebnisse und Diskussion

Die untersuchten Systeme bzw. Produkte haben sich durch das jeweilige Wirkprinzip und durch das mögliche Behandlungsvolumen unterschieden. Das Spektrum reicht von Einwegprodukten auf Haushaltsebene (P&G™ Purifier of Water) bis zu dauerhaft verwendbaren Systemen zur Versorgung von ganzen Dorfgemeinschaften oder Flüchtlingscamps (Wasserrucksack PAUL®).

Alle Systeme bzw. Produkte weisen systemspezifische Vor- und Nachteile auf. Helmintheneier und Bakterien werden von allen Produkten maßgeblich reduziert und führen so zu einer Verbesserung der Wasserqualität. Eine Wasserqualität entsprechend den Vorgaben der deutschen Trinkwasserverordnung kann nicht gewährleistet werden. Eine nennenswerte Reduktion des Risikos gesundheitlicher Beeinträchtigungen ist jedoch möglich.

Grundsätzlich kommt es bei allen Systemen bzw. Produkten ohne Desinfektionsmittel zu einer Wiederverkeimung des Wassers bei anschließender Lagerung. Der Rückhalt von chemischen/gelösten Substanzen ist nicht zuverlässig gegeben. Insofern sind alle untersuchten Produkte für den Rückhalt von gelösten Stoffen ohne Berücksichtigung der Rohwasserzusammensetzung nicht uneingeschränkt einsetzbar.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Kooperation mit zahlreichen assoziierten Partnern.

Hinweise auf Internetseiten/Presse/Fachzeitschriften (Auswahl):

https://www.fh-muenster.de/forschung/forschungsprofil/projekt.php?anzeige=projekt&pr_id=1138

<https://en.fh-muenster.de/bau/aktuelles/pressearchiv.php?pmid=8751&imgid=19347>

<https://www.fh-muenster.de/hochschule/aktuelles/news/index.php?newsId=2691>

<https://www.fh-muenster.de/hochschule/aktuelles/pressemitteilungen.php?madid=8718>

<https://www.hn-nrw.de/wasseraufbereitungssysteme-in-uganda/>

https://www.sanitaerjournal.de/das-wichtigste-mittel-fuer-hygiene-bildung_18870

<https://www.wn.de/muensterland/kreis-steynfurt/steinfurt/sauberes-trinkwasser-fur-uganda-2594885>

<https://www.muensterschezeitung.de/lokales/staedte/steinfurt/sauberes-trinkwasser-fur-uganda-2594885>

<https://wirin.de/wirtschaft-muensterland/36-technik/27709-sauberes-trinkwasser-fuer-uganda>

gwf Wasser+Abwasser (2022) Das wichtigste Mittel für Hygiene: Bildung, Jahrgang 163, S. 46 - 47

Schulungen in Uganda durch Dörthe Sievers und Ramona Hinz.

Weitere Publikationen sind vorgesehen.

Fazit

Jedes der Systeme/Produkte verbessert die Rohwasserqualität bei sachgerechter Anwendung deutlich. Auch wenn zulässige Werte gemäß der Trinkwasserverordnung nicht eingehalten werden, ist eine maßgebliche Reduktion der Gesundheitsgefährdung gewährleistet. Die Systemauswahl muss abhängig vom erforderlichen Volumen und der Rohwasserzusammensetzung erfolgen. Die Aufbereitungssysteme erfordern ein Mindestmaß an Vorwissen zu Möglichkeiten und Grenzen der Systeme sowie zur Anwendung (Inbetriebnahme und Wartung).

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt.....	2
1 Abbildungsverzeichnis.....	7
2 Tabellenverzeichnis.....	9
3 Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis	10
4 Zusammenfassung	11
5 Veranlassung und Zielsetzung	13
6 Projektorganisation durch Arbeitspakete.....	15
7 Anforderungen und Systeme	17
7.1 <i>Humanitäre Standards bei der Versorgung mit Trinkwasser.....</i>	<i>17</i>
7.2 <i>Wasseraufbereitung: Anforderungen und Methoden</i>	<i>18</i>
7.3 <i>Vorstellung der untersuchten Systeme bzw. Produkte.....</i>	<i>18</i>
8 Untersuchungen unter Laborbedingungen - Versuchsanlage	26
9 Untersuchungen in Uganda	27
9.1 <i>Ort und Projekt</i>	<i>27</i>
9.2 <i>Verwendetes Grundwasser</i>	<i>27</i>
9.3 <i>Verwendetes Oberflächenwasser.....</i>	<i>27</i>
10 Parameter und Versuchsdurchführungen.....	29
10.1 <i>Parameter zum Vergleich des Stoffrückhaltes</i>	<i>29</i>
10.2 <i>Untersuchungen zur Reduktion der Trübung</i>	<i>29</i>
10.3 <i>Untersuchungen zum Helminthenei-Rückhalt durch Referenzpartikel</i>	<i>30</i>
10.4 <i>Methoden zur Bestimmung des Bakterienrückhaltes</i>	<i>31</i>
10.4.1 <i>Verbreitung und Größenordnung</i>	<i>31</i>
10.4.2 <i>Plattenverfahren zur Bestimmung von koloniebildenden Einheiten</i>	<i>32</i>
10.4.3 <i>Durchflusszytometrie zur Bestimmung der Gesamtkeimzahl</i>	<i>33</i>
10.4.4 <i>Zusammensetzung des Testwassers</i>	<i>35</i>
10.5 <i>Bestimmung des Rückhaltes von gelösten Ionen und Schwermetallen</i>	<i>35</i>

10.6	<i>Erstspülung der Filtersysteme und stabile Systemwirkung</i>	36
11	Ergebnisse und Auswertungen	37
11.1	<i>Reduktion der Trübung</i>	37
11.2	<i>Helminthenei-Rückhalt (mit Referenzpartikeln)</i>	38
11.3	<i>Bestimmung des Bakterienrückhaltes</i>	41
11.3.1	Untersuchungen unter Laborbedingungen	41
11.3.2	Untersuchungen unter Realbedingungen in Uganda	45
11.3.3	Informationen zum Bewertungskonzept	46
11.4	<i>Rückhalt gelöster Ionen und Schwermetallen unter Laborbedingungen</i>	48
11.4.1	Konzentrationen im synthetischen Rohwasser	48
11.4.2	Nitrat	49
11.4.3	Arsen	50
11.4.4	Eisen	51
11.4.5	Mangan	51
11.4.6	Fluorid.....	52
11.5	<i>Untersuchungen zum Rückhalt gelöster Ionen und Schwermetalle in Uganda</i>	53
11.5.1	Probenahme und Konzentrationen im Rohwasser	53
11.5.2	Systemspezifische Rückhaltewirkung unter realen Bedingungen	54
11.6	<i>Grenzen des Rückhaltes gelöster Ionen und Schwermetalle</i>	56
11.7	<i>Zusätzliche Untersuchungen zur langfristigen Filterwirkung</i>	56
12	Vergleichende Gesamtbewertung	59
13	Erfahrungen und weitere Entwicklungen in Uganda	64
14	Fazit und Ausblick	67
15	Literaturverzeichnis	69

1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: P&G™ Purifier of Water - Produkt und Aufbereitungsprozess	22
Abbildung 2: What a Bird - Produkt und Aufbereitungseinheit sowie Anwendung	22
Abbildung 3: ATC Super Sterasyl® - Produkt und Aufbereitungseinheit (Bild rechts: Fa. Doulton).....	23
Abbildung 4: Wasserrucksack PAUL® - System und Aufbereitungseinheit (Membrane).....	24
Abbildung 5: Sandfilter nach Empfehlung der CAWST - System (links) und Baumaterial vor dem Aufbau in Uganda.....	25
Abbildung 6: Versuchsstand zur Herstellung und Zugabe des Testwassers	26
Abbildung 7: Teil der Stadt Gulu mit dem Areal Lichtstrahl Uganda e.V. (blau) sowie den Probenahmestellen (Oberflächenwasser Wetlands (rot) und Grundwasserquelle Wetlands (gelb) - Entfernung der beiden Punkte ca. 500 m (Karte verändert nach Google Earth, CNES/Airbus).	28
Abbildung 8: Oberflächenwasser-Probenahmestelle Wetlands	28
Abbildung 9: Quellfassung im Village (speist die Wetlands)	28
Abbildung 10: Aufnahme unterschiedlicher Helmintheneier (Jiménez, 2006).....	30
Abbildung 11: Schematisch dargestellte Funktionsweise eines Durchflusszytometers (Kötzsch et al. 2012).....	34
Abbildung 12: Online-DFZ "BactoSens" der Firma SIGRIST-PHOTOMETER AG (links) und im Gerät ablaufende Arbeitsschritte (rechts) (bNovate Technologies SA, 2020).....	34
Abbildung 13: Typische Totalzellzahlen verschiedener Wassertypen (Kötzsch und Sinreich, 2014)	35
Abbildung 14: Vergleich der prozentualen Trübungsreduktion der GW- und OW.....	38
Abbildung 15: Spezifischer Rückhalt zum Zeitpunkt des stationären Betriebszustandes für die Fraktionen 10 bis 25 µm und 25 bis 40 µm.....	40
Abbildung 16: Gegenüberstellung der durch DFZ ermittelten TCC- und ICC-Reduktionen bezogen auf die Zuläufe und direkten Abläufe (t = 0).....	43
Abbildung 17: Gegenüberstellung der prozentualen Änderung der TCs und ECs unter Realbedingungen in Gulu (Uganda) in Abhängigkeit vom jeweiligen Rohwassers und der Behandlung in Bezug zum jeweiligen Zulauf	46
Abbildung 18: Spezifischer Nitrat-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte (Laborbedingungen)	50
Abbildung 19: Spezifischer Arsen-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Laborbedingungen	50

Abbildung 20: Spezifischer Eisen-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Laborbedingungen	51
Abbildung 21: Spezifischer Mangan-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Laborbedingungen	52
Abbildung 22: Spezifischer Fluorid-Rückhalt (in %) unter Laborbedingungen für Oberflächenwasser (OW) und Grundwasser (GW)	53
Abbildung 23: Spezifischer Eisen-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Realbedingungen mit Oberflächenwasser mit einer Ausgangskonzentration von 1,11 mg/l	54
Abbildung 24: Spezifischer Mangan-Rückhalt (in %) bei Anwendung unter Realbedingungen mit Oberflächenwasser bei einer Ausgangskonzentration von 0,7 mg/l	55
Abbildung 25: Verlauf der Zellzahl (TCC) im Ablauf des PAULs über 1200 l bei Beschickung mit Wasser aus dem Dortmund-Ems-Kanal (Zulauf TCC = 4,88 Mio. Zellen/ml) am ersten Tag	57
Abbildung 26: Anwendung der Filterkerzen des ATC Super Sterasyl® zur Aufbereitung von örtlichem Oberflächenwasser	64
Abbildung 27: Einsatz des What a Bird in Uganda	65
Abbildung 28: Einsatz des Wasserrucksack PAUL® zur Vorbehandlung des Wassers auf dem Gelände des Vereins Lichtstrahl Uganda e.V. in Gulu	66

2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die verschiedene Arbeitspakete des Projektes.....	15
Tabelle 2:	Täglicher Mindestwasserbedarf in Litern pro Person in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen (verändert nach Sphere Association, 2018)	17
Tabelle 3	Übersicht über die untersuchten Wasseraufbereitungssysteme mit Herstellerangaben.....	21
Tabelle 4:	Trübungen (in NTU) für die verschiedenen synthetischen Rohwässer (Zuläufe) sowie der Abläufe (teilweise mit unterschiedlichen Spülvolumina vor der Messung)	37
Tabelle 5:	Prozentualer spezifischer fraktionierter Partikelrückhalt aller Produkte zum stationären Betriebszustand	39
Tabelle 6:	Vergleichende Übersicht der Ergebnisse bezüglich des Rückhaltes der Produkte gegenüber Bakterien.....	41
Tabelle 7:	Übersicht über die auf der Nährkartonscheibe befindlichen KBE der direkten Abläufe des synthetisch zusammengesetzten Oberflächenwassers nach der Behandlung	44
Tabelle 8:	Anzahl der KBE nach Aufbereitung der Rohwässer (GW und OW) - Sortierung entsprechend der Agarplatten nach TC (Gesamtkeimzahl) und EC (Coliforme und E. coli-spezifisch)	45
Tabelle 9:	Dosierung der Trägersalze für das Erreichen der Zielkonzentrationen und daraus resultierende Zulaufkonzentrationen sowie Grenzwerte der WHO.....	49
Tabelle 10:	Zulaufkonzentrationen der zwei Ausgangswässer in Gulu	53
Tabelle 11:	Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Produkte (teilweise subjektive/qualitative Bewertung).....	62

3 Abkürzungs- und Begriffsverzeichnis

Begriff	Erläuterung
ATC	ATC Super Sterasyl® von British Berkefeld® (Doulton®)
CAWST	Centre for Affordable Water and Sanitation Technology
DCC	Damaged Cell Count (Zahl geschädigter Zellen)
DFZ	Durchflusszytometrie
E.coli	Escherichia coli
GW	Grundwasser
HNAP	High Nucleic Acid Percentage (hoher Prozentsatz des Nukleinsäuregehaltes)
IBC	Intermediate Bulk Container
ICC	Intaktzellzahl = intact cell count
KBE	Koloniebildende Einheiten
OW	Oberflächenwasser
PAUL	Portable Aqua Unit for Lifesaving
P&G	Procter & Gamble
TCC	Totalzellzahl = total cell count
TrinkwV	Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung)
WASH	Wasser-, Sanitärversorgung und Hygieneaufklärung
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes wurden fünf unterschiedliche Systeme bzw. Methoden zur Rohwasseraufbereitung in Krisenregionen untersucht (Kapitel 7.3). Bei der Auswahl wurde auf repräsentative Systeme bzw. Methoden aus dem breiten Spektrum der Behandlungsmöglichkeiten geachtet. Wesentliche Unterscheidungsmerkmale waren das jeweilige methodenspezifische Wirkprinzip und das mögliche Behandlungsvolumen. Das Spektrum umfasst Einwegprodukte auf Haushaltsebene (P&G™ Purifier of Water) bis dauerhaft verwendbare Systeme zur Versorgung von Dorfgemeinschaften oder Flüchtlingscamps (Wasserrucksack PAUL®). Dabei reicht das jeweilige Behandlungsvolumen von wenigen Litern pro Tag bis zu über 1.000 Liter pro Tag. Neben einem Pulverprodukt (P&G™ Purifier of Water), das direkt dem Rohwasser zudosiert wird, erfolgten eine Untersuchung unterschiedlicher Filtersysteme.

Die Untersuchungen erfolgten mit synthetischem Rohwasser mit definierter stofflicher Belastung unter Laborbedingungen im Technikum für Wasserversorgung und Stadthydrologie der FH Münster (Kapitel 8) und unter realen Bedingungen im Dorf „Obiwa West“, in Gulu im Norden Ugandas auf dem Projektgelände des Münsteraner Vereins Lichtstrahl Uganda e.V. (Kapitel 9).

Zur Bewertung der Systemwirkung wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt, um repräsentative Stoffe und Stoffkonzentrationen in Krisenregionen abzubilden. Dabei wurden vor allem Bedingungen des afrikanischen Kontinentes berücksichtigt. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf dem Rückhalt von Helmintheneiern und der Reinigungswirkung bei bakteriologischer Belastung. Für den entsprechenden Nachweis wurde die neuartige Methode der Durchflussszytometrie (DFZ) verwendet (Kapitel 10.4.3). Mit der kultivierungsabhängige DFZ sind umfangreichere Aussagen zur bakteriellen Belastung und zum Bakterienrückhalt möglich, als mit dem herkömmlichen Plattenverfahren. Dies ist bei der Systembewertung zu berücksichtigen.

Die Untersuchungen zum Rückhalt von Helmintheneiern erfolgte mit einem gesiebten Quarzmehl mit einer repräsentativen Korngrößenverteilung von bis zu 40 µm. Die Rohwasserbelastung und der Rückhalt wurde durch Partikelzählung bestimmt (Kapitel 10.3 und 11.2).

Alle Systeme bzw. Produkte weisen systemspezifische Vor- und Nachteile auf. Helmintheneier und Bakterien werden von allen Produkten maßgeblich reduziert und führen so zu einer deutlichen Verbesserung der Wasserqualität (Kapitel 11.2 und 11.3). Eine sichere Reduktion mikrobiologischer Belastungen inklusive des breiten Spektrums möglicher chemischer Belastungen kann keines der untersuchten Systeme bzw. Produkte leisten. Eine Desinfektionswirkung weist ausschließlich das P&G™-Pulver durch das enthaltene Chlor auf. Die Filtersysteme reduzieren die Anzahl der Bakterien, haben aber keine ausreichende Desinfektionswirkung. Andererseits zeichnen sich die untersuchten Filtersysteme durch einen wirksameren Rückhalt von Helmintheneiern aus. Systembedingt können gelöste Stoffe durch Filtration nur eingeschränkt zurückgehalten werden (Kapitel 11.4 und 11.6).

Der bei der Wasseraufbereitung zentrale Parameter „Trübung“ wurde durch Zugabe von Ton und Algenpulver eingestellt. Die Trübung wurde von den Systemen bzw. Produkten zu über 90 % bis 99,8 % reduziert. Auch die Reduktion der Färbung war hoch.

Maßgeblich für die Systemwirkung ist die Rohwasserbelastung. Für die Wahl eines wirksamen Aufbereitungsverfahrens bzw. entsprechender Systeme sollte möglichst vorab eine Analyse des Rohwassers durchgeführt werden.

Für die Filtersysteme ist vor der Nutzung als Trinkwasser eine Systemspülung erforderlich. Das von den Herstellern angegebene Spülvolumen reicht für ein partikelfreies Filtrat häufig nicht aus (Kapitel 10.6). Um die maximale Filterwirkung zu erreichen, ist darüber hinaus eine „Einfahrphase“ erforderlich. Beispielsweise zeigte sich beim Wasserrucksack PAUL[®], dass sich der Bakterienrückhalt bei Anwendung über einen längeren Zeitraum verbessert. Das bedeutet für die Membran bzw. Oberflächenfilter, dass nach einer gewissen Betriebszeit (Einfahrphase) bessere Rückhalte erzielt werden können, als bei den im Rahmen der Untersuchungen über einen begrenzten Zeitraum erzielten Ergebnisse .

Ein maßgebliches Kriterium der System- bzw. Produktbewertung ist die Desinfektionswirkung bei anschließender Lagerung des aufbereiteten Wassers. Erfahrungsgemäß werden die Behälter für den Transport und die Speicherung (z. B. in Kanistern) nicht oder unzureichend gereinigt. Das Wasser lagert dann ggf. über Stunden und Tage möglicherweise bei hohen Temperaturen. Die Zellzahlen nehmen exponentiell zu. Bei allen Systemen bzw. Produkten ohne Desinfektionsmittel kommt es zu einem signifikanten Anstieg der Zellzahl im Wasser bei anschließender Lagerung. Auch die Depotwirkung durch das Chlor hält nur über wenige Stunden an.

In Kapitel 12 erfolgt eine vergleichende Gegenüberstellung der untersuchten Systeme bzw. Produkte. In einer Matrix (Tabelle 11) werden die Systemwirkungen übersichtlich veranschaulicht. Alle Systeme bzw. Produkte weisen spezifische Vor- und Nachteile auf.

Neben der Betrachtung ökonomischer Aspekte erfolgte auch eine ökologische Bewertung. Hier wurde der Wasserrucksack PAUL[®] als besonders langfristige Lösung positiv bewertet. Das System ATC Super Sterasyl[®] und das Pulver P&G[™] Purifier of Water sind vergleichsweise hochpreisig. Die Lebensdauer der Filtereinheiten reicht produktspezifisch von einem halben Jahr bis zu zehn Jahren.

Ein maßgebliches Bewertungskriterium waren anwendungsbezogene betriebliche Aspekte. Der Aufwand für das Verständnis der Anwendung und die Wartung muss niederschwellig sein. Diesem Anspruch genügen die untersuchten Systeme bzw. Produkte weitgehend.

Auch wenn die Vorgaben der Trinkwasserverordnung nicht von allen Produkten eingehalten werden, erfolgt grundsätzlich eine nennenswerte Reduktion des Risikos gesundheitlicher Beeinträchtigungen.

5 Veranlassung und Zielsetzung

In Deutschland ist Trinkwasser in hoher Qualität eine Selbstverständlichkeit. Vor allem durch die deutschen Trinkwasserverordnung (TrinkwV, 2016) werden Standards gesetzt. Wassermangel, infrastrukturelle Defizite und fehlendes Wissen über die Voraussetzungen und die Bedeutung von hygienisch einwandfreiem Trinkwasser führt in vielen Ländern der Erde zu Krankheiten, häufig mit Todesfolge. Eine akzeptable Trinkwasserqualität nach Standard der World Health Organisation (WHO), kann in den meisten Ländern im globalen Süden nicht erreicht werden. Dies gilt insbesondere für ländliche Regionen vieler Entwicklungsländer, in denen aus ökonomischen Gründen eine gesicherte staatliche Versorgung mit Trinkwasser nicht gegeben ist (UNICEF, 2013).

Probleme mit der Trinkwasserversorgung bestehen vor allem in ländlichen Regionen, wo das gerade verfügbare Wasser getrunken wird. Häufig fehlen finanzielle Mittel bereits für eine erste Analyse und für ein kontinuierliches Monitoring der Wasserqualität. Eine Aufbereitung des Wassers ist selten und oftmals unzureichend. Gesundheitsgefährdende Stoffe werden oral aufgenommen.

Zu der Problematik einer dauerhaften gesicherten Versorgung in vielen Ländern der Erde kommen Herausforderungen der Trinkwasserversorgung in Krisenregionen. Um humanitäre Hilfe u. a. durch medizinische Versorgung in diesen besonderen Situationen leisten zu können, ist einwandfreies Trinkwasser von elementarer Bedeutung. Hier muss häufig die Wasserversorgung innerhalb kurzer Zeit i. d. R. durch mobile Systeme sichergestellt werden.

Die Auslöser von Krankheiten durch eingeschränkte Wasserqualität lassen sich in drei wesentliche Gruppen gliedern:

- Parasiten
- mikrobiologische Belastungen
- gelöste Stoffe

Die Wirkung der Wasserinhaltsstoffe hängt maßgeblich von der Anzahl der Bakterien oder Viren sowie Konzentration der Wasserinhaltsstoffe ab.

Zur Entfernung biologischer und chemischer Verunreinigungen aus dem Rohwasser gibt es verschiedene Systeme bzw. Methoden und Verfahren. Für die jeweiligen marktverfügbaren mobilen Wasseraufbereitungssysteme liegen häufig bereits Einschätzungen zur Rückhaltewirkung einzelner Parameter vor. Dabei können die Angaben nur bedingt für einen Produktvergleich herangezogen werden, da häufig genaue Angaben zur Beschaffenheit des verwendeten Rohwassers fehlen. Darüber hinaus sind die Einsatzmöglichkeiten der Aufbereitungssysteme durch die Größe resp. das aufzubereitende Volumen nicht unmittelbar vergleichbar. Ein objektiver Vergleich ist zudem aufgrund der unterschiedlichen Methoden der Wasseraufbereitung schwierig. Eine vergleichende Untersuchung der Produkte setzt gleiche Bedingungen unter Anwendung des gleichen

Testwassers voraus.

Folgende Ziele sind vor diesem Hintergrund im Rahmen des Projektes verfolgt worden:

- Auswahl geeigneter dezentraler Aufbereitungssysteme zur Aufbereitung von Trinkwasser in Entwicklungsländern sowie Krisenregionen
- Vergleichende Untersuchung dieser mobilen Systeme hinsichtlich des Rückhaltes von Helmintheneiern, Bakterien sowie gelösten Ionen
- Untersuchung der hygienischen Bedingungen durch Bakterienreduktion und möglicher Wiederverkeimung nach einem Zeitraum von 48 Stunden
- Beurteilung der betrieblichen Bedingungen (Wartungsaufwand, Nutzerfreundlichkeit) und der Kosten

Die Untersuchungen sollten exemplarisch für die Aufbereitung von Oberflächenwasser (OW) und Grundwasser (GW) erfolgen, die Stoffe unterschiedlicher Art und Konzentration enthalten. Für die Untersuchungen wurden sowohl synthetisch zusammengesetzte Wässer als auch Realwässern in Uganda (Gulu) verwendet. Insgesamt sollten Aussagen über Produktanwendungen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen erfolgen, um eine Übertragung der Erkenntnisse auf möglichst viele Orte und Anforderungen zu ermöglichen.

Die Ergebnisse sollen unterschiedlichen Vereinen, Organisationen und auch Herstellern (siehe assoziierte Partner) helfen, die Einsatzmöglichkeiten der Aufbereitungssysteme einschätzen zu können. Übergeordnetes Ziel war es, die Untersuchungsergebnisse mittels einer Matrix hinsichtlich der genannten Parameter produktspezifisch vergleichend gegenüber zu stellen. Abhängig von den örtlichen Bedingungen soll es dadurch möglich sein, ein geeignetes System oder die passende Aufbereitungsmethode auszuwählen.

6 Projektorganisation durch Arbeitspakete

Die Bearbeitung des Projektes umfasst acht Arbeitspakete (Tabelle 1). Die vergleichenden Untersuchungen wurden im Technikum für Stadthydrologie und Wasserversorgung der FH Münster (Campus Steinfurt) und unter realen Bedingungen in Uganda durchgeführt. Während im Technikum synthetisches Wasser mit individueller stofflicher Belastung verwendet wurde, entsprach das untersuchte Wasser in Uganda den dortigen Bedingungen.

Tabelle 1: Übersicht über die verschiedenen Arbeitspakete des Projektes

Arbeitspaket	Kurzbeschreibung
I	Recherche, Produktauswahl, Versuchsplanungen und Versuchsaufbau
II	Simulation von Helmintheneiern/Partikelrückhalt
III	Mikrobiologische Untersuchungen mit <i>Escherichia coli</i> (<i>E. coli</i>) K12-Stamm sowohl mit Durchflusszytometrie als auch mit klassischen Nährböden (Kultivierungsverfahren)
IV	Rückhalt von gelösten Wasserinhaltsstoffen und physikochemischen Parametern
V	Untersuchungen mit Realwässern (Oberflächenwasser und Grundwasser) in Uganda
VI	Vergleich der Ergebnisse zwischen synthetisch hergestellten Wässern und Realwässern
VII	Nachuntersuchungen und Wiederholungen
VIII	Dokumentation

Arbeitspaket I: Es wurden zahlreiche Interviews mit Vereinen, Organisationen, Firmen und Produktherstellern geführt, die im Bereich der Trinkwasseraufbereitung in Entwicklungsländern und Krisenregionen tätig sind, um einen Überblick über bestehende Produkte der Wasseraufbereitung zu bekommen. Anschließend erfolgten die Auswahl der untersuchten Systeme bzw. Aufbereitungsmethoden und der Aufbau des Versuchstandes im Technikum.

Arbeitspaket II: Im Versuchstand wurde ein repräsentatives Quarzmehl (durch Siebung fraktioniertes Millisil W4) in Leitungswasser eingerührt. Das mit Quarzmehl versetzte Wasser wurde anschließend behandelt. Anschließend erfolgte die Ermittlung der Partikelzahlen mit einem Partikelzähler.

Arbeitspaket III: Im Versuchstand wurde Leitungswasser mit einem *E. coli*-K12-Stamm versetzt. Unterschiedliche Größenordnungen der Bakterienanzahl in Oberflächenwasser und Grundwasser

wurden berücksichtigt. Zur Bestimmung der mikrobiologischen Rückhalteraten der Produkte unter Laborbedingungen wurden das noch vergleichsweise selten eingesetzte Verfahren der Durchflusssytometrie und die klassischen Nährböden (koloniebildende Einheiten) verwendet.

Arbeitspaket IV: Die Zu- und Abläufe der fünf dezentralen Aufbereitungssysteme wurden hinsichtlich des Rückhaltes unterschiedlicher Parameter im Technikum untersucht. Zur Parameterpalette zählten: Temperatur, pH-Wert, Leitfähigkeit, Organik, Trübung, Färbung, Eisen, Mangan, Nitrat, Fluorid, Arsen.

Arbeitspaket V: Die Untersuchungen unter Realbedingungen erfolgten auf dem Gelände des Vereins *Lichtstrahl Uganda e.V.* in Gulu (Uganda). Zu den Untersuchungen in Uganda zählten die mikrobiologischen Untersuchungen und die der physikochemischen Parameter. Es wurden sowohl verschiedene Grund- als auch Oberflächenwässer untersucht. Darüber hinaus wurde die Bevölkerung vor Ort durch Schulungen für die erforderliche Trinkwasserhygiene sensibilisiert.

Arbeitspaket VI: Sämtlicher Analyseergebnisse mit Erfahrungen zur Anwendbarkeit unter realen Bedingungen wurden in einer Übersichtsmatrix vergleichend gegenübergestellt.

Arbeitspaket VII: Durchführung von Nachuntersuchungen und Wiederholungsprüfungen bei nicht eindeutigen Ergebnissen.

Arbeitspaket VIII: Dokumentation und Präsentation der Ergebnisse.

7 Anforderungen und Systeme

7.1 Humanitäre Standards bei der Versorgung mit Trinkwasser

Das Recht auf eine Wasserversorgung ist als Menschenrecht untrennbar mit dem Recht auf Gesundheit verbunden. Internationales Recht erkennt an, dass jeder Mensch den Anspruch auf Zugang zu sauberem und bezahlbarem Wasser in ausreichender Menge hat (OHCHR, 2010). Die humanitären Standards werden durch das *Sphere-Handbuch* beschrieben, das die Mindeststandards auf Basis rechtlicher sowie ethischer Grundlagen in Kooperation mit zahlreichen weltweit tätigen Organisationen aufgestellt hat. Einen großen Teil der humanitären Standards des *Sphere-Handbuchs* stellt der Bereich der Wasserversorgung dar, die in das *Wasser-, Sanitärversorgung und Hygieneaufklärung (WASH)*-Konzept fällt (Sphere Association, 2018). Der genaue Wasserbedarf ist dabei grundlegend vom Klima, der Kultur, den physiologischen Bedingungen sowie von Traditionen, beispielsweise bei der Art und Zubereitung der Nahrung abhängig (Tabelle 2). Abhängig vom Wassergebrauch wird von dem zu verwendenden Wasser eine entsprechende Qualität verlangt. Je nach Abgabe (Volumenstrom) sollen maximal 250 Menschen an einer Zapfstelle mit Trinkwasser versorgt werden (Durchfluss: 7,5 l/min). Ziel ist es zudem, eine Mindestentnahmezeit der Abgabestelle von 8 h/Tag zu gewährleisten (Sphere Association, 2018).

Tabelle 2: Täglicher Mindestwasserbedarf in Litern pro Person in Abhängigkeit von unterschiedlichen Rahmenbedingungen (verändert nach Sphere Association, 2018)

Bedarf	Menge (Liter/Person/Tag)	Einfluss und Bedingungen
Lebensnotweniger Bedarf: Wasseraufnahme (Essen und Trinken)	2,5 bis 3	Klima und individuelle Physiologie
Grundlegende Hygienepraktiken	2 bis 6	Soziale und kulturelle Normen
Grundbedarf für das Kochen	3 bis 6	Art der Nahrungsmittel und soziale und kulturelle Normen
Gesamter Grundbedarf an Wasser	7,5 bis 15	

Ein Zugang zu sauberem Wasser, so wie es jedem Menschen laut Menschenrechtskonvention (OHCHR, 2010) zustehen sollte, bedeutet, dass:

- Wasser für den persönlichen und häuslichen Gebrauch eine akzeptable Farbe sowie einen zumutbaren Geruch und Geschmack hat.
- Wasser ausreichend für persönliche Bedürfnisse und den Haushalt, wie Hygiene, sanitäre Zwecke und Essenszubereitung zur Verfügung stehen.
- Wasser sauber und frei von Mikroorganismen, chemischen Substanzen und radiologischen Gefahren ist, die die Gesundheit negativ beeinflussen können.

- Wasser sich im Umfeld von 1.000 m oder weniger als 30 min Fußweg Entfernung befindet.
- Wasserkosten laut des Entwicklungsprogramms der Vereinten Nationen (UNDP) 3 Prozent des Haushaltseinkommens nicht überschreiten soll, um erschwinglich zu bleiben (OHCHR, 2010).

7.2 Wasseraufbereitung: Anforderungen und Methoden

Die Grenzwerte für Wasser für den täglichen Gebrauch, die weltweit als anerkannt gelten, sind durch die WHO definiert worden (WHO, 2017). Zur Wasseraufbereitung gibt es verschiedene Verfahren, durch welche die Zurverfügungstellung mit einwandfreiem Trinkwasser ohne hygienische Mängel gewährleistet werden soll, was einem Wasser entspricht, von welchem keine Gesundheitsgefahr ausgeht. Diese gliedern sich grundsätzlich in physikalische, chemische und die biologische Aufbereitungsverfahren. Entsprechend der Größe und Eigenschaften der verschiedenen Wasserinhaltsstoffe gestalten sich die Ziele und Anforderungen an die Mechanismen in der Wasseraufbereitung. Eine besondere Bedeutung kommt der Form des Vorliegens der Inhaltsstoffe zu. Es wird zwischen der Abtrennung von partikulären Stoffen, der Abtrennung/Inaktivierung/Abtötung von Mikroorganismen, der Abtrennung gelöster organischer Stoffe sowie der Abtrennung/Destruktion anorganischer Stoffe unterschieden (Jekel, 2017). Bei der industriellen Wasseraufbereitung kann auf eine Vielzahl von Verfahren zurückgegriffen werden. Viele dieser Methoden finden im kleineren Maßstab auch bei der mobilen Wasseraufbereitung Verwendung (Wilhelm, 2008). Oberflächenwasser, welches zumeist eine stark heterogene und komplexe Zusammenstellungen der Wasserinhaltsstoffe aufweist, muss üblicherweise über Kombinationen der verschiedenen Verfahren aufbereitet werden (Karger und Hoffmann, 2013). Die in diesem Projekt thematisierten allgemeinen Verfahren der Wasseraufbereitung finden sich teils bei den verschiedenen untersuchten Produkten wieder. Dabei kombinieren einige Aufbereitungstechniken verschiedene Teilverfahren (physikalisch, chemisch, biologisch).

7.3 Vorstellung der untersuchten Systeme bzw. Produkte

Zur dezentralen Wasseraufbereitung sind zahlreiche mobile Systeme verfügbar. Verschiedene Hersteller bieten Produkte an, die für den Rückhalt unterschiedlicher Wasserinhaltsstoffe entwickelt wurden. Abhängig von den Zielparametern kommen unterschiedlichen Methoden der Wasseraufbereitung zum Einsatz. Die Auswahl der hier untersuchten Systeme resp. Produkte sollte ein repräsentatives Spektrum an mobilen Wasseraufbereitungssysteme abbilden. Neben einem Pulverprodukt (Chemikalie zur Wasseraufbereitung) wurden Systeme in einer Größenordnung ausgewählt, die zur Versorgung einzelner Haushalte bis zur Versorgung kleinerer urbaner Räume (z. B. Dorfgemeinschaften) geeignet sind. Folgende exemplarische Produkte resp. Systeme unterschiedlicher Hersteller wurden untersucht:

- ***P&G™ Purifier of Water (PUR)***
Wirkprinzip: Flockung und Desinfektion (Pulver)
Einsatz: Versorgung von Einzelhaushalten – in erster Linie für temporäre Einsätze bei fehlender Infrastruktur
- ***What a Bird***
Wirkprinzip: Membranverfahren (Patrone)
Einsatz: Versorgung von Einzelhaushalten
- ***ATC Super Sterasyl® von British Berkefeld® (Doulton®)***
Wirkprinzip: Filtration durch Keramikfilterkerzen mit Aktivkohle (AK)
Einsatz: Exemplarisch für ein Auftischgerät in erster Linie für Einzelhaushalte einsetzbar
- ***Wasserrucksack PAUL® (Portable Aqua Unit for Lifesaving)***
Wirkprinzip: Membranverfahren (Platten)
Einsatz: Versorgung von Dorfgemeinschaften (langfristig und temporär)
- ***Sandfilter nach Anleitung des CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology)***
Wirkprinzip: Tiefenfiltration (Filtersubstrate) mit physikalischen, chemischen und biologischen Wirkmechanismen
Einsatz: Vor Ort aufzubauendes System zur Versorgung mehrerer Haushalte

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Eigenschaften und Wirkmechanismen der Systeme bzw. Produkte zur Aufbereitung. Bei den produktspezifischen Informationen handelt es sich teilweise um Herstellerangaben, die vor allem folgenden Quellen entnommen wurden:

P&G™ Purifier of Water (PUR)

P&G (Procter & Gamble) (2021): P&G purifier of water packets - a simple way to clean water. <https://csdw.org/pg-purifier-of-water-packets>, letzter Aufruf: 06.05.2021

What a Bird

Trappe, L. (2018): Bedienungsanleitung. Water Filter Pump for Jerrycans, Havixbeck

Trappe, L. (2021): Das Wasseraufbereitungssystem für Kanister: What a Bird. Flyer

What a Bird (o.J.): What a bird. Water filters for jerrycans. <http://what-a-bird.com/>, letzter Aufruf: 30.04.2021.

What a Bird (2021): Water Filter Pump for Jerrycans. Bedienungsanleitung

Sandfilter: CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology)

CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) (2012): Biosand Filter Construction Manual. Calgary, Canada

CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) (2018a): Concrete Biosand Filter. Household Water Treatment and Safe Storage Product Overview. Fact Sheet. Calgary, Canada

CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) (2018b): Household Water Treatment and Safe Storage Product Overview. Calgary, Canada

CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) (2018c): P&G Purifier of Water. Household Water Treatment and Safe Storage Product Overview. Fact Sheet. Calgary, Canada

CAWST (Centre for Affordable Water and Sanitation Technology) (2023): <https://www.cawst.org/services/expertise/biosand-filter/more-information>, letzter Aufruf: 04.07.2023

ATC Super Sterasyl® von British Berkefeld® (Doulton®)

Doulton Water Filters (2021): HFK Gravity Filter & 2 x ATC SuperSterasyl® System. <https://doulton.com/hfk-gravity-filter-system>, letzter Aufruf: 10.06.2021

Doulton Water Filters (2023): ATC Super Sterasyl®. <https://doulton.com/atc-super-sterasyl>, letzter Aufruf am 04.07.2023

Doulton Water Filters and British Berkefeld (2016): Filter Performance. https://doulton.com/media/attachment/files/attachment/f/i/filter_performance_table_f.pdf, letzter Aufruf: 22.09.2021

Engineering For Change (o. J.): British Berkefeld Household Filter Kit | Engineering For Change. <https://www.engineeringforchange.org/solutions/product/british-berkefeld-household-filter-kit/>, letzter Aufruf: 10.06.2021

Wasserrucksack PAUL® "WaterBackpack "PAUL®"

Frechen, F. B. (2014): Dead End Filtration is not dead (Presentation). Universität Kassel - Department of Sanitary and Environmental Engineering (DESEE). http://waterbackpack.org/download/2014_dead_end.pdf, letzter Aufruf: 15.08.2021

Frechen, F. B., Schier, W., Romaker, J., Fortenbacher, C., Ordonez, A. & Grigo, M. (2014): Erprobung und Optimierung eines einfachen Membranfiltrationsgerätes zur Aufbereitung von trinkbarem Wasser aus Oberflächengewässern für kleine Personengruppen in Notsituationen ohne Fremdenergie (3. Phase) mit dem Ziel der Serienreife: Abschlussbericht zum DBU-Vorhaben AZ 23860/04, https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-23860_04.pdf, letzter Aufruf: 1.05.2021

Frechen, F. B. (2021): WaterBackpack "PAUL®" for disasters and for permanent water supply. Genral information about PAUL® and PAUL® stations (Presentation). The Waterbackpack Company GmbH. http://waterbackpack.org/download/2021_common.pdf, letzter Aufruf: 10.08.2022

Waterbackpack PAUL (2023) <http://waterbackpack.org>, letzter Aufruf am 02.07.2023

Tabelle 3 Übersicht über die untersuchten Wasseraufbereitungssysteme mit Herstellerangaben

Firma und Produktname	P&G™ Purifier of Water	What a Bird	British Berkefeld® ATC Super Sterasyl®	Wasserrucksack PAUL®	Sandfilter nach CAWST-Anleitung
Art des Produktes bzw. Systems	Pulver	Handpumpe mit Membranpatrone	Keramikfilterkerzen Tabletop-Lösung	Kunststoffbehälter mit Membraneinheiten	Säule mit Filtersubstraten (Sand und Kies)
Wirkprinzip	Flockung (Eisensulfat) und Desinfektion (Calcium-hypochlorit)	Mikrofiltration (100 nm) Ultrafiltrationsmembran	Mikrofiltration mit Keramikkerze und Aktivkohle (0,5 bis 0,8 µm) Oberflächen- und Tiefenfilter	Ultrafiltration (20 bis 100 nm)	Tiefen- und Oberflächenfilter
Kurzbeschreibung (Aufbau)	Inhalt der 4 g-Packung wird in Wasser verrührt (Eimer). Nach Sedimentation, Filtration und Standzeit kann das Wasser getrunken werden (Anleitung auf jeder Packung).	Point-Of-Use-Lösung. Das System kann u.a. auf Jerrycans gesteckt werden und wird durch manuelles Pumpen betrieben. Gereinigtes Wasser fließt aus „Vogelkopf“.	Wasser wird in oberen Container gefüllt und durchläuft zwei Keramikfilterkerzen. Entnahme aus unterem Container.	Kann als portabler Rucksack oder als Station installiert werden. Wasser wird oben eingefüllt und wird behandelt am unteren Hahn entnommen.	Wurde nach CAWST-Anleitung gebaut. Verschiedene Filtersubstrate und anwachsender Biofilm reinigen das auf die Säule gegebene Rohwasser.
Zeitabhängiges Behandlungsvolumen	10 l/Packung 30 min/Ansatz	ca. 115 ml/Pumphub	ca. 1 l/h je Filterkerze	mind. 1200 l/d	ca. 0,4 l/min etwa 70 l/d
Effektivität (mikrob.) Herstellerangaben	99,9999 % der wasserbezogenen Bakterien	99,9999 % der Bakterien und Parasiten	> 99,99 % der Bakterien und Zysten >0,9 µm	99,99 bis 99,9999 % der Bakterien	<ul style="list-style-type: none"> • bis zu 100 % Helminthen • Bis zu 100 % Protozoen • Bis zu 98,5 % Bakterien • 70 bis 99% Viren
Sonstiges	Tuchfiltration erforderlich	Kanisteraufsatz			Eigenbau vor Ort

P&G™ Purifier of Water (PUR): Das Pulver ist ein Gemisch aus Eisensulfat und Calciumhypochlorit. Hersteller ist die Firma Procter and Gamble™. Das Päckchen mit einem Inhalt von 4 g wird in 10 Liter Wasser eingerührt (Abbildung 1). Kleine Partikel koagulieren zu absetzbaren Flocken (durch Eisensulfat) und durch das Calciumhypochlorit erfolgt eine Desinfektion. Nach einer Einwirkdauer von ca. 30 Minuten und anschließender Tuchfiltration kann das Wasser getrunken werden. Die Haltbarkeit des Pulvers beträgt bis zu 3 Jahre.

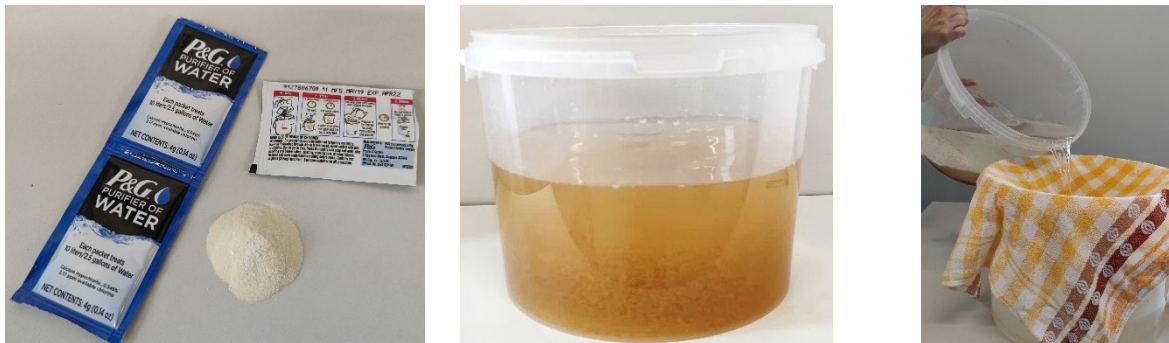


Abbildung 1: P&G™ Purifier of Water - Produkt und Aufbereitungsprozess

What a Bird: Das Pumpsystem mit integrierter Hohlfasermembranpatrone ist als Aufsatz für Wasserkanister konzipiert (Abbildung 2). Der Systemaufbau weist Ähnlichkeit zu einem Vogelkopf auf. Bei der Membraneinheit handelt es sich um eine Ultrafiltrationsmembran (UF) mit einer Porengröße von 100 nm. Pro manuellem Pumpstoß werden ca. 115 ml Wasser aufbereitet. Abhängig von der Rohwasserzusammensetzung und der Anwendungshäufigkeit ist eine Betriebsdauer von bis zu 2 Jahren möglich. Im Lieferumfang des Produktes sind auch ein Wartungsset (Silikonfett, eine Rückspülspritze, Verbinder und einen Schlauchadapter) und die Bedienungsanleitung enthalten.



Abbildung 2: What a Bird - Produkt und Aufbereitungseinheit sowie Anwendung

ATC Super Sterasyl® von British Berkefeld® (Doulton®): Das als Tischlösung konzipierte System (tabeltop) besteht aus zwei übereinander angeordneten Kunststoffboxen mit einem Volumen von 16 Litern und zwei Keramikfilterkerzen (Abbildung 3). Die mit Aktivkohle gefüllten Filterkerzen weisen eine Silberimprägnierung auf. Sie werden in den oberen der beiden Behälter eingeschraubt. Das Wasser durchfließt durch Gravitationswirkung die Filterkerzen. Der Durchfluss wird mit etwa einem Liter pro Stunde angegeben. Die Betriebszeit ist von der Nutzung abhängig. Nach ca. 1500 Litern wird ein Austausch empfohlen. Die Systeme können zwischenzeitlich gereinigt werden.

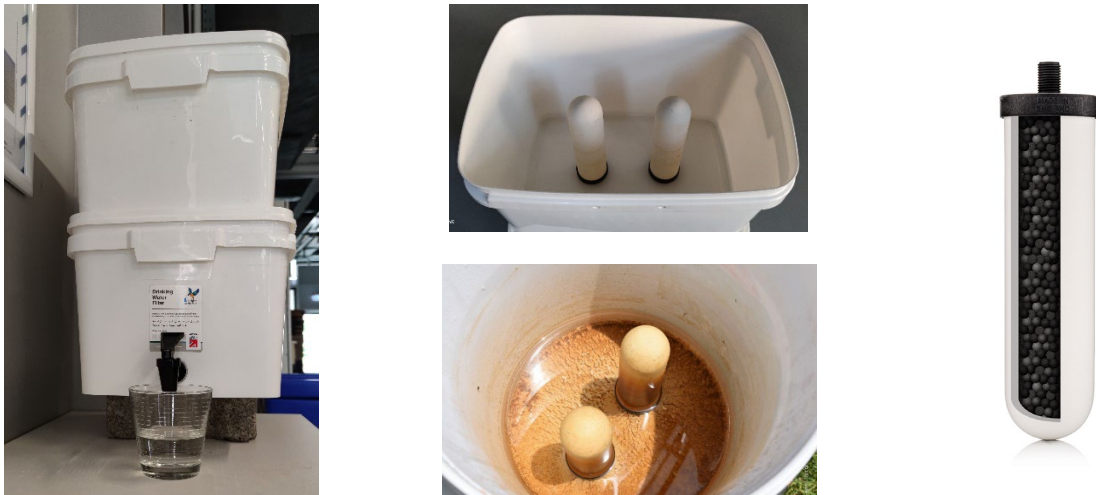


Abbildung 3: ATC Super Sterasyl® - Produkt und Aufbereitungseinheit (Bild rechts: Fa. Doulton)

Wasserrucksack PAUL® (Portable Aqua Unit for Lifesaving): Das System besteht aus einem tragbaren Kunststoffbehälter mit einer Höhe von 1,2 Metern und einem Leergewicht von ca. 20 kg (Abbildung 4). Durch Membranmodule (UF-Membran mit einer Porengröße von 20 bis 100 nm) wird das von oben einzufüllende Rohwasser aufbereitet. Ein Vorsieb hält gröbere Partikel zurück. Das Membranfiltermodul besteht aus Trägerplatten, auf denen sich beidseitig die Membran befindet. Das zu reinigende Wasser fließt horizontal durch die Membranen in den Zwischenraum der Platte und wird abgeleitet. Die Filterplatten bestehen aus Polyethylen. Mit dem System können über 1200 Liter pro Tag aufbereitet werden. Die Betriebsdauer wird mit über 10 Jahren angegeben. Durch eine Öffnung am Behälterboden kann abgelagerter Schlamm abgelassen werden.

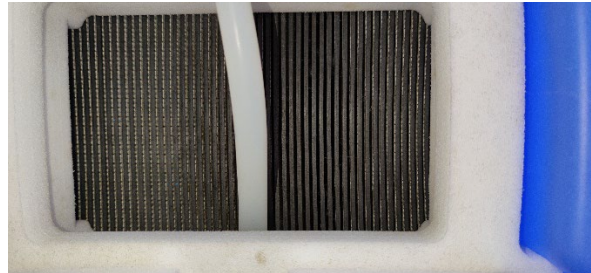


Abbildung 4: Wasserrucksack PAUL® - System und Aufbereitungseinheit (Membrane)

Sandfilter: Bei Sandfiltern erfolgt die Aufbereitung durch Tiefenfiltration (Abbildung 5). Bei dem hier untersuchten System handelt es sich um eine Empfehlung der gemeinnützigen Organisation *Centre for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST)* (Anleitung „*Biosand Filter Construction Manual*“). Es handelt sich nicht um ein herstellerepezifisches Produkt, sondern um ein System, das individuell aufgebaut werden kann. Neben der Filtrations- und Sorptionswirkung gewährleisten Mikroorganismen den Abbau vor allem organischer Wasserinhaltsstoffe. Das Wasser durchläuft im Abstromverfahren entweder eine homogene Sandschicht oder mehrere Substratschichten mit ggf. unterschiedlichen Körnungen. Die Untersuchungen erfolgten mit einem Dreischichtfilter. Als unterste Lage wurde eine Kies-Stüttschicht aus größerem Material mit einer Korngröße 8 bis 16 mm verwendet. Für die Zwischenlage wird Kies mit einer Korngröße von 2 bis 5 mm empfohlen. Das Volumen der untersten und mittleren Lage beträgt etwa 3 Liter. Die Filtereinheit mit einem Volumen von etwa 30 Liter bestand aus Quarzsand mit einer Korngröße von unter 1 mm. Das Filtergehäuse des Filters im Technikum der FH Münster bestand zur besseren Visualisierung der Filterprozesse aus Acrylglas. Bei den Untersuchungen in Uganda wurden Material und Filtersubstrate verwendet, die „vor Ort“ zur Verfügung standen. Die Lebenserwartung beträgt etwa 10 Jahre bei empfohlenem chargenweisem Betrieb mit 4 Chargen und jeweils 12 bis 18 Liter Wasser pro Tag. Dies entspricht einem Tagesvolumen von 48 bis 72 Liter.



Abbildung 5: Sandfilter nach Empfehlung der CAWST - System (links) und Baumaterial vor dem Aufbau in Uganda

8 Untersuchungen unter Laborbedingungen - Versuchsanlage

Ein Teil der geplanten Untersuchungen wurde im Technikum für Wasserversorgung und Stadtentwässerung der FH Münster (Campus Steinfurt) durchgeführt. Für die Laboruntersuchungen wurde eine Laboranlage angefertigt. Abbildung 6 veranschaulicht die Versuchsanlage. Die Befüllung des IBC-Tanks (schwarz) erfolgte durch einen Schlauch, der entweder am Leitungswassernetz oder am Tank mit destilliertem Wasser angeschlossen war. Durch ein auf dem Tank installiertes Rührgerät wurde eine gleichmäßige Verteilung der Stoffkonzentration im Tank gewährleistet und Sedimentationen verhindert. Durch eine frequenzgesteuerte Kreiselpumpe wurde das im Tank befindliche Testwasser in einen Dosierbehälter (Kanister 20 l) gefördert. Diese Konstruktion sollte bei den Versuchen für gleichbleibende Druckverhältnisse sorgen. Dazu konnte der Wasserstand im Behälter sowie dessen Höhe durch Verstellbarkeiten reguliert werden. Über einen Überlauf konnte das überschüssige Wasser aus dem Behälter zurück in den Wassertank ablaufen. Vom Behälter führte ein Schlauch über einen Kugelhahn das Wasser ab (Ablauf während der Versuche). Die Zulaufvolumenstrom wurde erfasst und über ein Regelventil dosiert.

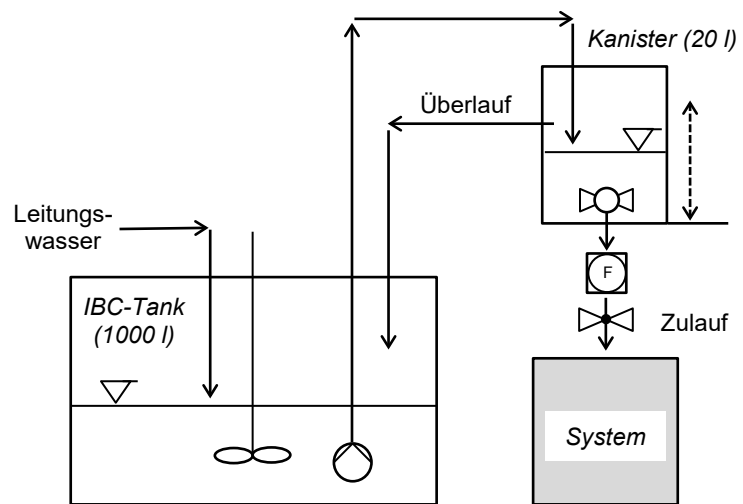


Abbildung 6: Versuchsstand zur Herstellung und Zugabe des Testwassers

Der Versuchsaufbau wurde für alle Experimente, sowohl für die Simulation des Helminthen-Ei-Rückhaltes mittels Partikel als auch für die Bestimmung des Bakterienrückhaltes verwendet.

9 Untersuchungen in Uganda

9.1 Ort und Projekt

Die Untersuchungen erfolgten im Dorf „Obiya West“, in Gulu im Norden Ugandas auf dem Projektgelände des Münsteraner Vereins Lichtstrahl Uganda e.V. Der Verein betreibt dort eine Medizinstation mit Schulungsbereich, eine Entbindungsstation, eine Vorschule, eine weiterführende Primary School und ein Kinder- und Mütterkrisenhaus.

9.2 Verwendetes Grundwasser

Das untersuchte Grundwasser wurde aus einem ca. 48 m tiefen Brunnen auf dem Projektgelände entnommen. Über einen Pumptest wurde ein Fördervolumen von 4.000 Litern über einen Zeitraum von 6 bis 7 Stunden entnommen (Pumptest 09.01.2020, gemäß Krider Ways Technical Solutions, 2020). Somit liegt eine Förderleistung von etwa $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ vor. Über eine Leitung wird das Wasser zu einer Entnahmestelle gefördert. Die Entnahme über einen Hahn dient zum Betrieb eines Coffee Shops (Restaurant). Das Wasser wird sowohl für Reinigungszwecke als auch zum Kochen verwendet. Ein Wasserhahn in roter Farbe diente als exemplarische Probenahmestelle und wird im Folgenden als „Red Tab“ bezeichnet. Neben dem zur Untersuchung verwendeten „Red Tab“ wurden auch weitere Brunnen auf dem Gelände untersucht. Auffällig war, dass die Wasserqualität aus verschiedenen Brunnen, die nur geringe Entfernungen zueinander aufwiesen, völlig unterschiedlich sein konnte.

9.3 Verwendetes Oberflächenwasser

Für die Untersuchung der Wirkung bei Oberflächenwasser erfolgte eine Entnahme aus einem kleinen Bachlauf in den Wetlands des Ortes Gulu (Uganda) neben dem Projektgelände des Vereins *Lichtstrahl Uganda e.V.* Bei den Wetlands handelt es sich um ein Feuchtgebiet, das während der Regenzeit dauerhaft unter Wasser steht. Die Jahresniederschlagshöhe in Gulu liegt etwa bei 1.600 mm/a . Es herrscht eine Durchschnittstemperatur von $23,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Da der Ort in Äquatornähe liegt, lassen sich Sommer und Winter meteorologisch nicht erfassen.

Die lokalen Bedingungen der Probennahmestellen und somit des Baches veranschaulichen Abbildung 7 bis Abbildung 9. Bei dem Bachlauf handelt es sich um ein Oberflächengewässer (OW), das ca. 500 m nördlich austritt (Quelle). Die Quelle liegt in einem tiefliegenden Bereich des Dorfes. Der Bach der Wetlands wird im Folgenden als *Wetlands* bezeichnet. Die Probennahme erfolgte aus der Mitte der Wasserstelle.

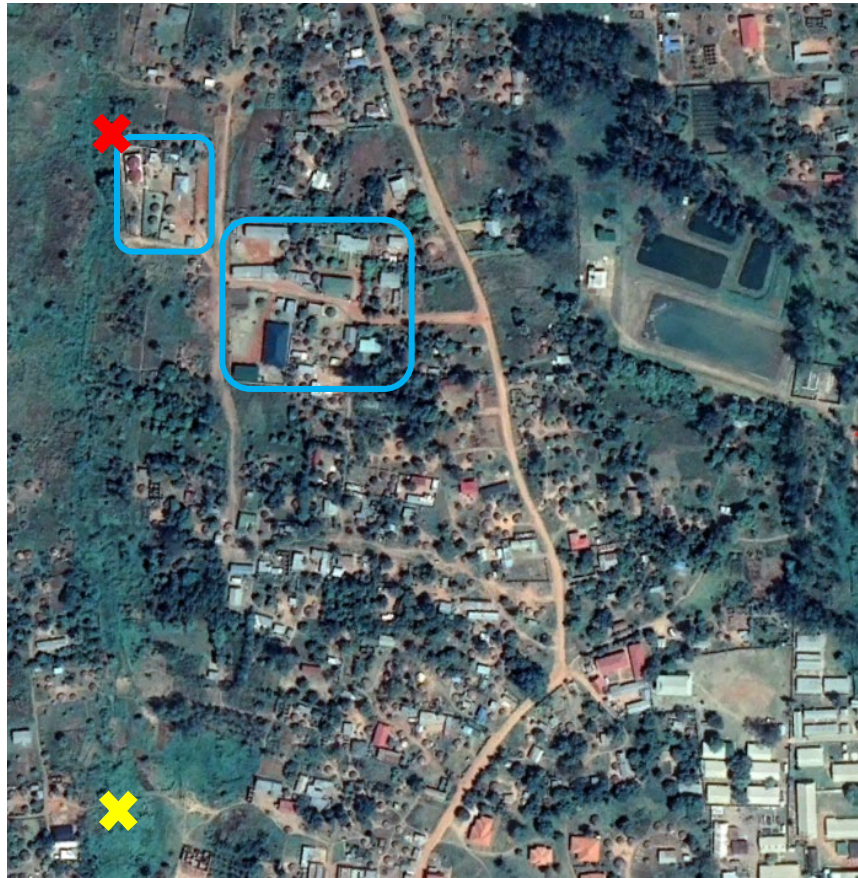


Abbildung 7: Teil der Stadt Gulu mit dem Areal Lichtstrahl Uganda e.V. (blau) sowie den Probenahmestellen (Oberflächenwasser Wetlands (rot) und Grundwasserquelle Wetlands (gelb) - Entfernung der beiden Punkte ca. 500 m (Karte verändert nach Google Earth, CNES/Airbus).



Abbildung 8: Oberflächenwasser-Probenahmestelle Wetlands



Abbildung 9: Quellfassung im Village (speist die Wetlands)

10 Parameter und Versuchsdurchführungen

10.1 Parameter zum Vergleich des Stoffrückhaltes

Maßgeblichen Einfluss auf die Qualität und Inhaltsstoffe des Rohwassers haben die Umgebungsbedingungen. Die Inhaltsstoffe eines Grundwassers werden maßgeblich durch den mineralogischen Aufbau des Grundwasserleiters (Speichergestein) sowie den Austausch und die Durchmischung bei der Versickerung des Niederschlagswassers bestimmt (z. B. durch Grundwasserflurabstand, Verweilzeiten, Durchlässigkeit des Bodens). Anders als beim Grundwasser erfolgt bei Oberflächengewässern häufig eine unmittelbare Einleitung von Abwässern. Neben den kontinuierlichen Einleitungen von behandeltem Abwasser aus Kläranlagen, werden bei intensiveren Niederschlägen direkt aus der Kanalisation zumindest verdünnte oder mechanisch vorbehandelte Abwässer eingeleitet. Darüber hinaus sind in Regionen und Ländern mit eingeschränkter Infrastruktur auch direkte Abwassereinleitungen (Schmutzwasser) ein Problem. Einen hohen Einfluss auf Grundwasser und Oberflächenwasser haben anthropogene Einträge wie beispielsweise Düngung, Abwässer oder der Austrag aus Altlasten. Zumindest beim Grundwasser erfolgt eine Behandlung während der Bodenpassage.

Für dieses Projekt wurden Daten über Grund- und Oberflächenwasserqualitäten unterschiedlichster Standorte weltweit auf der Basis einer Literaturrecherche zusammengestellt. Auf der Basis dieser Daten wurden die relevanten Parameter und zugehörige Konzentrationen bestimmt. Die vergleichende Gegenüberstellung des Stoffrückhaltes und der mikrobiologischen Wirkung der Systeme resp. Produkte wurde durch folgende Parameter untersucht:

- Trübung
- Bakterien und Helmintheneier
- Gelöste Ionen (Nitrat und Fluorid) und Schwermetalle (Eisen und Mangan sowie Arsen)

10.2 Untersuchungen zur Reduktion der Trübung

Die Trübung ist eine grundlegende Beurteilungsgröße zur Steuerung und Überwachung von Aufbereitungsschritten (Filtration, Flockung) oder zur Überwachung der Rohwasserbeschaffenheit (vor allem bei Oberflächenwässern). Gerade im Hinblick auf mögliche Weiterbehandlung der Wässer und vor allem für die Desinfektion spielt die Reduktion von Trübstoffen eine wichtige Rolle. Bei der Aufbereitung von Oberflächenwasser gilt ein Wert $< 0,2$ FNU als Voraussetzung, um die Desinfektionswirksamkeit zu sichern, weil sich Viren und Bakterien in Trübstoffen vor der Einwirkung von Chlor schützen können. So können beispielsweise UV-Strahlen die Zellen im Wasser nicht erreichen. Ein Beispiel für ein einfaches Aufbereitungsverfahren ist die *Solar Disinfection* (SODIS-Methode). Die Anwendungsgrenzen dieses Verfahrens sind zu beachten. Die Trübung wurde im Testwasser mit Ton und der pulverisierten Form der Alge *Chlorella* simuliert. Bei den Untersuchungen unter Laborbedingungen wurde ein Trübungsmessgerät verwendet.

10.3 Untersuchungen zum Helminthenei-Rückhalt durch Referenzpartikel

Helminthen sind parasitäre, mehrzellige Würmer. Endwirte sind häufig der Mensch oder große Säugetiere. Je nach Art haben die Würmer eine Größe von 1 mm bis zu mehreren Metern, während die Größe ihrer Eier im zweistelligen Mikrometerbereich liegt (Abbildung 10). Die meisten Infektionen sind auf die Gruppe der Fadenwürmer (*Nematoda*) und die Plattwürmer (*Plathelminthes*) zurückzuführen (Metcalf und Eddy, 2013). Weitverbreitet ist *Ascaris lumbricoides* auf dem afrikanischen und asiatischen Kontinent sowie im Fernen Osten. Die meisten Infizierten sind Kinder unter 15 Jahren. Eine Infektion äußert sich durch Wachstumsprobleme und geringer körperlicher Leistungsfähigkeit. Die Sterblichkeitsrate hingegen ist gering (Jiménez, 2006). Symptome sind Leibschmerzen, Entzündungen des Dünndarms und Diarrhöe (Gesundheitsamt Diepholz, 2013).

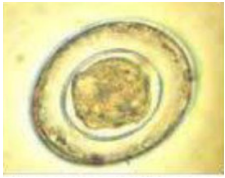
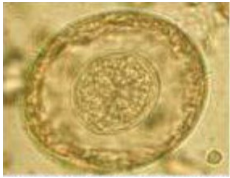
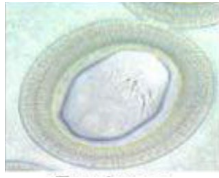


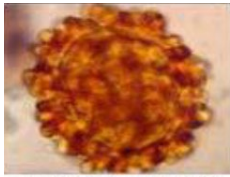

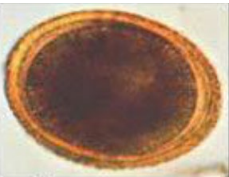
			
Hymenolepis nana egg 30 x 47 µm CESTODE	Hymenolepis diminuta egg 80 µm CESTODE	Taenia spp. 30 x 40 µm CESTODE	Trichosomoides spp. 80 x 50 µm NEMATODE
			
Ascaris lumbricoides fertile egg 80 - 90 x 30 - 40 µm NEMATODE	Ascaris lumbricoides non fertile egg 80 - 90 x 25 µm NEMATODE	Trichuris Trichiura egg 50 - 54 x 22 - 23 µm NEMATODE	Toxocara spp. egg 85 - 85 µm NEMATODE

Abbildung 10: Aufnahme unterschiedlicher Helmintheneier (Jiménez, 2006)

Die WHO gibt zwar nicht explizit eine Grenzkonzentration für Helmintheneier im Trinkwasser an, jedoch wird für die Verwendung von Abwasser zur Bewässerung in der Landwirtschaft darauf verwiesen, dass sich kein Helminthenei in einem Liter Wasser befinden darf (< 1 Ei/l) (WHO, 2006). Da bereits ein Ei ausreichend für eine Infiltration sein kann (Metcalf und Eddy, 2013), muss für Wasser im häuslichen Gebrauch ebenfalls ein Grenzwert von < 1 Ei/l angenommen werden. Die Eier des Wurmes werden über den menschlichen Stuhl ausgeschieden. Diese können von anderen Personen, vor allem bei geringen hygienischen Standards, oral über verunreinigtes Wasser und Lebensmittel (Naidoo et al., 2016) aber auch über den direkten Kontakt mit Fäkalien oder Abwasser, aufgenommen werden (Jiménez et al., 2007). In Regionen, in denen Wasser für die

Bewässerung der Felder eine knappe Ressource darstellt, wird Abwasser wiederverwendet. Besonders bei unzureichender sanitärer Versorgung gelangen die ausgeschiedenen Eier in Oberflächengewässer, welche gerade in Ländern ohne zentrale Wasserversorgung auf vielfältige Weise genutzt werden. Viele Helmintheneier sind sehr resistent gegenüber Umwelteinflüssen. Die Eier können im Gegensatz zu fäkalen Coliformen (Jiménez et al., 2007) nicht über eine Desinfektion, wie beispielsweise mit Chlor (Naidoo et al., 2016), UV-Licht oder Ozon inaktiviert werden (Jiménez-Cisneros und Maya-Rendon, 2007). Studien zur Inaktivierung von Helmintheneiern durch chemische Desinfektionsmittel zeigten eine geringe Wirkung. Untersuchungen von Naidoo et al. (2016) zeigten, dass mit chemischer Desinfektion lediglich weniger als 10 % der Eier erfolgreich inaktiviert werden können. Folglich sind Helmintheneier in der Wasseraufbereitung wie partikuläre Inhaltstoffe zu behandeln, die mechanisch (durch Filtration) zurückgehalten werden. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Produkte auf den mechanischen Rückhalt von Helmintheneiern untersucht.

Zur Untersuchung des Rückhaltes von Helmintheneiern wurde ein Quarzmehl (Millisil W4) verwendet, dessen Maximalkorn einen Durchmesser von 400 μm aufweist. Die Korngrößen der Partikel liegen im Wesentlichen in einem Spektrum zwischen 0 bis 200 μm . Von diesem Quarzmehl wurde die Fraktion < 40 μm ausgesiebt, damit für Helmintheneier repräsentative Partikelgrößen gewährleistet werden konnten.

Die Datenerhebung erfolgte mit Hilfe eines Partikelzählers. Dieses Gerät detektiert die Größe und Anzahl der Partikel in einer Flüssigkeit (Markus Klotz GmbH, o.J.). Für die Untersuchungen wurden die Fraktionen von 1 bis 40 μm berücksichtigt. Die Fraktionen wurden mit Bezug zur Größe von Bakterien und Helmintheneiern festgelegt. Bakterien haben je nach Art eine Größe von 1 bis 10 μm (Crittenden et al., 2012). Helminthen weisen eine Größenordnung von etwa 20 bis 80 μm auf (Jiménez-Cisneros und Maya-Rendon, 2007). Die Fraktion 1 μm wird separat dargestellt. Die Fraktionen 2 bis 10, 10 bis 25 und 25 bis 40 μm wurden zusammengefasst abgebildet.

10.4 Methoden zur Bestimmung des Bakterienrückhaltes

10.4.1 Verbreitung und Größenordnung

Trinkwasser ist nicht grundsätzlich keimfrei, sondern im Allgemeinen keimarm. Art und Anzahl von Mikroorganismen in einem Wasser hängen von der Herkunft des Rohwassers und Aufbereitung ab. Ursache für Erkrankungen durch nicht einwandfreies Trinkwasser sind Bakterien und Viren. Im Allgemeinen haben Bakterien eine Größe von 0,4 bis 750 μm , meistens aber zwischen 1 und 10 μm (Madigan et al., 2000). Viren sind mit einer Größe von 25 bis 300 nm deutlich kleiner.

Auch heute noch sterben viele Menschen und vor allem Kleinkinder durch fehlenden Zugang zu hygienisch einwandfreiem Trinkwasser. Häufige Ursache schwerwiegender Krankheiten, die bis zum Tod führen, sind Durchfallerkrankungen (Cholera, Typhus, Ruhr). Besondere Bedeutung hat dabei das Bakterium *V. cholerae* als Erreger der Cholera.

Als maßgeblicher Indikatorkeim bei der Wasseraufbereitung gelten die harmlose Form der *E.coli* und Enterokokken (Metcalf und Eddy, 2013; Worch, 2019). Bei dem für die Trinkwasserhygiene relevanten Bakterium *E. coli* handelt es sich um ein natürlicherweise im menschlichen Darm vorkommendes Bakterium. Abhängig von der Art des Bakterienstammes und den Bereichen des Körpers, in die Bakterien gelangen, können Infektionen und Erkrankungen hervorgerufen werden. Die Folgen reichen dabei von Infektionen der Harnwege über Atemwege bis hin zur Sepsis (RKI, 2017; WHO, 2017). Die Dosis zum Erreichen einer Infektion ist hierbei nach Angaben der WHO (2017) mit ca. 100 Organismen sehr gering. Das 1,1 bis 1,5 mal 2,0 bis 6,0 µm große Bakterium gilt in der Wissenschaft als Modellorganismus. *E. coli*-Bakterien teilen sich bei entsprechenden Bedingungen alle 20 min (Spektrum, 2021). Etwa 1 g Fäkalien können bis zu 10^7 *E. coli*-Bakterien beinhalten, wobei die meisten nicht-pathogen sind. In 1 l Abwasser sind 10^6 bis 10^{10} Bakterien und im Rohwasser etwa 10^2 bis 10^5 Bakterien pro Liter enthalten. Die Übertragungswege reichen aufgrund dessen von kontaminiertem Trinkwasser über direkten Personenkontakt bis hin zum Kontakt mit infizierten Tieren oder ihren Exkrementen. Sowohl die Weltgesundheitsorganisation als auch die TrinkwV legen einen Grenzwert von 0 *E. coli*-Bakterien/100 ml für Trinkwasser fest (WHO, 2017; TrinkwV, 2016).

Infektionen, die vom Bakterium *V. cholerae* herrühren, können zu schwerwiegenden Erkrankungen führen. Dabei ist Durchfall eines der bedenklichsten Hauptsymptome. Etwa 88 % der Infektionen sind auf Mängel in der Hygiene und/oder Wasserversorgung zurückzuführen. Als Folge können dadurch jährlich ca. 272 Mio. Schultage nicht wahrgenommen werden. Insgesamt versterben jedes Jahr etwa 1,1 Mio. Kinder aufgrund von Durchfallerkrankungen, in erster Linie hervorgerufen durch Cholera, Typhus oder der Ruhr (UNICEF, 2013). Der wässrige Durchfall der Erkrankten mit *V. cholerae* ist sehr infektiös. Fortlaufend wird von Cholera-Ausbrüchen, vor allem in den Entwicklungsländern, berichtet (WHO, 2017). Die Ansteckung erfolgt meist durch kontaminiertes Trinkwasser oder Lebensmittel, wobei die für eine Ansteckung notwendige Keimzahl mit ca. 1 Mio. relativ hoch ist.

In der Gruppe der Grundwassermikroorganismen machen die Bakterien den größten Anteil aus (DVWK, 1988). Die Überlebensdauer vieler Arten pathogener Mikroorganismen im Grundwasser ist hoch (>50 Tage). Lediglich ein Teil der Infizierten erkrankt durch diesen Erreger, allerdings erhöht sich das Risiko eines schweren Verlaufes, wenn z. B. das Immunsystem geschwächt ist oder eine Mangelernährung vorliegt, wie es in Entwicklungsländern häufig der Fall ist (Auswärtiges Amt, 2019).

10.4.2 Plattenverfahren zur Bestimmung von koloniebildenden Einheiten

Die mikrobiologische Routineanalytik basiert auf dem Nachweis kultivierbarer Mikroorganismen. Zur Bestimmung der mikrobiellen Belastung einer Wasserprobe wird seit Jahren die etablierte Methode der Plattierung angewendet (Kötzsch et al., 2012). Dabei wird eine Wasserprobe auf einem Nährboden ausgebracht und die vorhandenen lebenden Mikroorganismen vermehren sich

zu makroskopisch sicht- und zählbaren koloniebildenden Einheiten (KBE). Dieses Verfahren wird als Parameter für eine mikrobielle Belastung einer Trinkwasserprobe angesehen, wobei definierte Grenzwerte nicht überschritten werden dürfen: *E. coli* und Enterokokken: je 0/100 ml. Weiterhin ist das Ergebnis zählbarer KBEs nach 48 h aussagekräftig (TrinkwV, 2016). Durch die seit Jahrzehnten angewandte Methode werden ≤ 1 % der Gesamtbakteriengemeinschaft mit dem Kultivierungsverfahren erfasst. Einen Großteil der Gemeinschaft bilden die nicht-kultivierbaren Organismen (Kötzsch et al., 2012 und Epstein, 2013).

Im Zuge der mikrobiologischen Untersuchungen wurden Proben des unbehandelten und behandelten Wassers durch das Plattenverfahren auf KBEs hin untersucht. Für die Kultivierung wurde je eine 100 ml-Probe verwendet und mittels dieser eine 1:1000-Verdünnung angesetzt, sodass schließlich aber 100 ml (der 1:1000-Verdünnung) über einen Nitrat-Cellulose-Filter, welcher wiederum auf eine Nährkartonscheibe (beides Sartorius AG, Göttingen DE) gelegt wurde, gegeben wurde. Die Scheiben werden anschließend je 48 h bei 36 °C im Brutschrank bebrütet. Anschließend wurden die KBEs bestimmt.

10.4.3 Durchflusszytometrie zur Bestimmung der Gesamtkeimzahl

Für die mikrobiologischen Untersuchungen wurde neben der konventionellen Bestimmung die Durchflusszytometrie (DFZ) verwendet. Die DFZ ist eine kultivierungsunabhängige Methode zur quantitativen Bestimmung der realen Anzahl an Mikroorganismen und bietet zudem die Möglichkeit der Lebend-Tod-Differenzierung (Hammes und Steinberg, 2012). Die Technik basiert auf einem Laserstrahlverfahren zur Zelldetektion. Das Durchflusszytometer liefert schließlich Informationen über Streulicht- und Fluoreszenzeigenschaften der Zellen und ermöglicht eine quantitative Charakterisierung der Mikroorganismen im Wasser (Göhde und Dittrich, 1968). Verschiedene Fluoreszenzfarbstoffe, wie SYBR® Green, werden für Markierungszwecke und zur Differenzierung hinzugefügt. Für jede einzelne Zelle werden somit Informationen über die Fluoreszenz- und Streulichteigenschaften gewonnen, die mittels Software analysiert und nachfolgend interpretiert werden (Abbildung 11). -Durch das automatisierte Verfahren ist nach 30 min ein Probenergebnis vorhanden (Kötzsch et al., 2012). Neben der quantitativen Bestimmung aller vorhandenen Mikroorganismen, der Gesamtkeimzahl (Totalzellzahl = total cell count = TCC) ist auch eine Differenzierung von lebenden (Intaktzellzahl = intact cell count = ICC) und toten Zellen möglich. Die Untersuchungen erfolgten mit dem Gerät *BactoSense* der Firma *SIGRIST-PHOTOMETER AG*. Das System wird durch *©bNovate Technologies SA*, vertrieben (Abbildung 12).

Bei dieser Bestimmungsmethode können einzelne Zellen detektiert werden. Zusätzlich dient die DFZ der Online-Überwachung verschiedenster Flüssigkeitsproben über einen definierten Zeitraum (bNovate Technologies SA, 2020). Nach Herstellerangaben ist das Gerät in der Lage, 99,9 % der Mikroorganismen mit einer Größe von $> 0,1 \mu\text{m}$ zu detektieren.

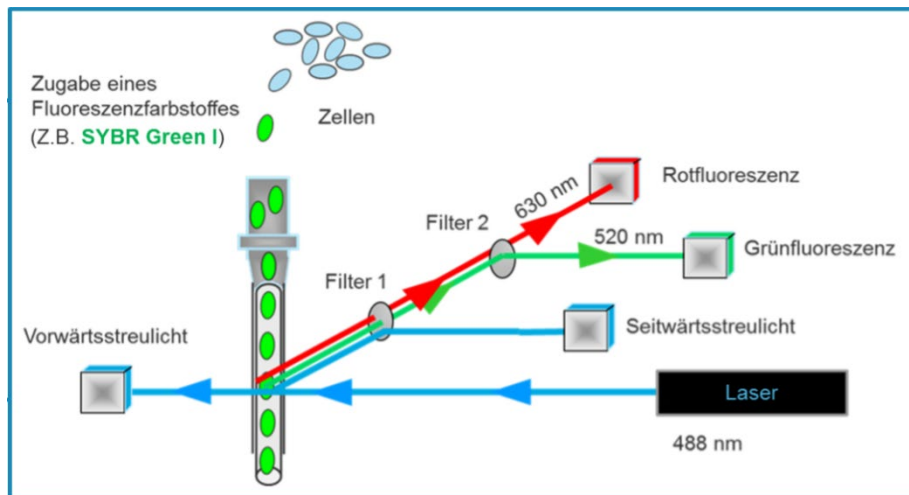


Abbildung 11: Schematisch dargestellte Funktionsweise eines Durchflusszytometers (Kötzsch et al. 2012)



Abbildung 12: Online-DFZ "BactoSense" der Firma SIGRIST-PHOTOMETER AG (links) und im Gerät ablaufende Arbeitsschritte (rechts) (bNovate Technologies SA, 2020)

Größenordnungen von Zellzahlen in verschiedenen Wasserarten verdeutlicht Abbildung 13. Diese Zellzahlen wurden mittels der Durchflusszytometrie ermittelt und liefern eine Einschätzung der typischen Beschaffenheiten der Wässer bezüglich vorhandener Zellzahlen.

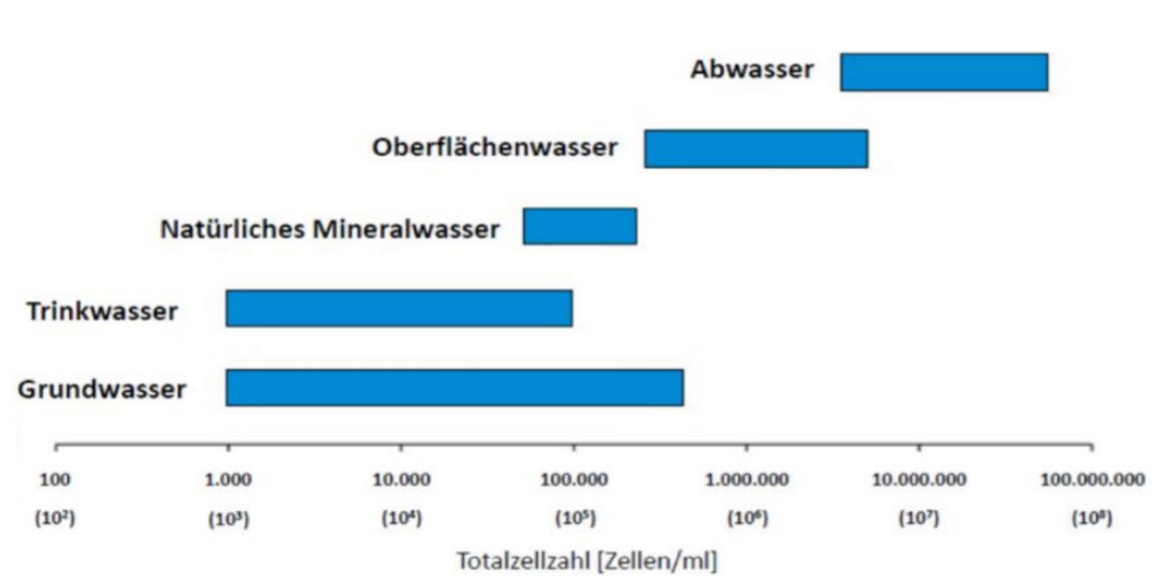


Abbildung 13: Typische Totalzellzahlen verschiedener Wassertypen (Kötzsch und Sinreich, 2014)

Die Konzentration in den Ausgangswässern zur Bakterienbestimmung wiesen Unterschiede auf, da die Versuche aufgrund der Versuchsanzahl an unterschiedlichen Tagen durchgeführt wurden. Die Stammlösungen zur Durchführung der Versuche wurden mehrfach angesetzt. Somit können die im Wasser befindliche Zellzahlen variierten. Dennoch sind die Ergebnisse vergleichbar und aussagekräftig.

10.4.4 Zusammensetzung des Testwassers

Für die Simulation des Rückhalts von Bakterien wurde ein *E. coli* K12-Stamm (DSM 498) verwendet. Dieser Stamm war aufgrund seiner Einstufung in die Risikogruppe 1 für Biostoffe für die Untersuchungen repräsentativ (Leibniz Institut DSMZ, 2021). Der Risikogruppe 1 gehören im Allgemeinen Biostoffe an „bei denen es unwahrscheinlich ist, dass sie beim Menschen eine Krankheit hervorrufen“ (RKI, 2021). Das Ziel war das Erreichen des typischen Zellzahlbereiches, welcher nach Kötzsch und Sinreich (2014) für ein Oberflächenwasser zwischen ca. 500.000 und 8 Mio. TCCs/ml liegt.

10.5 Bestimmung des Rückhaltes von gelösten Ionen und Schwermetallen

Für die Bestimmung der Zulauf- wie auch Ablaufkonzentrationen wurden sowohl unter Labor- als auch Realbedingungen Küvettentests der Firma Macherey-Nagel GmbH & Co KG verwendet, die mittels eines Photometers analysiert wurden. Im Technikum für Stadthydrologie und Wasserversorgung der FH Münster wurde das Photometer Nanocolor UV/VIS von Macherey-Nagel GmbH & Co KG eingesetzt und in Uganda das Photometer Nanocolor 500D. Der Parameter Arsen wurde bei den Laboruntersuchungen durch die Firma Wessling GmbH (Altenberge) bestimmt. In Uganda erfolgte die Arsenbestimmung mit den Teststäbchen Quantofix von Macherey-Nagel GmbH & Co KG.

10.6 Erstspülung der Filtersysteme und stabile Systemwirkung

Unmittelbar nach Inbetriebnahme oder Spülung eines Filters (Einfahrbetrieb) können Stoffe ausgespült werden. Üblicherweise kommt es während der Erstfiltratphase zu einem Partikelaustrag (Amirtharajah und Wetstein, 1980). Zu Beginn ist daher ggf. ein Erstfiltratabschlag erforderlich. In der Regel geben die Hersteller ein Spülvolumen vor der Inbetriebnahme an. Das Spülvolumen gemäß Herstellerangaben reicht von wenigen Litern (z. B. *What a Bird*) bis zu 50 Litern beim System *PAUL*®.

Für den Betrieb und die Wirkung von Filtersystemen ist ein weiterer betrieblicher Aspekt zu berücksichtigen. Auch nach dem Spülvorgang wird die maximale Filterwirkung häufig noch nicht erreicht. Eine hohe und langfristige Wirksamkeit (stabiler Betriebspunkt) stellt sich erst nach einer Einfahrphase des Filters ein (Gimbel und Nahrstedt, 2004). Der Zeitpunkt des stabilen Betriebes eines jeden Produktes ist insbesondere bei der Tiefenfiltration zu berücksichtigen.

Für die Systeme mit Membranfiltration (*What a Bird* und den Wasserrucksack *PAUL*®) wurde neben dem Ablauf des Testwassers auch die Einfahrphase des Produktes untersucht. Dabei wurde jeweils Leitungswasser zugegeben und über einen gewissen Zeitraum untersucht, in welchem Umfang die Partikel aus dem System gespült werden. Hier steigert eine Deckschicht auf den Membranen den Partikelrückhalt.

Um einen Vergleich des spezifischen Rückhaltes der Produkte durchzuführen, wurde für jedes Produkt der quasi-stationäre Betriebszustand bestimmt. Dieser ist erreicht, wenn der Austrag des Erstfiltrates abgeschlossen ist und der spezifische Rückhalt für alle Fraktionen über mehrere Messungen weitgehend konstant bleibt. Da dieser Zustand teilweise nicht eindeutig zu bestimmen war, wurde ein quasi-stationärer Betriebszustand akzeptiert. Auf dieser Basis erfolgte eine vergleichende Bewertung der Produkte bezüglich des Rückhaltes von Helmintheneiern.

11 Ergebnisse und Auswertungen

11.1 Reduktion der Trübung

Die Trübungswerte im synthetischen Rohwasser (Zulauf) und die systemspezifischen Reduktionen für GW und OW zeigen Tabelle 4 und Abbildung 14. Aus den Daten der Trübungsreduktionen geht hervor, dass zunächst die Reduzierung bei den OW-Proben durchweg höher war als bei den GW-Proben. Möglicherweise lag dies daran, dass die größere Partikelanzahl im Zulauf (bestehend aus Ton und Algen) die Membrane bzw. den Sandfilter zugesetzt haben, sodass die Entfernung der Partikel effektiver war (Filterkuchenbildung). Beim *P&G™-Pulver* kam es durch die größere Partikelanzahl womöglich zur einer verstärkten Flockenbildung.

Tabelle 4: Trübungen (in NTU) für die verschiedenen synthetischen Rohwässer (Zuläufe) sowie der Abläufe (teilweise mit unterschiedlichen Spülvolumina vor der Messung)

Zulaufwerte und Ablaufwerte (nach Behandlung)		Trübung (in NTU)	
		GW	OW
Zulaufwerte		9,13	48,7
Ablaufwerte	What a Bird	0,259 nach 10 l	0,11 nach 10 l
	PAUL®	0,412 nach 100 l	0,09 nach 100 l
	Sandfilter	0,275 nach 30 l	0,08 nach 50 l
	ATC Super Sterasyl®	0,586 nach 3 l	0,75 nach 5 l
	P&G™-Pulver	0,713	0,45

Der Sandfilter erreichte mit 99,84 % die höchste Reduktion der Trübung beim OW. Der Ablauf des *PAUL®* lag beim OW mit 99,82 % fast gleichauf. Die geringste, aber immer noch vergleichbar hohe Reduktion lag beim *ATC Super Sterasyl®* mit 98,46 % vor. Wenn die Systeme/Produkte entsprechend lange in Betrieb sind, wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit ein vergleichbares Ergebnis erzielt.

Beim GW erreicht die Behandlung mit dem *What a Bird* mit 97,16 % den vergleichsweise höchsten Wert. Für das GW führte die Behandlung mit dem *P&G™-Pulver* zur geringsten Trübungsreduktion (92,19 %).

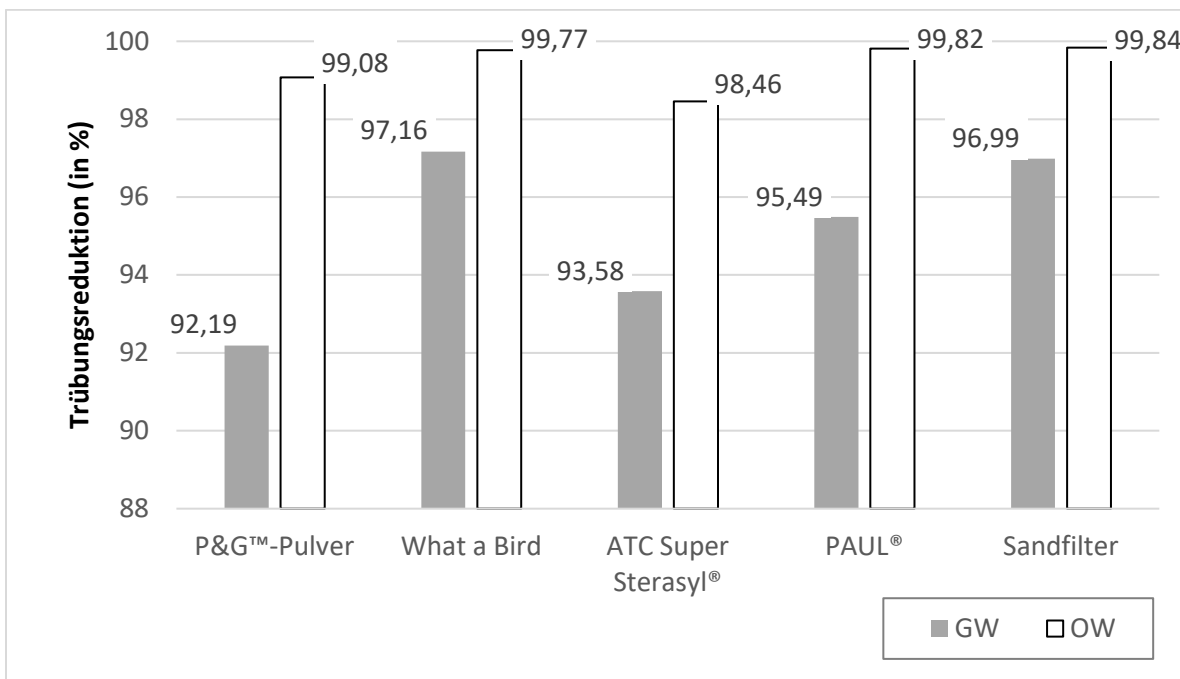


Abbildung 14: Vergleich der prozentualen Trübungsreduktion der GW- und OW-Proben nach Produktanwendungen in Bezug zu den Zulaufkonzentrationen

11.2 Helminthenei-Rückhalt (mit Referenzpartikeln)

Zur vergleichenden Gegenüberstellung der jeweiligen Rückhaltewirkung wurde das Ergebnis der Probe zum Zeitpunkt eines weitgehend stationärer Betriebszustandes verwendet. Dieser Zeitpunkt war nicht eindeutig zu bestimmen. In Tabelle 5 sind die systemspezifischen Vorlaufvolumina angegeben. Eine Steigerung der dort genannten Vorlaufvolumina kann zu einer verbesserten Wirkung führen. Der (mögliche) stationäre Betriebszustand wurde für den *What a Bird* nach 15 l, für den *PAUL®* nach 250 l, für den Sandfilter nach 50 l und für den *ATC Super Sterasyl®* nach 8 l angenommen. Das Pulverprodukt wird zugemischt und einmalig angewendet, so dass hier die Wirkung unmittelbar beginnt.

Da die Ergebnisse des Wasserrucksackes *PAUL®* noch keinen eindeutigen stationären Betriebszustand erkennen ließen, wurden nach einer Anfangsspülung mit 150 l Leitungswasser anschließend 250 l Testwasser (insgesamt 400 l) als Vorlaufvolumen verwendet.

Ein Vergleich des Rückhaltes kann aufgrund unterschiedlicher Zulaufkonzentrationen vor allem über den prozentualen Rückhalt und die produktspezifische Diskussion erfolgen und weniger über den Vergleich der Partikelzahlen. Im direkten Vergleich des spezifischen Rückhaltes unter Berücksichtigung aller Fraktionen konnte festgestellt werden, dass die beiden Produkte mit Membranfiltration die besten Ergebnisse erzielt haben. Über alle Fraktionen hinweg zeigen der Wasserrucksack *PAUL®* und der *What a Bird* den höchsten spezifischen Rückhalt.

Tabelle 5: Prozentualer spezifischer fraktionierter Partikelrückhalt aller Produkte zum stationären Betriebszustand

System/Produkt	Partikelfraktion (in μm)				Stationärer Betriebszustand
	1 bis 2	2 bis 10	10 bis 25	25 bis 40	
What a Bird	99,68	99,76	99,53	100,00	nach 15 l ggf. vollständig erreicht
PAUL®	99,95	99,95	99,75	100,00	nach 250 l ggf. vollständig erreicht
Sandfilter	99,22	99,86	99,95	99,71	nach 50 l noch nicht vollständig erreicht
ATC Super Sterasyl®	97,74	99,67	99,89	99,66	nach 8 l noch nicht vollständig erreicht
P&G™-Pulver	85,98	94,74	96,92	99,06	-

Wie die Werte in Tabelle 5 zeigen, ist ein zuverlässiger Rückhalt gegenüber allen Partikeln $> 1 \mu\text{m}$ zu erwarten. So konnten $1 \mu\text{m}$ große Partikel am effektivsten durch den PAUL® zurückgehalten werden, wenn zuvor ein gewisses Volumen die Membran passierte. Die Rate lag hier bei ca. 99,95 %. Auch das zweite Membran-Produkt, der *What a Bird*, zeigte eine deutliche Reduktion der Partikel über alle Fraktionen hinweg. Für die Fraktion $1 \mu\text{m}$ zum Zeitpunkt des stationären Betriebszustands konnten 99,68 % der Partikel zurückgehalten werden. Auch der Sandfilter zeigte gegenüber der Fraktion $1 \mu\text{m}$ eine deutliche Reduktion um 99,22 %. Der ATC Super Sterasyl® hielt ca. 97,74 % zurück und das P&G™-Pulver schnitt mit ca. 85,98 % am schlechtesten ab.

Für die Fraktionen der 2 bis $10 \mu\text{m}$ und 10 bis $20 \mu\text{m}$ großen Partikel ergaben sich ähnliche Tendenzen. Die Reduktionen aller Produkte (mit Ausnahme des P&G™-Pulvers) lag hier zwischen 99,53 % und 99,95 %. Für die genannten Fraktionen erzielte das Pulver mit einem Rückhalt von 94,74 % bzw. 96,29 % das vergleichsweise schlechteste Ergebnis. Der Wasserrucksack PAUL® wies auch für die Fraktion 2 bis $10 \mu\text{m}$ den höchsten spezifischen Rückhalt auf. Das zweitbeste Ergebnis zeigt der Sandfilter mit einem spezifischen Rückhalt von 99,86 %. Der Sandfilter zeichnete sich gegenüber dieser Fraktion durch einen höheren Rückhalt im Vergleich zur Fraktion $1 \mu\text{m}$ aus. Beim ATC Super Sterasyl® lag der Rückhalt bei 99,67 % und das Pulver konnte 94,74 % der Partikel zurückhalten.

In Abbildung 15 ist der spezifische Rückhalt zum Zeitpunkt des quasi-stationären Betriebszustandes für alle Produkte abgebildet. Es werden die Fraktionen 10 bis $25 \mu\text{m}$ und 25 bis $40 \mu\text{m}$ gezeigt, die für die Einordnung des Rückhaltes von Helmintheneiern relevant sind. Die größte Fraktion von 25 bis $40 \mu\text{m}$ konnte von mehreren Produkten erfolgreich zurückgehalten werden. Der What a

Bird und der PAUL® reduzierten die Partikel in der Fraktion 25 bis 40 µm zuverlässig mit 100 %. Der Sandfilter zu 99,71 %, der ATC Super Sterasyl® zu 99,66 % und das Pulver von P&G™ zu 99,06 %. Der PAUL® und der What a Bird sowie der Sandfilter zeigen gegenüber der Fraktion von 25 bis 40 µm einen zuverlässigen Rückhalt. Die Ergebnisse belegen einen fast vollständigen Rückhalt von Helmintheneiern aller Systeme resp. Produkte.

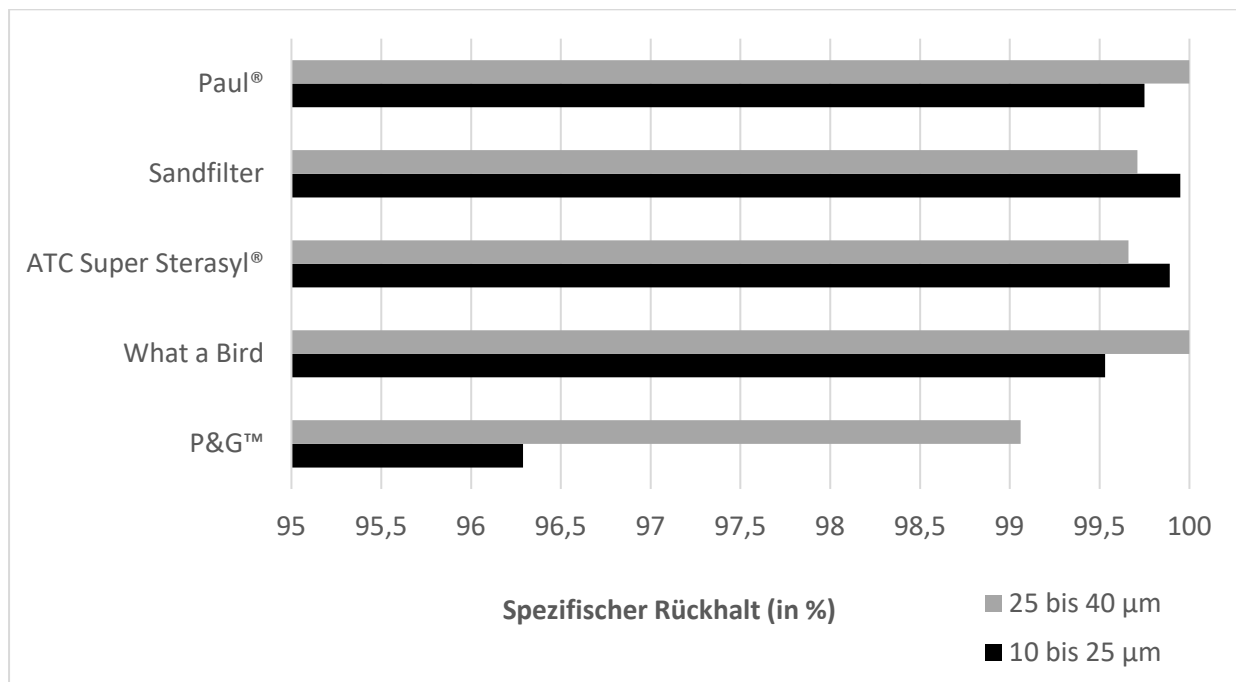


Abbildung 15: Spezifischer Rückhalt zum Zeitpunkt des stationären Betriebszustandes für die Fraktionen 10 bis 25 µm und 25 bis 40 µm

Der Sandfilter zeigt für die Fraktion von 10 bis 25 µm vereinzelt Partikel, die jedoch zu großer Mehrheit der kleineren Fraktion 10 bis 15 µm zugeordnet werden konnten. Möglicherweise sind detektierte Partikel der Fraktion 20 bis 25 µm nachträglich in die Probe gelangt.

Die vereinzelt Partikel der Fraktion 20 bis 25 µm können durch Abrieb der Filtermedien und dem Eintrag aus der Luft eingetragen worden sein. So konnte für den Sandfilter ein zuverlässiger Rückhalt gegenüber den simulierten Helmintheneiern festgestellt werden. Auch der *ATC Super Sterasyl®* zeigt nach Einordnung der Ergebnisse gegenüber der Fraktion von 20 bis 40 µm einen zuverlässigen Rückhalt. Das Pulver zeichnete sich beim Rückhalt der Fraktion 25 bis 40 µm durch einen hohen spezifischen Rückhalt von 99,06 % aus.

11.3 Bestimmung des Bakterienrückhaltes

11.3.1 Untersuchungen unter Laborbedingungen

Die Bestimmung des Bakterienrückhaltes erfolgte sowohl durch Messungen mit dem Durchflussszytometer „*BactoSense*“ als auch durch die Ermittlung der KBE mit dem Plattenverfahren. Neben der Bakterienreduktion unmittelbar nach der Behandlung wurde auch das Wachstumspotenzial der Bakterien nach Lagerung in einem geschlossenen zuvor desinfizierten Kanister über einen Zeitraum von 48 Stunden untersucht. Eine Übersicht der maßgeblichen Ergebnisse gibt Tabelle 6. Die höchste TCC-Reduktion (in %) wurde durch den *What a Bird* mit 89 % erreicht, was ebenfalls für die absoluten Zellzahlen mit 230.400 TCC/ml gilt. Die ICC wurden durch das P&G™-Pulver am besten reduziert (96 % bzw. 47.266 ICCs/ml).

Tabelle 6: Vergleichende Übersicht der Ergebnisse bezüglich des Rückhaltes der Produkte gegenüber Bakterien

System/Produkt		P&G™-Purifier of Water	What a Bird	ATC Super Sterasyl®	PAUL®	Sandfilter
Direkt nach Behandlung t = 0 h	TCC-Red. in %	68	89	76	64	36
	Zellzahl in TCCs/ml	453.377	230.400	526.122	360.350	878.566
	ICC-Red. in %	96	92	80	61	36
	Zellzahl in ICCs/ml	47.266	157.544	399.488	269.600	694.200
	Coliforme in KBE/ml	0	0	1.480	60	0
	E. coli in KBE/ml	0	1.270	0	0	übersät
Lagerung t = 48 h	Zellzahl in TCCs/ml	736.925	2.390.433	853.713	888.340	2.023.122
	Zellzahl in ICCs/ml	211.667	2.201.955	568.475	704.350	1.799.388

Der prozentuale Vergleich der ICC/ml (Verhältnis von Zu- und Ablauf zum Zeitpunkt t = 0 einzeln für jedes Produkt) zeigt, dass das P&G™-Pulver die höchste Reduktionsrate erreichte, gefolgt vom *What a Bird* und *ATC Super Sterasyls*®. Die niedrigste Reduktion erfolgte durch den Sandfilter. Bei den TCC wird auch der geringe Rückhalt durch den Sandfilter deutlich (36 %). Dabei erreichte der *What a Bird* mit 89 % den höchsten Rückhalt, gefolgt vom *ATC Super Sterasyl*® (76 %), dem P&G™-Pulver (68 %) und dem Wasserrucksack *PAUL*® (64 %).

Der Vergleich mit typischen TCC-Zahlen verschiedener Wässer (Abbildung 13) verdeutlicht, dass durch keine Behandlung ein TCC-Bereich von Trinkwasser erreicht werden konnte. Dies gilt auch für die Ergebnisse der KBE und die Untersuchungen mit der DFZ. In allen Fällen kamen die TCC-Zahlen des Ablaufes zum Zeitpunkt $t = 0$ dem Trinkwasserniveau am nächsten. Der *What a Bird* konnte sich mit 230.400 Zellen/ml im Ablauf ($t = 0$) durch eine hohe Reduktion auszeichnen, allerdings wurden KBE in Form von *E. coli* festgestellt. Andersherum wies der Ablauf des *P&G™*-Pulvers keinerlei KBE auf, allerdings lag die TCC-Zahl mit 453.377 Zellen/ml vergleichsweise hoch. Das für Kontrollversuche verwendete Leitungswasser im Technikum (Steinfurt) wies mit ca. 300.000 TCCs/ml bereits relativ hohe Werte auf. Gemäß Trinkwasserverordnung in Deutschland werden KBE-Anzahl von 0/100 ml gefordert (TrinkwV, 2016).

Grundsätzlich ist zu diskutieren, inwieweit die Gesamtzellzahlen solche Referenzen überschreiten dürfen oder eher die ICC für valide Aussagen herangezogen werden sollten. Da es sich bei dem Pulver von *P&G™* auch um ein Desinfektionsmittel handelt, wurden im Ablauf ($t = 0$) lediglich 47.266 ICCs/ml bei einer relativ hohen TCC-Zahl ermittelt. Unter Berücksichtigung der ICC und der KBE als auch des Partikelrückhaltes kann für das *P&G™*-Pulver eine weitgehende Unbedenklichkeit attestiert werden. Den Analysen zufolge lagen die ICCs deutlich unter den üblichen Werten, so dass nicht von einer Gefährdung auszugehen ist. Auch beim *P&G™*-Pulver ist von einem zuverlässig gereinigten Wasser auszugehen. Zu berücksichtigen ist dabei, auf welche Referenzen die Ergebnisse bezogen werden und welche Wirkmechanismen den unterschiedlichen Aufbereitungsprodukten unterliegen. Beim *ATC Super Sterasy!®*, dem *PAUL®* und dem Sandfilter lagen sowohl KBE als auch hohe TCC bzw. ICC vor (verglichen mit aufgeführten Referenzen). Hier lag insofern keine generelle Unbedenklichkeit vor. Die den Untersuchungen zugrunde gelegten Zellzahlen im Rohwasser orientierte sich an einem realen Oberflächen-Rohwasser. Beim *ATC Super Sterasy!®* und dem *PAUL®* ist zu berücksichtigen, dass die Abläufe keine *E. coli*-KBEs auf den Platten zeigten. Die mit der DFZ gemessenen Zellzahlen waren jeweils deutlich höher als die bisherige Referenz.

Ob die vorgenommene Bewertung tatsächlich bedeutet, dass die Abläufe der Produkte pathogene Wirkungen aufweisen, ist durch weitergehende Untersuchungen zu klären. Eine hohe Zellzahl ist nicht automatisch ein Indikator für eine schlechte Wasserqualität. Eine deutliche Überschreitung der üblichen Zellzahl erhöht allerdings die Wahrscheinlichkeit, dass sich Pathogene im Wasser befinden. Für die Zellzahlen, die mit der DFZ erfasst werden können, gibt es zum aktuellen Zeitpunkt keine festgeschriebenen Grenzwerte der WHO oder durch die TrinkwV. Eine Festlegung auf gewisse Zellzahlen wird aber für die nahe Zukunft auf nationaler sowie internationaler Ebene erwartet. Allgemein ist in der Diskussion zum Bakterienrückhalt festzuhalten, dass sich Risiken durch mit pathogenen Keimen belastetes Trinkwasser mit zunehmender Zellzahl wahrscheinlich generell erhöhen werden. Eine Übertragung der Ergebnisse auf alle Oberflächenwässer der unterschiedlichen Inhaltsstoffe ist nur eingeschränkt möglich.

Anhand der Ergebnisse und Auswertungen kann ein Vergleich der DFZ-Ergebnisse in Bezug auf

die TCC- und ICC-Reduktionen der einzelnen Systeme bzw. Produkte vorgenommen werden (Abbildung 16). Das P&G™-Pulver wird dem Rohwasser zudosiert, so dass kein Zu- und Ablauf, wie bei den Filtersystemen vorliegt. Hier wurde bei direkter Probenahme aus dem Aufbereitungsbehälter eine ICC-Reduktion von 96 % ermittelt. Damit liegt die Validität für diese Effizienz hoch und scheint zunächst unabhängig von der Menge der im Rohwasser befindlichen Bakterien (hier *E. coli*) zu sein. Ähnliches zeigte sich für die Reduktion durch den *What a Bird* (92 %). Der Rückhalt des *ATC Super Sterasyl*® lag bei 80 %. Eine mögliche Begründung für die Abweichungen gegenüber den Herstellerangaben könnte in der Menge der Bakterien im Zulaufwasser liegen.

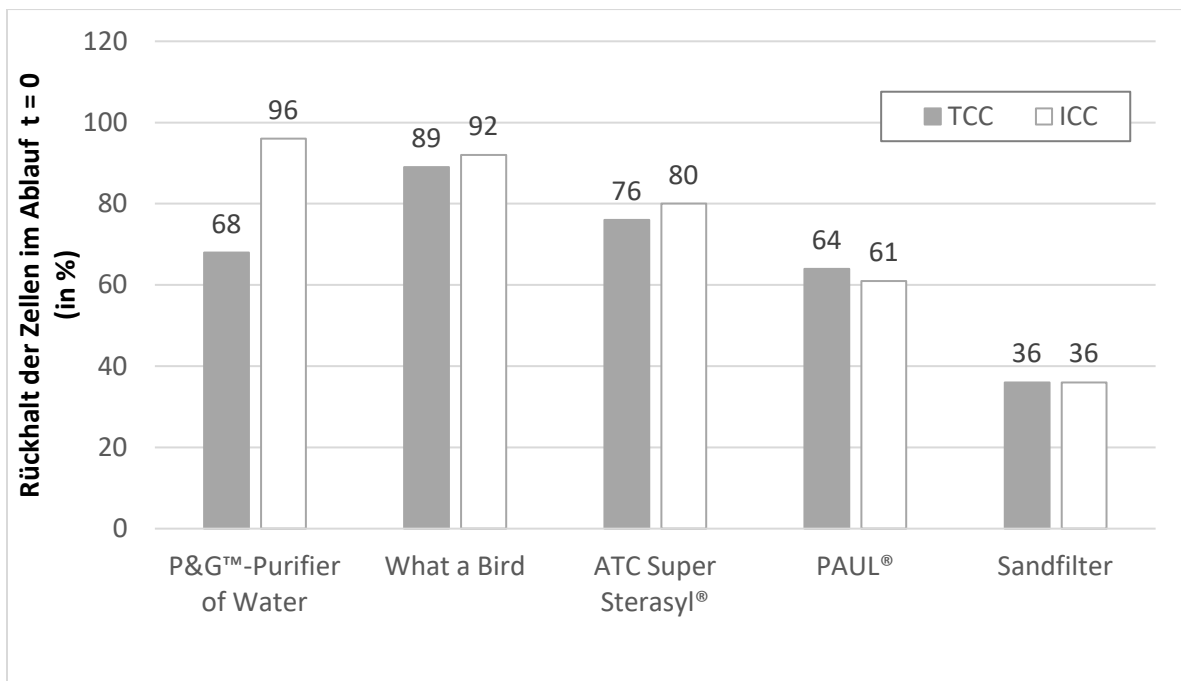


Abbildung 16: Gegenüberstellung der durch DFZ ermittelten TCC- und ICC-Reduktionen bezogen auf die Zuläufe und direkten Abläufe (t = 0)

Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die identifizierten KBE des kultivierungsabhängigen Verfahrens in Tabelle 7 aufgeführt. Demnach wurden beim P&G™-Pulver keinerlei KBE auf den Ablaufplatten gefunden. Bei der Nährkartonscheibe des *What a Birds* befanden sich keine Coliforme auf der Platte, hingegen aber 1.270 *E. coli*-KBE/ml beim OW. Der Ablauf des *ATC Super Sterasyl*® zeigte keine *E. coli*-KBE. Allerdings wurden hier Coliforme bestimmt. Für das OW lagen diese bei 1.480 KBEs/ml. Der Ablauf des Sandfilters wies wie der Zulauf auch eine mit *E. coli* übersäte Platte auf. Hier war der Kolonierasen etwas weniger dicht als der des Zulaufes. Für den direkten Ablauf des *PAUL*® wurden hingegen keine *E. coli*s gefunden, wohl aber Coliforme (60 KBEs/ml).

Tabelle 7: Übersicht über die auf der Nährkartonscheibe befindlichen KBE der direkten Abläufe des synthetisch zusammengesetzten Oberflächenwassers nach der Behandlung

System/Produkt	coliforme KBEs/ml	<i>E. coli</i> KBEs/ml
P&G® Purifier of Water	-	-
What a Bird	-	1.270
ATC Super Sterasyl®	1.480	-
Wasserrucksack PAUL®	60	-
Sandfilter nach CAWST-Anleitung	-	Kolonierasen

Für die Bewertung des Bakterienrückhaltes der einzelnen Produkte können zusätzlich die Ergebnisse aus Untersuchungen zur der Helmintheneireduktion hinzugezogen werden. Für den *What a Bird* wurde deutlich, dass kleinere Partikel, die u. a. Bakterien repräsentieren, von der Membran schlechter zurückgehalten wurden und es nur selten zu einem Rückhalt von über 99,9 % kam, obwohl der Hersteller einen Bakterienrückhalt von bis zu 99,9999 % angibt (Trappe, 2021). Möglicherweise wurden bei den Versuchen des Herstellers Bakterien anderer Größenordnung verwendet. Nach Madigan et al. (2000) reichen Bakteriengrößen von 0,4 µm bis hin zu 750 µm. Ein direkter Vergleich mit dem fraktioniertem Quarzmehl Millisil W4 (< 40 µm) führt dadurch zu unterschiedlichen Ergebnissen. Weiterhin kommt es bei der Verwendung von Bakterien zu einer Biofilmbildung, die den Rückhalt beeinflussen können. Diese Bedingungen würden auch erklären, weshalb viele Partikel mit einer Größe von 1 µm die Membran passierten. Die genannten Umstände könnten auch die Unterschiede der Rückhalte bei den Versuchen zum Bakterienrückhalt mit *E. coli* erklären. Allerdings bleibt weiterhin ungeklärt, wieso Partikel > 100 nm eine 100 nm-Membran, wie beim *What a Bird*, passieren. Es ist nicht auszuschließen, dass es durch Turbulenzen beim Pumpvorgang zur Bildung von Luftblasen kommt, die einen Teil der durch den Partikelzähler detektierten Partikel ausmachen.

Die Ergebnisse zum Helminthen-Ei-Rückhalt des *ATC Super Sterasyls*® zeigen, dass die Anzahl großer Bakterien (> 10 µm) zuverlässig reduziert wird. Bei Betrachtung des allgemeinen bzw. normalen Bakterienrückhaltes, sind die Ergebnisse differenziert zu beurteilen, was u. a. an den noch nicht vollständig erreichten stabilen Betriebsbedingungen gelegen haben könnte. Bis zum Ende der Messungen (8 l) konnten die Herstellerangaben mit einer Bakterienreduktion von 99,99 % nicht bestätigt werden. Bei allen Proben lag die Reduktion, die aus dem Probenvolumen berechnet wurden, zwischen 84,01 % (Fraktion 1 µm nach 1 l) und 99,78 % (Fraktion 2 bis 5 µm nach 5 l).

11.3.2 Untersuchungen unter Realbedingungen in Uganda

Die Probenahme erfolgte für den Zu- sowie Ablauf jeweils mittels eines Plastikgefäßes, wobei die erste Probe stets verworfen wurde. Nach der Probenahme wurde 1 ml mittels einer Pasteurpipette, die vorher mit der entsprechenden Probe sowohl von innen als auch von außen gespült worden ist, von der Probe auf Agarplatten gegeben. Jede Probe wurde zum einen bezüglich der Gesamtkeimzahl und zum anderen im Hinblick auf Coliforme, insbesondere *E. coli*, getestet, weshalb je zwei Platten (TC bzw. EC Compact-Dry™ von der Firma Carl Roth® GmbH & Co. KG) pro Probe angefertigt worden sind. Anschließend wurden diese für 48 h in einem Inkubator bei 37 °C bebrütet und anschließend die Koloniezahl bestimmt. Unter Realbedingungen wurde somit lediglich das kultivierungsabhängige Verfahren und keine DFZ angewandt.

Die Ergebnisse der KBE der direkten Abläufe nach sowohl für das GW als auch für das OW als Rohwässer sind Tabelle 8 und Abbildung 17 zu entnehmen. Abbildung 17 zeigt die prozentualen Änderungen der KBEs der TCs und ECs im Vergleich zum jeweiligen Zulauf.

Tabelle 8: Anzahl der KBE nach Aufbereitung der Rohwässer (GW und OW) - Sortierung entsprechend der Agarplatten nach TC (Gesamtkeimzahl) und EC (Coliforme und *E. coli* spezifisch)

Entnahmestelle und System bzw. Produkt		KBE		
		TC/ml	EC/ml Coliforme allg.	Ec/ml <i>E. coli</i>
Zulauf (Grundwasser) RedTab		40	-	32
Ablauf	P&G™ Purifier of Water	5	-	-
	What a Bird	n.b.	n.b.	n.b.
	ATC Super Sterasyl®	96	-	21
	Sandfilter (CAWST)	68	-	33
	Wasserrucksack PAUL®	26	-	1
Zulauf (Oberflächenwasser) Wetlands		366	-	296
Ablauf	P&G™ Purifier of Water	23	-	-
	What a Bird	120	6	26
	ATC Super Sterasyl®	Kolonierasen	-	118
	Sandfilter (CAWST)	138	8	35
	Wasserrucksack PAUL®	223	2	2

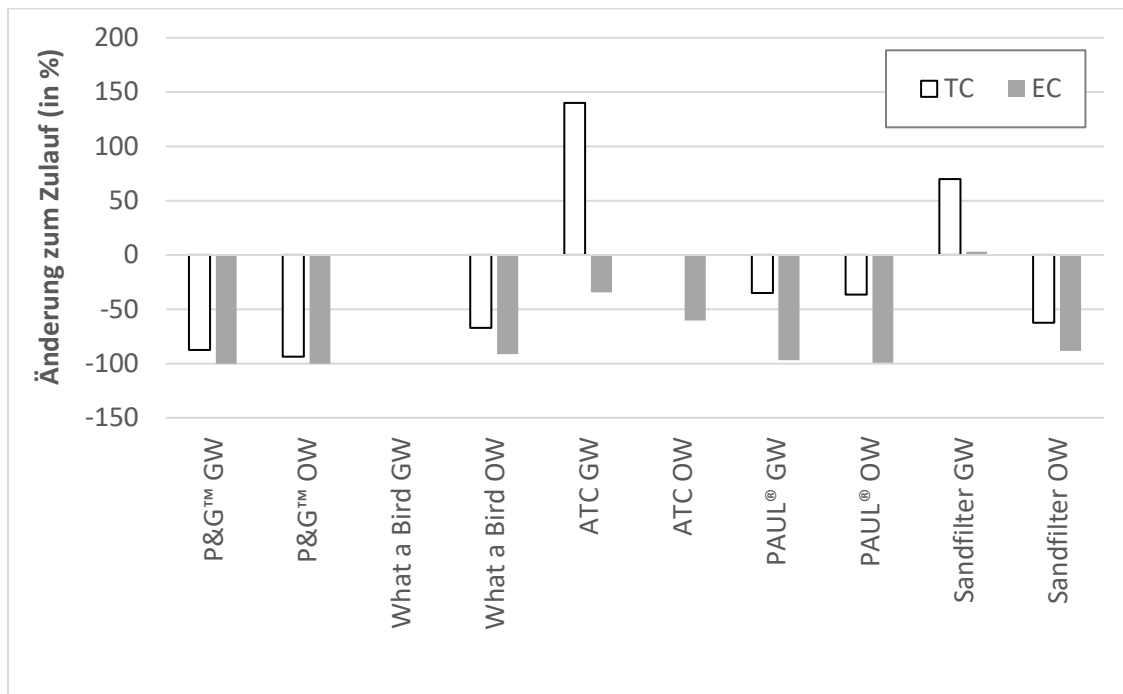


Abbildung 17: Gegenüberstellung der prozentualen Änderung der TCs und ECs unter Realbedingungen in Gulu (Uganda) in Abhängigkeit vom jeweiligen Rohwassers und der Behandlung in Bezug zum jeweiligen Zulauf

11.3.3 Informationen zum Bewertungskonzept

Für eine abschließende Beurteilung des Bakterienrückhaltes der verschiedenen Produkte in Abhängigkeit von der Rohwasserzusammensetzung wurden Bewertungsübersichten erstellt. Diese schließen neben den DFZ- und KBE-Ergebnissen auch den Partikelrückhalt ein und bewerten abschließend die jeweilige mikrobiologischen Konstitution der Abläufe und somit die Wirkung. Für die TCC- und ICC-Änderungen sind neben den bereits bekannten Vergleichen von Zu- und direktem Ablauf, ebenfalls Zellzahlen von behandeltem Wasser, das über einen Zeitraum von 48 h in Kanistern gelagert wurde, aufgeführt. Zudem wurden die Partikelreduktionen miteinbezogen, deren Fraktionen den Größen von Bakterien nahekommen. Aufgrund dessen wurde sowohl die 1 µm-Fraktion als auch die Fraktion 2 bis 10 µm in die Beurteilung aufgenommen. Für den *What a Bird* handelt es sich um Reduktionen, die nach 15 l Spülung mit dem eigentlichen Testwasser erreicht wurden. Beim *ATC Super Sterasy!*® betrug das Spülvolumen 8 l. Für das System *PAUL*® wurden an dieser Stelle die Daten nach einem Durchflussvolumen von 250 l verwendet und für den Sandfilter die Werte nach 50 l Spülung mit dem eigentlichen Testwasser. Eine Zusammenstellung enthält Tabelle 5.

Insgesamt wurden zwei Einschätzungen vorgenommen. Bei der ersten handelt es sich um die

unmittelbare Wirkung (Ablauf bei $t = 0$). In die Bewertung wurden die absoluten Zellzahlen für TCC und ICC sowie die jeweilige prozentuale Reduktion miteinbezogen. Darüber hinaus spielten die KBE eine wichtige Rolle - genauso wie die Ergebnisse aus den Versuchen des Partikelrückhaltes. Anschließend wurde aus diesen Ergebnissen folgende Bewertungskategorien zugrunde gelegt:

- „no risk“ = „kein Risiko“
- „low risk“ = „geringes Risiko“
- „medium risk“ = „mittleres Risiko“
- „high risk“ = „hohes Risiko“

Bei dieser Beurteilungsmethodik erfolgte eine Orientierung am Bewertungsschema der Studie von Odonkor und Mahami (2020), die von den Drinking Water Guidelines der WHO (2006) abgeleitet wurde. In dieser Bewertung fand die Beurteilung für KBE statt. In diesem Bericht wurden die Kategorien in Anlehnung an die genannten Veröffentlichungen für die Gesamtbewertung verwendet. Da es sich bei der DFZ noch um ein neuartiges Verfahren handelt, findet sich diese eine Bewertung mit dieser Genauigkeit zumeist nicht in bisherigen Studien wieder. Zur Bewertung der DFZ-Ergebnisse wurden Literaturdaten verwendet und ein Vergleich mit Leitungswasser vorgenommen.

Proben, die mit „no risk“ bewertet wurden, können bedenkenlos getrunken werden. Mit „low risk“ bewertete Proben sind in ihrer Qualität ebenfalls noch akzeptabel, insbesondere in Ländern, in welchen es ansonsten keinerlei Form der Wasseraufbereitung geben würde. Zwar ist eine geringe Verkeimung vorhanden, die auch deutlich über den Grenzwerten der TrinkwV (2016) liegt, jedoch besteht i. d. R. kein Gesundheitsrisiko. Mit „medium risk“ wurden Wässer bewertet, durch deren Konsum gesundheitliche Risiken möglich sind. Werden Proben mit „high risk“ bewertet, so kann basierend auf diesen Untersuchungen i. d. R. kein bedenkenloser Konsum empfohlen werden. Nach in Anlehnung an die WHO (2006) bedeuten im Kontext der KBE-Bewertung:

- 0 *E. coli*-KBE/100 ml: „no risk“
- 1-10 *E. coli*-KBE/100 ml: „low risk“
- 11-100 *E. coli*-KBE/100 ml: „medium risk“
- >100 *E. coli*-KBE/100 ml: „high risk“

Bei der zweiten Bewertung, bei welcher ebenfalls die oben genannten Bewertungskategorien vergeben wurden, erfolgte eine Untersuchung der Wiederverkeimung. Die Ergebnisse ergeben sich aus absoluten und prozentualen TCC- und ICC-Werten aus der DFZ. Die Einschätzung erfolgte ebenfalls im Vergleich zu Literaturwerten und im Vergleich zum Leitungswasser. An dieser Stelle ist darauf hinzuweisen, dass die Wiederverkeimung im Kanister über einen Zeitraum von 48 h nur bedingt produktspezifisch ist, sondern auch maßgeblich von äußeren Bedingungen (z.B. Licht und

Temperatur) abhängt. Für das Pulver von P&G™ konnte aufgrund der Depotwirkung des Chlors eine geringe Wiederverkeimung beobachtet werden. Maßgeblich für die Wiederverkeimung ist die Art der Lagerung (Sauberkeit des Behälters, Temperatur, Licht etc.). Die Angabe zum Rückhalt von KBE erfolgt häufig in log-Stufen mit Bezug zur Ausgangsbelastung. Diese Feststellung und daraus resultierende Darstellung waren in den vorliegenden Untersuchungen nicht möglich. Letzten Endes ist die Endkonzentration der im Wasser vorliegenden pathogenen Organismen, die konsumiert werden, entscheidend. Die Reduktion um mehrere log-Stufen führt nicht zwangsläufig dazu, dass das Wasser bedenkenlos getrunken werden kann. Aufgrund dessen wurden zur Auswertung die absoluten Zell- und KBE-Zahlen verwendet.

11.4 Rückhalt gelöster Ionen und Schwermetallen unter Laborbedingungen

11.4.1 Konzentrationen im synthetischen Rohwasser

Maßgeblichen Einfluss auf die stoffliche Zusammensetzung von Grundwasser hat das umgebende Gestein (geogene Mineralisation). Darüber hinaus führen anthropogenen Einträge zu stofflichen Belastungen des Grund- und Oberflächenwassers. Eine wichtige Gruppe möglicher anorganischer Kontaminationen bilden neben den Schwermetallen, wie beispielsweise Quecksilber, Chrom, Mangan und Eisen auch das Halogen Fluorid und das Halbmetall Arsen (Pandit und Kumar, 2019).

Die Ermittlung repräsentativer Stoffkonzentrationen in Grund- und Oberflächenwasser erfolgte auf der Basis einer umfangreichen Literaturrecherche. Arsen und das Fluorid kommen in hohen Konzentrationen an vielen Orten auf dem afrikanischen Kontinent (z. B. ostafrikanischer Graben) vor (Edmunds and Smedley, 2013 sowie Margat und van der Gun, 2013). Die Konzentrationen können regional stark variieren (Kut et al., 2016). Hohe Arsenkonzentrationen stellen beispielsweise im Grundwasser in Bangaldesch und im Vietnam ein großes Problem dar. Mit Bezug zu den Untersuchungen in Uganda wurden insbesondere Werte für den afrikanischen Kontinent betrachtet. Ein systematisches Monitoring von Grund- und Oberflächenwasserdaten besteht in Afrika selten (Adelana and MacDonald, 2008), insofern sind nur eingeschränkte Daten zur stofflichen Belastung verfügbar. Für die Zusammensetzung des synthetischen Rohwassers wurden das potenzielle Gesundheitsrisiko, das Vorkommen sowie der Einfluss auf den Betrieb der Aufbereitungssysteme zugrunde gelegt. Aufgrund des Spektrums an ortsspezifischen Einflüssen ist es nicht möglich, ein synthetisches Rohwasser herzustellen, das repräsentativ für ein Land oder sogar für einen Kontinent ist. Tabelle 9 zeigt die Stoffkonzentrationen für das Zulaufwasser auf Basis der Literaturreche. Die Abweichungen der Werte für Oberflächenwasser und Grundwasser liegen in einem begrenzten Spektrum. Auffällig sind die unerwartet höheren Werte für Eisen und Arsen im Oberflächenwasser. Über hohe Arsengehalte im Schlamm von Gewässern berichten Wallis et al. (2020).

Für die Versuchsdurchführung wurde das Leitungswasser in Steinfurt als Ausgangswasser verwendet. Für jeden Parameter wurde der Tank neu befüllt und der gewünschte Stoff über ein Salz dem

Ausgangswasser zugeführt. Zunächst wurde die Menge an Trägermedium berechnet, letztlich dieses jedoch sukzessive zugegeben und die Konzentration zwischenzeitlich überprüft. Großen Einfluss auf die Zielkonzentrationen haben Temperatur und der pH-Wert sowie die Wechselwirkungen der jeweiligen Chemikalien. Vor diesem Hintergrund war die präzise Einhaltung der Zielwerte schwierig.

Tabelle 9: Dosierung der Trägersalze für das Erreichen der Zielkonzentrationen und daraus resultierende Zulaufkonzentrationen sowie Grenzwerte der WHO

Verwendetes Trägersalz	Zielsubstanz	Zulaufkonzentration		Grenzwerte WHO (2017)
		GW	OW	
Eisen(III)-sulfat (in g)	Eisen(III)	0,56 mg/l	0,96 mg/l	Eisen: 0,2 mg/l
Calciumnitrat tetrahydrat (in g)	Nitrat	14,3 mg/l	6,98 mg/l	Nitrat: 50,0 mg/l
Mangan(II)chlorid Tetrahydrat (in g)	Mangan(II)	0,9 mg/l		Mangan: 0,4 mg/l
Kaliumfluorid (in g)	Fluorid	1,3 mg/l	0,8 mg/l	Fluorid: 1,5 mg/l
Arsen(III)-oxid (in µg)	Arsen(III)	12 µg/l	21 µg/l	Arsen: 10 µg/l

11.4.2 Nitrat

Der Rückhalt von Nitrat weist deutliche systemspezifische Unterschiede auf. Der *ATC Super Ster-asyt*[®] zeigte das beste Ergebnis. Bei einer Ausgangskonzentration von 14,3 mg/l (GW) wurden im Ablauf 5,8 mg/l bestimmt. Dies entspricht einem prozentualen Rückhalt von knapp 60 %. Bei der geringeren Ausgangskonzentration (OW) konnte ein ähnlicher Rückhalt von 61,6 % bestimmt werden. Mit den anderen Systemen bzw. Produkten konnte die Nitratkonzentration nur geringfügig reduziert werden (Abbildung 18).

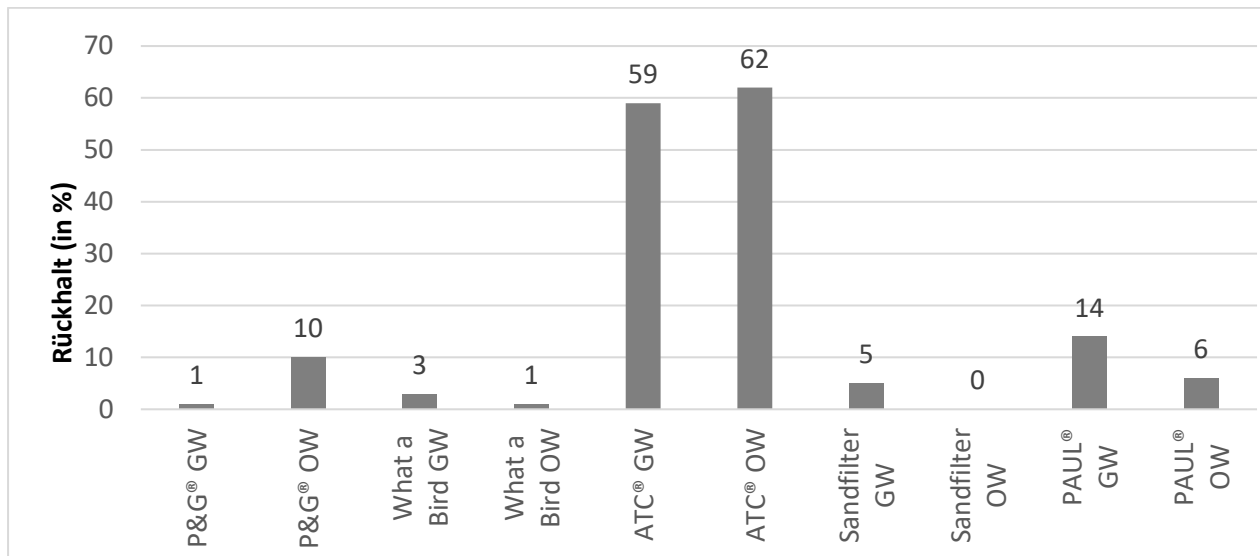


Abbildung 18: Spezifischer Nitrat-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte (Laborbedingungen)

11.4.3 Arsen

Im synthetischen Rohwasser lag die Arsenkonzentration bei 0,021 mg/l. Der systemspezifische Arsenrückhalt schwankte zwischen 14 und 52 % (Abbildung 19). Die größte Wirksamkeit konnte durch die Zugabe des *P&G™-Pulvers* (52 %) und durch den *PAUL®* (48 %) erreicht werden. Möglicherweise lagen Teile des Arsens partikulär gebunden vor, so dass ein Rückhalt über die Membran des *PAUL®* möglich war.

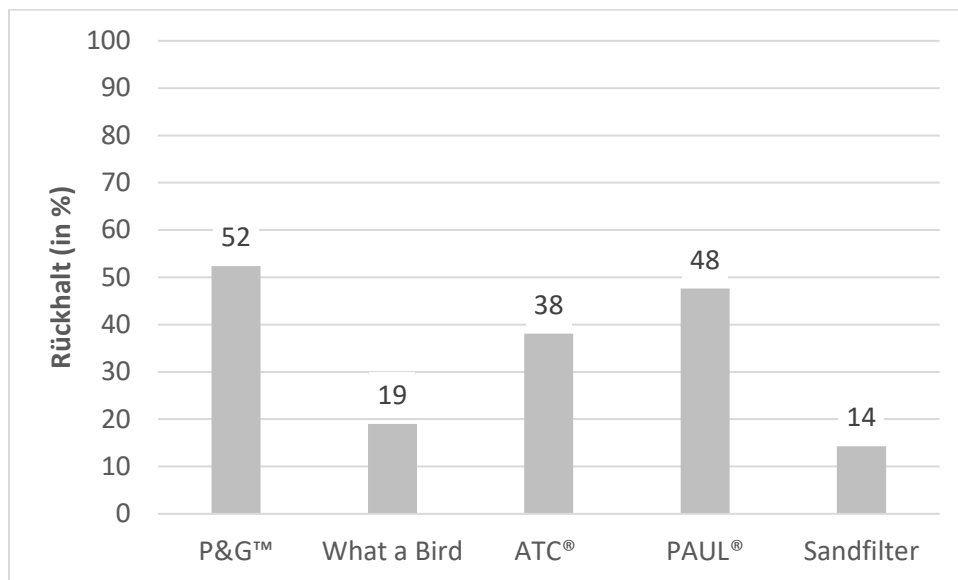


Abbildung 19: Spezifischer Arsen-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Laborbedingungen

11.4.4 Eisen

Die im Versuch eingestellten Ausgangskonzentrationen lagen bei 0,56 mg/l (GW) und 0,96 mg/l (OW). Die Reduktion der Eisenkonzentration weisen ein Spektrum zwischen 68 % und 98 % auf (Abbildung 20). Sehr wahrscheinlich ist Eisen aufgrund des Kontaktes mit der Umgebungsluft ausgefallen. Beim *What a Bird* wurde für die niedrigerem Ausgangskonzentrationen ein geringerer Rückhalt als für die höhere Ausgangskonzentration nachgewiesen. Zusammengefasst lag die Eisenreduktion beim *PAUL*® mit 95 % bzw. 98 % am höchsten.

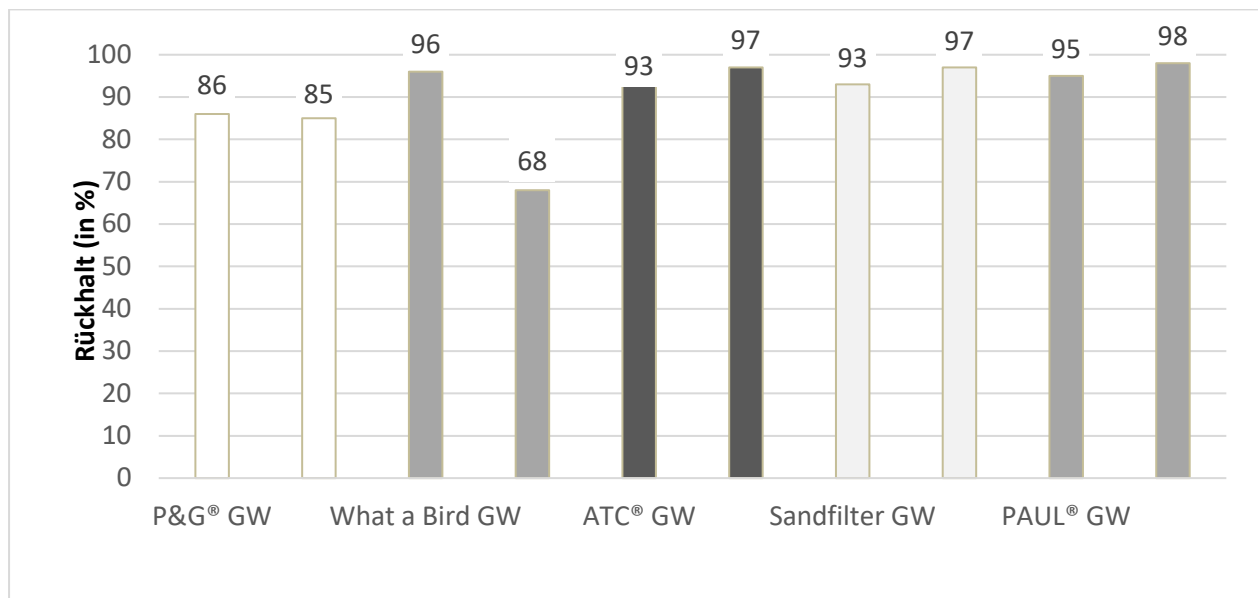


Abbildung 20: Spezifischer Eisen-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Laborbedingungen

11.4.5 Mangan

Das Spektrum der Orientierungswerte für Mangankonzentrationen aus der Literaturrecherche wies nur geringfügige Unterschiede auf (ca. 0,1 mg/l). Vor diesem Hintergrund wurde eine einheitliche Mangankonzentration von 0,9 mg/l festgelegt. Mit dem Sandfilter und der *ATC Super Sterasyl*® konnte eine deutliche Mangan-Reduktion erzielt werden. Mit dem Sandfilter war eine Reduktion von 0,9 mg/l auf 0,08 mg/l möglich (91,1 %). Der *ATC Super Sterasyl*® hat die Konzentration auf 0,15 mg/l reduziert (83,3 %). Deutlich geringer fiel der Rückhalt bei Anwendung des *Purifier of Water* und dem Wasserrucksack *PAUL*® aus. Der *What a Bird* konnte keine nennenswerte Reduktion der Mangan-Konzentration erzielen. Eine vergleichende Gegenüberstellung veranschaulicht Abbildung 21.

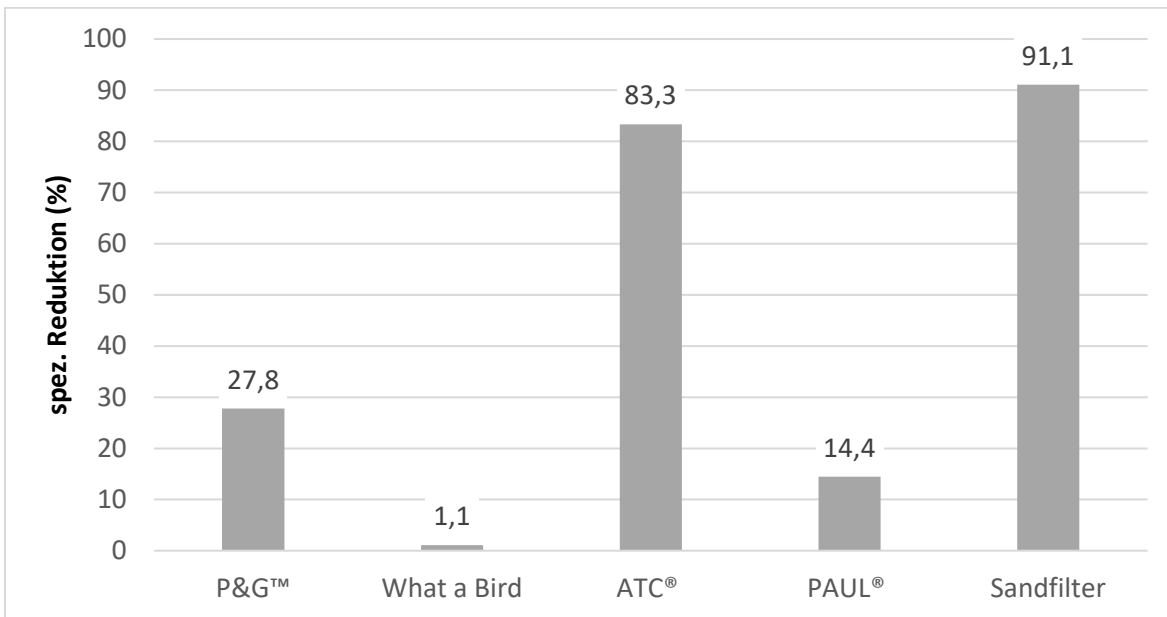


Abbildung 21: Spezifischer Mangan-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Laborbedingungen

11.4.6 Fluorid

Die Untersuchung auf den Rückhalt von Fluorid erfolgte mit zwei unterschiedlichen Zulaufkonzentrationen. Für Grundwasser wurde eine Konzentration von 1,3 mg/l (GW) bei einem pH-Wert von 8,28 und für Oberflächenwasser von 0,8 mg/l bei einem pH-Wert 8,19 verwendet. Der maximale Fluoridrückhalt lag bei 25 %. Durch den *ATC Super Sterasy!*® wurde die Ausgangskonzentration bei von 1,3 mg/l (GW) auf 1,1 mg/l bzw. von 0,8 mg/l auf 0,6 mg/l reduziert. Die vergleichende Gegenüberstellung veranschaulicht Abbildung 22.

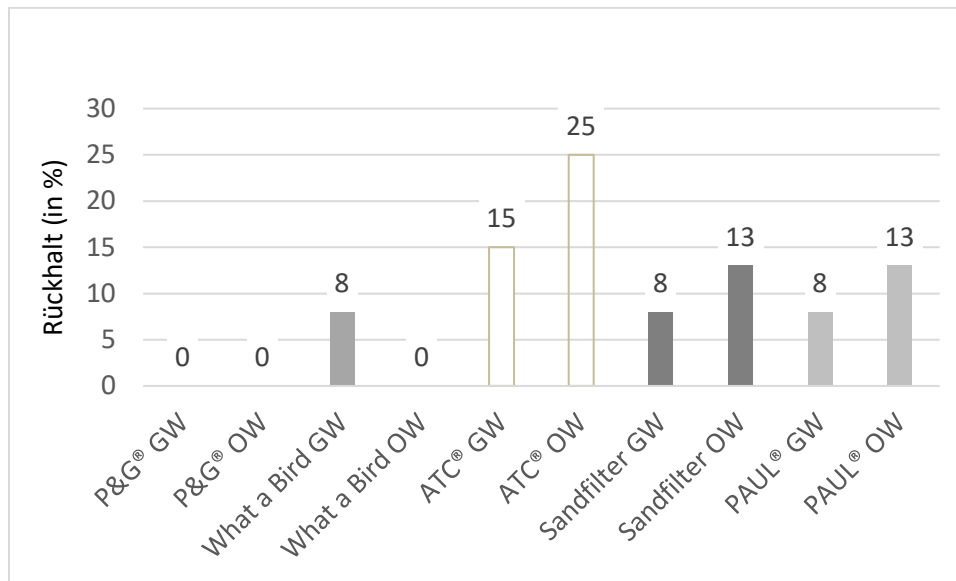


Abbildung 22: Spezifischer Fluorid-Rückhalt (in %) unter Laborbedingungen für Oberflächenwasser (OW) und Grundwasser (GW)

11.5 Untersuchungen zum Rückhalt gelöster Ionen und Schwermetalle in Uganda

11.5.1 Probenahme und Konzentrationen im Rohwasser

Für die Untersuchungen in Gulu (Uganda) wurde Rohwasser an zwei unterschiedlichen Stellen entnommen. Beide Entnahmestellen lagen auf dem Areal Lichtstahl Uganda e.V. Es wurde Brunnenwasser aus etwa 48 m Tiefe (Kapitel 9.2) sowie Oberflächenwasser aus einem Bach (Kapitel 9.3) entnommen. In Tabelle 10 sind die exemplarischen Parameter der zwei Rohwässer aufgeführt. Der Eisenwert für die Grundwasserentnahmestelle konnte aufgrund von technischen Problemen nicht bestimmt werden.

Tabelle 10: Zulaufkonzentrationen der zwei Ausgangswässer in Gulu

Rohwasser	elektr. LF (in $\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH-Wert	Nitrat (in mg/l)	Eisen (in mg/l)	Mangan (in mg/l)	Asen (in mg/l)	Fluorid (in mg/l)
Zulauf GW <i>RedTab</i>	242	7,16	1,3	n.b.	<0,1	<0,005	0,2
Zulauf OW <i>Wetlands</i>	357	7,12	0,3	1,11	0,7	<0,005	0,3

11.5.2 Systemspezifische Rückhaltewirkung unter realen Bedingungen

Die Aussagekraft der Ergebnisse unter Realbedingungen in Uganda ist geringer zu werten als die Ergebnisse der Laboruntersuchungen. Bereits die Ausgangskonzentrationen der getesteten Rohwässer waren teilweise niedrig, sodass eine Reduktion nicht immer bestimmt werden konnte. Darüber hinaus waren die Bedingungen zur Probenahme und Analyse im Feld schwierig. Es konnte aufgrund der zur Verfügung stehenden Mittel und Bedingungen keine Genauigkeit wie im Labor gewährleistet werden.

Nitrat: Die Nitratkonzentration im Zulauf (GW) lag bei 1,3 mg/l. Nach Anwendung der Produkte konnte nur im Ablauf des ATC Super Sterasyl® im GW-Versuch mit < 0,3 mg/l eine geringere Nitratkonzentration als im Zulauf bestimmt werden. Aufgrund der Funktionsweise des Produktes bzw. der verbauten AK-Einheit wurde ein gewisser Nitrat-Rückhalt durch dieses Produkt erwartet. Die Nitratkonzentration im Oberflächenwasser war mit 0,3 mg/l bereits sehr gering. Eine weitere Reduktion dieses geringen Nitratgehaltes konnte messtechnisch nicht nachgewiesen werden.

Eisen: Aufgrund eines technischen Problems konnten lediglich die Werte für das Oberflächenwasser ausgewertet werden (Abbildung 23). Die Zulaufkonzentration lag bei 1,11 mg/l. Der höchste Rückhalt des Eisens konnte mit dem Pulverprodukt (37 %) erreicht werden (Flockung und Filtration). Die Rückhalte des *ATC Super Sterasyls*®, des *PAULs*® und des Sandfilters weisen nur geringfügige Unterschiede auf. Der Ablauf des What a Birds zeigte einen negativen Rückhalt, sodass möglicherweise Eisenionen emittiert worden sind. Der Rückhalt wird hier mit "0 %" angegeben.

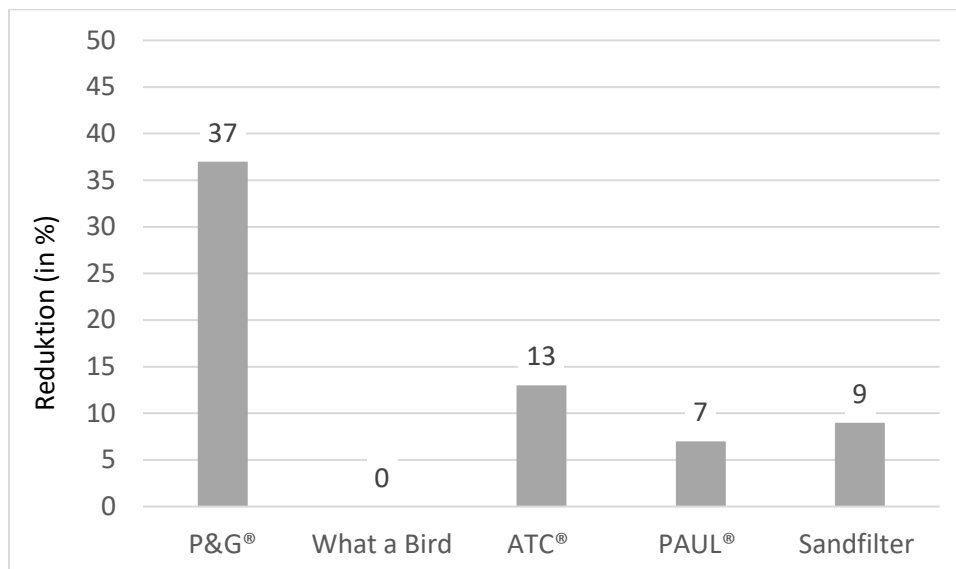


Abbildung 23: Spezifischer Eisen-Rückhalt (in %) bei Anwendung der Produkte unter Realbedingungen mit Oberflächenwasser mit einer Ausgangskonzentration von 1,11 mg/l

Mangan: Das Grundwasser aus dem Brunnen in Gulu wies eine Mangankonzentration $< 0,1$ mg/l auf. Über die Küvettentests konnte bei dieser Konzentration kein Rückhalt bestimmt werden. Im Oberflächenwasser lag die Konzentration bei $0,7$ mg/l. Das P&G™-Pulver, der ATC Super Sterasyl® und der Sandfilter konnten eine Reduktion der Mangankonzentration erzielen (Abbildung 24). Die Filtersysteme mit Membranen (*What a Bird* und das System *PAUL*) hielten kein Mangan zurück. Der Rückhalt gelöster Stoffe durch Membrane hängt von der Porengröße und entsprechend erforderlichen Drücken ab (Kapitel 11.6).

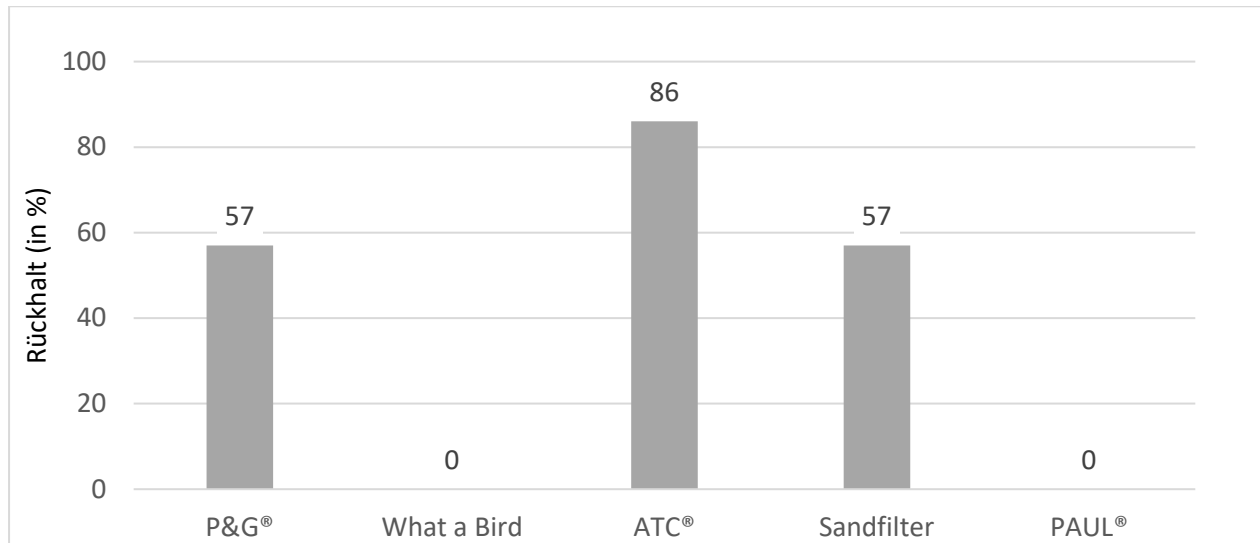


Abbildung 24: Spezifischer Mangan-Rückhalt (in %) bei Anwendung unter Realbedingungen mit Oberflächenwasser bei einer Ausgangskonzentration von $0,7$ mg/l

Fluorid: Die OW-Konzentration lag bei $0,3$ mg/l. Da sich die Ausgangskonzentration des Grundwassers und des Oberflächenwassers nur um $0,1$ mg/l unterschieden, wurde das Wasser mit der höheren Konzentration von $0,3$ mg/l verwendet. Bei Messergebnissen von $0,1$ mg/l, die sich folglich nur marginal von der Zulaufkonzentration (GW) unterscheiden, ist es schwer, valide Aussagen über den Rückhalt der Produkte abzuleiten. Bei solch geringen Konzentrationsunterschieden können zudem eventuelle Messfehler die Einschätzung der Produkte erheblich beeinflussen. Im Ablauf aller Produkte konnte eine geringere Fluoridkonzentration als im Zulauf festgestellt werden. Der *ATC Super Sterasyl®*, der Sandfilter, das Pulver *Purifier of Water* und der *PAUL®* konnten die Fluoridkonzentration von $0,3$ mg/l auf $0,1$ mg/l herabsetzen (> 60 % Rückhalt).

Arsen: Das örtliche Oberflächen- und Grundwasser in Uganda wies eine Arsenkonzentration von $< 0,005$ mg/l auf. Da dies bereits die kleinste messbare Konzentration der Messmethode war (kolorimetrische Teststäbchen), konnten in den Abläufen keine geringeren Konzentrationen als im Zulauf bestimmt werden. Folglich konnten keine Erkenntnisse über den Rückhalt der Produkte gegenüber Arsen abgeleitet werden, sodass beim Arsenrückhalt vollständig auf die im Labor ermittelten Ergebnisse zurückgegriffen werden muss.

11.6 Grenzen des Rückhaltes gelöster Ionen und Schwermetalle

Gelöste Ionen liegen im Größenbereich von 10^{-3} bis 10^{-4} μm und sind somit um ein Vielfaches kleiner als die Porengrößen der untersuchten Systeme mit Membranen (0,1 μm und maximal 0,02 μm). Ein Rückhalt wäre über das Umkehrosmoseverfahren, Koagulationen, über Sandfiltration, Ionentauscher und Aktivkohle (Adsorption) möglich. Die Wirkung variiert parameterspezifisch. Der Wirkungsgrad einer Membran gegenüber Spurenstoffen ist von dem Membrantyp und den Eigenschaften des Spurenstoffes abhängig (Lipp und Baldauf, 2008).

Die Ergebnisse der Untersuchungen in Steinfurt unter Laborbedingungen und Uganda unter Realbedingungen zeigen, dass die Filterkerzen, das Flockungsmittel und auch der Sandfilter manche der gelösten Ionen reduzieren konnten. Wie zu erwarten war, konnten die zwei Membranprodukte nur teilweise einen Effekt erzielen, was ihrer Porengröße und folglich den Zielparametern, dem Rückhalt von Partikeln, Trübung und Bakterien geschuldet ist. Die dennoch in einigen Fällen dokumentierte Reduktion ist vermutlich auf das Ausfallen der Stoffe aufgrund des Kontaktes zur Umgebungsluft (Oxidation) zurückzuführen.

11.7 Zusätzliche Untersuchungen zur langfristigen Filterwirkung

Alle Produkte lagen hinsichtlich des mit dem DFZ ermittelten Zellrückhaltes in den Laboruntersuchungen deutlich hinter den Erwartungen bzw. Herstellerangaben zurück. Das verwendete Testwasser bei den Untersuchungen zum Bakterienrückhalt war jedoch frei von Feststoffen. Daher wurden weiterführende Untersuchungen mit schwebstoffhaltigem Oberflächenwasser durchgeführt. Hierdurch sollte der Einfluss einer Deckschicht und der Betriebszeit auf die Wirksamkeit von Aufbereitungssystemen untersucht werden. Bereits die Untersuchungen zur Trübung unter Laborbedingungen haben einen Hinweis darauf gegeben, dass es eine Korrelation zwischen Partikelfracht und Rückhalt geben kann.

Zur Untersuchung mit realem Oberflächenwasser wurde der Wasserrucksack *PAUL* am Dortmund-Ems-Kanal in Münster aufgebaut. Über eine Tauchpumpe einen Meter unterhalb der Wasseroberfläche wurde der *PAUL* mit dem Wasser aus dem Schifffahrtskanal (vergleichbar mit Flusswasser) beschickt. Die Analyse des Wassers vor Beginn der Untersuchung zeigte eine Gesamtzellzahl von 4,88 Mio. Zellen/ml. Die ICCs lagen bei 3,39 Mio. und die DCCs bei 1,49 Mio. Zellen/ml. Der High Nucleic Acid Percentage (HNAP) lag bei 89,12 %. Am Ende der Untersuchung wurde die Bestimmung des Zulaufs wiederholt. Hier wurden folgende Zahlen gemessen: TCC 4,77 Mio. Zellen/ml, ICC 3,32 Mio. Zellen/ml und DCC bei 1,44 Mio. Zellen/ml bei 89,00 % HNAP. Die sehr dicht beieinanderliegenden Werte zeigen, dass die Zusammensetzung des Kanalwassers relativ konstant über die Zeit war. Für die Darstellung wurde immer der Zulaufwert zu Beginn der Messung herangezogen. Der verwendete Wasserrucksack *PAUL* wurde vor der Durchführung der Untersuchung bereits für die Untersuchungen zum Rückhalt von *E.Coli* Bakterien unter Laborbedingungen eingesetzt. Abbildung 25 zeigt den Verlauf der Zellzahl im Ablauf über einen Tag. Während der

Untersuchung sind insgesamt 1.200 l durch die Membranen geflossen. Die gesamte Betriebszeit lag bei etwa acht Stunden.

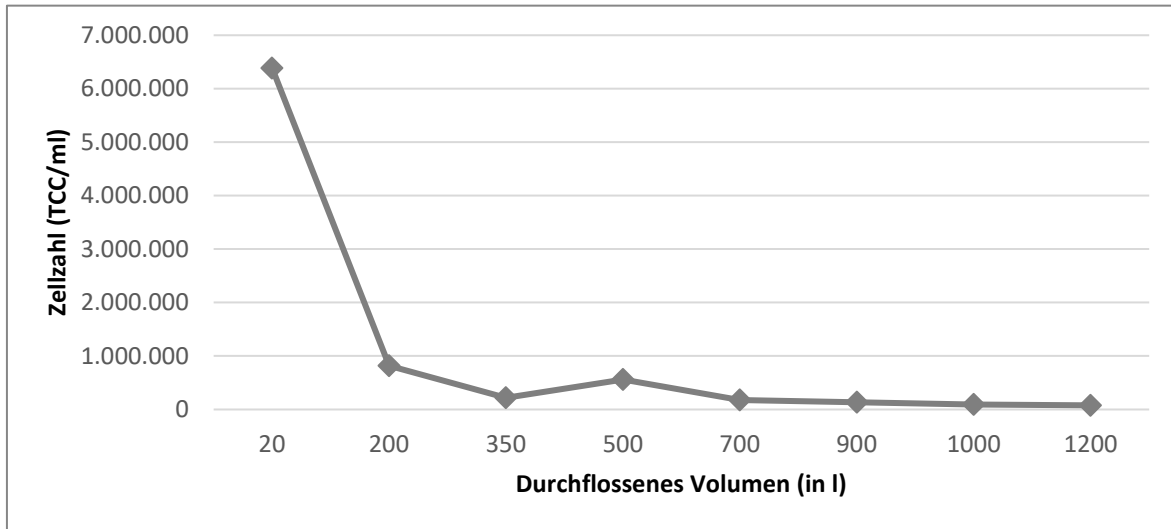


Abbildung 25: Verlauf der Zellzahl (TCC) im Ablauf des *PAULs* über 1200 l bei Beschickung mit Wasser aus dem Dortmund-Ems-Kanal (Zulauf TCC = 4,88 Mio. Zellen/ml) am ersten Tag

Nach 20 Litern befanden sich etwa 6,38 Mio. Zellen (TCC) im Ablauf des Filters. Dies ist ein Anstieg von etwa 1,5 Mio. Zellen. Dieser Messwert zeigt, dass es durch die Standzeit zwischen dem letzten Betrieb im Labor und der Wiederinbetriebnahme am Kanal zu einer Verkeimung hinter der Membran gekommen ist. Nach 200 Litern befanden sich aber lediglich noch 1 Mio. Zellen/ml im Ablauf. Die Konzentration nahm mit zunehmender Betriebszeit weiter ab, bis schließlich nur noch 77.740 Zellen (nach 1.200 Litern) im Ablauf des *PAULs* gemessen werden konnten. Die Zellzahl sank bis auf einen Ausreißer kontinuierlich. Bei der Messung bei 500 Litern wurde eine erhöhte Zellzahl (561.250 TCC/ml) gegenüber den Messungen bei 350 Litern (217.950 TCC/ml) und bei 700 Litern (174.050 TCC/ml) festgestellt. Neben einer erhöhten Zellzahl zeigten die Messwerte aber auch eine andere Zusammensetzung als die anderen Ablaufwerte. Wahrscheinlich besteht kein Zusammenhang zwischen der erhöhten Zellzahl und dem Rückhalt durch die Membran selbst, sondern die Ursache liegt hinter der Membran im Ablaufbereich des *PAUL*.

Die Untersuchung wurde noch ein zweites Mal durchgeführt, wobei sich qualitativ ähnliche Ergebnisse zeigten. Bei der zweiten Durchführung wurde festgestellt, dass sich die Wirksamkeit zwar schneller steigerte, das Ablassen des Wassers aus dem Schlammraum jedoch zu einem maßgeblichen Abtrag der aufgebauten Schicht führte. Insgesamt decken sich diese Ergebnisse auch mit den Erkenntnissen von Bartel et. al (2013). Auch hier wurde festgestellt, dass der Rückhalt in der Einfahrphase zunächst schlechter ist, sich dann aber stetig verbesserte.

Anhand der Untersuchungsergebnisse können folgende Rückschlüsse gezogen werden:

1. Die Betriebszeit und ausgebildete Deckschicht haben einen positiven Einfluss auf die Rückhaltungswirkung durch die Membrane
2. Die Ausbildung der Deckschicht ist abhängig von der Partikelfracht im Wasser. Das bedeutet, dass die Ablaufqualität sich schneller verbessert, wenn eine entsprechende Feststofffracht im Zulauf ist.
3. Durch Ablassen des Schlammesammelraumes im *PAUL* wird die Deckschicht wieder abgetragen. Die Reinigungsleistung steigt jedoch schneller wieder an als bei der Erstinbetriebnahme.
4. Nach einer Wiederinbetriebnahme oder längerer Standzeit ist zunächst mit einer höheren Anzahl an Zellen zu rechnen, sodass das erste Filtrat verworfen werden sollte.

Die Ergebnisse wurden bei Messungen mit dem *PAUL* erzielt. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass sich diese Ergebnisse auch auf andere Membran- und Oberflächenfilter übertragen lassen.

12 Vergleichende Gesamtbewertung

Auf der Basis der Untersuchungen sowohl unter Laborbedingungen als auch im praktischen Einsatz erfolgte eine vergleichende Gegenüberstellung der Systeme. Maßgeblich wird die Wirksamkeit sowie das langfristige Betriebsverhalten und die Lebensdauer von der Wartung und der Rohwasserzusammensetzung beeinflusst.

P&G™ Purifier of Water: Das Pulver *Purifier of Water* von P&G™ enthält neben einem Flockungsmittel auch ein Desinfektionsmittel. Der Rückhalt von Helmintheneiern (hier: Quarzmehlrückhalt) wurde als „bedingt zuverlässig“ eingestuft. Die Desinfektionswirkung durch das Produkt hatte diesbezüglich eine geringe Wirkung, da es sich um Helmintheneier handelt, die oftmals widerstandsfähig gegenüber der chemischen Desinfektion, was durch das Quarzmehl realistisch untersucht werden konnte. Der limitierende Faktor des Helminthenei-Rückhaltes ist das zur Filtration verwendete Stofftuch. Abhängig von den Stoffstrukturen ist die Variabilität groß. Die Reduktion von Bakterien war beim P&G™-Pulver mit „no risk“ vergleichsweise hoch. Bei dieser Bewertung ist eine Gesundheitsgefährdung unwahrscheinlich. Auch die Wiederverkeimungsrate lag mit „medium risk“ in einem Bereich, der als vertretbar eingestuft werden kann. Die Trübung konnte deutlich reduziert werden. Hinsichtlich gelöster Ionen zeigte dieses Produkt einen hohen Eisenrückhalt. Die Reduzierung von Arsen und Mangan war mittelmäßig und die von Nitrat und Fluorid sehr gering. Die Produkthanwendung erfordert ein niederschwelliges Verständnis zur Durchführung. Mit einem Pulverpaket können innerhalb von 30 min 10 Liter Wasser aufbereitet werden. Systembedingt fällt keine Wartung an. Jedoch ist die Einmüllösung aus ökologischer Sicht nachteilig zu werten. Sowohl das Anfallen des Verpackungsabfalls als auch die Langlebigkeit sind bedenklich. In Anbetracht der nicht vorhandenen Folgekosten kann dieses Kriterium nicht bewertet werden. Der Kaufpreis ist allerdings hoch - vor allem mit dem Hintergrund der geringen Durchschnittseinkommen von z. B. der Bevölkerung in Uganda. In einer akuten Krisensituation ist dieses Produkt aufgrund der leichten Anwendung gut geeignet, weil die Pakete leicht verteilt werden können.

What a Bird: Der *What a Bird* konnte einen zuverlässigen Rückhalt von Helminthen-Eiern erzielen. Dabei wird deutlich, dass sich mit größerem Volumen, welches die Membran durchfließt, der Rückhalt erhöht, was wiederum auf eine Deckschichtbildung schließen lässt. Nach den durchgeführten Analysen konnte der zuverlässige Rückhalt von Helmintheneiern nach einem Durchflussvolumen von ca. 15 l erreicht werden. Das vom Hersteller empfohlene Spülvolumen zu Beginn der Inbetriebnahme ist geringer. Die Bakterienreduktion wurde insgesamt mit „medium risk“ bewertet, wenn die Laborergebnisse des direkten Ablaufs („low risk“), der Wiederverkeimung („high risk“) und der Realbedingungen („high risk“) mit einbezogen werden. Die Filtereinheit *What a Bird* zeigte eine zuverlässige Trübungsentfernung aus den Rohwässern. Das Eisen konnte zuverlässig reduziert werden. Andere gelöste Wasserinhaltsstoffe konnten nur geringfügig bis nicht zurückgehalten werden. Im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel in Uganda (Durchschnittswerte) ist die Anschaffung des Produktes sehr teuer. Die Folgekosten sind

allerdings gering, da die Filter (in Abhängigkeit der Rohwasserqualität) lediglich alle zwei Jahre ausgetauscht werden müssen. Die Langlebigkeit des Produktes ist gegeben. Je nach Schnelligkeit des Pumpens und der Kraftaufwendungen können ca. 55 l/h aufbereitet werden. Die Wartung wird nach den Erfahrungen in Uganda als mittelmäßig eingestuft (sowohl Komplexität als auch Häufigkeit).

ATC Super Sterasyl®: Der *ATC Super Sterasyl®* wies einen zuverlässigen Rückhalt der Helminthen-Eier auf. Dieses Ergebnis wurde nach einem Durchflussvolumen von etwa 20 Liter ermittelt. Demnach musste sich auch bei diesem Produkt zunächst eine Deckschicht bilden, die ein Volumen fordert, welches über den Herstellerangaben liegt. Die Reduktion von Bakterien wurde sowohl unter Labor- als auch unter Realbedingungen mit „high risk“ bewertet. Die Trübungsreduktion dieses Produktes ist geringer als bei den anderen Produkten - allerdings sind die Ergebnisse des Rückhaltes gelöster Wasserinhaltsstoffe beim *ATC Super Sterasyl®* am besten. Bis auf den Parameter Fluorid konnten alle Stoffe mindestens mittelmäßig entfernt werden, Eisen und Mangan sogar im höheren Maße. Die Kosten sind jedoch zum einen beim Kaufpreis und zum anderen bei den Folgekosten vergleichsweise hoch. Hier ist der Filterkerzenwechsels nach durchschnittlich bereits sechs Monaten zu beachten (auch hier in Abhängigkeit der vorliegenden Rohwasserqualität). Der Durchfluss ist mit 1,3 l/h sehr gering, vor allem wenn das Produkt, welches auf Haushaltsebene angewendet werden soll, einen großen Haushalt bedienen sollte. Die Komplexität der Wartung ist aufgrund des einfachen Reinigungsvorganges der Filterkerze sehr gering. Die Nachhaltigkeit ist eher gering bis mittelmäßig zu bewerten, da das Plastikprodukt beispielsweise durch intensive Sonneneinstrahlung kurzlebig sein kann und die Kerzen regelmäßig gewechselt werden müssen.

Wasserrucksack PAUL®: Der *Wasserrucksack PAUL®* kann nach der Simulation die Helminthen-Eier zuverlässig auf ein unbedenkliches Niveau reduzieren. Nach einer Einfahrphase (ca. 150 l) und der Testwasserzugabe (ca. 250 l) wurden insgesamt ca. 400 l auf das Produkt gegeben bis diese Zuverlässigkeit, welche sich durch die Deckschichtbildung ergibt, erreicht worden ist. Dieses Volumen liegt über der Herstellerangabe von 50 l. Das System wurde für die Bakterienreduktion mit insgesamt „medium risk“ bewertet. Diese Einschätzung ergibt sich aus den Laborergebnissen des direkten Ablaufes („medium risk“), der Wiederverkeimung („high risk“) und den Ergebnissen unter Realbedingungen aus Uganda („medium“ bzw. „high risk“). Die „medium risk“-Bewertung aus dem Labor wurde nach einem Gesamtvolumen von 610 l (Durchfluss durch den *PAUL®*) gemessen. Es ist anzunehmen, dass mit größerem Gesamtvolumen der Rückhalt der Wasserinhaltsstoffe (hier insbesondere Bakterien und Helminthen) steigen wird. Nach 50 l ist eine zuverlässige Reduktion jedoch nach diesen Ergebnissen ausgeschlossen. Sowohl die Trübungs- als auch die Eisenreduktionen waren hoch und auch der Arsenrückhalt war mittelmäßig. Nitrat, Mangan und Fluorid wurden gar nicht bis wenig aus dem Rohwasser entfernt. Der Kaufpreis ist hoch, allerdings bestätigen Erfahrungen unterschiedlicher Anwender eine hohe Lebensdauer. Es treten keine Folgekosten für den *PAUL®* auf. Nach direkter Inbetriebnahme, wenn sich noch keine Deckschicht

auf der Membran gebildet hat, zeigt der Wasserrucksack unter allen betrachteten Produkten den höchsten Durchfluss. Anfangs wurden 180 l/h aufbereitet. Im Verlauf der Untersuchungen nahm der Wert auf 100 l/h ab. Die Häufigkeit und Komplexität der Wartung ist gering. Zwar werden keine lokalen Materialien verwendet, jedoch fallen keinerlei Reststoffe an.

Sandfilter nach CAWST-Anleitung: Mit dem Sandfilter konnten Helmintheneier wirksam zurückgehalten werden. Die Bakterienrückhalte wurden sowohl im Labor als auch unter Realbedingungen als „high risk“ eingestuft. Das Aufwachsen des Biofilmes benötigt Zeit. Der Sandfilter muss gespült werden. Dennoch wurde kein Rückhalt erzielt, der eine Gesundheitsgefahr ausschließen würde. Auch bei diesem Produkt ist davon auszugehen, dass weiteres Spülen und Beschicken des Sandfilters mit z. B. Oberflächenwasser das Anwachsen des Biofilmes und somit den Bakterienrückhalt verbessern würde. Der Sandfilter wies eine hohe Reduktion der Trübung auf. Wie beim *ATC Super Sterasyl*[®], konnte durch diese Aufbereitungsmethode Eisen und Mangan im hohen Maße entfernt werden. Der Rückhalt von Nitrat und Arsen war gering. Je nach Region und Land sind die Anschaffungskosten für das Material und den Bau eines Sandfilters hoch. Folgekosten kommen, wenn es zu keiner Beschädigung des Produktes oder des Materials kommt, in der Regel nicht zustande. Aufgrund dessen ist die Langlebigkeit und das Anfallen von Reststoffen positiv bewertet worden. Durch die Beschaffung lokaler Materialien wird dieses Kriterium ebenfalls als sehr gut bewertet. Der Wartungsaufwand ist nach Erklärungen des Systems mittelmäßig bis gut. Der Aufwand ist im Vergleich zu den marktverfügbaren Produkten hoch, denn der Sandfilter muss erst einmal vor Ort gebaut werden. Die anschließende Anwendung ist dann einfach.

Die abschließende Matrix (Tabelle 11) ermöglicht eine Einschätzung für eine Produktauswahl in Abhängigkeit des jeweiligen Rohwassers, der verfügbaren Kosten oder auch der Akzeptanz der Bevölkerung. Die Matrix liefert somit eine Entscheidungshilfe z. B. für NGOs, Vereine oder Institute, wenn es darum geht, dezentrale und mobile Systeme zur Wasseraufbereitung zu wählen.

Eine pauschale Aussage zur Wirksamkeit gegenüber gelösten Stoffen ist nicht möglich, da i. d. R. äußere Bedingungen, wie Feststoffgehalt oder pH-Wert maßgeblichen Einfluss auf das Verhalten der Stoffe haben und so zu Messergebnissen führen, die einen Rückhalt zeigen, der ggf. aber nicht reproduzierbar ist. Bei keinem der getesteten Produkte ist pauschal von einem sicheren Rückhalt gelöster Stoffe auszugehen. Lediglich der Sandfilter (biologisch) und der ATC (adsorptiv) weisen vergleichsweise robuste Wirkmechanismen auf.

Tabelle 11: Zusammenfassende Bewertung der untersuchten Produkte (teilweise subjektive/qualitative Bewertung)

System/Bewertungskriterium	System/Produkt				
	P&G™ Purifier of Water	What a Bird	ATC Super Sterasyl®	Wasserrucksack PAUL®	Sandfilter CAWST-Anleitung
<i>Art der Behandlung</i>	Flockung (Eisensulfat) und Desinfektion (Calciumhypochlorit)	Mikrofiltration (0,1 µm)	Adsorption, Tiefen- und Oberflächenfiltration (0,5 bis 0,8 µm)	Ultrafiltration (0,02 bis 0,1 µm)	Oberflächen- und Tiefenfiltration
<i>Größenordnung (Orientierungswerte)</i>	bis 10 Personen (Haushalt)	bis 20 Personen (mehrere Haushalte)	bis 5 Personen (Haushalt)	bis 400 Personen (Dorf/Community)	bis 100 Personen (Dorf/Community)
<i>Durchfluss oder Volumen pro Anwendung</i>	10 l pro Anwendung (Päckchen)	115 ml/Hub bis 55 l/h	1,3 l/h	100 l/h Anfangswert (Abnahme über Zeit)	24 l/h
<i>Anschaffung/Kaufpreis</i>	ca. 0,10 € pro Päckchen	ca. 35 €	ca. 100 €	ca. 1.200 €	ca. 80 € (Material vor Ort verfügbar)
<i>Folgekosten</i>	nicht bestimmt	gering	sehr hoch	sehr gering	sehr gering
<i>Lebensdauer</i>	einmaliger Einsatz	Filtereinheit nach 2 Jahren	Austausch Filterkerze nach ½ Jahr	10 Jahre	mehrere Jahre
<i>Wartungshäufigkeit</i>	sehr gering	mittelmäßig	mittelmäßig	gering	mittelmäßig bis gering
<i>Wartungsaufwand</i>	sehr gering	mittelmäßig	sehr gering	gering	gering
<i>Komplexität/Aufwand</i>	mittelmäßig	gering	einfach	gering	hoch
<i>Reststoffe/Abfall</i>	hoch	gering	gering	sehr gering	sehr gering

Wirkung (Rückhalt/Reduktion)		System/Produkt				
		P&G™ Purifier of Water	What a Bird	ATC Super Ster- asyl®	Wasserrucksack PAUL®	Sandfilter CAWST-Anleitung
Helmintheneier		bedingt	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig	zuverlässig
Bakterien		no risk	medium risk	high risk	medium risk	high risk
<i>Bewertung orientiert an Odonkor und Mahami (2020) sowie WHO (2016) - siehe Kapitel 11.3.3</i>						
Trübung	Ablauf	bis 1,0 NTU	bis 0,5 NTU	0,5 bis 1,0 NTU	< 0,2 bis 0,5 NTU	< 0,2 bis 0,5 NTU
	Rückhalt	92,2 bis 99,1 %	97,2 bis 99,8 %	93,6 bis 98,5 %	95,5 bis 99,8 %	97,0 bis 99,8 %
Reduktion Färbung		sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch
Gelöste Stoffe (Nitrat, Eisen, Man- gan, Fluorid, Arsen)		Wurden im Rah- men der Untersu- chungen nennens- wert zurückgehal- ten. Generell si- cher Rückhalt aber systemspezi- fisch nicht ge- währleistet.	Rückhalt system- spezifisch nicht ge- währleistet. Rückhalt von Eisen hoch.	Adsorption durch Aktivkohle. Bis auf Fluorid weitegehende Wirksamkeit nach- gewiesen.	Genereller Rück- halt systemspezi- fisch nicht gewähr- leistet. Hoher Eisenrück- halt in Laborversu- chen.	Rückhalt aufgrund komplexer Wirk- mechanismen (u.a. biologisch) mög- lich. Eisen und Mangan zuverlässig redu- ziert.
			Wirkung entwickelt sich u.U. nach längerer Betriebsdauer (u.a. Biofilmbildung)			

13 Erfahrungen und weitere Entwicklungen in Uganda

Einen wesentlichen Einfluss auf die dauerhafte Anwendung der Wasseraufbereitungssysteme hat der betriebliche Aufwand und die Akzeptanz der Bevölkerung.

Wie die Erfahrungen in Uganda mit dem *ATC Super Sterasyl*[®] zeigten, ist die Handhabung einfach. Allerdings fehlt in den häufig nur mit einem Bett ausgestatteten Hütten die Abstellfläche des klassischen Tischgerätes (table-top-Lösung). Die Positionierung des Systems auf dem Boden schränkt die Nutzung ein. Hier besteht zudem die Gefahr, dass der Auslass verunreinigt wird. Außerdem zählen zu einem Haushalt häufig mehr als fünf Personen, so dass sich die Verfügbarkeit von 16 l Wasser nach einem mehrstündigen Durchlaufzeitraum als eingeschränkt praktikabel erwies. Abbildung 26 zeigt die Verunreinigung der Filterkerzen, die vergleichsweise einfach gereinigt werden können.

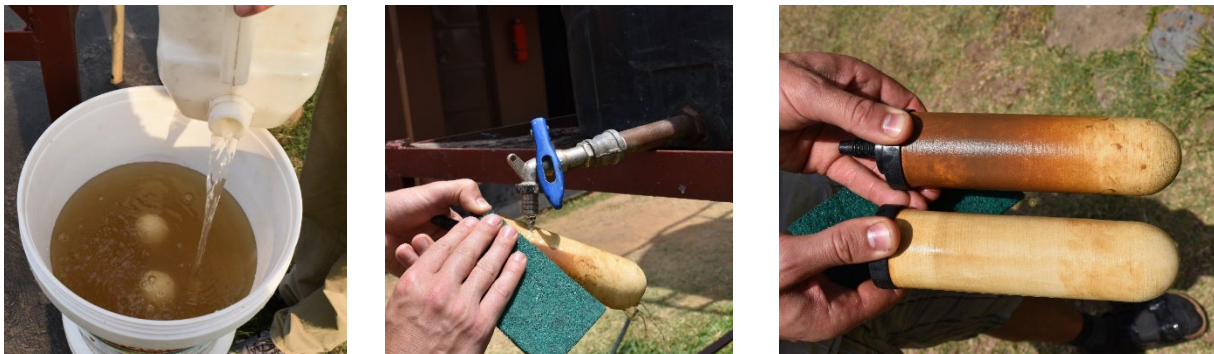


Abbildung 26: Anwendung der Filterkerzen des *ATC Super Sterasyl*[®] zur Aufbereitung von örtlichem Oberflächenwasser

In der Region um Gulu sind bereits einige What a Birds im Einsatz. Sechs Frauen, die einen What a Bird von Lichtstahl Uganda e.V. erhielten, haben über ihre Erfahrungen berichtet. Entscheidend bei der Wartung des What a Bird ist das Rückspülen der Filtereinheit. Anschließend ist der What a Bird mit seinen recht vielen und teils kleinen Einzelteilen wieder zusammzusetzen. Eine Nutzerin hat den What a Bird in einer falschen Reihenfolge zusammengesetzt. Die weiteren fünf Frauen schienen sicher im Umgang mit dem Produkt. Lediglich die Nutzerin, die das Produkt in falscher Reihenfolge zusammengesetzt hatte, verfügte nicht über das erforderliche Wissen zur Rückspülung der Filtereinheit. Wird der What a Bird täglich angewendet, muss er je nach Trübung des Wassers täglich bis alle zwei Tage gereinigt werden. Damit ist die Wartungshäufigkeit vergleichsweise hoch. Die Verfügbarkeit von Wasseraufbereitungssystemen ist in den ländlich gelegenen Dörfern um Gulu eine Rarität. Dementsprechend stellt ein What a Bird eine Ware da, die Begehrlichkeiten weckt und gestohlen wurde. In Abbildung 27 wird die Nutzung des What a Bird gezeigt. Eine Nutzerin (Bild links) versorgt mit dem System nicht nur die eigene Familie, sondern auch weitere Mitbewohner der Dorfgemeinschaft.



Abbildung 27: Einsatz des What a Bird in Uganda

Die Anwendung des P&G™-Purifier of Water ist auf der Rückseite jeder Packung anschaulich erläutert und illustriert. Auch in Uganda wurde das Produkt zur Aufbereitung von Oberflächen- und Grundwasser angewendet. Die Anwendung des Produktes ist leicht verständlich. Dennoch müssen verschiedene Arbeitsschritte durchgeführt werden, bis das Wasser den vollständigen Reinigungsprozess durchlaufen hat. Zudem werden zwei Eimer benötigt, die vielleicht nicht jeder Familie zur Verfügung stehen. Darüber hinaus können sich die Menschen meist nicht vorstellen, dass mit dem Pulver das Wasser gereinigt werden kann. Es war etwas Überzeugungsarbeit nötig, bis letztlich das Ergebnis überzeugte. Weiterhin bestand Skepsis bei der lokalen Bevölkerung, da das Wasser nach Chlor roch und schmeckte. Diese Skepsis, so teilte eine Mitarbeiterin von Lichtstrahl Uganda e.V. mit, stammt durch den ungewohnten Geruch und Geschmack. Darüber hinaus sind die Menschen skeptisch, weil der Chlorgeruch an die Ebola-Ausbrüche erinnert, bei denen Chlor zur Desinfektion eingesetzt wurde. Das Pulver als Einmalprodukt hat den Vorteil, dass keine Wartung erforderlich ist.

Die Anwendung des Systems *PAULs*® zeichnet sich durch das vergleichsweise hohe Behandlungsvolumen von 1.200 l/d und die einfache Anwendung aus. Bei der lokalen Bevölkerung in Gulu war es anfangs schwierig zu erläutern, dass die Membran keine Reinigung erfordert. Die Reinigungsprozesse im geschlossenen Behälter sind nicht visuell nachvollziehbar, so dass die Anwendung anfangs zögerlich erfolgte. Ein Vorteil des geschlossenen Systems ist der Schutz vor Beschädigungen und Kontamination der Membraneinheiten. Nach Erklärung der Prozesse wurde das System sehr gut angenommen. Der Wasserrucksack *PAUL*® wird zur Aufbereitung von Wasser im Küchenbereich des Vereins *Lichtstrahl Uganda e.V.* eingesetzt (Abbildung 28).



Abbildung 28: Einsatz des Wasserrucksack *PAUL*® zur Vorbehandlung des Wassers auf dem Gelände des Vereins *Lichtstrahl Uganda e.V.* in Gulu

Während des Aufenthaltes und den Arbeiten in Uganda wurde das große Interesse der dortigen Bevölkerung deutlich. Trinkwasser mit unbedenklicher Qualität hat einen hohen Stellenwert. Fragen zur geeigneten Entnahme, Aufbereitung und Speicherung des Wassers wurden intensiv diskutiert. Einige Menschen tranken jedoch bedenkenlos Rohwasser ohne jegliche Aufbereitung. Da Verunreinigungen häufig nicht unmittelbar sichtbar sind, wird das Problem nicht wahrgenommen. Diese Eindrücke waren Anlass für die Durchführung von Workshops, zunächst mit Personen von Lichtstrahl Uganda e.V. Neben den genannten Inhalten wurden auch neue Routinen für die Reinigung von Behältern oder die Benutzung von bestimmten Wasserquellen auf dem Projektgelände festgelegt. Darüber hinaus erfolgte eine Erläuterung möglicher Gefahren und Folgen durch das Trinken von Rohwasser ohne Aufbereitung. Die gesundheitlichen Gefahren waren den Menschen vor Ort meist nicht bewusst. Aufgrund des großen Interesses wurde ein zweiter Workshop durchgeführt.

14 Fazit und Ausblick

Die Untersuchungen veranschaulichen die Möglichkeiten und Grenzen mobiler Systeme und Produkte zur Wasseraufbereitung in Krisenregionen. Untersucht wurden Systeme mit unterschiedlichen Wirkmechanismen und einem breiten Behandlungsvolumen von wenigen Litern bis über 1000 Litern pro Tag.

Folgende Aspekte sind bei der Anwendung zu berücksichtigen:

- Bei den meisten Systemen ist eine „Einfahrphase“ erforderlich. Das von den Herstellerfirmen angegebene Spülvolumen reicht häufig nicht aus, um die maximale Filterwirkung zu erreichen. Beispielsweise zeigte sich beim Wasserrucksack PAUL[®], dass sich der Bakterienrückhalt bei Anwendung über einen längeren Zeitraum verbessert. Das bedeutet für die Membran/Oberflächenfilterprodukte, dass diese nach einer gewissen Betriebszeit bessere Rückhalte erzielt werden können als bei den hier vergleichsweise kurzen Einsätzen.
- Keines der Produkte konnte als alleinige Lösung einen zuverlässigen Rückhalt gegen mikrobiologische Belastungen und das breite Spektrum chemischer Belastungen leisten. Für den Rückhalt von Mikroorganismen ist das Höchstmaß an Sicherheit bei einer Verfahrenskombination aus Filtration und Desinfektion zu erreichen. Eine Desinfektionswirkung weist ausschließlich das P&G[™]-Pulver auf. Die Filtersysteme reduzieren die Anzahl der Bakterien haben aber keine Desinfektionswirkung.
- Ein maßgebliches Kriterium ist die Desinfektionswirkung bei anschließender Lagerung des aufbereiteten Wassers. Erfahrungsgemäß werden die Behälter für den Transport und die Speicherung (z. B. in Jerrycans oder Pots) nicht oder unzureichend gereinigt. Das Wasser lagert dann ggf. über Stunden und Tage und die Zellzahlen nehmen exponentiell zu.
- Eine Desinfektion kann durch Chlor oder auch durch UV-Strahlung erfolgen. Eine Methode ist die Solar Disinfection (SODIS)-Methode, bei der Wasser in transparenten PET-Flasche durch Sonnenlicht bestrahlt wird. Voraussetzung der Desinfektionswirkung ist eine sehr geringe Trübung, damit alle Zellen durch die Strahlung in der Flasche erreicht und unschädlich gemacht werden. Hier können weitergehende Untersuchungen wertvolle Informationen liefern.
- Bei der in diesem Projekt angewandten Methode der Durchflusszytometrie zur Ermittlung der Zellzahlen handelt es sich um eine neuartige Methode der Trinkwasseranalytik. Diese Methode liefert im Vergleich zur üblichen Methode (Plattenverfahren) wesentlich mehr Informationen zum Rückhalt von Keimen. Bei der Systembewertung ist dieser Aspekt zu berücksichtigen.

Eine generelle Unbedenklichkeit nach der Anwendung besteht nicht, da systembedingte Grenzen der Aufbereitung vorliegen. Die Wahl des entsprechenden (optimalen) Aufbereitungssystems erfordert eine Analyse der Rohwasserbelastung. Weiterhin sind betriebliche Anforderungen zu berücksichtigen, auch wenn diese den allen Produkten auf einem niederschweligen Niveau liegen.

Es kann allerdings auch nicht erwartet werden, dass kompakte in der Regel einstufige Systeme mit einfacher Handhabbarkeit einen vergleichbaren Reinigungserfolg erzielen, wie ein komplexes Wasserwerk mit abgestimmten sequenziellen Aufbereitungsschritten. Insofern können die Anforderungen der Trinkwasserverordnung zwar als orientierender Vergleich, aber nicht als Anforderung zugrunde gelegt werden. Im Projekt wurde nachgewiesen, dass durch alle Systeme bzw. Produkte eine nennenswerte Reduktion von Wasserinhaltsstoffen erfolgt. Damit wird die Gesundheitsgefährdung der Menschen deutlich reduziert.

15 Literaturverzeichnis

Adelana, S. and MacDonald, A. (2008): Groundwater research issues in Africa. In: Adelana, S. und MacDonald, A. (Hrsg.) Applied Groundwater Studies in Africa. TAYLOR & FRANCIS LTD, pp. 1-8

Amirtharajah, A. and Wetsein, D. (1980): Initial Degradation of Effluent Quality During Filtration. *American Water Works Association Journal*, pp. 518-524

Auswärtiges Amt (2019): Cholera - Informationen für Beschäftigte und Reisende. *Gesundheitsdienst*. <https://www.auswaertiges-amt.de/blob/200200/d4ceac4e2836d49a08096185d67d0532/cholera-merkblatt-data.pdf>, letzter Aufruf: 21.10.2021

Bartel H., Frohnert A., Grunert A., Selinka H.-C. und Szewzyk (2013) Membranfiltrationsgerät zur Aufbereitung von trinkbarem Wasser aus Oberflächengewässern für kleine Gruppen in Notsituationen ohne Fremdenergie. Abschlussbericht (DBU), Umweltbundesamt und Universität Kassel, Dezember 2013

bNovate Technologies SA (2020): BactoSense™. Automatisiertes Durchflussszytometer zur online Überwachung von Wasser. Anleitung/Datenblatt/Anmerkungen

Crittenden, J., Trussell, R., Hand, D., Howe, K. and Tchobanoglous, G. (2012): MWH's water treatment - principles and design. 3. Aufl., Wiley-Blackwell, Hoboken, N.J.

DVWK Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (Hrsg.) (1988): Bedeutung biologischer Vorgänge für die Beschaffenheit des Grundwassers. Bearbeitung durch den DVWK-Fachausschuss „Grundwasserbiologie“, Parey Verlag, Hamburg. Berlin

Epstein, S. S. (2013): The phenom of microbial uncultivability. *Current opinion in microbiology*, 5, pp. 636-642

Gimbel, R. und Nahrstedt, A. (2004): Erstfiltratabschlag bei der Tiefenfiltration. Abschlussbericht zur DVGW-Literaturstudie

Göhde, W., and Dittrich, W. (1968): Flow-through chamber for Photometers to measure and count particals in a dispersion medium (Anmeldung Patent DE1815352)

Hammes, F., and Steinberg, M. (2012): Analysemethoden: Durchflussszytometrie in der Trinkwasseranalytik. *BioSpektrum*, 18(3), pp. 300–302

Jiménez-Cisneros, B. and Maya-Rendon, C. (2007): Helminths and Sanitation. In: Méndez-Vilas, A., Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology. FORMATEX, pp. 60–71

Karger, R. und Hoffmann, F. (2013): Aufbereitungsverfahren in der Trinkwasserversorgung. In Wasserversorgung. Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung, Verteilung. 14. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden

Kötzsch, S., Alisch, S., and Egli, T. (2012): Durchflussszytometrische Analyse von Wasserproben. Schweizerisches Bundesamt für Gesundheit (BAG). Ausgabe 1

Kötzsch, S. und Sinreich, M. (2014): Zellzahlen zum Grundwasser – Bestimmung mittels Durchflussszytometrie. *Aqua & Gas*, 94(3), pp. 14-21

Krider Ways Technical Solutions (2020): Pump test for Lightray Gulu. Coffeeshop Borehole. Pump test: 9th January 2020

Kut, K., Sarswat, A., Srivastava, A., Pittman, C. U., Mohan, D. (2016): A review of fluoride in african groundwater and local remediation methods. *Groundwater for Sustainable Development*, 2-3, pp. 190–212

Leibniz Institut DSMZ (Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen) (2021): German Collection of Microorganisms and Cell Cultures GmbH: Details. *Escherichia coli* DSM 498. <https://www.dsmz.de/collection/catalogue/details/culture/DSM-498>, letzter Aufruf: 04.10.2021

Lipp, P. und Baldauf, G. (2008): Stand der Membrantechnik in der Trinkwasseraufbereitung in Deutschland. *DVGW Energie | Wasser-Praxis* 04/2008, S. 60 bis 64

Madigan, M., Martinko, J. M. and Parker, J. (2000): BROCK Mikrobiologie. Goebel, W (Hrsg.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

Margat, J. and van der Gun, J. (2013): Groundwater around the World. A Geographic Synopsis. CRC Press. London.

Markus Klotz GmbH (o. J.): Syringe® Partikelzähler für Flüssigkeiten. <https://www.faklotz.de/partikelzaehler/fluessigkeiten/produkte-partikelzaehler-fluessigkeiten/12-partikelzaehler-fuer-fluessigkeiten-syringe.php>, besucht am 09.01.2022

Metcalf and Eddy (Hrsg.) (2013): Wastewater engineering: Treatment and resource recovery. 5. Aufl., McGraw-Hill Medical Pub, Burr Ridge

Naidoo, D., Archer, C., Louton, B. and Rodda, N. (2016): Testing household disinfectants for the inactivation of helminth eggs on surfaces and in spills during pit latrine emptying. *Water SA*, (42), Nr. 4, pp. 560-570

Odonkor, S. T. and Mahami, T. (2020): *Escherichia coli* as a Tool for Disease Risk Assessment of Drinking Water Sources. *Int J Microbiol.* 2020 Jun 15;2020:2534130

OHCHR (United Nations High Commissioner for Refugees) (2010): The Right to Water: Factsheet Nr. 35, <https://www.ohchr.org/Documents/Publications/FactSheet35en.pdf>, letzter Aufruf: 01.05.2021

Pandit, A. and Kumar, J. (2019): Drinking water treatment for developing countries: Physical, chemical and biological pollutants. Royal Society of Chemistry

RKI (Robert Koch-Institut) (2017): *Escherichia Coli*. https://www.rki.de/DE/Content/Infekt/Antibiotikaresistenz/nosokomiale_Erreger/E_coli.html, letzter Aufruf: 22.12.2021

RKI (Robert Koch-Institut) (2021): EKOS. Schutzmaßnahmen-Krankheitserreger in Risikogruppen. <https://ekos.rki.de/Webs/Ekos/DE/Schutzmassnahmen/Krankheitserreger/Krankheitserreger-node.html>, letzter Aufruf: 10.09.2021

Spektrum (2021): *Escherichia coli*. Lexikon Der Biologie. Spektrum Akademischer Verlag. Heidelberg. <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/escherichia-coli/22571>, letzter Aufruf: 03.12.2021

Sphere Association (2018): Das Sphere-Handbuch. Humanitäre Charta und Mindeststandards in

der humanitären Hilfe. 2. dt. Ausgabe. <https://www.spherestandards.org/handbook/editions>.

TrinkwV (2016): Trinkwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die zuletzt durch Artikel 99 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist. Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Geb. Bundesministerium Der Justiz Und Für Verbraucherschutz

UNICEF (United Nations International Children´s Emergency Fund) (2013): Wasser wirkt (Hintergrund zur UNICEF-Kampagne). Mein Recht auf Wasser. <https://www.unicef.de/informieren/materialien/mein-recht-auf-wasser/9520>, letzter Aufruf: 21.09.2021

Wallis, I., Prommer, H., Berg, M., Siade, A. J., Sun, J., & Kipfer, R. (2020): The river–groundwater interface as a hotspot for arsenic release. *Nature Geoscience*, 13(4), pp. 288–295

WHO (World Health Organization) (2006): Wastewater use in agriculture. 3. Aufl., World Health Organization, Genf

WHO (World Health Organization) (2016): Countries Reporting Cholera, 2010-2015. https://tropiceninstitut.de/impfungen-a-z/alle-impfungen/cholera?banner_unsubribe=true, letzter Aufruf: 18.07.2022

WHO (World Health Organization) (2017): Guidelines for Drinking-water Quality. 4. Auflage.

WHO (World Health Organization), & UNICEF (United Nations International Children´s Emergency Fund) (2017): Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene Update and SDG Baselines 2017

Wilhelm, S. (2008): Wasseraufbereitung: Chemie und chemische Verfahrenstechnik. 7. Aufl., Springer, Berlin Heidelberg

Worch, E. (2019): Drinking Water Treatment: An Introduction. De Gruyter, Berlin Boston