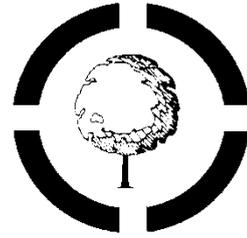


---

**Masterstudiengang Umweltschutz**

Ein Modell der Hochschulen

Esslingen, Nürtingen, Reutlingen, Stuttgart



# **Internationale Übertragbarkeit der in der GIZ Zentrale in Eschborn installierten Braunwasserbehandlungsanlage**

**Yue, Wu**

**Master Thesis**

**Wintersemester 2011/2012**

**Nürtingen, Dezember 2011**

vorgelegt bei

**Prof. Helmut Hohnacker – Hochschule für Technik (HFT),  
Stuttgart**

**Dr.-Ing. Martina Winker – Gesellschaft für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Eschborn**

# Dank

Ich möchte mich bei all denjenigen bedanken, die mir bei der Erstellung meiner Masterarbeit geholfen haben. Ganz gleich wie, ohne Euch hätte ich das niemals geschafft. Besonders möchte ich mich aber bei Prof. Hohnecker bedanken, der mir aufgrund seiner langjährigen Erfahrungen eine große Hilfe war. Vielen Dank auch an Frau Dr.-Ing. Martina Winker (GIZ) und Herr Enno Schröder (GIZ), der mir bei Problemen mit der Formulierung immer zur Seite stand.

Auch bei Herr Enno Schröder möchte ich mich für die vielen Stunden Korrekturlesen bedanken.

Yue Wu

Stuttgart, 08,01,2012

## Kurzfassung

NASS („Neuartige Sanitärsysteme“) strebt die Rückgewinnung von denen im Abwasser beinhaltenen Ressourcen wie z.B. Nährstoffen und Energie an. Eine Trennung der Abwasserströme ist das wesentliche Merkmal eines innovativen Wasserkonzepts.

Die Braunwasserbehandlung durch das MBR Verfahren ist eine Erprobung innerhalb eines neuen Sanitärsystems, der einzelne Abwasserteilstrom betrachtet und behandelt. In Haus 1 der GIZ in Eschborn ist seit 27.06.2011 die Braunwasserbehandlung mittels Membranbelebungsverfahren in Betrieb. In dieser Arbeit wurde die Internationale Übertragbarkeit der in GIZ installierten Braunwasserbehandlungsanlage durch Literaturrecherche, Interview, fiktive Wirtschaftlichkeitsberechnung, Bewertung der Nutzwertanalyse nach verschiedenen Dimensionen untersucht.

Das Ergebnis zeigt, dass das MBR-Verfahren über eine sehr effektive Reinigungsleistung, hohe hygienische Qualität des Permeats, einen geringen Flächenbedarf verfügt und ermöglicht sowohl die direkte Weiterverwendung des gereinigten Abwassers als Betriebswasser als auch die Nutzung der abgeschiedenen Feststoffen von Braunwasser und die im Retentat zurückbehaltenen Nährstoff des Abwassers nach Behandlung als Dünger im landwirtschaftlichen Bereich, Bei vergleichsweise hohen Investitionskosten und Energiekosten. 35 Länder wurden durch Nutzwertanalyse bewertet. Die Länder in Westasien und Nordafrika wurde wegen der Wasserknappheit, der schlechten Frischwasserqualität, der hohen Besiedlungsdichte und des hohen Urbanisierungsgrad dem größten Einsatzpotential zugewiesen.

---

## Inhalt

1.	Einleitung .....	1
1.1	Fragstellung und Zielsetzung.....	3
2.	Material und Methoden .....	4
2.1	Literaturübersicht.....	4
2.1.1	Innovative Wasserkonzepte.....	4
2.1.2	Definition und Charakterisierung der häuslichen Abwasserteilströme .....	5
2.1.3	Aspekte der Verwertung der Stoffströme Gelb- und Braunwasser.....	8
2.1.4	Gesetzliche Anforderungen an Betriebswasser .....	11
2.1.5	Darstellung der verschiedenen Verfahrens zur Braunwasserbehandlung	14
2.1.6	Parameter zur Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit einer Membranfiltration.....	23
2.2	Das SANIRESCH Projekt .....	24
2.2.1	Beschreibung der Anlage der Braunwasserbehandlung in Haus 1 der GIZ.....	25
2.3	Methode zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit von Braunwasserbehandlung durch MBR- Technologie.....	31
2.3.1	Auswahl der Evaluations & Bewertungsverfahren .....	31
2.3.2	Vorgehensweise bei der Nutzwertanalyse .....	36
2.3.3	Auswahl und Gewichtung der Dimensionen und Kriterien .....	39
2.3.4	Interviewleitfaden für Experteninterview mit Chinesischen Experten.....	48
2.4	Methode zur Identifizierung von Globalen Hotspots .....	49
2.5	Methode zur vorläufigen Kostenabschätzung.....	52
3.	Ergebnisse und Diskussion.....	54
3.1	Analyse des Betriebs der MBR-Anlage in Haus 1 der GIZ .....	54
3.1.1	Hydraulische Leistungsfähigkeit der MBR- Anlage in Haus 1 der GIZ.....	54
3.1.2	Reinigungsleistung .....	55
3.2	Vorläufige Kostenabschätzung Haus 1 der GIZ.....	57
3.2.1	Fiktive Berechnung der Wassermenge .....	57
3.2.2	Berechnung der einzelnen Kosten.....	58
3.2.3	Analyse der Kostenabschätzung .....	61

---

3.3	Ergebnis der Bewertung der Internationale Übertragbarkeit durch Nutzwertanalyse .....	63
3.4	Ergebnis der Gewichtung von chinesischen Experten.....	69
3.5	Identifizierung den Globalen Hotspots.....	71
3.5.1	Wasserkapazität.....	71
3.5.2	Frischwasserqualität.....	73
3.5.3	Nährstoffbedarf.....	75
3.5.4	Besiedlungsdichte .....	76
3.5.5	Urbanisierungsgrad .....	78
3.5.6	Ergebnisse der Identifizierung der globalen Hotspots .....	79
4.	Zusammenfassung und Ausblick .....	82
5.	Literaturverzeichnis.....	85
6.	Anhang.....	89
6.1	Technische Daten der Anlagenkomponenten des SANIRESCH Projekts .....	89
6.2	Energieverbrauch der in Haus 1 der GIZ (Eschborn) installierten Braunwasserbehandlungsanlagen .....	90
6.3	Energieverbrauch der in Haus 1 der GIZ (Eschborn) installierten Braunwasserbehandlungsanlagen .....	91
6.4	Preislist der MCB 4x4 von HUBER .....	92
6.5	Technische Daten des Feststoffabscheiders Ro9-E.....	93
6.6	Daten Tabelle der vorläufigen Kostenabschätzung .....	94
6.7	Gewichtung der chinesischen Experten .....	95
6.8	Komplett Version der NWA zur Identifizierung von globalen Hotspots .....	96

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der einwohnerspezifischen Frachten in den verschiedenen Teilström $[g/(E \cdot d)]$ [12].....	8
Abbildung 2: MAP-Fällungsreaktor ohne Strippung [14].....	9
Abbildung 3: MAP-Fällung und Stickstoffrückgewinnung durch Strippung kombiniert mit Gaswäsche [14] .....	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Tropfkörpers [16] .....	14
Abbildung 5: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Tauchkörpers [16] ....	15
Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Belüfteten Festbettes [16].....	16
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Schwebebett [16].....	17
Abbildung 8: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Belebung [16].....	18
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer diskontinuierlichen Belebung [16].....	19
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Belebung mit Membranfiltration(Heinrich & Heinrich, 2008).....	20
Abbildung 11: Konzentration an Schmutzstoff verschiedener Verfahren [16].....	21
Abbildung 12: Konzentration an Nährstoffen in Ablauf verschiedener Verfahren [16]....	21
Abbildung 13 Ablaufplan der SANIRESCH Projekt [19].....	24
Abbildung 14 Strukturzeichnung Haus 1 der GIZ [21] .....	25
Abbildung 15 Fließschema der Braunwasserbehandlungsanlage [22] .....	26
Abbildung 16 Aufbau Brauwasservorreinigung [22] .....	27
Abbildung 17: Schematischer Aufbau des eingesetzten Filtrationmoduls MCB1 [22].....	28
Abbildung 18: Klassifizierung des Mehrdimensionalen Bewertungsverfahrens. (Vgl. [24]) .....	31
Abbildung 19 AHP-Skala für Paarvergleichsurteile [28].....	33
Abbildung 20 Vorgehensweise der Nutzwertanalyse (Vgl. [26]) .....	36
Abbildung 21 Frischwassereinsparung durch Anwendung des MBRs (Yue. W).....	52
Abbildung 22 Betriebsparameter der Brauwasser-MBR [23] .....	54
Abbildung 23 Fiktive Wirtschaftlichkeitsberechnung der Brauwasserbehandlung durch MBR in Haus 1 der GIZ; (berechnet von Yue. W).....	61
Abbildung 24 Anlagenschema der Kläranlage Hohtälli (Schlussbericht-hohtälli).....	66
Abbildung 25 Ergebnis der Nutzwertanalyse (von Yue. W) .....	68

---

Abbildung 26 Gebiete von Physikalische und Ökonomische Wasserknappheit [35] .....	71
Abbildung 27: Frischwasserqualität der Welt [40].....	74
Abbildung 28 Physiologische Bevölkerungsdichte der Welt [54] .....	76
Abbildung 29 Agglomeration der Welt 2009 (Urbanisierungsgrad der Welt: 50.1%); [54] .....	78
Abbildung 30: Regionale Verteilung der Kandidatenländern (präsentiert von Yue. W) ....	81

---

## Tabellerverzeichnis

Tabelle 1: Teilströme des häuslichen Abwassers [5].....	6
Tabelle 2: Frachten unterschiedlicher Stoffe in den Einzelstoffströmen des häuslichen Schmutzwassers. [5] .....	7
Tabelle 3: Bakteriologische Belastung der Stoffströme häusliches Schmutzwasser. [5]....	8
Tabelle 4: Wesentliche Vor- und Nachteile des Sanitärsystems mit Brauwassertrennung mittels Trenn- Trockentoilette und nachgeschalteter Kompostierung [5] .....	10
Tabelle 5: SENATSWERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG BERLIN, 2007: „Innovative Wasserkonzepte - Betriebswassernutzung in Gebäuden.“ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Fachbereich Ökologischer Städtebau, Berlin 2007, S.23.....	12
Tabelle 6: Qualitätsanforderungen für die Toilettenspülung im Ländervergleich. WEITERBILDENDES STUDIUM WASSER UND UMWELT, 2009: „Neuartige Sanitärssysteme - Begriffe, Stoffströme, Behandlung von Schwarz-, Braun-, Gelb-, Grau- und Regenwasser, Stoffliche Nutzung.“ Lehrmaterial der Bauhaus-Universität mit freundlicher Genehmigung der DWA, Februar 2009, S.134 .....	12
Tabelle 7: Unterscheidung verschiedener Verfahren zur Brauwasserbehandlung nach Merkmalen (eigene Erarbeitung nach [16]) .....	22
Tabelle 8: Gesamtübersicht über die Sanitärtechnik in Haus 1 der GIZ [20] .....	25
Tabelle 9: Betriebsparameter der MBR Anlage in Haus 1 der GIZ [23].....	30
Tabelle 10: Anforderungen an multikriterielle Entscheidungsverfahren für eine nachhaltige Entwicklung [25] .....	32
Tabelle 11: Bewertung der Nutzwertanalyse [25].....	35
Tabelle 12 Bewertung der AHP [25].....	35
Tabelle 13: Kriterien zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit (von Yue Wu) ..	40
Tabelle 14: Verbindliche Voraussetzungen (von Yue .W) .....	45
Tabelle 15: Matrix der Nutzwertanalyse (Yue. W).....	47
Tabelle 16: Kriterien zur Identifizierung der globalen Hotspots (von Yue. W) .....	49
Tabelle 17: Matrix der NWA zur Identifizierung der globalen Hotspots (von Yue. W) ....	51
Tabelle 18: Bewertungsskala für das Interview (von Yue W).....	48
Tabelle 19: Analyseergebnisse der Reinigungsleistung [23].....	55
Tabelle 20 Vergleich der Permatqualität in Eschborn mit gesetzlichen Anforderungen an Betriebswasser [23].....	56
Tabelle 21: Berechnung der Brauwassermenge nach Messwert [23].....	57

---

Tabelle 22: Berechnung der Braunwassermenge nach Anzahl des Mitarbeiters (von Yue. W).....	58
Tabelle 23: Berechnung des Stromverbrauchs (von Yue, W) .....	59
Tabelle 24: Überblick der einzelnen Kosten (von Yue Wu) .....	60
Tabelle 25 Ergebnis der Gewichtung von chinesischen Experten (von Yue. W).....	70
Tabelle 26: Ergebniss der Intenationalen Übertragbarkeit (von Yue. W) .....	64
Tabelle 27: Frischwasserqualität gemäß WQI Wert in 34 Kandidatenländer [41] .....	74
Tabelle 28: Nährstoffbedarf der Welt in nächsten 4 Jahr [37] .....	75

---

## Abkürzungsverzeichnis

AHP	Analytical hierarchy process
bar	Einheit für den Druck 1 bar = 10 <sup>5</sup> [N/m <sup>2</sup> ]
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BSB	Biochemischer Sauerstoffbedarf [mg/l]
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf [mg/l]
DIN	Deutsches Institut für Normung
EW	Einwohnerwert
EPI	Environmental performance index
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH
h	Stunde
k.A.	Keine Angabe
MBR	Membranbioreaktor
NASS	Neuartige Sanitärsysteme
N <sub>ges</sub>	Gesamtstickstoff
NWA	Nutzwertanalyse
oTS	organische Trockensubstanz
RWTH	Aachen Rheinisch-Westfaelische Technische Hochschule Aachen
SANIRESCH	Sanitär Recycling Eschborn (Forschungsprojekt)
SBR	Sequencing batch reactor
THM	Technische Hochschule Mittelhessen
TS	Trockensubstanz
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WQI	Water quality index

---

# 1. Einleitung

Das weltweit bestehende Problem mit der Ressource Wasser, das nicht überall in ausreichendem Maße und/oder in zufrieden stellender Qualität zur Verfügung steht, stellt eine Herausforderung für die nächsten Jahrzehnte dar. Die in industrialisierten Ländern angewendeten Trink- und Abwasserkonzepte können dieses Problem nicht allein lösen. Es müssen demnach neue und nachhaltige Konzepte für die Abwasser- und Trinkwasserversorgung entwickelt werden [1].

Im Jahr 2050 werden 70 % der Welt Bevölkerung in urbanen Regionen der Schwellen- und Entwicklungsländer leben [2]. In diesen Regionen sind jedoch nicht ausreichend Sanitärsysteme vorhanden. Auch wenn in einigen der genannten Regionen Sanitärsysteme implementiert wurden, bestehen große Probleme in Bezug auf einen nachhaltigen und effektiven Betrieb. Außerdem steht es außer Frage, dass konventionelle Abwassersysteme zu viel Energie verbrauchen und gleichzeitig zu wenig der im Abwasser beinhalteten Ressourcen zurückgewinnen. Aus diesen Gründen stellt die Implementierung eines innovativen Abwassersystems eine Alternative des konventionellen Abwassersystems in Schwellen- und Entwicklungsländer durchgeführt [3].

NASS („Neuartige Sanitärsysteme“), die auf der getrennten Erfassung und Behandlung der Abwasserteilströme beruht, strebt die Rückgewinnung von denen im Abwasser beinhalteten Ressourcen wie z.B. Nährstoffen und Energie an [4]. Seit den 90er Jahren des 20. Jh. werden in Bezug auf NASS verschiedenste wissenschaftliche Studien/Projekten zur Entwicklung von teilstromorientierten dezentralen Sanitärkonzepten und zum Einsatz von Technologien zur Behandlung der einzelnen Stoffströme und Systemimplementierung durchgeführt [5].

Bei der Teilstrombehandlung des Abwassers handelt sich um die separate Ableitung und Behandlung des Grau-, Gelb- und Braunwassers. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die Behandlung des Braunwassers betrachtet. Unter Braunwasser versteht man das Teil des häuslichen Abwassers, der nur Fäzes, Spülwasser und Toilettenpapier enthält [6]. Es entsteht nur durch Separationstoiletten, die Urin und Fäzes trennen, (wie z.B. No-Mix Toiletten von Rödiger Vakuum GmbH) und ermöglicht nach der Behandlung die Wiederwertung sowohl des Wassers als auch der wertvollen Inhaltstoffe der menschlichen Exkremente zur landwirtschaftlichen Nutzung verwertet werden.

Als eine Pilot Forschung und Paradigmenwechsel, wird das Projekt „SANIRESCH“ für den Zeitraum von Juli 2009 bis Juni 2012 von Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und finanziert. Die Projektpartner sind die Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Technische Hochschule Mittelhessen (TMH), Huber SE, Rödiger Vakuum GmbH, die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen und die Universität Bonn. Ziel des Projektes ist die Umsetzung der Behandlung und Verwertung von Urin, Braunwasser und Grauwasser gesammelt im Hauptgebäude der GIZ in Eschborn, Frankfurt. Die GIZ hat bereits in ihrem Hauptgebäude (Haus 1) ein System zur getrennten Erfassung von Urin und Braunwasser eingebaut. Im Bezug auf die Sammlung der Abwässer, setzt sich das System aus Separationstoiletten, wasserlosen Urinalen, separaten Leitungssystemen für Urin, Braunwasser und Grauwasser

---

sowie einem Tank zur Urinspeicherung zusammen. Zur Behandlung der anfallenden Abwasserströme (Grau- Braun- und Gelbwasser) werden neue Technologien (Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)-Fällung, Membranbioreaktoren (MBR)) eingesetzt und bewertet. Seit 27.06.2011 ist die Braunwasserbehandlung mittels Membranbelebungsverfahren in Betrieb. Täglich werden ca. 15m<sup>3</sup> Braunwasser aus 34 No-mix Toiletten gesammelt und 2000 l davon behandelt.

Das Ziel des SANIRESCH Projektes ist die Durchführung Paradigmenwechsels in der Siedlungswasserwirtschaft in Schwellen- und Entwicklungsländern. Neben der in Eschborn installierten Technologie gibt es noch andere Lösungen für Braunwasserbehandlung (z.B. SBR Verfahren oder Schwebebett Verfahren). Um die möglichen Risiken bei der Implementierung der einzusetzenden Technologien in andere Regionen oder Länder zu verringern, ist eine Charakterisierung der Standort und Ermittlung der lokalen Rahmenbedingungen im Sinne einer Übertragbarkeitsuntersuchung von großer Wichtigkeit.

---

## 1.1 Fragstellung und Zielsetzung

Im Rahmen des SANIRESCH Projektes und dieser Arbeit lassen sich folgende Fragen stellen:

- Warum und wozu braucht man Braunwasserbehandlung?
- Ist MBR eine fortschrittliche Technologie zur Braunwasserbehandlung? Woran liegen seine Vor- und Nachteile?
- Ist das System ökonomisch nachhaltig?
- Welche Komponenten muss man in Bezug auf die internationale Übertragbarkeit betrachten und wie evaluiert man Sie?
- Welchen Kriterien spielen wichtige Rollen bei der Implementierung der Braunwasserbehandlung durch MBR in Schwellen- und Entwicklungsländern?
- Welche Regionen haben das größte Einsatzpotential weltweit?

Ziel dieser Arbeit ist es, die eingesetzte Technik zu analysieren, die Wirtschaftlichkeit der in Haus 1 der GIZ installierten Braunwasserbehandlung zu ermitteln und die konkreten Parameter und Rahmenbedingungen für die Implementierung in Schwellen- und Entwicklungsländern unter der Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Ressourceneffizienz herauszuarbeiten. Vorüberlegungen haben ergeben, dass nur bestimmte Regionen für eine mit dem SANIRESCH System vergleichbare Braunwasserbehandlung in Frage kommen:

- Peripher gelegene Regionen, wo kein Anschluss an ein zentrales Abwasserbehandlungssystem sowohl technisch als auch ökonomisch ungünstig ist.
- Urbane, dicht besiedelte Räume mit hohen Grundstückspreisen, bzw. schnell wachsende Städte in Schwellen- und Entwicklungsländern.
- Länder/Regionen mit Wasserknappheit
- Regionen mit Nährstoffknappheit.

---

## 2. Material und Methoden

### 2.1 Literaturübersicht

#### 2.1.1 Innovative Wasserkonzepte

##### **Historischer Irrtum bei der Entwicklung von Siedlungswasserschafft?**

Das konventionelle Sanitärsystem ist eine End-of-the-Pipe-Technologie. Es stellt mit dem einheitlichen Schwemmkanal ein vom Grundansatz ungünstig entwickeltes System dar, das in Industrieländern half durch einen hohen technischen Aufwand akute Probleme zu lösen. In der Vergangenheit wurden dadurch die drängenden hygienischen Probleme in der Stadt gelöst, gleichzeitig wurden aber die für die Trinkwasserversorgung genutzten Gewässer verschmutzt. Vorher begrenzt auftretende Epidemien konnten sich über die Trinkwasserversorgung rasend schnell ausbreiten. In der technisch entwickelten Welt hat man dieses Problem gelöst, ohne das Gesamtkonzept jemals ernsthaft auf Alternativen zu überprüfen. Der historische Irrtum der Vermischung von Fäkalien mit großen Wassermengen wird auch heute nicht offen als solcher benannt. Zugleich wird in weiten Teilen der Welt dieser Fehler wiederholt [7].

Wenn man das heutige Abwassersystem betrachtet. Es ist zu erkennen, dass es zwei Hauptprobleme gibt :

##### **a) Schwemmkanal und Spültoilette tragen zur weiteren Wasserverknappung bei**

Das Abwassersystem mit Spültoilette und Schwemmkanal ist auf einen hohen Wasserdurchsatz angewiesen. In vielen Teilen der Welt stehen diese Wassermengen physisch nicht zur Verfügung oder die Kosten für den Betrieb eines solchen Systems können von den Benutzern aufgrund der Preise für Trinkwasser nicht aufgebracht werden. Deshalb trägt der Bau solcher auf relativ hohen Durchfluss ausgelegter System zur Verknappung der Wasserressourcen bei und führt bei einer Verschärfung der Knappheit zu unhaltbar hygienischen Zuständen [7].

##### **b) Konventionelle Abwassersysteme sind ungünstig für die Rückgewinnung von Nährstoff aus Abwasser**

Die im Abwasser enthaltenen Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor oder Kalium können bei Nutzung von konventionellen Abwassersystemen nur schwierig zurück gewonnen werden, da durch in die oben genannten, großen Wassermengen eine starke Verdünnung stattfindet. Nur ein geringer Teil dieser Wertstoffe wird im Klärschlamm bleiben und kann nutzbar gemacht werden. Nach neueren Untersuchungen ist der mit Fe- und Al-Salzen durch Fällung im Klärschlamm vorhandene Phosphor lediglich zu etwa 20% pflanzenverfügbar [8], weshalb eine landwirtschaftliche Verwertung der Nährstoff nur teilweise möglich. Außerdem scheitern oftmals die alternativ vorgeschlagenen Rückgewinnungstechniken der Nährstoffe aus Klärschlamm an der Unwirtschaftlichkeit der großen Volumen.

##### **Teilstromkonzept**

Aufgrund dieser problematischen Zukunft des konventionellen Abwassersystems ist ein innovatives Sanitärkonzept notwendig, dass Nutzung von Wasser und Nährstoff im Kreislauf

---

ermöglicht. Das Ziel der Entwicklung von innovativen Sanitärsystemen ist zum einen die Vermeidung von Abwasser und hat ein derartiges Sanitärsystem die Wiederverwendung des Wassers zum Ziel. Deshalb sollte in urbanen, dicht besiedelten und unter Wasserknappheit leidenden Räumen Abwasser wie eine Ressource behandelt werden. Aufgrund der Vermischung von Fäkalien, Urin und dem restlichen Haushaltsabwasser in konventionellen Sanitärsystemen ist dies aus hygienischen und technologischen Gründen jedoch nicht möglich. Einerseits ist die Abwassermenge zu groß, andererseits sind die im Fäkalienanteil enthaltenen Keime und Viren hygienisch gefährlich. Eine Trennung der Abwasserströme ist daher ein wesentliches Merkmal eines innovativen Wasserkonzepts. Wegen der relativ kleineren Volumina dieser Teilströme können sie wie in der Industrieabwasserwirtschaft teilweise üblich, mit Techniken wie z.B. Membranbioreaktor aufbereitet werden [7]. Durch die Anwendung des MBR können die Teilströme Grauwasser und Braunwasser nach Aufbereitung als Betriebswasser z.B. als Toilettenspülwasser in wassersparenden Toiletten, oder als Bewässerungswasser verwertet werden. Der Feststoffanteil des Braunwassers und das gesamte Gelbwasser werden gesondert behandelt und können anschließend landwirtschaftlich genutzt werden, wodurch die Schließung von Stoffkreisläufen ermöglicht wird. Ein solches Konzept wäre besonders interessant für wasserarme, dichtbebaute urbane Gebiete, in denen sich sowohl ökologisch, durch Wassereinsparung und Nährstoffrückgewinnung, als auch ökonomisch, durch Kosteneinsparung bei Frisch- und Abwassergebühren Vorteile realisieren ließen.

### **2.1.2 Definition und Charakterisierung der häuslichen Abwasserteilströme**

In Konventionellen Systemen werden die Abwässer aus Haushalten und Gewerbe und Industrie vermischt und zu Kanalisation geführt. Ein deutlicher Unterschied während der Entwicklung des neuartigen Sanitärsystems zum konventionellen System ist die separate Erfassung und Behandlung von Abwasserinhaltsstoffen in den Teilströmen des häuslichen Abwassers bei Überlegung von neuen Systemen und Ressource Recycling [6]. Dadurch ist die Nutzung des Abwassers als Betriebswasser und seiner Inhaltstoffe, wie Kohlenstoff, Phosphor, Stickstoff möglich.

Das häusliche Abwasser lässt sich in unterschiedliche Teilströme aufteilen. Das gesamte Abwasser bezeichnet man als häusliches, oder kommunales Abwasser. Die einzelnen Teilströme sind Grau-, Braun- und Gelbwasser, wobei eine Mischung aus Braun- und Gelbwasser, also Toilettenabwasser, als Schwarzwasser bezeichnet wird. Tabelle 1 gibt dazu einen Überblick.

Tabelle 1: Teilströme des häuslichen Abwassers [5]

	Teilstrom	Definition
<b>Häusliches Abwasser</b>	<b>Grauwasser</b>	Abwasser aus Wasch und Spülmaschine, Dusch und Bad sowie Waschbecken ohne Toilettenabwasser
	<b>Schwarzwasser</b> <sup>1)</sup>	Fäzes-Urin-Wasser-Gemisch (Toilettenabwasser)
	<b>Gelbwasser</b> <sup>2)</sup>	Urin ohne / mit Spülwasser, ohne Fäkalien
	<b>Braunwasser</b> <sup>2)</sup>	Fäzes-Wasser-Gemisch ohne Urin
1) Definition: Grauwasser nach DIN 4045 [9]		
2) Definition: Gelb-, Braun-, Schwarzwasser nach Lange und Otterpohl (2000)		

### **Schwarzwasser**

Schwarzwasser setzt sich aus Gelbwasser (Urin) und Braunwasser zusammen. Die Zusammensetzung von Schwarzwasser schwankt stark abhängig von den Volumina der täglich ausgeschiedenen Exkremente. Das Schwarzwasser beträgt 30 bis 42% des Gesamtaufkommens des häuslichen Abwassers. Diese Teilstrom beinhaltet 70 bis 90% der Nährstoffmenge und ca. 60% der organischen Belastung (als CSB) des häuslichen Abwassers [5].

### **Gelbwasser (Urin)**

Urin besteht zu ca. 95% aus Wasser. Der pH-Wert liegt, abhängig von der Ernährung, zwischen pH= 4,8 und 7,4. Urin enthält normalerweise kein Eiweiß und keinen Zucker. Die wesentlichen Inhaltstoffe sind Harnstoff (20-30 g/d), Harnsäure (0,7 g/d), Ammoniumsalze (0,7 g/d), Phosphate (2,5 g/d), Sulfate (2,5 g/d) und Kochsalz (15 g/d) [10]. Mit dem Urin scheidet der Mensch weiterhin auch chemische Verunreinigungen in Form von endokrinen Substanzen und Medikamentenrückständen und deren Metaboliten aus, die im Krankheitsfall höher konzentriert sein können.

### **Braunwasser (Fäzes)**

Braunwasser enthält nur Fäzes, Spülwasser und Toilettenpapier. Das Ergebnis von Untersuchungen in Schweden [11] hat gezeigt, dass das C/N-Verhältnis von Braunwasser zwischen 5: 1 und 10: 1 liegt. Der Stickstoffanteil in den Fäzes stammt aus der Darmwand, den Verdauungsflüssigkeiten, den Bakterien und den Nahrungsresten. Der größte Teil des Phosphors kommt in der Form von Calciumphosphat vor, ein kleiner Teils auch als gelöste Phosphationen. Fäzes bestehen aus ca.65 % Wasser, 10 – 20 % organischen Substanzen, 5 – 10 % Stickstoff und löslichen Substanzen. Der Trockensubstanzgehalt beträgt ca. 25 %, davon sind rund 90 % organisch. Ca. ein Fünftel der organischen Materie besteht aus Bakterienmasse und ein Drittel aus ausgeschiedenen Darm- und Blutzellen.

Aufgrund der starken Durchsetzung mit Viren, Parasiten und Bakterien können Braunwasser ohne weitere Behandlungen nicht wiederverwertet werden.

## Belastung des häuslichen Abwassers

Tabelle 2 stellt die Ergebnisse der Untersuchung von der einwohnerspezifischen Belastung rein häuslichen Schmutzwassers und deren Teilströme dar.

Tabelle 2: Frachten unterschiedlicher Stoffe in den Einzelstoffströmen des häuslichen Schmutzwassers.

[5]

Parameter	Einheit	Urin (ohne Spül- wasser)	Fäzes (ohne Spül- wasser)	Schwarz- Wasser	Grau- wasser	häusliches Schmutz- wasser	ATV A 131
Menge	L/(E*d)	1-1.8	0.1-0.4	35	70-80	105-115	150
Menge	m <sup>3</sup> /(E*a)	0.3-0.7	0.03-0.14	12.8	25,5-29,2	38-42	-
TR	g/(E*d)	50-70	30-60	80-130	-	80-130	70
oTR	g/(E*d)	33-60	26-58	59-118	-	59-118	
CSB	g/(E*d)	5.4-24	38-64	44-64	33,7	78-89	120
CSB <sub>mittel</sub>	g/(E*d)	9.35	34.3	-	-	-	-
BSB <sub>5</sub>	g/(E*d)	1.8-9.8	19	21-29	16,7	38-46	60
C	g/(E*d)	7.5	73	80.5	15,1	95.6	
N	g/(E*d)	7.5-15	1.5-7.1	9-19	0,8	9.8-20	-
N <sub>mittel</sub>	g/(E*d)	10.5	2.8	10.4	-	-	11
P	g/(E*d)	0.5-1.9	0.4-2.8	0.9-3.3	0,2	1.1-3.5	-
P <sub>mittel</sub>	g/(E*d)	0.93	1	1.4	-	-	1.8
K	g/(E*d)	1.4-3.5	0.3-1.5	0.9-4.1	3	4.7-7.1	
K <sub>mittel</sub>	g/(E*d)	2.6	0.9	2.1	-	-	

In Abbildung 1 findet sich zusammenfassend eine grafische Zusammenfassung der in Tabelle 2 dargestellten Werte. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Nährstoffanteil im Urin mit 81 % des Stickstoffs und 50 % des Phosphors besonders hoch ist. Im Bezug auf Fäzes (ohne Spülwasser, bzw. nur Kot) wird deutlich, dass es mit 60% eine deutlich höhere CSB Belastung als Urin mit 10% besitzt.

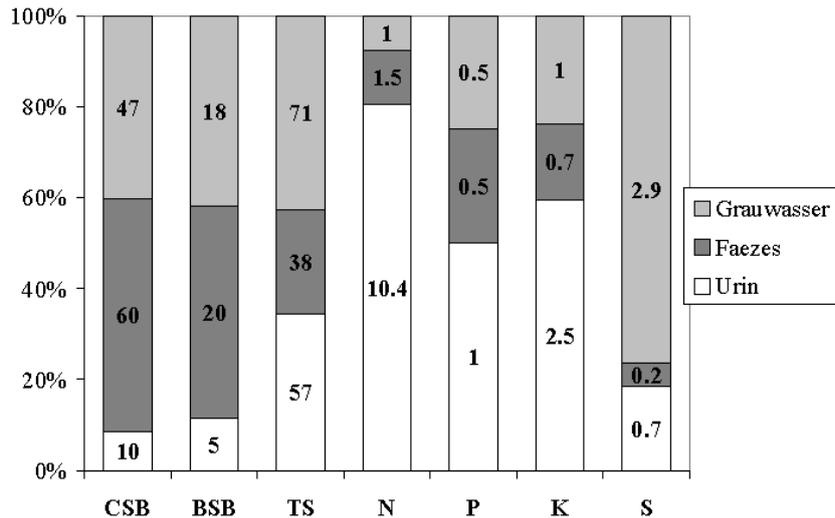


Abbildung 1: Verteilung der einwohnerspezifischen Frachten in den verschiedenen Teilström [g/(E\*d)] [12]

In Tabelle 3 werden die Ergebnisse der bakteriellen Belastungen der einzelnen Teilströme gezeigt. Als Indikatoren wurden Anzahlen der Gesamtcoliforme, Clostridium perfringens und Fäkalcoliforme pro Milliliter ausgewählt. Aufgrund des hohen Anteils an organischer Substanz, kann im Fäzes (nur Kot) eine höhere bakterielle Belastung festgestellt werden. Der hygienische Zustand des Abwassers spielt bei Aufbereitung von den Stoffströmen und deren anschließender Nutzung eine wichtige Rolle.

Tabelle 3: Bakteriologische Belastung der Stoffströme häusliches Schmutzwasser. [5]

Bakterien	Einheit	Stoffstrom			
		häusliches Schmutzwasser	Schwarzwasser	Fäzes	Urin
Ges.-Coliforme	1/mL	$10^4 - 10^7$	k.A.	k.A.	k.A.
Clostridium perfringens	1/mL	k.A.	k.A.	$4 \cdot 10^2 - 5.8 \cdot 10^6$	$10^1 - 2.3 \cdot 10^3$
Fäkalcoliforme (E. coli)	1/mL	$10^4 - 10^7$	k.A.	$8.5 \cdot 10^4 - 5.8 \cdot 10^8$	$10^1 - 10^5$
k.A. = keine Angaben					

### 2.1.3 Aspekte der Verwertung der Stoffströme Gelb- und Braunwasser

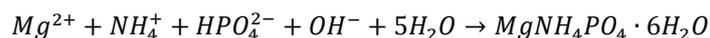
#### Gelbwasser

Wie oben erwähnt, hat Gelbwasser einen hohen Gehalt von Stickstoff, Phosphor und Kalium. Um seine Nährstoffe zu nutzen ist jedoch eine Aufbereitung erforderlich. Eine direkte landwirtschaftliche Nutzung von Urin findet bereits seit langer Zeit statt. Jedoch haben sich wesentliche Nachteile gegenüber synthetischem Dünger, wie zum Beispiel der vergleichsweise

geringer Nährstoffgehalt und die Belastung mit Medikamentenrückständen, Keimen und Bakterien. Der hohe Salzgehalt erschwert weiterhin die Verwertung. Nach Oldenburg et al. [12] werden außerdem von landwirtschaftlicher Seite Feststoffdünger gegenüber Flüssigdünger bevorzugt. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen haben sich in den letzten Jahren einige großtechnische Verfahren, wie beispielweise MAP-Fällung und Stripping zur Urin- bzw. Gelbwasserbehandlung entwickelt.

### Struvit/MAP-Fällung

Unter Struvit versteht man die kristalline Verbindung Magnesiumammoniumphosphat (MAP). Die MAP-Fällung ist ein Verfahren, um gleichzeitig Stickstoff in Form von Ammonium und Phosphat unter Zugabe eines Magnesium-Fällmittels (Magnesiumoxid oder -Chlorid) chemisch zu fällen. Die Chemische Gleichung ist im Folgenden gezeigt



Typische Anlagen, die für die MAP-Kristallisation verwendet werden, sind Flißbettreaktoren (FBR) oder spezifische Fällungsreaktoren (Abbildung 2). Wesentliche Einflussfaktoren der MAP-Fällung sind der pH-Wert und das Molverhältnis. Der optimale pH-Wert liegt zwischen pH = 9 und pH = 9,5, das Molverhältnis zwischen 1 und 1,5 [13].

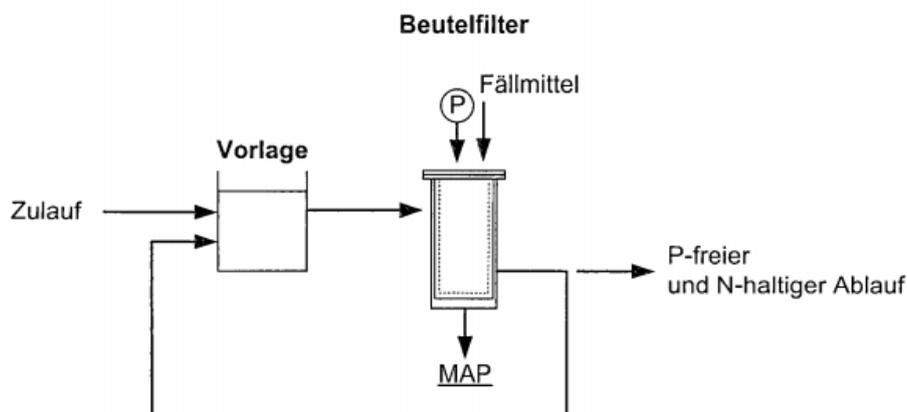


Abbildung 2: MAP-Fällungsreaktor ohne Stripping [14]

### Stripping

Bei dem Verfahren der Stripping muss das Dissoziationsgleichgewicht durch Erhöhung der pH-Werts im Urin zugunsten von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) verschoben werden. Ammoniak kann mittels Luftstripping, bestehend aus einem Strippreaktor und einem Adsorber, zu ca. 95% aus dem Urin zurückgewonnen werden. Dabei werden im Stripper hohe Temperaturen (ca. 40°C) bei niedrigem Druck (ca. 0,4 bar) sowie am Adsorber geringe Temperaturen (ca. 20°C) bei hohem Druck (5 bar) eingestellt. Das Verfahren der Ammoniak-Stripping wurde in zahlreichen großtechnischen Anlage für unterschiedliche Stoffströme umgesetzt. Zur Behandlung von Urin wird, im Verband mit einer MAP-Fällung, eine großtechnische Anlage von der HUBER SE angeboten [5]. Abbildung 3 stellt den Kombinationsverfahren dar.

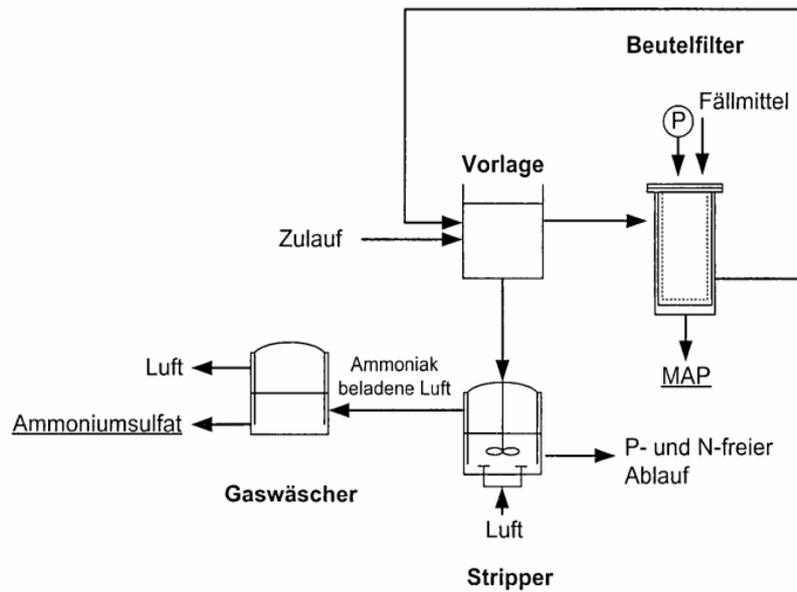


Abbildung 3: MAP-Fällung und Stickstoffrückgewinnung durch Strippung kombiniert mit Gaswäsche [14]

## Braunwasser

Wegen des geringeren Gehaltes von Stickstoff und Phosphor und einem höheren Anteil organischer Substanz ist Braunwasser im Vergleich zu Gelbwasser zur Kompostierung besser geeignet. In Tabelle 4 wird ein Überblick der Vor- und Nachteile der Fäzes Kompostierung gegeben.

Tabelle 4: Wesentliche Vor- und Nachteile des Sanitärsystems mit Braunwassertrennung mittels Trenn-Trockentoilette und nachgeschalteter Kompostierung [5]

Systemkomponenten für Braunwasserkompostierung	Vorteile	Nachteile
Sanitäreinrichtungen mit Urintrennung	Spül-WC hat einen höheren Komfort <sup>1</sup>	Wasserverbrauch beim Spül-WC
Spül-WC	Kein Wasserverbrauch beim Trocken-WC	Substratzugabe beim Trocken-WC
Trocken-WC		

<sup>1</sup> Für den Nutzer stimmt das so nicht. Die Toilette ist prinzipiell gleich zu benutzen. Die Leerung, bzw. das Management der Toilette ist unter Umständen (wenn es nicht von einem Fachmann gemacht wird) Grund für die schlechtere Bewertung vgl. RWTHAachen, Befragungsergebnisse (2011)

<http://www.saniresch.de/images/stories/downloads/RWTH-Befragung-Internetversion-02-2011.pdf>

Behandlung mittels Kompostierung		Das geringe Porosität erfordert Zugabe von Strukturmaterial im Verhältnis 1 : 1 C/N-Verhältnis von 5 – 10 ungünstig, Zugabe von Grünschnitt oder Sägemehl im Verhältnis Fäzes : Strukturmaterial 1 : 2 (C/N = 21 - 27)
Interne Kompostierung	Dezentrale hausgebundene Anlage Direkte Zuordnung (Verursacherprinzip)	Erhebliche Anzahl fäkaler keime (unzureichende Hygienisierung, da Temperatur nicht über 50°C) <sup>2</sup> Zu niedrige Kompostierungstemperatur (= Raumtemperatur) Zu hoher Wassergehalt Erforderliche Nachkompostierung führt zu zusätzlichen Kosten a) Biologisch mit biogenen Abfällen b) Chemisch mit Asche/Kalk c) Thermisch (Verbrennung)
Externe Kompostierung	Durch Vermischung der Fäkalien mit anderen biologischen Abfällen optimale Nährstoffzusammensetzung Ausreichende Hygienisierung	Aufändige Technik, für die eine Mindestanzahl an angeschlossenen Haushalten/Einwohnern erforderlich ist.

Während der Kompostierung der Fäzes wird das übrige Wasser nach Behandlung in einem MBR als Betriebswasser verwertet oder kann ebenso in ein Gewässer abgeleitet werden. Der Verwendungsbereich des Betriebswassers ist je nach gesetzlichen Anforderungen der lokalen Regierung unterschiedlich.

#### 2.1.4 Gesetzliche Anforderungen an Betriebswasser

Das zu verwendendes Betriebswasser muss prinzipiell bestimmte Anforderungen in hygienischer gewachsen sein. Die Qualitätsanforderungen sind je nach dem Gebrauch

<sup>2</sup> Kommt auf das Verfahren an. Es gibt auch Kompostierungsverfahren wo 70°C erreicht werden. Vgl. Niwagaba, C.B. (2009) S. 23 ff.

[http://www.susana.org/docs\\_ccbk/susana\\_download/2-703-niwagabac091123.pdf](http://www.susana.org/docs_ccbk/susana_download/2-703-niwagabac091123.pdf)

spezifisch. Aufgrund des Fokus dieser Arbeit auf urbane Räume werden nur die Anforderungen an eine Nutzung in Gebäuden für Toilettenspülung betrachtet.

In Deutschland gibt es derzeit noch keine einheitlichen gesetzlichen Regelungen. Die Mindestanforderungen müssen nach §57 Wasserhaushaltsgesetz einhalten werden. Die Berliner Senatsverwaltung für Bau- und Wohnungswesen hat im Jahr 1995 ein **Merkblatt „Betriebswassernutzung in Gebäuden“** herausgegeben, in dem Qualitätsziele definiert wurden. Dieses Merkblatt stellt jedoch nur einen Vorschlag dar und ist nicht rechtlich bindend.

Tabelle 5: SENATSVERWALTUNG FÜR STADTENTWICKLUNG BERLIN, 2007: „Innovative Wasserkonzepte - Betriebswassernutzung in Gebäuden.“ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung Fachbereich Ökologischer Städtebau, Berlin 2007, S.23

Qualitätsziele	Beurteilungskriterium	Werte
Hygienisch, mikrobiologisch einwandfrei <sup>1)</sup>	Ges.-Coliforme	0/0,001 ml (< 100/ml)
	Clostridium perfringens	0/0.1 ml (< 1/ml)
	Fäkalcoliforme (E. coli)	0/0.1 ml (< 10/ml)
niedriger BSB <sup>2)</sup>	BSB <sub>7</sub>	< 5 mg/l
Nahezu schwebstofffrei, nahezu geruchlos, farblos und klar	UV-Desinfektion mit mindestens 250-400 J/m <sup>2</sup>	>60% (damit Armaturen einwandfrei funktionieren und kein Komfortverlust für die Nutzer eintritt)
Möglichst sauerstoffreich	Sättigung	>50% (damit Betriebswasser langerfähig ist)

1) Bei der Grauwasseraufbereitung - insbesondere wenn mehr als eine Wohneinheit angeschlossen ist und bei der Nutzung von Ablaufwasser von befestigten Verkehrswegen sollte eine UV-Desinfektion mit einer Minstdosis von 250-400 J/m<sup>2</sup> erfolgen.

2) Der BSB<sub>7</sub> (biochemischer Sauerstoffbedarf gemessen über einen Zeitraum von 7 Tagen) ist ein geeigneter Wirkungsparameter, der Auskunft über die Menge der vorhandenen biologisch abbaubaren Verschmutzung des Wassers gibt. Aus messtechnischen Gründen kann gegebenenfalls auch der gesamte organisch gebundene Kohlenstoff (TOC) oder der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) als geeigneter Parameter herangezogen werden.

In anderen Ländern sind die Qualitätsvorgaben auch vergleichsweise unterschiedlich. In den USA, Kanada und Australien wird gereinigtes Braun- und Grauwasser unter die Kategorie „unrestricted urban reuse“, eingeordnet, darunter versteht man die allgemeine zentrale Nutzung von aufbereiteten kommunalen Abwasser um die öffentlichen Grünanlagen zu bewässern und Verkehrsflächen zu reinigen. Tabelle gibt einen Überblick über nationale Richtlinien bezüglich der Nutzung von Braunwasser.

Tabelle 6: Qualitätsanforderungen für die Toilettenspülung im Ländervergleich. WEITERBILDENDES STUDIUM WASSER UND UMWELT, 2009: „Neuartige Sanitärsysteme - Begriffe, Stoffströme,

Kriterien	Deutschland :	Japan :	USA:	Kanada BC :	Australia :	China:
C <sub>BSB</sub>	< 5 mg/l	-	< 10 mg/l	≤ 10 mg/l	≤ 20 mg/l	≤ 10 mg/l
X <sub>TS</sub>	Nahezu schwebstofffrei			≤ 5 mg/l	≤ 30 mg/l	≤ 15 mg/l
Sauerstoff-sättigung	> 50%	-	-	-	-	≥ 1 mg/l
Ges.-Coliforme	< 100/ml	≤ 10 /ml				≤ 3/l
Fäkal-coliforme	< 10/ml					
E. coli	-	-	-	-	10/100 ml	-
Clostridium perfringens	< 1/ml	-	-	-	-	-
UV-Transmission bei 254 nm	>60%	-	-	-	-	-
Chlor	-	-	> 1 mg/l	-	0,5-2,0 mg/l	Nacheine Kontaktzeit 30 min. ≥ 1 mg/l am Ende des Rohrnetzes ≥ 0,2 mg/l
Trübung	-	-	≤ 2 NTU	≤ 2 NTU	≤ 2 NTU	≤ 10 NTU
Geruch	Normal	Normal	Normal	-	Normal	Keine unangenehmen Gerüche
pH-Wert	-	5,8-8,6	6-9	6-9	-	6,5-9
S <sub>NH4-N</sub>						≤ 10 mg/l
Anionische Tenside						≤ 1 mg/l
Färbung						≤ 30 Grad
Fe						≤ 0,3 mg/l
Mn						≤ 0,1 mg/l
Salzgehalt						≤ 1,0 mg/l

## 2.1.5 Darstellung der verschiedenen Verfahren zur Braunwasserbehandlung

Für die dezentrale Behandlung von Braunwasser stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Ihre Verwendung ist abhängig von örtlichen Bedingungen (Platzangebot, Energieversorgung, Anschlussgröße, etc.). Es besteht die Möglichkeit, sowohl aerobe als auch anaerobe Verfahren zu nutzen. Allen Verfahren basieren auf einer Phasenseparation der Feststoff (Fäzes und Toilettenpapier) und der flüssigen Phase (Spülwasser).

### Tropfkörper

Bei dem Tropfkörperverfahren wird das mechanisch vorbehandelte Braunwasser über einem Tropfkörper verrieselt. Ein Tropfkörper besteht wiederum aus einer Vielzahl von Füllkörpern wie beispielweise kleinen Kunststoff- oder Keramikelementen, die zur Vergrößerung der Wirkungsfläche genutzt werden (Abbildung 4). Der sich auf den Füllkörpern gebildeter Biofilm nimmt mit dem Abwasser herangeführte Nährstoffe auf und baut sie unter Sauerstoffverwendung (aerob) mikrobiell ab. Der zusätzlich entstehende Biofilm wird durch das durchrieselnde Abwasser abgeschwemmt und im Nachklärbecken abgetrennt. (Vgl. [15] [16]).

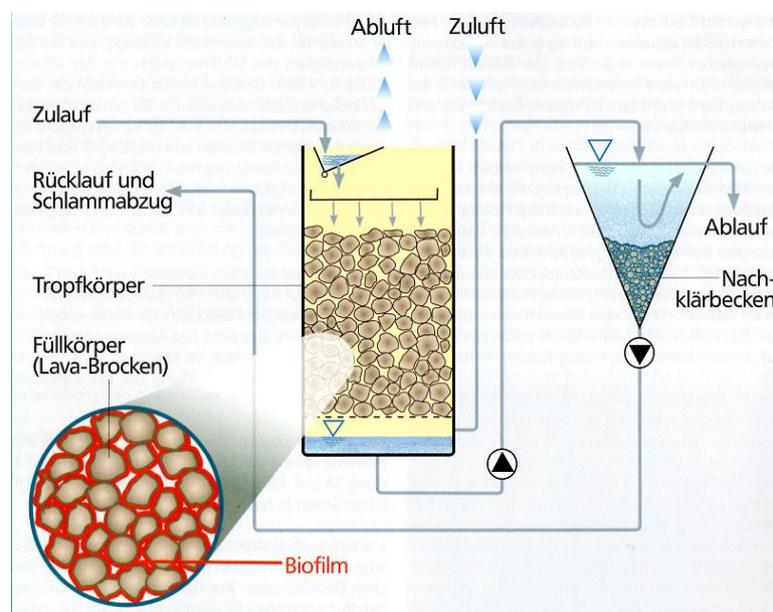


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Tropfkörpers  
Tropfkörpers [16]

## Rotations-Tauchkörper

Bei diesem Verfahren wird das mechanisch vorbehandelte Braunwasser in einen Trog mit etwa halbkreisförmigem Querschnitt geleitet, in den eine oder mehrere hineinpassende Walzen zur Hälfte eintauchen und ständig um die einzige horizontale Symmetrieachse rotieren (Abbildung 5). Eine solche Walze besteht aus auf einer Welle konzentrisch mit geringem Abstand angeordneten kreisrunden Scheiben, aus einem mit leichten Füllkörpern gefüllten Käfig-Zylinder oder einer festen Gitterstruktur. Die große, zerklüftete Oberfläche des Rotationskörpers dient als Besiedelungsfläche für den Biofilm. Die Mikroorganismen aus Abwasser sowohl frei bewegliche Mikroorganismen aus Luft nehmen die Schmutzstoffe des Braunwassers auf und bauen sie anschließend ab. Der zusätzlich entstehende Biofilm wird ebenso durch das durchrieselnde Abwasser abgeschwemmt und im Nachklärbecken abgetrennt. (Vgl. [15] [16])

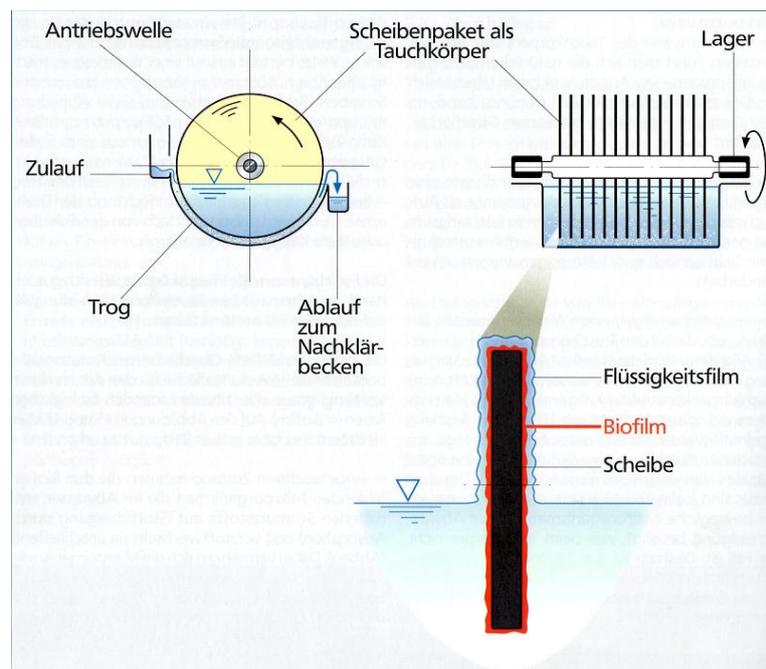


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Tauchkörpers [16]

## Belüftetes Festbett

Bei diesem Verfahren wird das vorgeklärte Braunwasser in wassergefüllte Becken mit eingetauchten festgelegten Festbettblocks geleitet (Abbildung 6). Das Festbett besteht aus einem kompakten Block mit bestimmter, unveränderlicher Geometrie, welcher aus dauerhaft zusammengefügte Einzelemente gebildet wird. Unterhalb eines jeden Festbettblocks sind die Belüfter angeordnet. Dadurch entsteht eine Strömung im Becken, die das Braunwasser im Behälter durchmischt und es stetig durch den von Biofilm bedeckten Elementen des Festbetts strömen lässt. Dort werden die Nährstoffe im Abwasser, ebenso wie in den oben genannten Beispielen, durch die im Biofilm befindlichen Mikroorganismen verstoffwechselt. (Vgl. [15] [16])

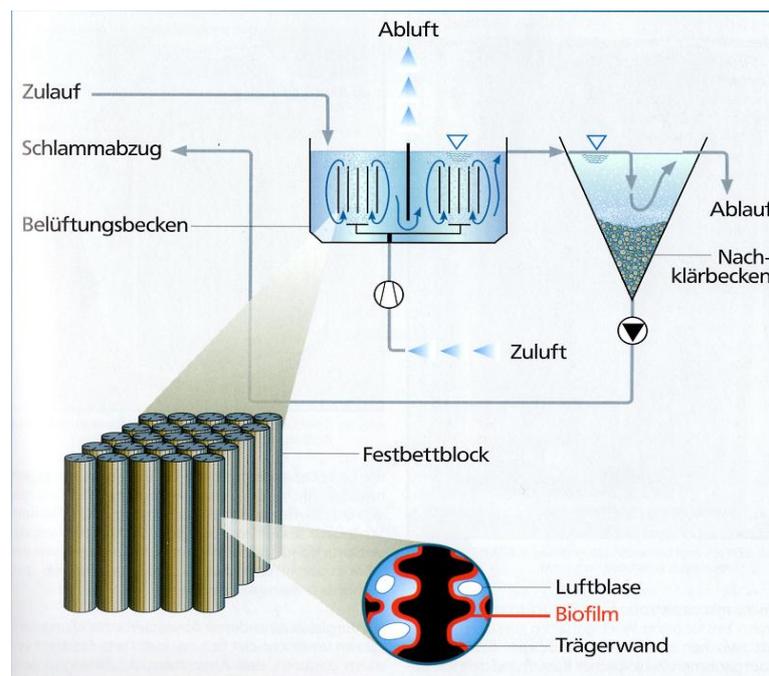


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Belüfteten Festbettes [16]

## Schwebebett

Bei der Schwebebett- oder auch Wirbel-Schwebebett-Biofilm-Technologie wird das vorbehandelte Braunwasser in ein Becken geleitet, wo es durch von unten eingeblasene Druckluft mit Sauerstoff angereichert wird (Abbildung 7). In dem Becken befinden sich zahlreiche kleine, leicht verwirbelbare Kunststoff-Schwebekörper, an denen sich der Biofilm ansiedelt. Das gereinigte Braunwasser fließt mit den darin mitgeführten Schlammpartikeln dann ins Nachklärbecken ab, während die Schwebekörper durch eine besondere Einrichtung (Rückhalteeinrichtung) zurückgehalten und im Belüftungsbecken verbleiben werden. (Vgl. [15] [16])

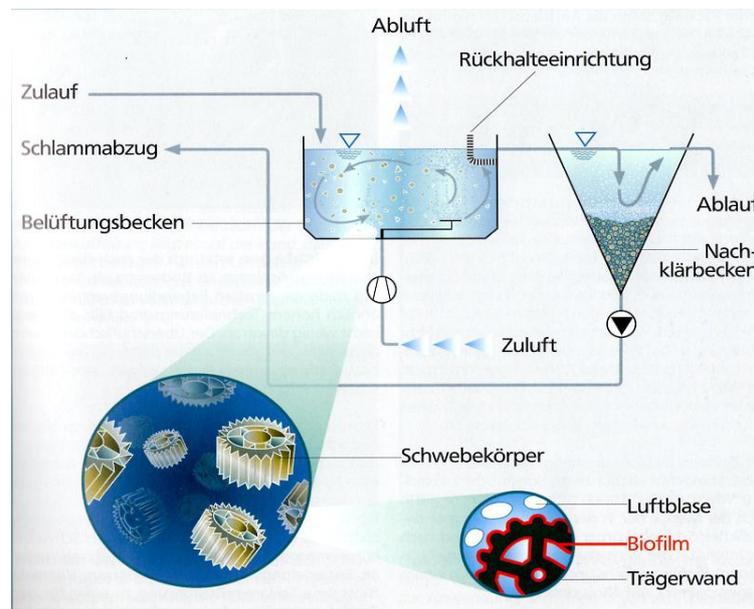


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Schwebebett [16]

## Belebung

Bei diesem Verfahren entsteht die Reinigungsfunktion durch die die Flocken des Belebtschlamm (Abbildung 8). Im Abwasser enthaltene, frei bewegliche Mikroorganismen vermehren sich bei mehrtägiger Belüftung und führen zu einer Zunahme des Schlammanteils. Nach einer gewissen Verweildauer wird der Belebtschlamm mit in ein Nachklärbecken geleitet, wo sich die Belebtschlammflocken durch Sedimentation vom übrigen Abwasser trennen (Abbildung 6). Der große Teil des Belebtschlammes wird als Rücklaufschlamm wieder dem Belebungsbecken zugeführt, um dort eine gewisse Konzentration Biomasse aufrechtzuerhalten. (Vgl. [15] [16])

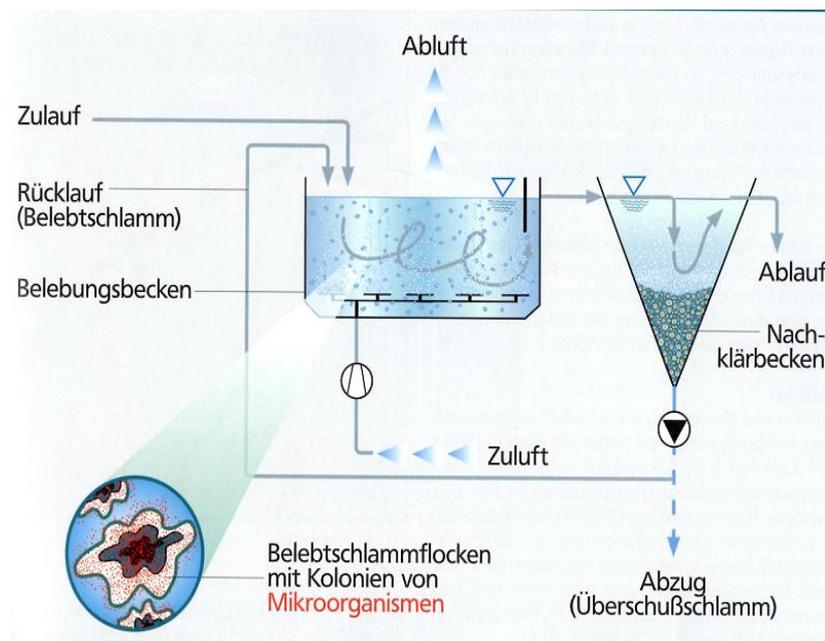


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Belebung [16]

## Diskontinuierliche Belebung (SBR)

Bei diesem Verfahren wird das zu behandelnde Braunwasser dem Belebungsbecken nicht gleichförmig, sondern gesammelt und chargenweise zugeführt. Die Reinigung geschieht durch eine festgelegte zeitliche Abfolge mehrerer Prozessphasen. Sie bilden einen Zyklus von bestimmter zeitlicher Dauer, der sich mit der jeweils zur Behandlung anstehenden neuen Abwassermenge ständig wiederholt (Abbildung 9). Charakteristisch ist, dass der biologische Abbau der Abwasserinhaltsstoffe und die Abtrennung des Belebtschlamms vom Abwasser in ein und demselben Becken erfolgen. Daher ist ein Nachklärbecken nicht erforderlich (Vgl. [15] [16]).

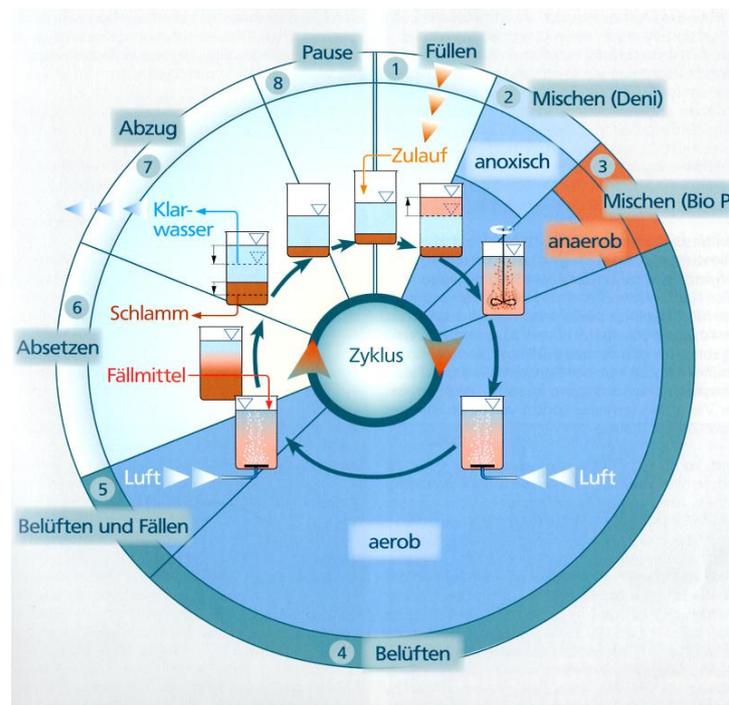


Abbildung 9 Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer diskontinuierlichen Belebung [16]

## Membranbioreaktor (MBR)

Dieses Verfahren beruht auf einer Kombination von Belebtschlammverfahren und Membranfiltration (Abbildung 10). Durch ein sich im Belebungsbecken befindliches ((Ultra-)Filtrationsmodul) werden Belebtschlamm, Mikroorganismen, Keime, Bakterien und Viren, je nach Porengröße des Membranmoduls im Retentat zurückhalten. Mit diesem Verfahren sind sehr gute Reinigungsleistungen erreichbar. Zudem ist das Filtrat arm an Keimen und eignet sich zur Wiederverwertung als Betriebswasser (z.B. für Toilettenspülung und Gartenbewässerung). Diese hygienisierende Wirkung der Ultrafiltration ist ein verfahrensbedingter günstiger Effekt (Vgl. [15] [16])

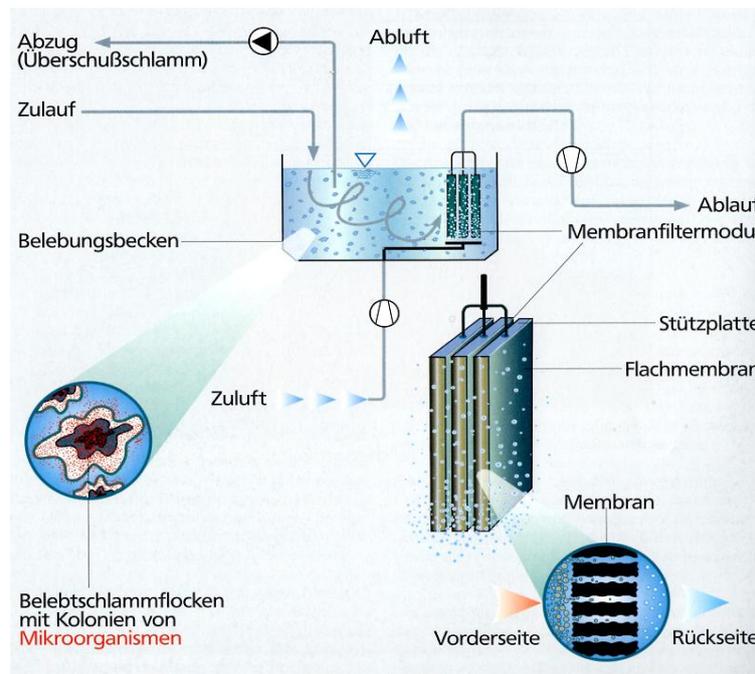


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Wirkungsweise einer Belebungsanlage mit Membranfiltration (Heinrich & Heinrich, 2008)

## Gegenüberstellung und Zusammenfassung

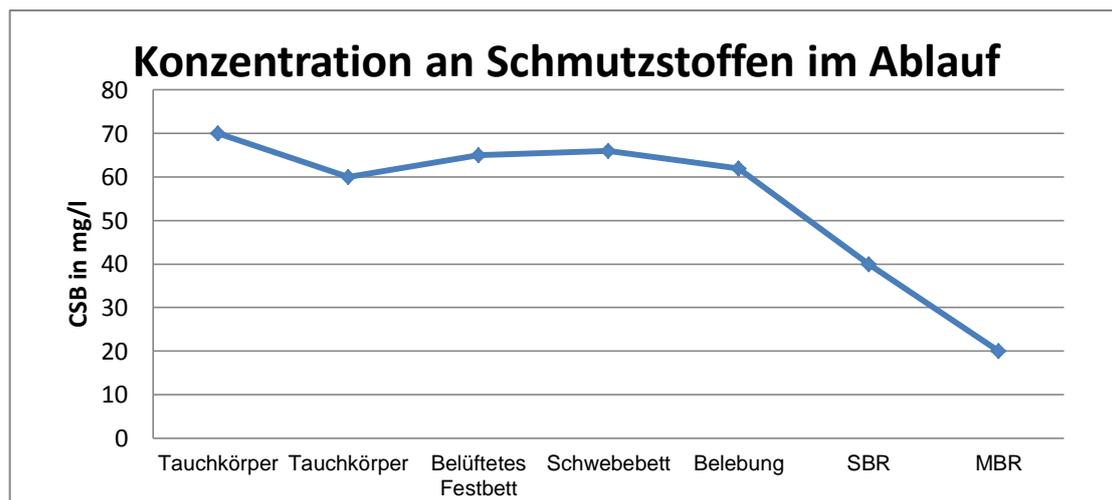


Abbildung 11: Konzentration an Schmutzstoff verschiedener Verfahrens [16]

In Abbildung 11 werden die in der Praxis erreichten Mittelwerte der Ablaufkonzentration an Schmutzstoffen (CSB) für Kläranlagen in Abhängig von der oben dargestellten Verfahrens herausgegeben. Es fällt auf, dass bei der Reinigungsleistung SBR und MBR signifikant vor anderen Verfahren liegen, welche die Konzentrationen der CSB im Ablauf zwischen 60-70 mg/l. Im Vergleich zur SBR verfügt MBR der besten Reinigungsleistung mit den geringsten Schmutzstoffe (CSB) im Ablauf bei durchschnittlich 20 mg/l CSB ,während bei SBR 40 mg/l ist.

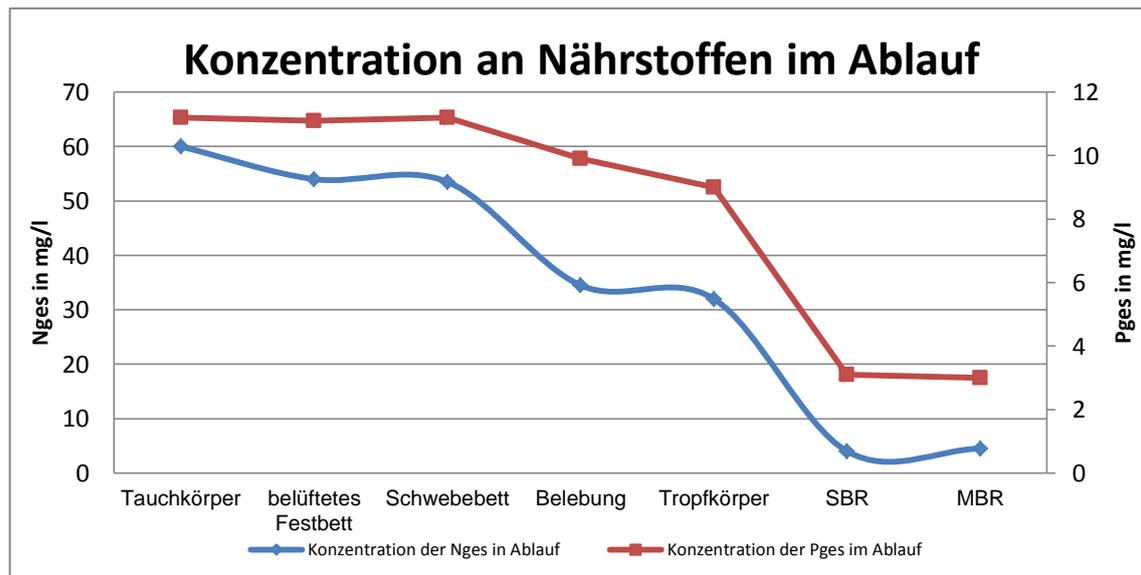


Abbildung 12: Konzentration an Nährstoffen in Ablauf verschiedener Verfahrens [16]

Die Abbildung 12 zeigt die in Ablaufkonzentration an Nährstoffen im Bezug auf die gesamt Stickstoff und Phosphor. Es ist deutlich zu erkennen, dass SBR und MBR die effektivsten Leistung an Entfernung von Nährstoffen erreichen können, mit jeweils die Konzentration vom Gesamtstickstoff unterhalb 10 mg/l und die Konzentration von Gesamtphosphor unterhalb 4mg/l im Ablauf.

Tabelle 7 stellt die Gegenüberstellung aller Verfahren im Hinblick auf Reinigungswirkung, Flächenbedarf, Technisierungs- und Automatisierungsgrad, Kontroll- und Wartungs- Aufwand sowohl Reinigungswirkung Nährstoff dar.

Tabelle 7: Unterscheidung verschiedener Verfahrens zur Braunwasserbehandlung nach Merkmalen (eigene Erarbeitung nach [16])

Verfahren Merkmal	Tropfkörper	Tauch- körper	Belüftetes Festbett	Schwebe- bett	Belebung	SBR	MBR
<b>Reinigungs- wirkung</b>	Gut bis Befriedigend	Gut	Gut bis Befriedigend	Gut bis Befriedigend	Gut	Sehr gut	Sehr gut
<b>Flächen- bedarf</b>	gering	gering	gering	Sehr gering	gering	Sehr gering	Sehr gering
<b>Technisierun- gs- und Automatisier- ungsgrad</b>	technisiert	technisiert	Stark technisiert	Stark technisiert	Stark technisiert	Stark technisiert und automatisiert	Stark technisiert und automatisiert
<b>Kontroll- und Wartungs- Aufwand</b>	hoch	gering	Recht hoch	gering	Sehr hoch	gering	Sehr hoch
<b>Entfernung von Nährstoff</b>	Recht hoch	gering	gering	gering	Recht hoch	Sehr hoch	Sehr hoch

Aus der Abbildung 11, 12 und Tabelle 7 lassen folgend punkte entnehmen

1. Eine sehr gute Reinigung und sehr hohe Entfernung von Nährstoff ist mit den Verfahren „Diskontinuierliche Belebung(SBR)“ und „Membranbioreaktor(MBR)“ erreichbar. Im Vergleich haben „Tropfkörper“, „Belüftetes Festbett“ und „Schwebett“ eine gute bis befriedigende Reinigungswirkung. Dabei werden Schmutzstoffe zumeist mehr oder weniger auch unter Umwandlung von Ammonium in Nitrat entfernt, aber in der Regel gelingt die gezielte und zuverlässige Entfernung des Stickstoffs nicht.

2. Alle Verfahren weisen geringeren Platzbedarf als naturnahe Verfahren wie z.B. „Unbelüfteter Abwasserteich“ oder „Pflanzenbeet“. Darunter werden „Schwebett“, „SBR“ und „MBR“ vergleichsweise als „sehr gering“ eingestuft.

3. Außer „Tropfkörper“ und „Tauchkörper“ haben alle anderen 4 Verfahren höhere Betriebskosten (Energiekosten). Der sehr aufwendige Wechsel der Tropfkörperfüllung erschwert allerdings die Wartungsarbeit, deswegen sein Wartungsaufwand als hoch. Aufgrund der Komplexität von MBRs und damit anspruchsvollen Wartungsarbeiten und dem Anfall von Überschussschlamm, fallen beim MBR zusätzliche Betriebskosten an. Zudem erfordern alle Verfahren außer MBR eine chemische oder physikalische Behandlungsstufe (z.B. chemische

---

Fällung oder UV-Bestrahlung) als „dritte Reinigungsstufe“ bei erhöhter Anforderung an die Wasserqualität.

Als Hauptaussage lässt sich festhalten, dass MBR eine beherrschbare Technologie für die Braunwasserbehandlung ist. Die hohen Betriebskosten können aber durch die hohe und gleichbleibende Qualität des erzeugten Betriebswassers gerechtfertigt werden.

### **2.1.6 Parameter zur Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit einer Membranfiltration**

Die Anwendung der Membran basiert in der Regel auf einer Reihe von Anforderungen. Die ausgewählten Membranen müssen nicht nur hohe selektive Eigenschaften bzw. Reinigungsleistung bei Abwasserreinigung, sondern auch widerstandsfähig gegenüber Fouling sein und eine hohe mechanische Stabilität besitzen [17]. Im Folgenden werden wichtigen Formeln und Parameter erläutert, die für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Membranfiltration erforderlich sind.

Die Beurteilung der hydraulischen Leistungsfähigkeit hängt wesentlich von den 3 Parametern ab. Beziehungsweise der Spezifischer Fluss ( $V_p$ ), Transmembrandruck (TMP) und Permeabilität .

#### **Spezifischer Fluss ( $V_p$ ) (Flux)**

Als Spezifischer Fluss bezeichnet man die anfallende Permeatmenge ( $Q_{perm}$ ) auf die Membranfläche ( $A_{Mem}$ ), die zur Filtration zur Verfügung steht.

$$V_p = \frac{Q_{perm}}{A_{Mem}} \left[ \frac{l}{m^2 \cdot h} \right]$$

#### **Transmembrandruck (TMP)**

Der Transmembrandruck (TMP) ist die Druckdifferenz zwischen Feed und Permeat. Er ist die Treibkraft der Filtration.

$$TMP = P_{feed} - P_{perm} [bar]$$

#### **Permeabilität ( $L_p$ )**

Spezifischer Fluss und TMP verhalten sich üblicherweise annähernd linear zueinander [18]. Die Permeabilität beschreibt den Systemzustand unabhängig von jeweiligen Flux und TMP um den Vergleich mit anderen Systemen zu ermöglichen. Die Permeabilität spiegelt die hydraulische Leistungsfähigkeit der MBR wider und wird wie folgend berechnet:

$$L_p = \frac{Flux}{TMP} \left[ \frac{l}{m^2 \cdot h \cdot bar} \right]$$

## 2.2 Das SANIRESCH Projekt

In Abbildung 2 sind Projektkomponenten und seiner Ablaufplan des SANIRESCH Projekts dargestellt. Das SANIRESCH Projekt teilt sich in 2 Phasen. In der ersten Phase (von 2004 bis 2009) wurde der Umbau der Rohrleitungen und die Installation der No-Mix Toiletten von der Roediger Vacum GmbH in Haus 1 der GIZ in Eschborn umgesetzt. Damit wurde es möglich die Teilströme Gelb-, Grau- und Braunwasser getrennt zu erfassen und abzuleiten. Das Gelbwasser wird seitdem in einem Tank gesammelt. In der anschließenden Phase 2 (2009 bis 2012) wird das erfasste Gelbwasser zu einer MAP-Fällungsanlage von HUBER SE geleitet und dort zur Erzeugung von Struvit verwendet. Gleichzeitig wird Braunwasser und Grauwasser durch MBRs von HUBER SE behandelt, wobei Betriebswasser erzeugt wird.

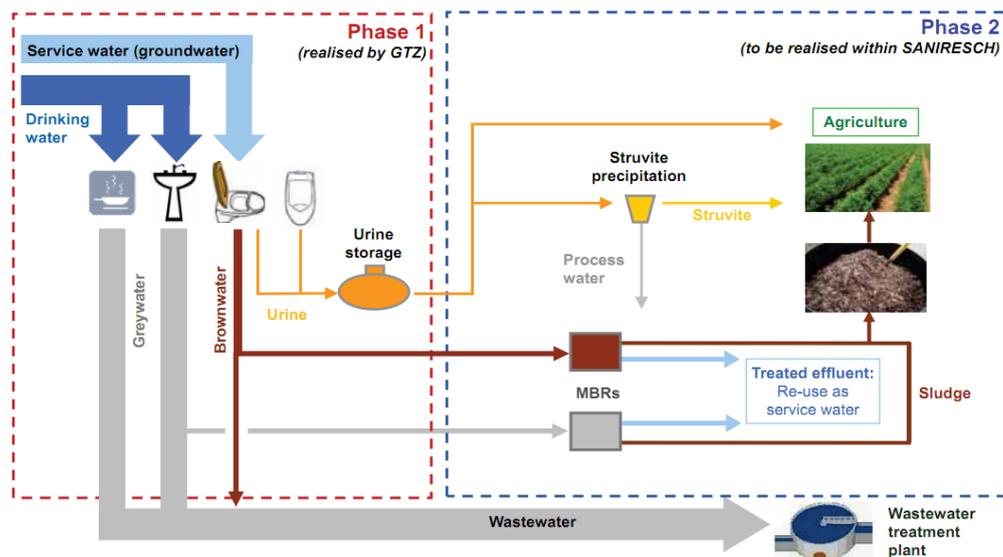


Abbildung 13 Ablaufplan der SANIRESCH Projekt [19]

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die Haus 1 der GIZ verbauten Toiletten und Urinale. Es gibt zurzeit insgesamt 102 Toiletten im Gebäude. 36 davon sind No-Mix Toiletten. Sie befinden sich in dem zentralen Teil des Gebäudes (Abbildung 3). Das Braunwasser wird in 36 No-Mix Toiletten erfasst, die im linken Strang des zentralen Teils von Haus 1 der GIZ verbaut sind und gesammelt zur Braunwasserbehandlungsanlage im Keller des Gebäudes geleitet werden (Zustand: 14,06,2011).

Tabelle 8: Gesamtübersicht über die Sanitärtechnik in Haus 1 der GIZ [20]

Sanitärbereich			Mitte 2006		2011/6/14		2011/11/24	
konventionell	Toiletten		52		54		62	
	Urinale		34		34		34	
Saniresch	Toiletten	gesamt	50	2	48	4	40	6
		linker Strang	18	2	16	4	14	6
		rechter Strang	20		20		20	
		nicht erfasst	12		12		12	
	Urinale		23		23		23	
		konventionelle Toiletten, die an das Sanireschsystem angeschlossen sind						

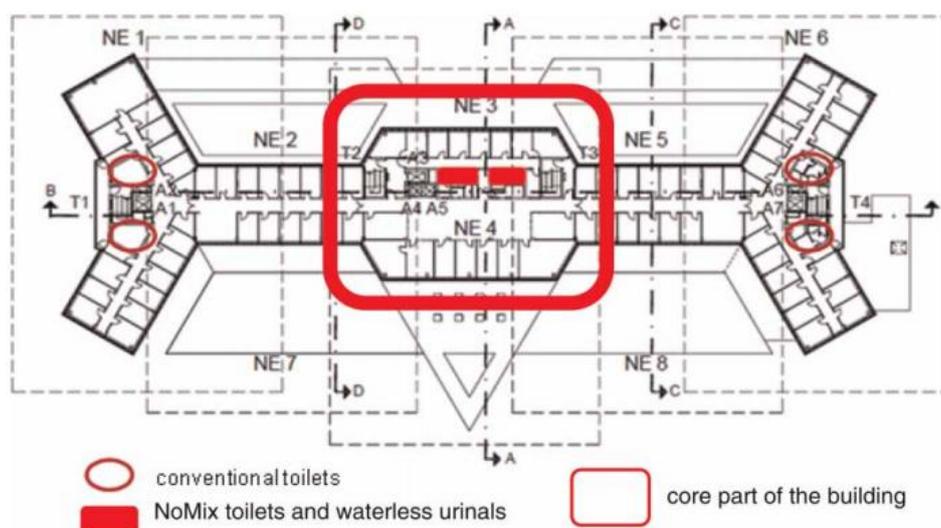


Abbildung 14 Strukturzeichnung Haus 1 der GIZ [21]

## 2.2.1 Beschreibung der Anlage der Braunwasserbehandlung in Haus 1 der GIZ

Die in Haus 1 der GIZ eingesetzte Anlage wurde von der Firma HUBER SE aus Berching hergestellt. Das Aggregat (Abbildung 4) setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen. Nach Entfernung der Grobstoffe durch die automatische mechanische Vorsiebung (1) wird das vorgereinigte Braunwasser in einem Vorlagebehälter (2) mit elektrischem Rührwerk (R1) zwischengespeichert. Anschließend wird es über die Beschickungspumpe (P1) intervallweise in den mit Belebtschlamm gefüllten Membranbelebungsreaktor (4) gepumpt. Die Entnahme von Überschussschlamm erfolgt über die Pumpe (P3) im MBR-Behälter. Für die Ultrafiltration kommt eine MembranClearBoX<sup>®</sup> (MCB 1 Modul) zur Anwendung. Das Gebläse (G1) erzeugt einen kontinuierlichen, grobblasigen Spüllufteintrag unterhalb des Membranmoduls, wodurch eine Überströmung der Membrane entsteht und eine Verblockung der Membranoberfläche

verhindert wird. Zur Durchmischung des Belebtschlammes und zur Verbesserung der biologischen Abbauprozesse wird über einen zusätzlichen Belüfter (G2) am Beckenboden Sauerstoff eingetragen. Über die Permeatpumpe (P2) wird das Permeat durch die Membranen einem leichten Unterdruck von -50 mbar abgesaugt. Bei unterschreitung eines definierten Füllstandes des MBR wird die Pumpe automatisch abgeschaltet.

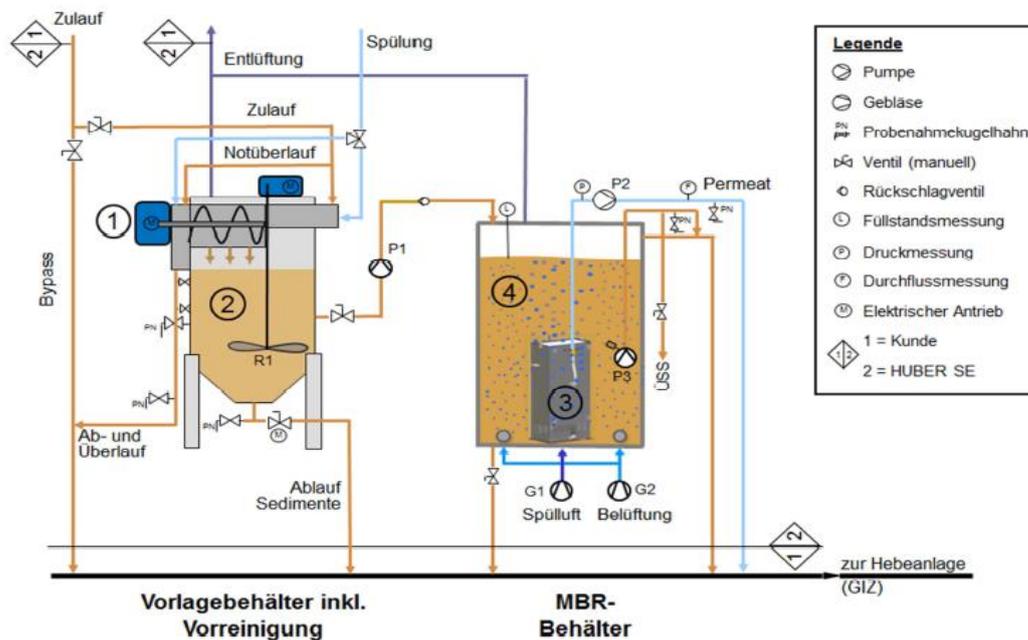


Abbildung 15 Fließschema der Braunwasserbehandlungsanlage [22]

#### Zusätzliche Beschreibung der Anlagenteile:

- 1 Mechanische Vorreinigungsstufe mit Siebschnecke und Siebkorb
- 2 Vorlagebehälter mit elektrischem Rührwerk
- 3 Membranmodul mit Ultrafiltrationsmembran
- 4 Membranbelebungsreaktor (MBR)
- R1 Rührwerk Vorlage
- P1 Beschickungspumpe MBR-Behälter
- P2 Permeatpumpe
- G1 Spülluftgebläse
- G2 Belüftungsgebläse

#### Aufbau Braunwasservorreinigung

Abbildung 5 stellt die Struktur der Braunwasservorreinigung dar. Die Braunwasservorreinigung besteht aus einem Edelstahl-Zylinder und hat ein Volumen von 400 Litern. Ein mit einem 3mm Lochblech ausgestatteter Siebkorb befindet sich waagrecht im oberen Bereich des Behälters. Innerhalb des Korbs befindet sich eine Transportschnecke, deren Schneckenwendel mit einer Bürste bestückt sind. Die Transportschnecke wird von einem außen angebrachten

Getriebemotor angetrieben. Der Siebkorb wird über einen Zulaufstutzen mit rohem Braunwasser direkt aus dem Rohrsystem beschickt. Auf dem Zulaufstutzen ist schräg ein Spülanschluss angebracht. An der gegenüberliegenden Behälterwand befindet sich ein Abwurfschacht, an den die Ablaufleitung angeschlossen ist. Der Abwurfschacht ist ebenfalls mit einem Spülanschluss versehen. Ein Notüberlauf, der oberhalb des maximalen Füllstandniveaus außerhalb des Behälters verläuft, verbindet den Zulaufstutzen mit dem Abwurfschacht und kann im Störfall so als Bypass fungieren.

Der untere Bereich des Behälters besteht aus einem Edelstahlzylinder, der sich im unteren Bereich trichterförmig zuspitzt. Am oberen Ende des Trichters ist ein Füllstandsensoren eingebaut. Am Boden des Trichters sind der Ablauf für Sedimente und ein Kugelhahn zur Probenahme angebracht. Die Beschickung des MBR Behälters erfolgt über eine seitlich am Vorlagebehälter angebrachte Beschickungsleitung. An der zylinderförmigen Behälterwand befinden sich ein zusätzlicher Kugelhahn zur Probenahme sowie zwei Überlaufleitungen, die über Kugelhähne geschlossen sind. Oben ist der Behälter durch einen Deckel, in den ein Entlüftungsanschluss versiegelt. Im Inneren des Behälters befindet sich ein leicht seitlich versetztes, senkrecht angebrachtes Rührwerk, das über einen Getriebemotor am Behälterdeckel angetrieben wird.

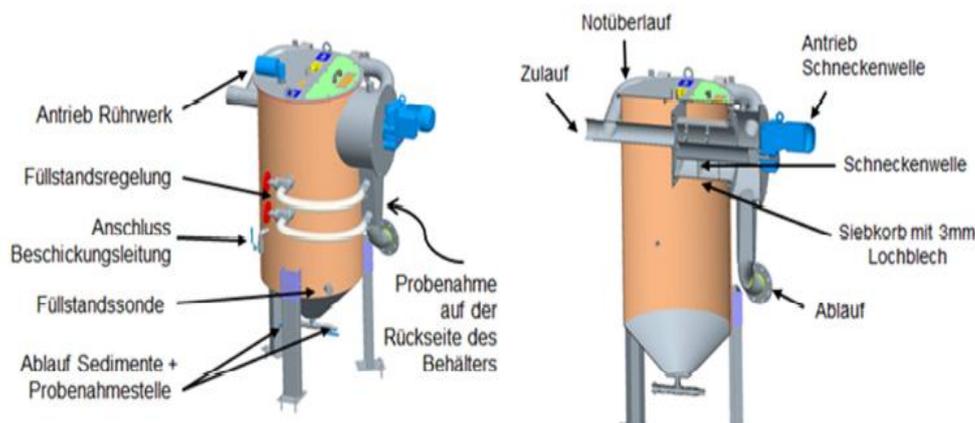


Abbildung 16 Aufbau Braunwasservorreinigung [22]

### Aufbau Membranbelebungsreaktor (MBR)

Abbildung 17 stellt den Aufbau des eingesetzten Filtrationsmoduls dar. Der Behälter für den Membranbelebungsreaktor (MBR) besteht aus Polyethylen (PE) und wird projektspezifisch angefertigt. Er wird gekapselt ausgeführt und ist mit mehreren Verstrebungen aus PE ausgestattet, um unerwünschte Verformungen zu verhindern. Das Volumen der Biologie beträgt bei einem Raumbedarf von 1605x780x600 mm (HxBxL) maximal 710 Liter. Die Anschlüsse für die Permeat- und Belüftungsschläuche sind auf dem Behälterdeckel angeordnet.

Die Anschlüsse für die Permeat- und Belüftungsschläuche werden oben am Behälter angebracht. Der MBR ist mit einer Höhenniveaumessung, einer Entlüftung sowie einem Überlauf ausgestattet.

Als Filterelement dient ein Membranfiltrationsmodul mit Ultrafiltrationsmembran (MCB1 mit 3,5 m<sup>2</sup> Membranoberfläche), welches direkt im Belebungsbecken untergebraucht ist. Die Membranmodule bestehen aus einzelnen Membranplatten die doppelseitig mit Ultrafiltrationsmembranen bespannt sind. Die Trenngrenze der Membrane liegt bei ca. 38nm.

Das Modulgehäuse des Filtrationsmoduls ist aus Edelstahl gefertigt und stellt einen robusten Schutz für das Membranmodul gegen Beschädigungen dar. An der Einhausung ist auch der Anschluss für den Permeatabzug angebracht.

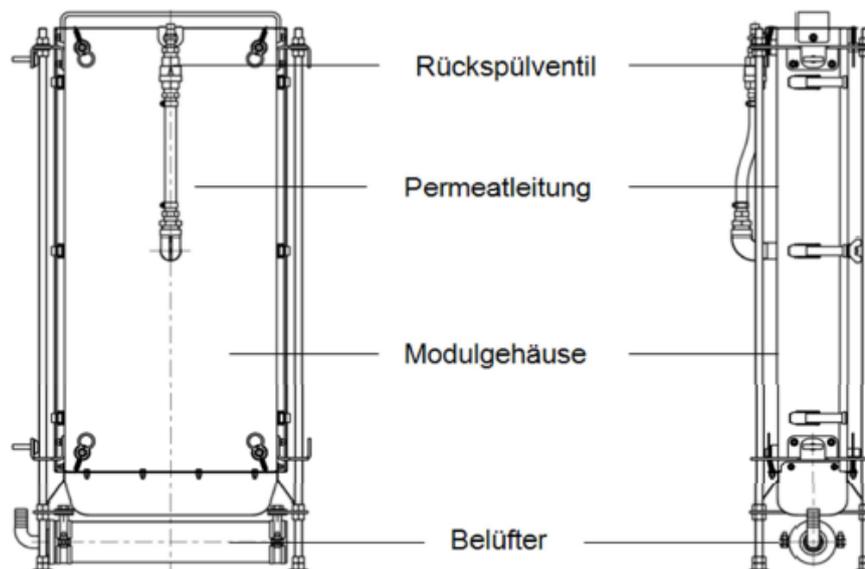


Abbildung 17: Schematischer Aufbau des eingesetzten Filtrationsmoduls MCB1 [22]

Unterhalb des Filtrationsmoduls befindet sich eine Belüfterlanze für die Spülluft. Zusätzlich ist neben dem Modul am Behälterboden eine zweite Belüftungsvorrichtung für die Sauerstoffversorgung der Biologie installiert.

In der Permeatleitung befinden sich eine Permeatpumpe, ein Probenahmekugelhahn und ein Rückschlagventil. Außerdem sind in die Leitungen Messarmaturen für die Druck- und Durchflussmessung integriert.

Für den manuellen Überschlussschlammabzug ist im Behälter eine Überschlussschlammpumpe installiert, die mit Überlaufleitung des Behälters verbunden ist. Ein Kugelhahn zur Probenahme befindet sich ebenfalls in der Leitung.

Eine Beschickungspumpe dient der Substratförderung vom Auffangbehälter der Vorreinigungsstufe in den Behälter des Membranbelebungsreaktors. In der Verbindungsleitung befinden sich ein Kugelhahn zur Probenahme und ein Rückschlagventil.

### **Funktionsbeschreibung Braunwasservorreinigung**

Das ankommende Braunwasser wird über einen Zulaufstutzen schwallweise in den Siebkorb gespült. Die Feststoffabtrennung erfolgt über das zylinderförmige Lochsieb mit einem Lochdurchmesser von 3mm.

---

Die flüssige Phase wird in dem darunter liegenden Vorlagebehälter aufgefangen, der mit dem Rührwerk intervallweise durchmischt wird. Die zurückgehaltenen Feststoffe (Fäzes und Toilettenpapier) werden über die integrierte Transportschnecke, welche intervallweise betrieben wird, automatisch aus dem Inneren des Siebrohres entfernt und in die Ablaufleitung transportiert. Die Bürsten auf der Schneckenwendel reinigen beim Transport zusätzlich den Siebkorb von innen.

Über den in Fließrichtung angebrachten Spülanschluss am Zulaufstutzen lassen sich mögliche Ablagerungen bei gleichzeitigem Schneckenbetrieb manuell aus dem Innenraum des Siebkorbentfernen. Als Spülmedium kann Permeat aus der Grauwasserbehandlung genutzt werden. Zusätzlich gewährleistet eine große Bypass-Leitung einen sicheren Verstopfungsschutz für den Fall, dass im Siebkorb eine Verblockung vorliegen sollte und die Spritzdüse nicht ausreicht, um die Blockade zu lösen. Über einen zusätzlichen Anschluss oberhalb des Abwurfschachtes kann die Ablaufleitung im Falle einer Verblockung effektiv gespült werden.

Über einen Entlüftungsanschluss im Behälterdeckel wird die Separationseinheit an die zentrale Entlüftungsanlage angeschlossen, um Geruchsbelästigungen zu vermeiden. Eine Öffnung im Behälterdeckel, die mit einem Abdeckblech geschlossen ist, ermöglicht eine Kontrolle der Siebkorboboberfläche auf Verschmutzungen.

Über zwei Überlaufleitungen kann der maximale Behälterfüllstand manuell dem Substratbedarf der MBR-Anlage angepasst werden. [22]

### **Funktionsbeschreibung Membranfiltration**

Die Beschickungspumpe beschickt den MBR intervallweise aus dem Speicherbehälter der Vorreinigung. Die Füllstandsonde oberhalb des Behälterkonus der Vorlage dient als Trockenlaufschutz für die Beschickungspumpe, die bei einem zu niedrigem Füllstand stoppt. Das Rückschlagventil in der Leitung verhindert das Rückfließen von Belebtschlamm aus dem Membranbelebungsreaktor in den Vorlagebehälter.

Die Trennung von Belebtschlamm und Wasser findet über das verwendete Membranmodul statt. Durch eine Permeatpumpe wird ein Unterdruck an dem Membranmodul erzeugt. Die Feststoffe des angesaugten Belebtschlammes verbleiben im MBR, während die Flüssige Phase als Endprodukt des Behandlungsprozesses als Betriebswasser genutzt werden kann. Der grobblasige Rohrbelüfter dient der Verteilung der Spülluft. Durch die Strömung des Luft/Schlammgemisches zwischen den Membranplatten werden die Oberflächen der Membranen kontinuierlich gereinigt und eine Deckschichtbildung weitestgehend verhindert. Der feinblasige Rohrbelüfter gewährleistet eine ausreichende Sauerstoffversorgung für die biologischen Abbauprozesse im MBR-Behälter. Beide Rohrbelüfter werden über ein Gebläse mit Luft versorgt.

Der Füllstand in der Anlage wird über eine Höhenniveaumessung vom Typ Vegawell 52 erfasst. Über zwei Schaltpunkte, auf welche die Niveaumessung eingestellt ist, wird der Anlagenbetrieb im Normalmodus betrieben. Bei einer Unterschreitung des unteren Niveaus, geht der Anlagenbetrieb in den Sparmodus über. Den zwei Stufen sind jeweils charakteristische Laufzeiten der Aggregate (Pumpe, Belüfter) hinterlegt, um den wechselnden Bedingungen gerecht zu werden.

Die Spülluft kann optional intermittierend betrieben werden, läuft jedoch parallel mit der andauernden Filtration. Die Belüftungsparameter können von Fachpersonal gegebenenfalls optimiert und bedarfsgerecht angepasst werden.

Durch diese Betriebszustände kann die Anlage in Zeiten mit geringem Zufluss energiesparend betrieben werden. Die biologische Reinigungsstufe ist zur vollständigen Nitrifikation ausgelegt und wird kontinuierlich betrieben. Das Permeat ist dank der Ultrafiltration nahezu keimfrei. [22]

Der Betrieb und die Überwachung der MBR-Anlage ist Projektpartner Johanna Heynemann aus Technisch Hochschule Mittelhessen zuständig. Die hauptsächlichen Betriebsparameter sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Betriebsparameter der MBR Anlage in Haus 1 der GIZ [23]

<b>Inbetriebnahme</b>	<b>27.06.2011</b>
<b>Fläche der UF- Membran</b>	3.5 m <sup>2</sup>
<b>TS<sub>MBR</sub></b>	5 – 6 g/l
<b>Durchsatz</b>	≈ 14 l/h
<b>Durchsatz</b>	≈ 350 l/d
<b>Pausenzeiten</b>	23 bis 4 Uhr
<b>Filtration</b>	270 Sekunden
<b>Pause</b>	120 Sekunden
<b>Transmembrandruck</b>	50 mbar

---

## 2.3 Methode zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit von Braunwasserbehandlung durch MBR- Technologie.

Um Entscheidungen bezüglich der internationalen Übertragbarkeit und der Implementierung von MBR - Braunwasserbehandlungssystemen zu treffen, bedarf es der Betrachtung mehrerer Dimensionen. Eine Option eine derartige Betrachtung durchzuführen ist die Anwendung eines mehrdimensionalen Bewertungsverfahrens, welches aus der Entscheidungstheorie stammt. Ein Bewertungsverfahren handelt sich um einen Prozess der Informationsgewinnung und Verarbeitung, um die rationale Auswahl von mehreren möglichen Handlungsalternativen zu treffen. Das folgende Kapitel wird sich mit der Auswahl von Evaluierungs- und Bewertungsverfahren beschäftigen.

### 2.3.1 Auswahl der Evaluations & Bewertungsverfahren

Abbildung 18 illustriert die Klassifizierung der mehrdimensionalen Bewertungsverfahren, die nach Zahl und Art der Ziele benutzt werden. Die mehrdimensionalen Bewertungsverfahren unterteilen sich in Semi-quantitative und quantitative Verfahren. Bei quantitativen Verfahren werden die zielrelevanten in berechenbare Größen transformiert, während von Semi-quantitative Verfahren wegen der unberechenbaren Informationen die Bewertung der Kriterien mit beispielweise hoch, mittel, gering ausreichend ist.

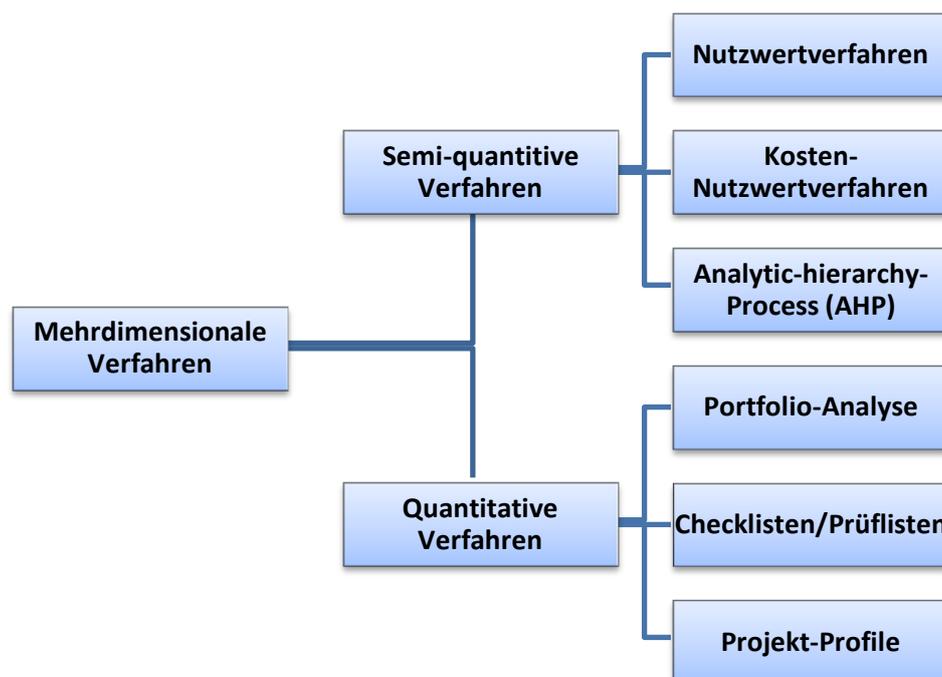


Abbildung 18: Klassifizierung des Mehrdimensionalen Bewertungsverfahrens. (Vgl. [24])

Bei der Bewertung der internationalen Übertragbarkeit der Braunwasserbehandlung das durch MBR Verfahren sind hier aufgrund vieler nicht in berechenbaren Größen zu transformierende Kriterien wie z.B. „Akzeptanz bezüglich der Verwertung von gereinigtem Betriebswasser“ semi-quantitative Bewertungsverfahren anzuwenden.

Bei der Auswahl der Bewertungsverfahren der Zielstellung einer nachhaltigeren Entwicklung und deren Realisierung sind von Schuh [25] verschiedene Anforderungen, zu berücksichtigen sind. Tabelle 10 stellt diese Anforderungen dar.

Tabelle 10: Anforderungen an multikriterielle Entscheidungsverfahren für eine nachhaltige Entwicklung [25]

Anforderungen	Konkretisierung
<b>Vollständigkeit</b>	Werden als Voraussetzung für aussagefähige Ergebnisse alle relevanten Kriterien der Alternativen erfasst? Grundsätzliche Voraussetzung hierfür ist, dass vor Anwendung eines Entscheidungsverfahrens bei der Lösung der Ansatzproblematik alle relevanten Kriterien ermittelt und erfasst werden. Dies stellt gleichzeitig eine Voraussetzung für die Strukturähnlichkeit von Modell und Realität dar.
<b>Transparenz, Nachvollziehbarkeit, Objektivität</b>	Sind die Regeln der Vorgehensweise offengelegt, klar formuliert und damit auch das Ergebnis und dessen Zusammensetzung nachvollziehbar und überprüfbar? Die Nachvollziehbarkeit hat direkten Einfluss auf die Akzeptanz des Verfahrens bei Anwendern und Stakeholdern und stellt damit eine unabdingbare Voraussetzung für dessen Anwendung dar
<b>Genauigkeit und Validität</b>	Wird eine angemessene Lösungsqualität erreicht? Wird das gesteuert, was zu steuern beabsichtigt wurde (Effektivität)?
<b>Reliabilität</b>	Wird zuverlässig gesteuert, d. h. führt auch eine mehrmalige Anwendung zum gleichen Ergebnis? Wird das Ergebnis von allen gleich verstanden?
<b>Kein Einfluss neuer Alternativen auf die bisherige Bewertung</b>	Bleibt die Bewertung bei neu hinzukommenden Alternativen stabil? Ist dies nicht der Fall, muss bei neu hinzukommenden Alternativen die gesamte Bewertung neu durchgeführt werden.
<b>Offenheit der Modellstrukturen, Integrierbarkeit neuer Kriterien</b>	Ist das Verfahren anpassbar an verschiedene Anwendungssituationen, Veränderungen der Ziele, Rahmenbedingungen oder Präferenzen und können neue relevante Entscheidungskriterien, die sich erst im Laufe der Entscheidungsvorbereitung ergeben, in das gerade angewendete Bewertungskonzept integriert werden?
<b>Praktikabilität und wirtschaftlichkeit</b>	Steht der Aufwand zur Entscheidungsfindung in einem angemessenen Verhältnis zu den erwarteten Ergebnissen (Effizienz)? Ist das Konzept praktisch anwendbar und beherrschbar von Entscheidungsträgern, d. h. auch Nicht-Experten hinsichtlich der methodischen Vorgehensweise? Für eine nachhaltigere Entwicklung und eine möglichst breite Anwendung bei einer Vielzahl von Entscheidungsträgern und Entscheidungen kommt diesem Kriterium eine hohe Bedeutung zu.
<b>Eindeutigkeit</b>	Folgt aus dem Verfahren eine eindeutige Aussage, welche Handlungsalternative die beste ist?
<b>Erforderlicher Dateninput</b>	Liegen die Inputdaten in der benötigten Skalierung vor? Sind Präferenzaussagen der Entscheidungsträger in der benötigten Genauigkeit zu erwarten?

## Nutzwertanalyse (NWA)

Die Nutzwertanalyse unterstützt die Auswahl von Entscheidungsalternativen unter Sicherheit. Im deutschsprachigen Raum wird Sie von Zangmeister entwickelt und so definiert:

*„Nutzwertanalyse ist die einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu Ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch Angabe der Nutzwert (Gesamtwerte) der Alternativen.“ [26]*

Die Nutzwertanalyse stellt ein Instrument zur Bestimmung der vom Entscheidungsträger bevorzugten Alternativen dar. Dazu müssen die Alternativen parametrisiert und auf – ebenfalls parametrisierbare Konsequenzen abgebildet werden. Die Nutzwertanalyse nimmt an, dass der Entscheidungsträger die Alternativen bevorzugt, die ihm den größten Nutzen bringen.

## Analytic-Hierarchy-Process (AHP)

Der Analytic-Hierarchy-Process wurde von Thomas L. Saaty seit den 70er Jahren entwickelt und wird seitdem in verschiedensten Entscheidungssituationen zum Einsatz gebracht [27] Der AHP kann als eine Lösungsmethodik verstanden werden, welche ein komplexes Entscheidungsproblem in seine Bestandteile zerlegt und anschließend hierarchisch strukturiert modelliert. Mit Hilfe vollständiger Paarvergleiche werden alle Elemente der Hierarchie in Beziehung gesetzt und unter Anwendung von eigenen AHP-Algorithmen in Vektoren umgewandelt. Das Entscheidungsproblem wird dadurch in seiner Gesamtheit erfasst und in den Einzelbestandteilen bewertet. Die Skala des AHP wird in Abbildung 19 dargestellt.

mögliche Werte für Paarvergleichsurteile $a_{ij}$	Bedeutung der möglichen Werte für Paarvergleichsurteile $a_{ij}$	
	Beurteilung von Handlungsalternativen in Bezug auf ein Kriterium	Beurteilung der relativen Bedeutung von Kriterien
1	gleiche Kriterienausprägung der beiden Handlungsalternativen i und j (Indifferenz)	gleiche Bedeutung der beiden Kriterien i und j (Indifferenz)
3	etwas höhere Kriterienausprägung der Handlungsalternative i	etwas höhere Bedeutung des Kriteriums i
5	deutlich höhere Kriterienausprägung der Handlungsalternative i	deutlich höhere Bedeutung des Kriteriums i
7	viel höhere Kriterienausprägung der Handlungsalternative i	viel höhere Bedeutung des Kriteriums i
9	sehr viel höhere Kriterienausprägung der Handlungsalternative i	sehr viel höhere Bedeutung des Kriteriums i
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	
$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$	Reziprokwerte für „inverse“ Präferenzen, bei denen die Handlungsalternative bzw. das Kriterium j gegenüber i bevorzugt wird [die Reziprokwerte werden im Allgemeinen in der unteren (oberen) Dreiecksmatrix der quadratischen Evaluationsmatrix mit allen Paarvergleichsurteilen „automatisch“ generiert, indem jedem Paarvergleichsurteil $a_{ij}$ in der oberen (unteren) Dreiecksmatrix durch Spiegelung der Evaluationsmatrix entlang ihrer Hauptdiagonalen das inverse Paarvergleichsurteil $a_{ji} = 1/a_{ij}$ in der unteren (oberen) Dreiecksmatrix zugeordnet wird]	

Abbildung 19 AHP-Skala für Paarvergleichsurteile [28]

---

Die Bewertung von NWA und AHP nach die Anforderungen von Schuh sind in Tabelle 11 und 12 gegenüberstellt. Vergleich mit Nutzwertanalyse, ist bei Anwendung des Analytisch-hierarchischer Prozess (AHP) Verfahren mathematisch anspruchsvoller und wegen seiner breiteren Bewertungsskala in Gegensatz zur Nutzwertanalyse (NWA) logischer und präziser in der Entscheidung. Aber, da das Ergebnis des AHP Verfahrens auf einem paarweisen Vergleich basiert, müssen die Alternativen in der Matrix reziprok sein. d.h. das Alternative 1 wird als doppelt so wichtig wie Alternative 2 bewertet. Wenn man neues Kriterium berücksichtigt oder weitere Alternative hinzufügt, muss die Paargleich alle Alternativen noch mal bestimmt werden und das sogenannte „Rangreversion“ passiert werden könnten wie zum Beispiel, wenn man das AHP benutzt, ist nach einer vollständigen Bewertung die Reihenfolge der Alternativen  $X_1 > X_2 > X_3$  und es kann passieren, dass durch das Hinzufügen einer weiteren Alternative die Reihenfolge gedreht wird, und als  $X_1 > X_3 > X_2 > X_4$  vorkommt. Diese Veränderung der Reihenfolge hat der IIA-Kriterium (Independence of Irrelevant Alternatives) geschädigt (Vgl.[29]). Aus diesem Grund sind bei die Anwendung von AHP Verfahren die Offenheit der Modellstrukturen, die Reliabilität der Bewertung und die Einführung neue Alternativen eingeschränkt und Zeit aufwendig, während bei NWA die Einführung des neuen Kriteriums nur eine neue Gewichtung alle Kriterien geben soll. Die weitere eingefügte Alternative hat kein Einfluss auf die bereits vorhandene Bewertung [25].

Mit dem Hauptziel dieser Arbeit ein allgemeingültiges Instrument für die Bewertung der internationale Übertragbarkeit und Entscheidung der Implementation zu erstellen, soll die Offenheit der Modellstrukturen hoch und die Ergebnisse der Bewertung stetig zuverlässig sein, damit neue Alternativen/Kriterium leicht zugänglich und mit bereits bewertete vergleichbar stehen. Deswegen stellt die Nutzwertanalyse für die Entscheidungsunterstützung zur Untersuchung der internationalen Übertragbarkeit der Braunwasserhandlung sehr geeignet. (Yue W.)

Tabelle 11: Bewertung der Nutzwertanalyse [25]

Vollständigkeit	Ja
Transparenz, Nachvollziehbarkeit, Objektivität	Transparenz und Nachvollziehbarkeit ja durch die explizite Offenlegung der jeweiligen Präferenzen in Form von Kriterien, Gewichten und Aggregationsverfahren. Damit wird gleichzeitig verhindert, dass unbewusst Kriterien in die Bewertung einfließen, die mit der Sache an sich nichts zu tun haben. Objektivität wird damit nicht sichergestellt, wohl aber Nachvollziehbarkeit.
Genauigkeit und Validität	Ja
Reliabilität	Ja
Einfluss neuer Alternativen	Kein Einfluss neuer Alternativen auf bisherige Bewertungen
Offenheit der Modellstrukturen	Ja, neuer Kriterien erfordern lediglich eine Neugewichtung aller Kriterien
Eindeutigkeit	Ja
Erforderlicher Dateninput	Verfahrenstechnisch quasi-kardinale Daten. Vielfach werden ordinale Daten als ausreichend angesehen, wenn deren grundsätzliche Transformierbarkeit in Nutzenpunkte möglich ist.

Vollständigkeit	Ja
Transparenz, Nachvollziehbarkeit, Objektivität	Objektivität der angewendeten mathematischen Verfahren ja, allerdings Transparenz und Nachvollziehbarkeit insbesondere der Rechenverfahren für die praktische Anwendung nein
Genauigkeit und Validität	Nein. Neue, auch irrelevante Alternativen können die bisherige Reihenfolge z. T. deutlich ändern. Dies widerspricht dem Rationalitätspostulat der Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen und führt zu einem „erheblichen Zweifel an der Validität der Handlungsempfehlung“
Reliabilität	Nein. Bereits die auf einem paarweisen Vergleich beruhende doppelte Erfassung der Präferenzen garantiert keine konsistenten Daten. Als Möglichkeit zur Überprüfung der Konsistenz der Paarvergleichsurteile als Grad der Fehlbeurteilungen kann ein Konsistenzindex ermittelt und überprüft werden, ob er den Konsistenzanforderungen genügt. Dies lässt allerdings weitere Zweifel an der Nachvollziehbarkeit aufkommen.
Einfluss neuer Alternativen	Keine Unabhängigkeit von neu hinzukommenden Alternativen aufgrund von Paarvergleichen.
Offenheit der Modellstrukturen	Eingeschränkt, weil bei veränderten Entscheidungskriterien aufgrund paarweiser Vergleiche das Verfahren neu durchlaufen werden muss.
Eindeutigkeit	Ja
Erforderlicher Dateninput	mindestens quasi-kardinale Daten.

Tabelle 12 Bewertung der AHP [25]

## 2.3.2 Vorgehensweise bei der Nutzwertanalyse

In der Literatur werden verschiedene Vorgehensweisen eine Nutzwertanalyse beschreiben. Die Unterschiede sind aber gering. Bei der Untersuchung der internationalen Übertragbarkeit der Braunwasserbehandlung werden die nachfolgende beschriebene Vorgehensweisen (Abbildung 20) durchgeführt.

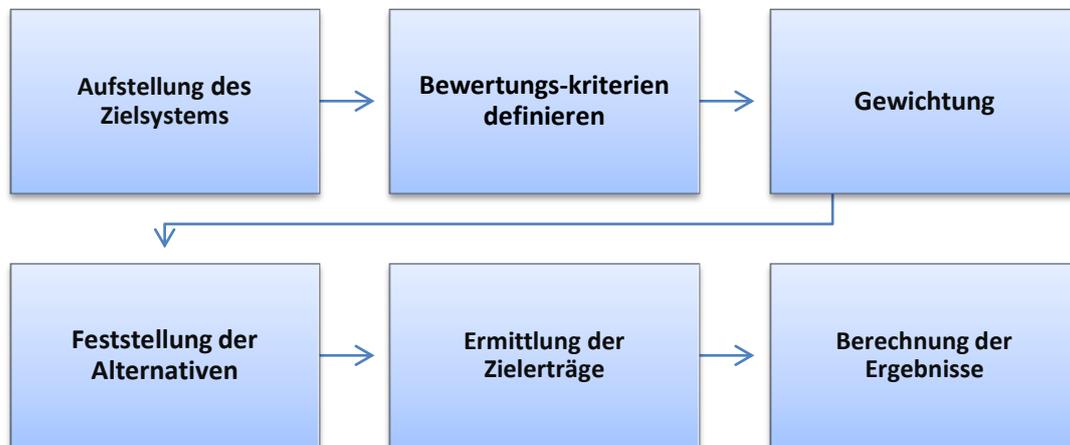


Abbildung 20 Vorgehensweise der Nutzwertanalyse (Vgl. [26])

### Aufstellung des Zielsystems

Um einen logisch geschlossenen Überblick über komplexe Entscheidungssituationen zu gewinnen, muss ein klar definiertes Zielsystem aufgestellt werden [30]. Dieses ist in der Regel hierarchisch aufgebaut, d.h., Unterziele bzw. Teilziele werden einem gemeinsamen Oberziel untergeordnet [31]. Der sich ergebende Zielbaum muss dabei nicht symmetrisch sein [32].

Um ein klar geordnetes und gegliedertes Zielsystem aufzubauen und dem Entscheidungsträger dabei zu helfen, möglichst alle für die Entscheidungsding relevanten Ziele zu finden, kann die Ordnung der Ziele nach einer Reihe von Regeln sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Richtung vorgenommen werden.

#### a) Vertikale Zielordnung

Vertikale Zielordnung unterteilt das Zielsystem hierarchisch in Ober- und Unterziele. Dabei kommt zwischen Ober- und Unterzielen eine Zweck-Mittel-Beziehung vor. Ein Oberziel gilt dann als vollständig erreicht, wenn alle ihm untergeordneten Ziele erfüllt sind. Die systematische Analyse solcher Zweck-Mittel-Beziehung stellt das wirksamste Hilfsmittel zur Erfassung aller relevanten Ziele dar.

#### b) Horizontale Zielordnung

Die Ziele einer Hierarchiestufe müssen auf ein gemeinsames, direkt übergeordnetes Oberziel zurückzuführen sein, d.h., es müssen alle Teilziele gefunden werden, die zur Erfüllung ihres Oberziel beitragen. Durch dieses Ordnungskriterium sollen sich alle Aspekte eines Oberziels in den Unterzielen widerspiegeln. Weiterhin wird kontrolliert, dass „Unterziele derselben Zwecksetzung nicht mehrmals in das Zielsystem einbezogen werden“. [26]

---

Bei der Untersuchung in dieser Arbeit werden sowohl vertikaler als auch horizontaler Zielordnungsmerkmale verwendet.

### **Definition der Bewertungskriterien**

Nach der Aufstellung eines Zielsystems müssen die konkreten Kriterien bestimmt und in eine hierarchische Ordnung gebracht werden.

Die Kriterien in dieser Arbeit kommen hauptsächlich aus Literaturrecherchen und Diskussion mit der Experten von der GIZ. Die Auswahl der Entsprechenden Dimensionen und Kriterien wird in Kapitel 2.3.3 erläutern.

Bestimmung der Gewichtungsfaktoren

Es wird davon ausgehen, dass nicht alle Kriterien denselben Einfluss auf die Entscheidung haben. Der Beitrag zum Gesamtnutzen kann auch bei jedem Ziel unterschiedlich sein. Deshalb sollte Gewichtungsfaktoren eingeführt, die der unterschiedlichen Bedeutung der Teilziele tragen.

Zur Evaluation der Übertragbarkeit der Braunwasserbehandlung wird eine bestimmte vorgegebene Punktzahl zu jedem Kriterium verteilt. Die Summe der ermittelten Gewichtungsfaktoren (GWF) werden auf 100% normiert, sodass gilt:

$$\sum_{i=1}^n GWF_i = 100\%$$

Sukzessive Gewichtung

Bei der sukzessiven Gewichtung werden die Gewichtungsfaktoren zuerst direkt geschätzt, dann wird die Gültigkeit der einzelnen Schätzwerte oder der Teilsummen von Schätzwerten in mehreren Stufen durch die Zuordnung von Gleichheits- bzw. Ungleichheitsbedingungen überprüft und evtl. korrigiert. Die erstellte Präferenzordnung könnte dann folgendermaßen aussehen:

$$G_1 \geq G_2 = G_3 > G_4 \geq \dots \geq G_n$$

Als nächstes werden die Gewichtungsfaktor geschätzt, um danach für einzelne Zielkriterien oder Gruppen von Zielen Bedingungen festzulegen. Wie zum Beispiel :

- Ziel 1 ist wichtiger als Ziel 2;
- Ziel 1 und Ziele 2 zusammen sind wichtiger als die Ziele 3 und 4 zusammen;
- Ziel 1 ist weniger wichtig als die Ziele 3,4 und 5 zusammen;
- Ziel 4 ist genauso wichtig wie Ziel 5 usw.

Die jeweiligen Faktoren oder Summen von Faktoren werde miteinander vergleichen und, falls die Bedingungen nicht erfüllt sind, entsprechend korrigiert. Es muss darauf geachtet werden, dass die korrigierten Faktoren auch die vorliegenden Bedingungen erfüllen. Sonst können in den Bedingungen Widersprüche auftreten.

### **Feststellung der Alternative**

---

Nachdem die Gewichtungsfaktoren ermittelt und verteilt wurden, werden die Alternativen festgelegt, die zur Auswahl stehen sollen.

Da es sich bei der Braunwasserbehandlung durch die MBR-Technologie um eine neuartige Kombination von Abwasserteilstrom und Behandlungsverfahren im Rahmen eines Forschungsprojekts handelt, liegt kein unmittelbar vergleichbares Projekt vor, das in die Bewertung mit einbezogen werden könnte. Es gibt zurzeit nur Projekte, die eine Schwarzwasserbehandlung durch MBR untersuchen, weswegen in dieser Arbeit zwei Beispiele aus diesem Bereich zur Bewertung herangezogen werden, es handelt sich dabei die Projekte „Hohtälli“ in der Schweiz und Projekt „Kompelett“ von der TU Kaiserslautern.

### **Ermittlung der Zielerträge**

Da die Kriterien in der Regel zu unterschiedlichen Dimensionen gehören, müssen sie auf eine vergleichbare Skala umgerechnet werden. Anhand dieser Skalenwerte kann dann der Erfüllungsgrad der Alternative bezüglich der Kriterien abgelesen werden [30]. Dabei wird jedem Kriterium die jeweils passende Skala zugeordnet.

In der Arbeit werden die Nominalskala (bzw. Ja- oder Nein) und Kardinalskala benutzt.

Wenn das Kriterium einen positiven Einfluss hat, wird die Punkte wie folgend geben.

<b>Zielertrag</b>	<b>Nutzwert</b>
<b>Keine Angaben</b>	0
<b>Niedrig</b>	1
<b>Mittel</b>	5
<b>Hoch</b>	10

Im Gegensatz, wenn das Kriterium einen negativen Einfluss auf die Übertragbarkeit hat, werden „Niedrig“, „Mittel“, „Hoch“ jeweils Punkte 10, 5 oder -1 bekommen.

#### **Berechnung der Ergebnisse**

Am Ende werden die Nutzwerte der Alternativen berechnet. Die Berechnung wird in 3 Schritten durchgeführt.

##### **a) Bewertung der Alternativen**

Zunächst muss beurteilt und angegeben werden, wie gut oder schlecht jede Alternative die Kriterien erfüllt. Es erfordert detaillierte Informationen zu jeder Alternative, die durch Befragungen, Recherchen und Schätzungen oder konkrete Messungen bekommen.

##### **b) Berechnung von Teilnutzwerten**

Nachdem jedem Kriterium entsprechende Punkte nach Erfüllungswert (EFW) zugeordnet wurden, wird dieser Wert mit dem zum jeweiligen Kriterium gehörenden Gewichtungsfaktor (GWF) multipliziert, um seinen Teilnutzwert (TNW) zu errechnen. Durch die Summierung der Teilnutzwerte des Unterziels ist der Teilnutzwert des entsprechenden Oberziels festgelegt.

---

$$TNW(K_1, \dots, K_n) = \sum_{i=1}^n GWF_i \times EFW_i(K_i)$$

### c) Berechnung des Gesamtnutzwerts

Der Gesamtnutzwert einer Alternative wird dadurch ermittelt, dass alle Teilnutzwerte der obersten Hierarchiestufe summiert werden.

$$N_{alternative} = \sum_{i=1}^n TNW_{obersten}$$

Dieser Gesamtwert stellt das Ergebnis der Analyse dar. Jetzt können die Alternativen in eine Rangordnung gebracht werden, wobei der Alternative mit dem höchsten Nutzwert die höchste Rangzahl zugeordnet wird.

## 2.3.3 Auswahl und Gewichtung der Dimensionen und Kriterien

### Auswahl der Dimensionen

Dimensionen bilden die Oberstufen in der hierarchischen Zielordnung der Analyse und drücken deren quantitative Unterstufen aus. Die ausgewählten Dimensionen stellen die Ansichten dar, die in der Analyse des Globalzieles betrachtet werden.

Laut der „Sustainable Sanitation Alliance“ [33] sollten die folgenden Nachhaltigkeitskriterien berücksichtigt werden, wenn neue Sanitärsysteme entworfen oder bestehende verbessert werden:

1. Gesundheit und Hygiene
2. Umwelt und natürliche Ressourcen
3. Technologie und Betrieb
4. Finanziellen und ökonomische Kriterien
5. Soziokulturelle und institutionelle Kriterien

Im Hinblick auf die Anwendungsbereiche und die betrieblichen Bedingungen der Anlage werden die oben erwähnten Dimensionen „Umwelt und natürliche Ressourcen“ zusammen mit anderen Standortkriterien der Dimension „Umgebung des Betriebes“ zugeordnet. Die folgende Auflistung repräsentiert die modifizierte Liste der Dimensionen, die bei der Bewertung der Braunwasserbehandlung durch das MBR Verfahren angewendet werden;

1. Gesundheit und Hygiene
2. Finanzielle Kriterien
3. Technologie
4. Umgebung des Betriebes
5. Soziokulturelle Kriterien

## Auswahl der Kriterien und deren Gewichtung

Die Kriterien stehen in den untersten Stufen der Zielordnung. Es präsentiert die obere Dimension in verschiedene konkrete Hinsicht. Gemäß der Richtlinie von Foxon, et al. [34] sollte bei der Auswahl der Kriterien an folgenden Prinzipien festhalten werden:

- Die Verfügbarkeit der Kriterien muss bei allen Alternativen sichergestellt sein.
- Die Kriterien müssen zuverlässig nummeriert werden können und aus qualitativen Daten bestehen.
- Die Auswahl der Kriterien müssen genügend begründet werden und durch die Stakeholders identifiziert, verstanden und weiterhin ergänzt werden können.

Die in der NWA aufgelisteten und angewendeten Kriterien (Tabelle 13) wurden durch Hinweise aus Literaturrecherche, halbstrukturierten Interview mit Experten und Ergebnisse aus der Wirtschaftlichkeitsanalyse der Haus 1 der GIZ ausgewählt und gewichtet.

Tabelle 13: Kriterien zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit (von Yue Wu)

G	Gesundheit und Hygiene	6%	
G1	Qualität des Permeat	0	nicht berücksichtigt
G2	Gesetzliche Anforderungen an Betriebswasser	6	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0
F	Finanzielle Kriterien	38%	
F2	Direkt Finanzierung von Seiten der Regierung	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0
F1	Indirekt Anreize durch den Betrieb von Braunwasserbehandlung	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0
F3	Investitionskosten ( Anlage, Leitungssystem )	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10
F4	Betriebskosten (Wartung/Unterhalt)	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10
F5	Strompreis	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10
F6	Trinkwasserpreis	7	Hoch oder Subventioniert = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1
F7	Abwasserpreis	7	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1
F8	Grundstückpreis	3	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1
T	Technologie	0%	
T1	Jährliche Wartung	0	nicht berücksichtigt
T2	Stabilität der Operation und Qualität des Permeats	0	nicht berücksichtigt
T3	Ausfälle	0	nicht berücksichtigt
U	Umgebung des Betriebes	41%	
U1	Wasserknappheit	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10,

U3	Anzahl der Bewohner	8	Groß (> 100 Personen) = 10, Mittel (10 - 100 Personen) = 5, Klein = 1 (< 10 Personen)
U4	Anschluss an Kanalisation	8	Vorhanden = 0, Kein = 10
U5	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
U6	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
U7	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
U8	Akkumulation der Braunwasser	0	nicht berücksichtigt
S	Soziokulturelle Kriterien	15%	
S1	Akzeptanz bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Braunwassers	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
S3	Ökologisches Bewusstsein	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
S4	Pioniergeist	3	Ja = 10, Nein = 0
S2	Akzeptanz bezüglich der Nutzung der menschlichen Exkremente als Dünger	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,
S5	Pädagogische Maßnahmen von der Regierung	0	nicht berücksichtigt

---

## Gesundheit und Hygiene

Der Kontakt mit Krankheitskeimen kann die Gesundheit des Menschen gefährden. Das Hauptziel von Sanitärversorgung ist Schutz und Förderung menschlicher Gesundheit durch den Einsatz von bestimmten Systemen oder Techniken [33]. Deshalb spielt der Aspekt der Hygiene eine wichtige Rolle bei der Implementierung einer neuen Technik. Die Qualität des Permeats drückt direkt die Leistung der Braunwasserbehandlung im Bezug auf Hygiene aus. Aufgrund effektiven Reinigungsleistung des Abwassers stellt die MBR Technologie hier aber bereits die maximale zu vergebende Punktzahl dar. Aus diesem Grund wird für **Qualität des Permeat (G1)** hier keine Gewichtung vergeben und nicht mit in die Gesamtbewertung einbezogen. Es ist lediglich mitzuberücksichtigen, dass bei einer Weiterverwendung als Betriebswasser gesetzliche Anforderungen von der Regierung aufgestellt sollten, um die Gesundheit der Nutzer sicherzustellen. **Gesetzliche Anforderungen an Betriebswasser (G2)** werden deshalb zu 6% mit in die Betrachtung einbezogen.

## Finanzielle Kriterien

Die Wirtschaftlichkeit einer neuen Technologie hat immer starke Auswirkungen im Bezug auf ihre Übertragbarkeit. Diese Gruppe von Kriterien bildet die Gruppe mit der zweitgrößten Wichtigkeit, Es werden 38% vergeben. Bei finanziellen Betrachtung wirken Investitionskosten, Betriebskosten, Frischwasserpreis, Abwasserpreis, Grundstückpreis, Strompreis zusammen. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass durch den Betrieb einer MBR Anlage zur Braunwasserbehandlung direkte- oder indirekte finanziell Anreize bestehen. Je höher der Frisch- und Abwasserpreis, oder der Grundstückpreis, desto stärker sind bspw. Die indirekten finanziellen Anreize eine Braunwasserbehandlung mittels MBR Verfahren durchzuführen. Je niedriger die Investitions- und Betriebskosten oder der Strompreis, desto stärker bewegt sich die Übertragbarkeit in positive Richtung. Basierend auf den Ergebnissen der Wirtschaftlichkeitsberechnung und der Einschätzung der Experten wird die Gewichtung folgendermaßen verteilt:

**Direkt Finanzierung von der Regierung an die Anlage (F1)** ist mit 4% gewichtet. Die Direkt Finanzierung kann z.B. Zuschuss beim Ankauf der Anlage sein.

**Indirekt Anreize am Betrieb von Braunwasserbehandlung (F2)** ist mit 4% gewichtet. Der indirekte Anreiz kann durch Steuervergünstigung oder Minimierung der Frisch – und Abwassergebühren erfolgen.

**Investitionskosten (F3)** ist mit 4% gewichtet. Die Investitionskosten beinhalten die Kosten der Anlage, die Kosten der entsprechenden Grundstücke, die Kosten des Baus der Rohrleitung und andere einmalige Kosten für die Installation.

**Betriebskosten (F4)** ist mit 4% gewichtet. Die Betriebskosten beinhalten die alle Kosten, die für einen stabilen und dauerhaften Betrieb der Anlage notwendig sind, z.B. die Energie- und Wartungskosten, Ersatz der Verschleißteile. Die Energiekosten nehmen dabei den größten Teil ein.

**Strompreis (F5), Frischwasserpreis (F6) und Abwasserpreis (F7)** sind die drei wichtigsten Kriterien, die grundsätzlich die Betriebskosten und Wasserkosten, bzw. Einsparungskosten beeinflussen. Je höher der Frisch- und Abwasserpreises und je niedriger der Strompreise,

---

desto schneller ist die Gewinnschwelle des Systems überschritten. Deshalb sind die drei Kriterien mit jeweils 5%, 7%, 7% höher als die anderen in diese Gruppe gewichtet.

**Grundstückpreis (F8)** ist mit 3% gewichtet. Bei der Installation der Braunwasserbehandlungsanlagen im urbanen Raum müssen die Investitionskosten des Grundstücks berücksichtigt werden. Die Investitionskosten für das Grundstück ist abhängig von dem Flächenbedarf der Behandlungstechnik und dem Grundstückspreis. Wegen des sehr geringen Flächenbedarfs der MBR Technologie ist hier dem Grundstückspreis nur eine untergeordnete Position zugeordnet.

## Technologie

Weil diese Nutzwertanalyse insgesamt auf der MBR Technologie basiert und nur ein Vergleich von prinzipiell gleichen Anlagen miteinander erfolgen würde, sind die technischen Kriterien hiermit nicht notwendig zu evaluieren und gehen nicht in die Bewertung ein. Die drei Kriterien sind **Jährliche Wartung (T1)**, **Stabilität der Operation und Qualität des Permeats (T2)** und **Ausfälle (T3)**.

## Umgebung des Betriebes

Unter der Dimension „Umgebung des Betriebs“ sind die Eigenschaften der möglichen Standorte zusammengestellt. Sie bildet die wichtigste Dimension und beinhalten 8 verschiedene Kriterien mit einer Gesamtgewichtung von 41%.

**Wasserknappheit (U1)** ist das wichtigste aller einzelnen Kriterien in der Tabelle 10 mit einer Gewichtung von 12%. Es ist leicht nachvollziehbar, dass in wasserarmen Regionen das Bedarf und wassersparenden Technologien sehr groß ist, besonders in urbanen Räumen in diesen Ländern. Die Wasserknappheit bedeutet hier sowohl physikalische Wasserknappheit, was bedeutet, dass nicht genug Wasser vorhanden ist, als auch ökonomische Wasserknappheit: Hierbei geht um den Mangel an ökonomischen Ressourcen, die eine Nutzung des unter Umständen ausreichend vorhandenen Wassers bezeichnet [34].

**Frischwasserqualität (U2)** ist mit 5% gewichtet. In Regionen, in denen aufgrund von industrieller Verschmutzung oder Mangel an Abwasserbehandlung, eine schlechte Frischwasserqualität existiert, sollte der Schutz von Frischwasserressourcen Vorrang haben, um die anschließende Erzeugung von und Nutzung als Trinkwasser zu ermöglichen. Da in konventionellen Sanitärsystemen die Spülung von Toiletten Frischwasser verbraucht, wird somit ein schwerwiegender Beitrag zur Verknappung der Frischwasserressourcen geleistet. Durch die Implementierung von Braunwasserbehandlung kann der Verbrauch von Frischwasser verringert werden. Kriterium U2 beeinflusst daher eine Entscheidung für eine Braunwasserbehandlung mittels MBR auf positive Weise.

Das Kriterium **Anzahl der Bewohner im Gebäude (U3)** ist hier mit 8% gewichtet. Die Anzahl der Bewohner ist für die Entscheidung zur Implementierung wichtig, weil durch die Anzahl der Benutzer in dem Gebäude die Menge des Braunwassers Abschätzt werden kann. Je größer die Braunwassermenge, desto größer die Frischwassereinsparung.

**Anschluss an Kanalisation (U4)** spielt auch eine wichtige Rolle bei Entscheidung der Implementierung. Man geht hier davon aus, dass alle entstehenden Abwässer behandelt

---

werden müssen. Wenn das Gebäude keinen Anschluss an Kanalisation aufweisen, muss man in der Regel entweder dezentrale Behandlungsanlage benutzen oder das Abwasser im Tank speichern und dann zu Kläranlage transportieren, welches sehr aufwendig ist. weshalb U4 mit 8% gewichtet ist.

**Besiedlungsdichte (U5)** und **Urbanisierungsgrad (U6)** sind beide mit 2% gewichtet. Mit zunehmender Besiedlungsdichte und hohen Urbanisierungsgrad. Steigt auch die Vulnerabilität der Bevölkerung und des Ökosystems gegenüber Umweltverschmutzung durch Abwasser. Da in urbanen, dicht besiedelten Gebieten der Grundstückspreis zudem höher ist, stellt die Abwasserbehandlung mittels platzsparender MBR Technologie eine sinnvolle und effiziente Behandlungsmethode dar.

**Nährstoffbedarf (U7)** ist mit 4% gewichtet. Da nicht nur Wasser, sondern auch Nährstoffe aus dem Abwasser zurück gewonnen werden können. Der durch Braunwasserbehandlung von MBRs erzeugte Überschussschlamm kann nach weiterer Aufbereitung als Dünger auf Ackerland genutzt werden und so die Bodenqualität verbessern. Dies kann ebenso in gewissem Ausmaß den Verbrauch von synthetischem Dünger reduzieren. Die Verfügbarkeit von synthetischem Dünger ist jedoch auch in näherer Zukunft gesichert [36], sodass das Kriterium des Nährstoffbedarfs einer Region als weniger wichtig im Bezug auf die Entscheidung für eine Braunwasserbehandlung durch MBRs bewertet werden kann.

**Akkumulation des Braunwassers (U8)** ist mit 0% gewichtet, weil das Braunwasser nur eine Quelle hat. Die Akkumulation von verschiedenen Quellen, wie bei Grauwasser hat hier keine Bedeutung.

### **Soziokulturelle Kriterien**

5 Kriterien werden unter „Soziokulturelle Kriterien“ aufgeführt. Außer ökonomischen und geografischen Faktoren sind weiterhin soziale und kulturelle Faktoren von Bedeutung. hier werden insgesamt 15% vergeben.

**Akzeptanz bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Braunwassers (S1)** und **Akzeptanz bezüglich der Nutzung der Menschlichen Exkrement als Dünger (S4)** basieren auf der Annahme, dass es Region gibt, wo den Einwohnern aus religiösen oder kulturellen Gründen die Wiederverwertung von gereinigtem Braunwasser oder Nutzung der menschlichen Exkremente als Dünger nicht erlaubt ist oder wo große Barrieren diesbezüglich bestehen. Eine extrem niedrige Akzeptanz erschwert dort eine Implementierung einer MBR Anlage. Nach Sieghart [38] ist es sehr oft in muslimische Länder, dass aufbereitete Grauwasser nur zur landwirtschaftlichen Nutzung angewendet werden kann. Aus diesem Grund sind **S1** und **S4** mit 4% gewichtet. Die Bewertung wird nach der Anwendungsmöglichkeit des Betriebswassers klassifiziert.

**ökologisches Bewusstsein (S2)** ist mit 4% gewichtet. Als ökologisches Bewusstsein bezeichnet man die Erkenntnis eines Menschen, dass eine Sache ökologisch sinnvoll ist. Bei der Übertragung der Braunwasserbehandlung durch MBR beeinflusst das Niveau des ökologischen Bewusstseins in-wie-fern die Unternehmen oder Bewohner dieses neue System akzeptieren können und fördern, auch wenn es sie nicht unbedingt davon profitieren. Je höher

---

das ökologische Bewusstsein der Region, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit ein Braunwasserbehandlungssystem durch MBR dort zu implementiert.

Der **Pioniergeist (S3)** ist mit 4% gewichtet. Er wird hier so definiert, dass wenn das Projekt in seine Region oder Land Pionierarbeit leistet, hat es dann Pioniergeist. Der Pioniergeist geht in der Richtung ökologischen Bewusstseins. Das Projekt lässt sich interessant sein und erleicht das Projekt die Unterstützung zu erringen.

**Pädagogische Maßnahmen der Regierung (S4)** sind hier mitberücksichtigt, weil es Länder in der Welt gibt, z.B. China, in dem der Bau der Infrastruktur in großem Ausmaß von der Regierung koordiniert wird. Aber dies ist kein allgemeiner Fall, deshalb ist dieses Kriterium mit 0% gewichtet.

### **Verbindliche Voraussetzungen für die Anwendung der Braunwasserbehandlung durch MBRs**

Folgende Bedingungen(Tabelle 14) schaffen die Grundlage für die Installation und Anwendung der Braunwasserbehandlung durch MBR. Für die Bewertung der internationalen Übertragbarkeit mit Nutzwertanalyse müssen folgende Voraussetzungen erfüllt werden, da ansonsten die Implementierung der Anlage wenig sinnvoll ist.

Tabelle 14: Verbindliche Voraussetzungen (von Yue .W)

V	Verbindliche Voraussetzungen zur Installation der Braunwasserbehandlung durch MBR
V1	Verwertung des aufbereiteten Braunwassers
V2	Erfassung von Braunwasserteilstrom durch No-Mix Toilette
V3	Sichere Energieversorgung
V4	Temperatur des Belebungsbeckens > 12°C
V5	Ausgebildetes Personal für Wartung und Betrieb

Die **Verwertung des aufbereiteten Braunwassers (V1)** und **Erfassung von Braunwasserteilstrom durch No-Mix Toilette (V2)** bilden die Voraussetzungen für die Braunwasserbehandlung.

**Sichere Energieversorgung (V3)** und **Temperatur des Belebungsbeckens > 12°C (V4)** sind die zwei grundlegende technische Bedingungen für den Betrieb der Anlage. Zum einen, weil jede Komponente dieser Anlage mit Strom benötigt, ist ein Betrieb der Anlage ohne Strom nicht möglich. Zum anderen sollte die Temperatur des Belebungschlammes 12°C nicht unterschreiten [22], um ein Überleben der Mikroorganismen im Belebtschlamm nicht zu gefährden.

Weil MBR ein stark technisiertes Verfahren ist, können seine Installation-, Operation- und Wartungsarbeiten nur von **Ausgebildetes Personal für Wartung und Betrieb (V5)** durchgeführt werden. Die Stabilität der Operation und Qualität des Permeats kann sonst nicht gewährleistet werden.

---

Die gesamt Matrix der Nutzwertanalyse zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit ist in Tabelle 15 dargestellt. Die Auswahl der Kriterien und ihre Gewichtung wurde in Abstimmung mit Frau Dr.-Ing. Martina Winker(GIZ,Eschborn) und Herrn Enno Schröder(GIZ,Eschborn) vom SANIRESCH Projekt entwickelt.

Tabelle 15: Matrix der Nutzwertanalyse (Yue. W)

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 100.00%	Bewertungsskala	Projekt	
				Zielertrag	Wert
<b>G</b>	<b>Gesundheit und Hygiene</b>	6%			0
G1	Qualität des Permeat	0	nicht berücksichtigt		
G2	Gesetzliche Anforderungen an Brauchwasser	6	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0		0
<b>F</b>	<b>Finanzielle Kriterien</b>	38%			0
F1	Direkt Finanzierung von der Regierung an die Anlage	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0		0
F2	Indirekt Anreize an Betrib von Braunwasserbehandlung	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0		0
F3	Investitionskosten ( Anlage, Leitungssystem )	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10,		0
F4	Betriebskosten (Wartung/Unterhalt)	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10,		0
F5	Strompreis	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10,		0
F6	Frischwasserpreis	7	Hoch oder Subventioniert = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
F7	Abwasserpreis	7	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
F8	Grundstückpreis	3	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
<b>T</b>	<b>Technologie</b>	0%			0
T1	Jährliche Wartung	0	nicht berücksichtigt		
T2	Stabilität der Operation und Qualität der Permeat	0	nicht berücksichtigt		
T3	Ausfälle	0	nicht berücksichtigt		
<b>U</b>	<b>Umgebung des Betribes</b>	41.00%			0
U1	Wasserknappheit	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
U2	Frischwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10		0
U3	Anzahl der Bewohner	8	Groß (> 100 persons) = 10, Mittel (10 - 100 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)		0
U4	Anschluss an Kanalisation	8	Vorhanden = 0, Kein = 10		0
U5	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
U6	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
U7	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
U8	Akkumulation der Braunwasser	0	nicht berücksichtigt		
<b>S</b>	<b>Soyokulturelle Kriterien</b>	15.00%			0
S1	Akzeptanze bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Braunwassers	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0		0
S2	Ökologische Bewusstsein	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0		0
S3	Pioniergeist	3	Ja = 10, Nein = 0		0
S4	Akzeptanze bezüglich der Nutzung der Menschlichen Exkrement als Dünger	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		0
S5	Pädagogische Maßnahmen der Regiung	0	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0		0
			Summenwert (%)	0	
			Rang	0	

---

### 2.3.4 Interviewleitfaden für Experteninterview mit Chinesischen Experten

Die gegebene Gewichtung der Kriterien in NWA drücke die Überlegungen und Beachtungen der Entscheidungsträger aus. Die Meinung des Stakeholders spielt immer wichtige Rolle in die Übertragung eines ganzen neuen Systems. Ein Interview oder Befragung nach lokalen Experten ist häufig benutzt.

China ist eine der größten Schwellenländer der Welt. Die raschen Entwicklungen von Wirtschaft und Urbanisierung führen auch zu Anforderungen an Infrastrukturen, inkl. Sanitärsystem in urbanen Räumen. Die nördlichen China leiden zurzeit an schwere Wasserknappheit. Die chinesischen Forscher suchen auch Lösungen dafür in Hinblick auf die hohe Besiedlungsdichte, geringe verfügbare Flächen und unzureichend Kläranlage. Deswegen lässt es ein Interview nach chinesischen Experten sinnvoll.

Um die Meinungen der Anwendung der Braunwasserbehandlung mittels MBR in China zu sammeln. Der Research Professor Herr. Meixin Yang von „Städtische Verwaltung des Ozeans Chinas“ wurde eingeladen. Er ist ein Experte im Bereich Gewässerschutz, Wassermanagement und Ökologie. Eine kurze Einführung der Braunwasserbehandlungsanlage und die oben entwickelte Tabelle von NWA (Tabelle 15) wurden per Email zu Herrn. Xinmei Yang gesendet. Er hat die Tabelle zu 7 seine Kollege weitergeleitet und ausgefüllt. 3 Tage später hat er die Ergebnisse (insgesamt 8 Befragten) zurückgesendet.

Aber wurde solche Interviews oft abgelehnt oder infolge von eine zu viel oder komplizierte Fragen keine Antworten erhalten. Die Gewichtung wurde aus diesem Grund vereinfacht, statt die konkret Gewichtung in Form von Zahlen zu geben wird die Gewichtung mit folgender Skala (Tabelle 16) von Bedeutung übernommen:

Tabelle 16: Bewertungsskala für das Interview

Skalenwert	Bedeutung
1	Keine Bedeutung
2	Geringe Bedeutung
3	Große Bedeutung
4	Dominierende Bedeutung

Die Gewichtung von chinesischen Experten wurde dann zu Zahlen umgerechnet, indem das Ergebnis vergleichbar wird. Die Berechnung liegt in Anhang (6.7). Die Gewichtung des einzelnen Kriteriums wurde dadurch ausgerechnet, dass 100% durch die gesamten Werte alle Dimensionen dividierte und dann mit die Werte des Kriteriums multiplizierte. Außerdem, die Standardabweichungen des Kriteriums wurden auch berechnet, um die Abweichungen zwischen die chinesischen Experten zu beobachten.

---

## 2.4 Methode zur Identifizierung von Globalen Hotspots

Wie bereits erwähnt wird die Nutzwertanalyse in dieser Arbeit zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit angewendet. Das gleiche Verfahren kann aber ebenso genutzt werden, um globale Hotspots für die Anwendung der betreffenden Technologie, hier der Behandlung von Braunwasser durch einen MBR zu identifizieren. Im Gegensatz zur NWA werden bei der Identifizierung der Hotspots allerdings nur Kriterien mit in die Betrachtung einbezogen, die eine räumlich aggregierte Darstellung erlauben.

Die ausgewählten Kriterien werden in Tabelle 17 zusammengestellt.

Tabelle 17: Kriterien zur Identifizierung der globalen Hotspots (von Yue. W)

U	Umgebung des Betriebes	25%
U1	Wasserknappheit	12
U2	Trinkwasserqualität	5
U3	Anzahl der Bewohner	0
U4	Anschluss an Kanalisation	0
U5	Besiedlungsdichte	2
U6	Urbanisierungsgrad	2
U7	Nährstoffbedarf	4
U8	Akkumulation der Braunwasser	0

### Wasserknappheit (physikalisch) (U1)

Das Wasser in der Erde ist ungleich verteilt. Als Mass der Wasserverfügbarkeit verwendet man oft die jährliche erneuerbare Wassermenge pro Kopf. Nach der Angabe von EAWAG [38] steht die Wasserverfügbarkeit in der Schweiz im Jahr 1990  $6520\text{m}^3$  pro Kopf, während  $770\text{m}^3$  in Algerien und  $160\text{m}^3$  in Saudi-Arabien. In Länder mit dem Wert unter  $1700\text{m}^3$  herrscht bereits Wasserknappheit gemäß Falkenmark und Widstrand [39]. Unter  $1000\text{m}^3$  besteht eigentlicher Wassermangel. Wenn der Wert unter  $500\text{m}^3$  liegt, wird dieses Land als extremen Wassermangel bezeichnet.

Für die Identifizierung der globalen Hot-Spots werden nur Länder betrachtet in denen physikalische Wasserknappheit herrscht. Da die Länder, in denen ökonomische Wasserknappheit herrscht, normalerweise zu den ärmsten Regionen der Welt. Gezählt werden, sodass hier die Anwendung des MBR Verfahrens ohnehin nicht in Frage kommen würde.

Hoch: Physikalische Wasserknappheit vorhanden in den meisten Gebieten des Landes = 10

Mittel: Annäherung an Wasserknappheit vorhanden in den meisten Gebieten des Landes = 5

Niedrig: Wenig bis kein Wasserknappheit vorhanden in den meisten Gebieten des Landes = 1

---

### **Frischwasserqualität (U2)**

Der Environmental Performance Index 2010 (EPI) wird zur Bewertung der ökologischen Qualität eines Landes angewendet [40]. 163 Länder werden gemäß 25 Indikatoren klassifiziert. Frischwasserqualität (WQI) ist einer von ihnen und wird gemäß 5 Parametern (Gelösten Sauerstoff; elektrische Leitfähigkeit; pH – Wert; Gesamt Phosphor; Gesamt Stickstoff) bewertet. Das Ergebnis jedes Landes wird in eine Zahl von 0 bis 100 umgerechnet. Je höher die Zahl, desto besser ist die Wasserqualität in dem Land. In der NWA wird die folgende Gewichtung der Frischwasserqualität vergeben:

Hoch: Wert der WQI  $0 - 33 = 10$

Mittel: Wert der WQI  $34 - 66 = 5$

Niedrig: Wert der WQI  $67 - 100 = 1$

### **Besiedlungsdichte (U4)**

Die Besiedlungsdichte ist eine bereinigte Form der Bevölkerungsdichte. Die Wohnbevölkerung eines Raumes wird dabei nur auf die theoretisch besiedelbare Fläche bezogen. Die Besiedlungsdichte ist wichtig bei Betrachtung von Ländern, in denen große Teile nicht besiedelbar sind.

Folgende Bewertungsskala wird bei der NWA gemäß der Anzahl der Einwohner pro  $\text{Km}^2$  vergeben.

Hoch: Besiedlungsdicht  $> 800 \text{ E/ Km}^2 = 10$

Mittel: Besiedlungsdicht  $250 - 800 \text{ E/ Km}^2 = 5$

Niedrig: Besiedlungsdicht  $< 250 \text{ E/ Km}^2 = 1$

### **Urbanisierungsgrad (U6)**

Die Urbanisationsgrad präsentiert die Proportion der städtischen Bevölkerung in der gesamt Bevölkerung eines Landes. Je höher der Urbanisierungsrate eines Landes, umso höher Nutzwert ihm vergeben.

Hoch: Urbanisierungsrate  $67 - 100\% = 10$

Mittel: Urbanisierungsrate  $34 - 66\% = 5$

Niedrig: Urbanisierungsrate  $0 - 33\% = 1$

### **Nährstoffbedarf (U7)**

Nach einer Untersuchung von FAO [36] wird der Bedarf der synthetischen Dünger in den nächsten 4 Jahren weiter steigen. Die Steigerungsrate ist je nach Regionen der Welt unterschiedlich. Der Nutzwert wird nach die Steigerungsrate der Gesamt synthetischen Dünger ( $\text{N} + \text{P}_2\text{O}_5 + \text{K}_2\text{O}$ ) vergeben

Hoch: Steigerungsrate  $> 3\% = 10$

Mittel: Steigerungsrate  $2 - 3\% = 5$

Niedrig: Steigerungsrate  $< 2\% = 1$

Die komplette Matrix zur Identifizierung der globalen Hotspots ist in Tabelle 18 dargestellt. auffällig ist es, dass die Wasserknappheit 12% von 25% einnimmt. Die physikalische Wasserknappheit besteht die dominiert Faktor zur Installation der Braunwasserbehandlung mittels MBRs.

Tabelle 18: Matrix der NWA zur Identifizierung der globalen Hotspots (von Yue. W)

Dimensionen und Kriterien		Gewichtung $\Sigma = 25.00\%$	Bewertungsskala	Land/Region	
				Zielertrag	Wert
U	Umgebung des Betriebs	25.00%			
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1		
U2	Frischwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10,		
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,		
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,		
U5	Urbanisationsgrad	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1,		
			Summerwert (%)		
			Rang		

## 2.5 Methode zur vorläufigen Kostenabschätzung

Das Ziel der Kostenabschätzung in dieser Arbeit ist nur die Überschlägerung zu geben, um die Nutzung der NWA zu unterstützen. Die Kostenabschätzung wird hier die Investitionskosten und Betriebskosten einzubeziehen. Unter Investitionskosten versteht man alle Kosten für Aggregat, Grundstück, Umbau der Rohrleitung zusammengesetzt. Die den Betriebskosten beinhalten Strom- und Wartungskosten. Es lässt sich die repräsentative Investitions- und Betriebskosten der noch zu optimierende Pilotanlagen schwer zu bestimmen, weil die Daten nicht ausreichend sind sowohl die Einführung und Implementierung solcher neuen Technologien eine Änderung der bestehenden Infrastruktur(separate Rohrleitung) verlangen, wozu zusätzliche Investition erforderlich sind. Außerdem muss man auch die Auswirkung auf Allgemeinheit und Umwelt bei Einsatz des neuen Systems berücksichtigen. Die monetären Vorteile, die sich durch die Einsparung von Frischwasser ergeben, können in monetärer Form ausgedrückt werden.

Das grundsätzliche Prinzip der Einsparung von Frischwasser lässt sich relativ einfach in Abbildung 21 dargestellt.

In konventionellen Sanitärsystemen, wird für die Toilettenspülung Frischwasser verbraucht. Das erzeugte Abwasser wird zur Kanalisation und anschließende einer Kläranlage zugeführt, Es entstehen also sowohl Kosten für Frischwasser und es müssen Gebühren für Abwasser eintrichert werden.

Da das behandelte Betriebswasser beim SANIRESCH Projekt als Spülwasser verwendet werden kann, fallen keine Kosten für Frischwasserversorgung und Abwasserentsorgung an, sofern die Behandlungskapazität 100% des anfallenden Braunwasser decken kann.

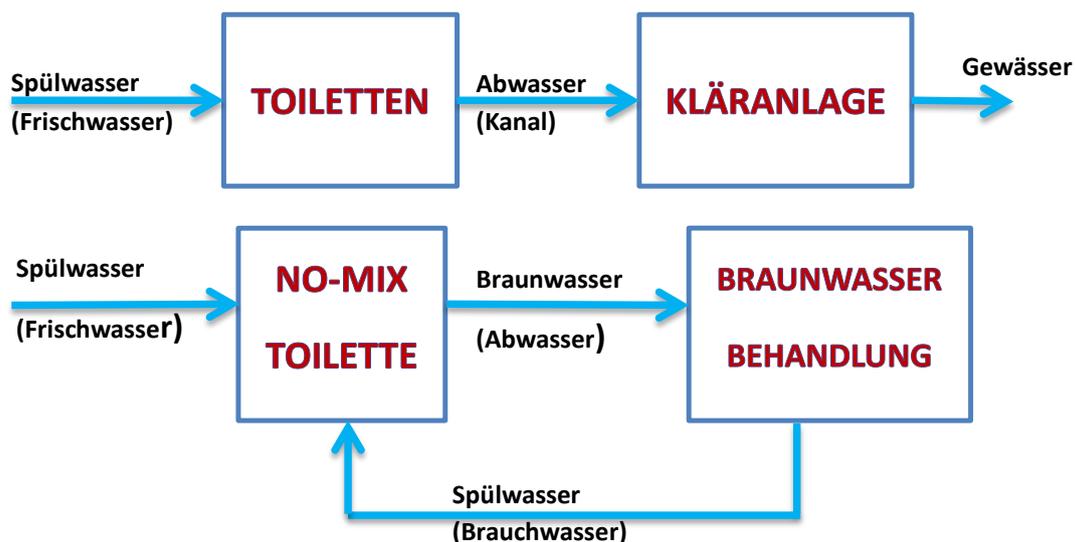


Abbildung 21 Frischwassereinsparung durch Anwendung des MBRs (Yue. W)

Da zur Zeit No-Mix Toiletten nur in dem zentralen Teil des Gebäudes eingebaut werden (Abbildung 14), ist die genaue Menge des Braunwassers in Haus schwer erfassbar. In dieser Arbeit lässt sich die gesamte Braunwassermenge für Haus 1 auf zwei Arten fiktiv abschätzen

---

Zum einen, der in Tabelle 8 angezeigte Anzahl der Toiletten in Haus 1 werden mit dem Durchsatz des No-Mix Toiletten nach dem Messwert des tägliche anfallende Braunwasser multipliziert.

Zum anderen, die Wassermenge werden durch die Anzahl der Mitarbeiter in Haus 1 berechnet. Diese Berechnung basiert auf die Annahme, dass Jeder Mitarbeiter in dem Tag einmal Stuhlgang geht. Dadurch kann man den Verbrauch des Spülwassers sowie Braunwasser berechnet.

Um Sicherheit der weiteren Kostenberechnung zu gewährleisten wird der höhere Wert der beiden Ergebnisse aufnehmen.

Weiterhin wird die jährliche einsparende Wasserkosten dadurch berechnet, dass der 100% mittels MBR behandelte und wiedernutzte Wassermenge pro Jahr mit lokale Frisch- und Abwasserentgelte multipliziert und dann minus die laufenden Kosten.

## 3. Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Analyse des Betriebs der MBR-Anlage in Haus 1 der GIZ

Durch die Gegenüberstellung der Verfahren zur Braunwasserbehandlung in Kapitel 2.1.5 wird die MBR Technologie als effektivsten Verfahren herausgearbeitet. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse des Betriebs von MBR dargestellt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die in Haus 1 der GIZ installierten MBR- Anlage dauerhaft betrieben, als auch die Reinigungsleistung als effektiv eingestuft werden kann.

#### 3.1.1 Hydraulische Leistungsfähigkeit der MBR- Anlage in Haus 1 der GIZ

Wie in Kapitel 2.1.6 erläutert, die Permeabilität beschreibt die hydraulische Leistungsfähigkeit der MBR Anlage. In Abbildung 21 ist es zu erkennen, dass der Flux in die ersten 40 Betriebstage immer gestiegen hat. Der größten Flux trat an dem 32 Tag seit der Inbetriebnahme mit ca.  $14 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  auf. Aufgrund der Verringerung des ankommendes Braunwassers hat der Flux seit 40 Tage des Betriebs auf  $6 - 8 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  abgenommen. Dementsprechende Permeabilität ist auf  $120 - 160 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$  gesunken. Die beiden Linien verlaufen weitgehend parallel. Als Hauptaussage lässt sich festhalten, dass in die erst 3 Monate des Betriebs kein wesentlicher Filtrationswiderstand aufgetreten ist. Die MBR-Anlage hat eine sehr gute hydraulische Leistungsfähigkeit und Stabilität.

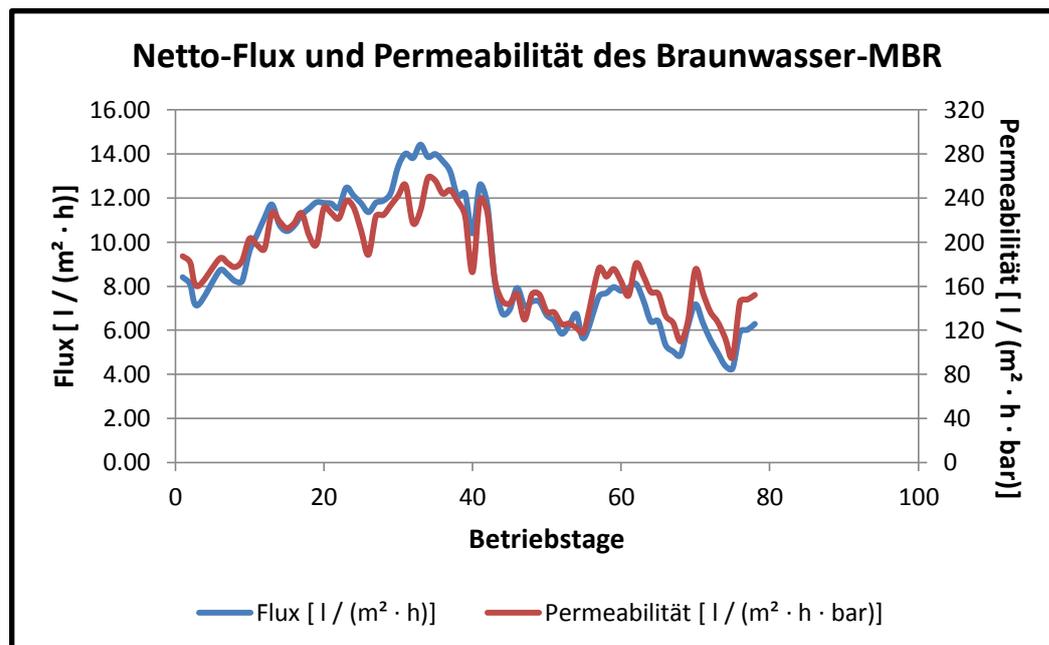


Abbildung 22 Betriebsparameter der Braunwasser-MBR [23]

### 3.1.2 Reinigungsleistung

Die Untersuchung der Wasserqualität ergibt sich die durchschnittlich Konzentration im Zulauf von CSB, TN<sub>b</sub>, P<sub>ges</sub> jeweils 725 mg/l, 57 mg/l ,21.3 mg/l. In vorhandene Literatur gibt es keinen vergleichbaren Wert. Aber der entsprechende Nährstoffverhältnis C: N = 100: 7,9 steht annähernd mit dem literarischen Wert 10: 1 [5].

Bei dem Abbau von Nährstoff hat MBR-Anlage sehr gut erzielt. Die Konzentration von CSB im Permeat wird um 97.1% reduziert. Die Abbaugrad von NH<sub>4</sub>-N und P<sub>ges</sub> sind 99.6% und 45.5. Die Ursache für einen angestiegenen Wert der TN<sub>b</sub> ist die durch Biomassenzerfall entstehenden Ammoniums auch nitrifiziert und zu Nitrat umgewandelt werden.

Tabelle 19: Analyseergebnisse der Reinigungsleistung [23]

	Zulauf								
	CSB [ mg/l ]	TN <sub>b</sub> [ mg/l ]	P <sub>ges</sub> [ mg/l ]	pH [ - ]	T [ °C ]	Lf [ μS/cm ]	O <sub>2</sub> [ mg/l ]	AFS / TS [ g/l ]	GV [ % ]
∅	725	57,0	21,3	8,5	21,7	1663	1,7	0,348	93,0
min	270	13,4	7,9	7,7	20,7	687	0,3	0,179	90,4
max	1642	82,2	34,4	8,7	23,2	2440	3,2	0,560	95,4
	Biologie								
∅	-	-	-	7,9	22,1	1694	6,4	5,6	65,6
min	-	-	-	7,5	21,4	1229	3,0	4,5	59,7
max	-	-	-	8,4	23,3	2610	8,9	6,8	68,9
	Permeat								
∅	21,0	62,8	11,6	8,0	22,4	1713	8,3	-	-
min	13,8	24,9	5,2	7,6	21,9	1241	7,5	-	-
max	30,5	80,6	20,5	8,3	23,0	2640	8,7	-	-
Nährstoffverhältnis:				<b>C : N : P = 100 : 7,9 : 2,9</b>					
CSB-Abbaugrad:				<b>97,1 %</b>					

Tabelle 20 zusammenstellt den Vergleich den Parametern der Permeat von MBR-Anlage mit der gesetzlichen Anforderung von Betriebswasser in Kapitel 2.1.4. Außer der Konzentration von CSB und 3 nicht gemessene Parameter erfüllt der Permeat die meisten Anforderungen weltweit. Aber als eine der wichtigsten Parameter bezüglich der Wasserqualität muss technische Optimierung an der Eliminierung von CSB weiter durchgesetzt werden.

Tabelle 20 Vergleich der Permatqualität in Eschborn mit gesetzlichen Anforderungen an Betriebswasser [23]

Parameter	Saniresch	Deutschland	Japan	USA	Kanada BC :	Australia	China:
C <sub>BSS</sub>	21 mg/l	< 5 mg/l	-	< 10 mg/l	≤ 10 mg/l	≤ 20 mg/l	≤ 10 mg/l
X <sub>TS</sub>	0	Nahezu schwebst-offfrei			≤ 5 mg/l	≤ 30 mg/l	≤ 15 mg/l
Sauerstoff-sättigung	8,3 mg/l 100%	> 50%	-	-	-	-	≥ 1 mg/l
Ges.-Coliforme	1/100 ml	< 100/ml	≤ 10 /ml				≤ 3/l
Fäkalcoliforme	< 1/100 ml	< 10/ml					
E. coli	0/100 ml	-	-	-	-	10/100 ml	-
Clostridium perfringens	Nicht gemessen	< 1/ml	-	-	-	-	-
Trübung	Nicht gemessen	-	-	≤ 2 NTU	≤ 2 NTU	≤ 2 NTU	≤ 10 NTU
Geruch	Normal	Normal	Normal	Normal	-	Normal	Keine unangenehmen Gerüche
pH-Wert	8.0	-	5,8-8,6	6-9	6-9	-	6,5-9
S <sub>NH4-N</sub>	0.03 mg/l						≤ 10 mg/l
Färbung	Nicht gemessen						≤ 30 Grad

---

## 3.2 Vorläufige Kostenabschätzung Haus 1 der GIZ

Die fiktive Kostenabschätzung der Braunwasserbehandlung für Haus 1 wird in 3 Schritten gemacht: **1). Wassermenge bestimmen; 2). Einzelne Kosten berechnen; 3). Wirtschaftlichkeit analysieren**

### 3.2.1 Fiktive Berechnung der Wassermenge

Da nur ein kleiner Teil des ankommenden Braunwasser durch MBR behandelt wird, ist es ziemlich schwer, die genaue Menge für das ganze Gebäude zu schätzen. Es erhöht sich noch die Ungenauigkeit, wenn der Besucher auch mitberücksichtigt wird. Auf diesem Grund kann man nur fiktive Berechnung für Wassermenge machen.

Berechnen nach Messwert

Insgesamt werden 36 No-Mix Toiletten im Zentralteil Haus 1 der GIZ installiert und 14 davon wird durch MBR behandelt und die Durchflussmenge gemessen. Der Durchsatz beträgt 200 l/h d.h. 14.3 l/h/Toilette. Nach der gegebenen Zeichnung gibt es zurzeit 102 Toiletten im Gebäude. Deshalb wird die gesamt Menge der Braunwasser von Haus 1 folgenderweise (Tabelle 21) bestimmt:

Tabelle 21: Berechnung der Braunwassermenge nach Messwert [23]

	Linker Strang	Gebäude
Toiletten	14	102
Durchsatz [l/h]	14.3	14.3
Zulauf Stunde [h]	10	10
Braunwassermenge [l/d]	2000	14586

Durch die Berechnung nach dem Messungswert ergibt sich die Braunwassermenge im Volumen von 15m<sup>3</sup> pro Tag.

Berechnen nach Anzahl der Mitarbeiter in Huas 1

Zur Überprüfung des Messwerts wird die Wassermenge nochmal anhand der Anzahl des Mitarbeiters von Haus 1 berechnet. In der Regel soll das Ergebnis weniger als den Messwert betragen, da nichtzahlende Besucher nicht berücksichtigen. Die Berechnung erfolgte mittels 2 Annahmen:

- Jeder Mitarbeiter geht zweimal Urinieren und einmal Stuhlgang
- Wegen des Geruchproblems und Hygiene wird durchschnittlich die No-Mix Toilette 1.7-mal pro Benutzung gespült.

Es ist auch zu beachten, dass je nach Geschlecht die Toilette auf verschiedene Weise benutzt wird. Daran ergibt sich die Braunwassermenge wie folgend in Tabelle 22:

Tabelle 22: Berechnung der Braunwassermenge nach Anzahl des Mitarbeiters (von Yue. W)

Geschlecht	Mann		Frau	
	Häufigkeit	Spülwasser [l]	Häufigkeit	Spülwasser [l]
Urinieren	2	0	2	12
Defäkieren	1	1,7 × 6 = 10	1	1,7 × 6 = 10
Summe		10		22
Anzahl der MA		270		377
Volumen BW [l/d]		2700		8294
Summe Volumen BW [l/d]		10994		

Die durch die Anzahl der Mitarbeiter berechnete Braunwassermenge ist ca. 5 m<sup>3</sup> pro Tag weniger als Messwert. Diese Differenz muss auch mitberücksichtigt werden, wenn man solcher Anlage in andere Gebäude einsetzt.

Ein Wasserbilanz Haus 1 liegt in Tabelle 23 vor. Die weitere Kostenabschätzung wird nach dem hochgerechneten Messwert durchgeführt. Anhand HUBER SE [41] ist mit einem Zulauf von 15 m<sup>3</sup> pro Tag die Membranmodul MCB 4 × 4 zu verwenden, mit Anwendung der Membranmodul MCB 4 × 4 kann 100% des anfallenden Braunwassers zu Wiedernutzung führen.

Tabelle 23 Wasserbilanz des Braunwassers Haus 1

Braunwassermenge(Messwert)	-14586 l/d
Wiedernutzung zur Toilettenspülung mit MCB 4 × 4 von HUBER SE	+15000 l/d
Wasser Bilanz	+414 l/d

### 3.2.2 Berechnung der einzelnen Kosten

#### Investitionskosten

Unter Investitionskosten zählt man alle einmaligen Kostenaufwand. Bei Braunwasserbehandlung sind dies vor allem die Kosten der Anlagen, welche von HUBER SE [41] 25616,00 € (netto) angeboten. Weil die Firma HUBER keine Vorreinigungsbehälter für einen täglichen Zulauf von 15m<sup>3</sup> haben, müssen die Kosten jeder Komponente des Behälters suchen und dann summieren. Nach Abfragung sind der Feststoffabscheider Ro9-E von HUBER SE [42] und die Abwassersammelgrube von BTG-Beton GmbH zu verwenden. Der Preis von Feststoffabscheider und Abwassersammelgrube betragen jeweils 5155,9 € (Netto) und 1147 € (Netto). Außerdem muss der Aufwand des Umbaus der Rohrleitung in Haus 1 mitgezählt werden. Nach Winker .M und Saadoun .A [43] besteht diese Kosten für die ganze Gebäude in Höhe von 25050 €.

## Betriebskosten

Betriebskosten setzen sich aus Energiekosten und Wartungskosten zusammen. Gemäß HUBER SE [44] ist der Stromverbrauch der MCB 4 × 4 39.55 kWh/d bei Normalmodus und 2,85 kWh/d bei Sparmodus. Wegen der Gedanken, dass die Anlagen nicht jährlich kontinuierlicher in Normalmodus betreiben werden können, aufgrund von Wochenende oder gesetzlichen Feiertagen, werden 314 Tage bzw. 86% des Jahres dem Normalmodus zugewiesen und die restliche 51 Tage dem Sparmodus. In der Summe beträgt der jährliche Stromverbrauch der MBR 1259 kWh. Der Stromverbrauch von Feststoffabscheider ist 0,09 kWh/d, umrechnet 28,26 kWh/a

Tabelle 24: Berechnung des Stromverbrauchs (von Yue, W)

Betriebstag /a	Betriebsart	Stromverbrauch kWh/d	Stromverbrauch kWh/a	Summe kWh/a
51	Sparmodus	2,85	145,35	12592,31
314	Normalmodus	39.55	12418,7	
314	Vorreinigung	0.09	28,26	

Mit einer jährlichen Steigerungsrate von 6.5 % [45] wird die Stromkosten im Jahr 2011 so berechnet, dass die 0,23 €/kWh zweimal mit 1,065 multipliziert werden. Für die Berechnung in Zukunft wird diese Steigerungsrate weiter angenommen. Das Ergebnis ist 0,26 €/kWh für Jahr 2011. Mit dem vorher ausgerechneten jährlichen Stromverbrauch ergibt sich die jährliche Stromkosten wie 3274 €.

Die Wartungskosten wird von HUBER SE [46] als 1030,63 €/a (Netto) gegeben inklusive den Verschleißteilen. Zusammen mit den Stromkosten betragen die jährlichen Betriebskosten 4539,09 €

## Wasserkosten

Die Kosteneinsparung beruht auf den durch MBR-Recycling eingesparten Kosten von Frischwasser und Abwasser. Bei Trinkwasserpreisen und Abwassergebühren bleibt in Deutschland seit 10 Jahren der Wert stabil. Wenn dieser Trend sich auch zukünftig fortsetzt, kann man eine jährliche Teuerung für die Trink- und Abwasserpreis von 2 % annehmen [45]. Nach dem Statistik Bundesamt betragen die Trink- und Abwasserentgelt zusammen 4,74 €/m<sup>3</sup>. Nach der berechneten Wassermenge in Haus 1 (Tabelle 18), fällt 71,1 € pro Tag bezüglich 314 Tage pro Jahr sämtliche 21903,9 € pro Jahr an. Die Kosteneinsparung ergibt sich dann daraus, dass die Differenz zwischen Wasserkosten und Betriebskosten berechnet werden.

Ein Überblick der einzelnen Kosten wird in Tabelle 25 gezeigt.

Tabelle 25: Überblick der einzelnen Kosten (von Yue Wu)

Einzelne Kosten	Wert (Brutto)	Quelle
HUBER, Membrananlage MCB 4 × 4 mit Vorreinigungsstufe	25616,00 €	HUBER SE
Feststoffabscheider Ro9-E	6365,31 €	HUBER SE
Braunwasserbehälter	1416,10	BTG- Betonwerk GmbH
Rohrleitung	25050,00 €	Winker .M und Saadoun .A [44]
INVESTITION GESAMT (Zinssatz 2 %/a)	58447,41 €	
Wartungskosten inkl. Verschleißteile (inflation 2 %/a)	1272,38 €/a	Feicht M., 2011
Stromkosten 0.26 €/kWh, Teuerung 6.5 %/a)	3274,00 €/a	
LAUFENDE KOSTEN GESAMT	4546,38 €/a	
Frischwasserentgelt in Hessen (2010) Teuerung 2 %/a	1,99 €/m <sup>3</sup>	Statistisches Bundesamt 2011
Abwasserentgelt in Hessen (2010) Teuerung 2 %/a	2,66 €/m <sup>3</sup>	Statistisches Bundesamt 2011
Wasserpreis in Hessen (2011) Teuerung 2 %/a	4,74 €/m <sup>3</sup>	berechnet von Yue. W gemäß Statistisches Bundesamt (2011)
Wasserkosten (Frisch- und Abwasser )	21903,9 €	
<b>KOSTENEINSPARUNG</b>	17357,52 €/a	

Allerdings ist oben ergebende Kosteneinsparung in real nicht erreichbar, weil bei diese Kostenabschätzung folgende Faktoren nicht eingeschlossen sind :

1. Kosten der Implementierung von No-Mix Toiletten
2. Abschreibung der Aggregat.
3. Kosten für Schlammabzug und seine Behandlung und landwirtschaftliche/energiesche Nutzung.
4. Kosten des Ersatzes der Membranen und ihre jährliche Reinigung.

Diese Faktoren lässt sich zur Zeit wegen der noch laufenden Forschung oder noch zu optimierendes Design schwerig erfassbar, wenn alle Faktoren mitberücksichtigt würde, ist die Rentabilität der Braunwasser-Recycling durch Anwendung der MBR-Technologie an im großen Maße begrenzt.

### 3.2.3 Analyse der Kostenabschätzung

Ahand den in Schritt 2 erhaltenen Daten kann man einen Ausblick auf die zukünftige ökonomische Bilanz von Braunwasserbehandlung durch MBR für die Haus 1 der GIZ erhalten, gesehen in einem Zeitraum von 15 Jahre bzw. der Nutzungsdauer der MBR Anlage.

Das Ergebnis ist in Abbildung 23 dargestellt. Alle Linien bilden sich mit der vorgegebenen Inflation/Teuerung. Die Gewinnschwelle in Höhe von 62612,5 € kommt in dem vierten Jahr vor, welche die eingesparten Kosten die sowohl die Investitions- als auch die Laufendkosten abdecken und danach den Benutzer profitieren können. Im 10. Jahr steigt die Differenz zwischen der gesamten Kosteneinsparung und Investitionskosten auf 110736 € während der jahresgewinn sich von 17357,52 €/a bis auf 19039.42 €/a erhöht. im dem 15. Jahr wird die gesamt Kosteneinsparung auf 278055 € erreichen.

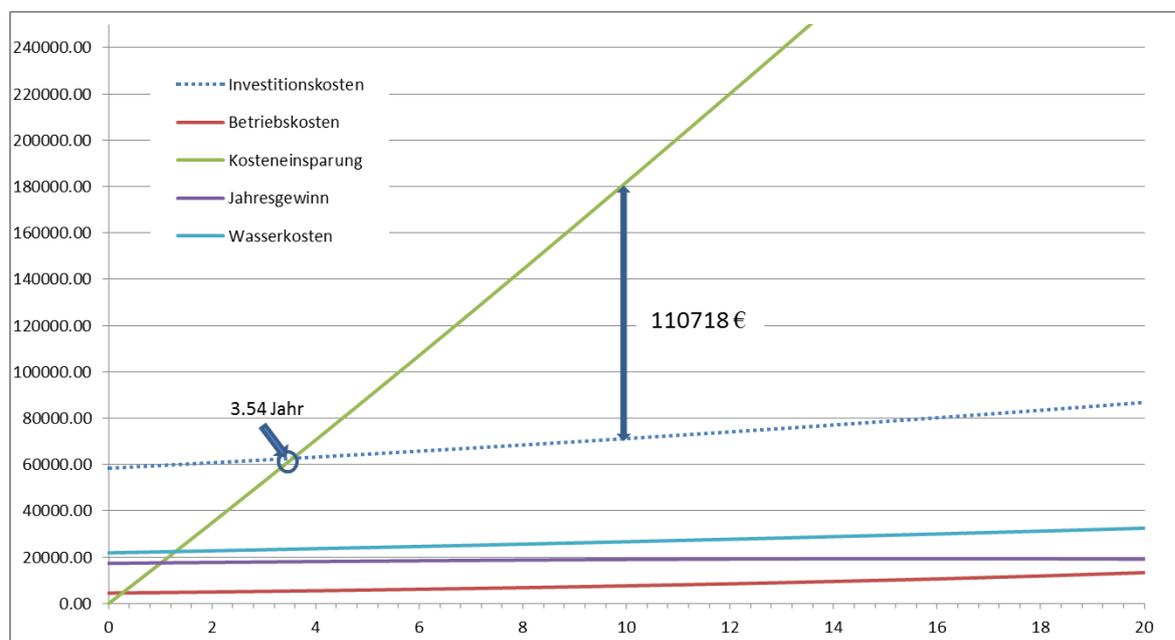


Abbildung 23 Fiktive Wirtschaftlichkeitsberechnung der Braunwasserbehandlung durch MBR in Haus 1 der GIZ; (berechnet von Yue. W)

Die Fiktive Berechnung der Braunwasserbehandlung durch MBR hat einen optimistischen Ausblick gezeigt. Besonders in einem Land mit sehr hohen Wasserpreis. Es ist deutlich zu erkennen, dass je höher der Frischwasserpreis und Abwasserpreis desto schneller wird die Gewinnschwelle erreicht. Andererseits, mittels fiktiver Berechnung kann man die untere Grenz des Wasserpreises abschätzen. Wie z.B. bei Eschborn. Wenn der Gewinnschwelle in den letzten Jahre der Lebensdauer (15 Jahren) der Anlage angelangt, beträgt die Summerpreis von Frisch- und Abwasserentgelt 2,12 € pro m<sup>3</sup>, nur ein Hälfte des heutigen Preis. Der ökonomische Retanbalität wird ein wichtiges Perspektiv für die Übertragung der Braunwasserbehandlung durch MBR sein, In solchem Land, wo zwar kein Wasserknappheit

---

existiert, aber der Wasserpreis hoch ist, erfolgt der ökonomische Profit eine plausible Motivation, die MBR-Anlage zu installieren.

---

## **3.3 Ergebnis der Bewertung der Internationale**

### **Übertragbarkeit durch Nutzwertanalyse**

Gemäß in Kapitel 2.3 dargestellt Methode ist das Resultat der Bewertung mit 3 Projekten in Tabelle 26 dargestellt. Literarischer Recherche zufolge gibt es außer SANIRESCH Projekt keine Projekte zur Braunwasserbehandlung durch MBR. Die meisten Forschungen auf Innovative Sanitärsystem wurden mit Schwarzwasser und Grauwasser durchgeführt. Aus diesem Grund werden 2 Projekten, die sich mit Schwarzwasser beschäftigt haben, hier als Alternative in der Matrix mit betrachtet. Der vergebene Wert der Zielertrag wurde von Literaturstudie und in Abstimmung mit Frau Dr.-Ing. Martina Winker (GIZ, Eschborn), Herrn Enno Schröder (GIZ, Eschborn) vom SANIRESCH Projekt entwickelt.

Tabelle 26: Ergebnis der Internationalen Übertragbarkeit (von Yue. W)

Kriterien und Dimensionen	Gewichtung $\Sigma =$ 100.00%	Bewertungsskala	Projekt						
			Deutschland-SANRESCH GIZ		Schweiz-Hohfallprojekt der Zermatt		Deutschland KOMPLETT- projekt		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
<b>G</b>	<b>Gesundheit und Hygiene</b>	6%		3		3		3	
G1	Qualität des Permeat	0	nicht berücksichtigt						
G2	Gesetzliche Anforderungen an Brauchwasser	6	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	30	5	30	5	30
<b>F</b>	<b>Finanzen</b>	38%		9.9		22.4		9.9	
F1	Direkt Finanzierung von der Regierung an die Anlage	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	0	0	0	0	0	0
F2	Indirekt Anreize an Betrieb von Braunwasserbehandlung	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	0	0	0	0	0	0
F3	Investitionskosten ( Anlage, Leitungssystem )	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10	1	4	1	4	1	4
F4	Betriebskosten (Wartung/Unterhalt)	4	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10	5	20	1	4	5	20
F5	Strompreis	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10	10	50	10	50	10	50
F6	Frischwasserpreis	7	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	1	7	10	70	1	7
F7	Abwasserpreis	7	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	1	7	10	70	1	7
F8	Grundstückpreis	3	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	5	15	10	30	5	15
<b>T</b>	<b>Technologie</b>	0%		0		0		0	
T1	Jährliche Wartung	0	nicht berücksichtigt						
T2	Stabilität der Operation und Qualität der Permeat	0	nicht berücksichtigt						
T3	Ausfälle	0	nicht berücksichtigt						
<b>U</b>	<b>Umgebung des Betriebes</b>	41.00%		17.7		32.9		13.7	
U1	Wasserknappheit	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	1	12	10	120	1	12
U2	Frischwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10	1	5	1	5	1	5
U3	Anzahl der Bewohner	8	Groß (> 100 persons) = 10, Mittel (10 - 100 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)	10	80	10	80	5	40
U4	Anschluss an Kanalisation	8	Vorhanden = 0, Kein = 10	0	0	10	80	0	0
U5	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	10	20	1	2	10	20
U6	Urbanisierungsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	10	20	1	2	10	20
U7	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	10	40	10	40	10	40
U8	Akkumulation der Braunwasser	0	nicht berücksichtigt						
<b>S</b>	<b>Sozial-Kultur</b>	15.00%		11		11		11	
S1	Akzeptanz bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Brauwassers	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	5	20	5	20
S2	Ökologisches Bewusstsein	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	40	10	40	10	40
S3	Pioniergeist	3	Ja = 10, Nein = 0	10	30	10	30	10	30
S4	Akzeptanz bezüglich der Nutzung der Menschlichen Exkrement als Dünger	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1	5	20	5	20	5	20
S5	Pädagogische Maßnahmen der Regierung	0	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	0	0	0	0	0	0
			<b>Summenwert (%)</b>	41.6		69.3		37.6	
			<b>Rang</b>	2		1		3	

---

## SANIRESCH Projekt

In Deutschland gibt es derzeit noch keine einheitlichen gesetzlichen Regelungen bezgl. Betriebswasser. Die Qualitätsanforderungen sind nach dem Gebrauch spezifisch. Die Mindestanforderungen muss nach §57 Wasserhaushaltsgesetz eingehalten werden. Deshalb wurde das Kriterium **G2** mit „5“ bewertet. Es gibt auch keine direkte Finanzierung und es sind auch keine indirekten Anreize an das Braunwasserbehandlungssystem verfügbar. Somit wurden die **F1** und **F2** mit „0“ beurteilt. Die Investitionskosten inklusive Anlagen und Rohrleitung ist sehr hoch und wird mit „1“ bewertet. Bei den Betriebskosten handelt es sich um die jährliche Wartung der Verschleißteile und werden einen Mittelwert „5“ gegeben. In Deutschland, aufgrund der Subventionen, sind der Strompreis und Frisch- und Abwasserpreis niedrig. Deswegen werden **F5**, **F6**, **F7** jeweils mit „10“, „1“, „1“ beurteilt. Der Grundstückspreis in Frankfurt am Main beträgt 480 €/m<sup>2</sup> bis 600 €/m<sup>2</sup> [47] und wird somit mit **F8** mittels „5“ bewertet. Nach Angabe der FAO [37] ist die Wahrscheinlichkeit einer Wasserknappheit in Deutschland „Niedrig bis Keine“. Deshalb wird **U1** mit „1“ beurteilt. In Bezug auf die Frischwasserqualität ist es in Deutschland sehr gut und hat 79 Punkte von 100 in WQI. Somit ist **U2** mit „1“ bewertet worden. In Bürogebäude arbeiten zurzeit ca. 650 Mitarbeiter, deshalb wurde **U3** mit „10“ bewertet. Die Abwasserentsorgung in Frankfurt ist nach der gesetzlichen Anforderung der Abwasserrichtlinie (91/271/EWG) aufgebaut, deshalb hat das Gebäude Anschluss an Kanalisation und **U4** wurde mit „0“ beurteilt. Bis Ende 2010 hat Frankfurt an Main insgesamt 679,664 Einwohner und die Bevölkerungsdichte beträgt 2737 E/km<sup>2</sup> [48]. Somit wurden die beiden Kriterien **U5** und **U6** mit „10“ bewertet. Die Steigerungsrate des gesamten Nährstoffbedarfs in Zentraleuropa in den nächsten 4 Jahren ist prognostisch 3,5% [36]. Es ist relativ hoch im Vergleich mit anderen Regionen weltweit. Deswegen wurde **U7** mit „10“ bewertet. Die Akzeptanz bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Braunwassers wird auf Mittel „5“ geschätzt. Weil Deutschland eine der umweltbewusstesten Länder der Welt ist, wurde **S2**, ökologisches Bewusstsein auf „10“, bewertet. Zwar die landwirtschaftlicher Nutzungen von Mist, Gülle, Guano was schon seit langem in Europa der Fall ist, ist die Nutzung der menschlichen Exkremete als Dünger in Deutschland noch nicht allgemein akzeptierbar. Die Sorge um juristische Haftbarkeit und Preis des von menschlichen Exkrementen gedüngten Düngers bestehen den überwiegenden Hintergrund seiner Wiederverwendung [50]. Somit wurde **S3** mit 5 bewertet. Der **S4**, Pioniergeist wurde mit 10 bewertet, weil SANIRESCH Projekt eine Pilotforschung leistet.

Die Nutzwertanalyse der Übertragbarkeit von Braunwasserbehandlung durch MBR ergibt 41.6% an SANIRESCH Projekt. Zwar das Recycling des Braunwassers hat generelle Akzeptanz, aber die natürliche Bedingungen (Keine Wasserknappheit), gut entwickelte Infrastrukturen (Kanalnetz, Frischwasserqualität) und hoch subventionierte Frisch- und Abwasserpreis verringern die dessen Einsatzpotenzial in Deutschland.

## Hohtälli - Projekt an dem Zermatt<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Schlussbericht Hohtälli

[http://www.eawag.ch/forschung/eng/schwerpunkte/abwasser/toilettenabwasser/Schlussbericht-Hohtalli\\_d.pdf](http://www.eawag.ch/forschung/eng/schwerpunkte/abwasser/toilettenabwasser/Schlussbericht-Hohtalli_d.pdf)

Die Seilbahnbergstation Hohtälli liegt auf 3286 m ü. M. in Skigebiet Matterhorn Ski Paradies. Bis Sommer 2004 wurde dort Trockentoiletten betrieben, in der mittels Absackanlage anfallendes Urin und Fäkalien gesammelt wurde. Aufgrund des hohen Betriebs- und Personalaufwandes für Reinigung und Abtransport, erheblicher Geruchsemissionen und der generell höheren Akzeptanz und Komforts einer Spülwassertoilette wurde die Toilettenanlage umgebaut. Das anfallende Schwarzwasser wird durch MBR behandelt (Abbildung 24).

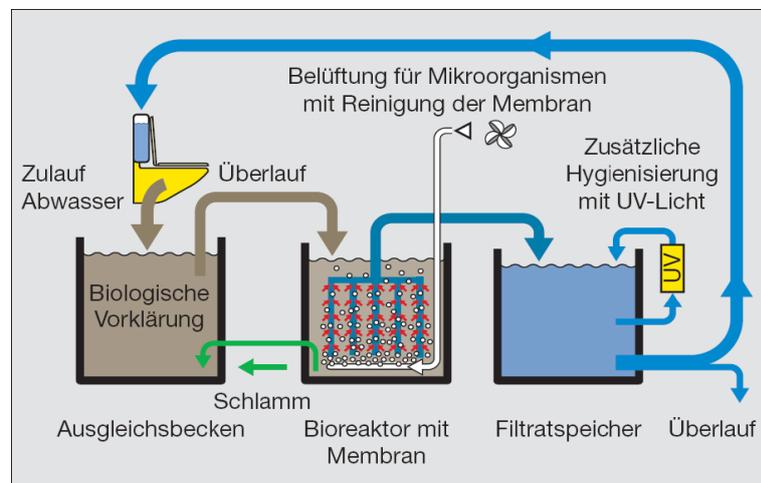


Abbildung 24 Anlagenschema der Kläranlage Hohtälli (Schlussbericht-hohtälli)

Das Problem der Versorgung und Entsorgung von Wasser tritt vor allem im alpinen Raum auf. Die Versorgung mit Frisch- bzw. Schmelzwasser oder Quellwasser ist nicht immer gegeben, da im Winter dieses Wasser energieaufwendig aufbereitet werden muss. In extremen Hochlagen steht oftmals kaum oder kein Wasser zur Verfügung. Die Versorgung über Leitung und Pumpstationen ist technisch als sehr aufwendig und als kostenintensiv zu bezeichnen. Die Abwasserentsorgung ist ebenso problematisch. Eine Ableitung ins Tal zur Reinigung in einer Kläranlage über Leitungen wie auch bei der Wasserversorgung ist für viele Standorte aufwendig. Die Nutzung anderer Transportmittel ist aus hygienischen und wirtschaftlichen Gründen als kritisch zu bewerten [50]

Die Bergstation Hohtälli befindet sich genauso in dieser speziellen Lage, da dort die Ver- und Entsorgung mit hohem Aufwand betrieben werden muss.

Die gesetzliche Anforderung an Betriebswasser in der Schweiz bleibt gleich wie in Deutschland, deswegen wurde **G2** mit „1“ bewertet. In der Schweiz gibt es zudem keine Angabe über die direkte Finanzierung oder indirekten Anreize am Betrieb von Braunwasserbehandlung. Aus diesem Grund wurden **F1** und **F2** hiermit „0“ bewertet. Die Investitionskosten der MBR Anlage sind sehr hoch, deshalb wurde **F3** mit „1“ bewertet. Aufgrund der besonderen Lage des Hohtälli, erhöht sich die Wartungskosten **F4** welche mit „1“ bewertet wurde. Der Strompreis in Zermatt Region beträgt 18,81 Rp./kWh, bzw. 0,15 €/kWh [52]. Es ist niedrig und somit wurde **F5** mit „1“ bewertet. Wegen der oben beschriebenen Probleme sind die Frisch- und Abwasserpreis in Hohtälli extrem hoch. Deswegen wurden **F6** und **F7** mit „10“ bewertet. Der Grundstückspreis ist hier mit „10“ bewertet, da Hohtälli in einem unbesiedelbaren Gebiet liegt, wo der Bau von Gebäude und Nutzung von Fläche sehr aufwendig ist. Die Wasserknappheit in Hohtälli ist extrem hoch, da der Untergrund aus Fels besteht (keine Wasserspeicherung) oder permanent gefroren ist. Deshalb ist **U1** mit

---

„10“ bewertet. Die Frischwasserqualität in der Schweiz ist als sehr gut bezeichnet, welche 89.1 Punkte von 100 in EPI bekommt [40]. Deswegen wurde **U2** mit „1“ bewertet. Da Hohtälli ist in einem Skigebiet liegt, hängt die Anzahl der Besucher von Saison ab, in der Spitze in der Hochsaison kann die Besucheranzahl bis auf rund 5000 Personen täglich erreichen. Etwa. 10% bis 15% davon werden die Toiletten benutzen [50]. D.h. 500 – 750 Benutzer pro Tag. Aus diesem Grund wurde **U3** mit 10 bewertet. In Hohtälli ist kein Anschluss an Kanalisation vorhanden. Das anfallende Abwasser muss transportiert werden. Deshalb **U4** ist mit „10“ bewertet. Die Urbanisierungsrate und Besiedlungsdichte ist sehr niedrig an Zermatt, außer den Mitarbeitern in Hotel oder Gastronomie ist dieses Gebiet naturnahe. Deswegen wurden **U5** und **U6** mit „1“ bewertet. Die Schweiz befindet sich auch in Zentraleuropa, wie Deutschland, deswegen ist der Nährstoffbedarf auch als hoch bezeichnet und wurde deshalb mit „10“ bewertet. Bei der Dimension „Sozial – Kultur“ ist die Bewertung in der Schweiz gleich wie in Deutschland.

Das Resultat von Hohtälli sieht gut aus, mit dem Summenwert von 69,3%. Die hauptsächliche Ursache ist ihre schlecht natürliche Bedingung. Diese Umgebung ermöglicht die Implementierung von Braunwasserbehandlung durch MBR.

#### **KOMPLETT Projekt<sup>4</sup>**

Das KOMPLETT Projekt war ein von 2005 bis 2008 von der TU Kaiserslautern, Uni Bonn, Fraunhofer UMSICHT und 3 Unternehmen durchgeführte Pilot Projekt zu High – Tech – systemen für Recycling von Grau– und Schwarzwasser [52].

Da das KOMPLETT Projekt auch als ein Pilotversuch erstellt wurde und sich in einer Stadt von Deutschland befindet, werden die meisten Zielertrag gleich wie dem SANIRESCH Projekt vergeben. Die Abweichung besteht beim Kriterium **Anzahl der Bewohner (U3)**. Die KOMPLETT Projekt wurde nur für 20 Einwohner aufgebaut und somit ist mit „5“ bewertet. Der Summenwert ergibt 39,6%

In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass „Umgebung des Betriebs“ und „Finanzielle Kriterien“ die Hauptteile des Nutzwerts besteht. Die entscheidenden Kriterien sind „Wasserkanppheit“, „Frischwasser – und Abwasserpreis“ und „Anschluss an Kanalisation“. Da alle Alternative sich in Deutschsprachige Raum befinden, kommt es kein Unterschied bei „Gesundheit und Hygiene“ und „Soziokulturelle Kriterien“ vor.

Bei dieser Matrix beinhalten alle Dimensionen und Kriterien beinhalten. Es werden Unsicherheiten bei der Bewertung vorliegen, da die Nutzwert gemäß die Literurstudie und personale Abschätzung vergeben werden. Hinsichtlich des Unterschieds von Situation zwischen Regionen können die Nutzwerte anders sein. Um mögliche Abweichungen oder Fehler zu vermeiden oder verringern, sollte so viel wie möglich die offizielle Daten benutzen und mit Experte abstimmen.

---

<sup>4</sup> <http://www.komplett-projekt.de/>

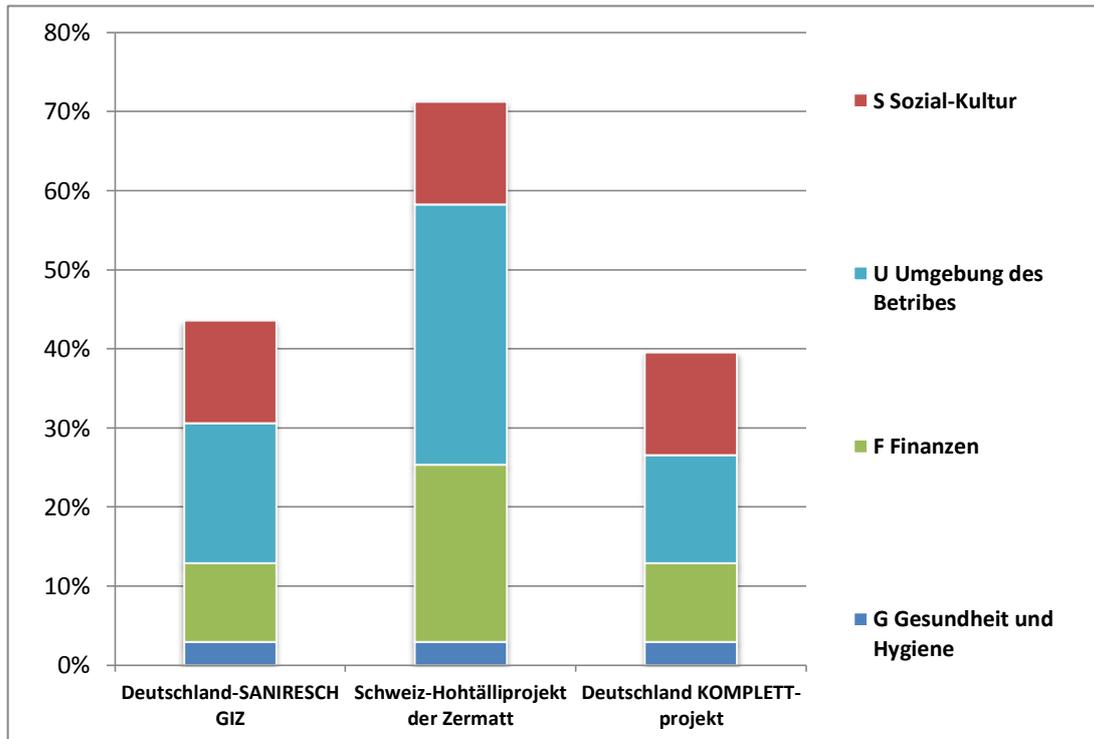


Abbildung 25 Ergebnis der Nutzwertanalyse (von Yue. W)

Zwar die beiden Projekt in Deutschland niedrig Summenwert (< 50%) bekommen, kann man aber trotzdem nicht behaupten, dass die Braunwasserbehandlung durch MBR dort kein Sinn ergibt. Bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit in Haus 1 der GIZ kann man sehen, dass die Braunwasserbehandlung durch MBR überschlägig monetär gewinnbar ist. In solchem Projekt, das man vorwiegend die Wirtschaftlichkeit betrachtet, besteht durchaus eine Motivation für eine Installation, somit muss die Gewichtung und Bewertung je nach Projekt umgestellt werden.

---

### 3.4 Ergebnis der Gewichtung von chinesischen Experten

Die vorgegebenen Gewichtungen in der NWA von chinesischen Experten werden in Tabelle 27 gezeigt. Die hauptsächliche Abweichung treten in den Dimensionen „Finanzielle Kriterien“, „Umgebung des Betriebs“ und „Soziokulturelle Kriterien“ auf. Die „Finanziellen Kriterien“ wurde von chinesischen Experten 6% mehr gewichtet. Die chinesischen Experten haben mehr auf die Investitionskosten der Anlage, direkte Finanzierung und indirekte Anreize von der Regierung beachtet, weil die Investitionskosten von MBR Anlage sehr hoch ist, Das Einsatzpotential der Anlagen in China ist wesentlich abhängig von der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit und der Rentabilität des Braunwasserrecyclings.

Die „Umgebung des Betriebs“ wurde 11% weniger gewichtet. Die Abweichung zwischen China und Deutschland treten wesentlich an 2 Kriterien auf. Das Kriterium „Wasserknappheit“ wurde von alle chinesischen Experten zwar als „4 Dominante Bedeutung“ bewertet, aber, bei der Umrechnung hat es 6%, nur halb des Wertes von Deutschland. Die Ursache dieser Begrenzung ist die Bewertungsskala. Mit einer Wertebereich nur von 1 bis 4 mangelt die Gewichtung an Präzision und Vergleichbarkeit zwischen solche Kriterien, die 4 oder mehr mal wichtiger als die Kriterien mit „1 Keine Bedeutung“ sind. Ein optimales Interview soll möglichst weiter Wertebereich benutzt werden. Das Kriterium „Anschluss an Kanalisation“ nur mit 2% bewertet, während in Deutschland mit 8%. Es geht davon aus, dass die Infrastruktur von Abwasserbehandlung in China nicht vollständig entwickelt, ob ein Anschluss zu Kanalisation und Kläranlage vorhanden ist, trägt nicht bedeutend zu der Implementierung bei.

Bei „Soziokulturelle Kriterien“ wurde alle Kriterien mehr gewichtet. Auffällig ist, dass die S5 Pädagogische Maßnahmen von der Regierung mit 6% bewertet, während in Deutschland mit 0% gewichtet. Zum einen, da das Umweltbewusstsein in China noch in einem niedrigen Niveau steht, ist die Orientierung und Förderung von der Regierung erforderlich. Zum anderen, aufgrund der Unterschiede des Politiken Systems ist der Wille der Regierung in China wichtig bei Durchsetzung der Implementierung eines neuen Systems

Die Abweichung zwischen die chinesischen Experten weist nur wenig auf. Die größte Standardabweichung kommt bei F8 Grundstückpreis mit 0,7 vor. Die Gründe dafür ist einerseits die Übereinstimmung der Bewertung von chinesischen Experten und andererseits die Begrenzung der vereinfachten Bewertungsskala.

Tabelle 27 Ergebnis der Gewichtung von chinesischen Experten (von Yue. W)

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung von chinesischen Experten	Gewichtung von Yue Wu und Experten von GIZ
		Gewichtung	Gewichtung
		$\Sigma=$	$\Sigma=$
		100.00%	100.00%
<b>G</b>	<b>Gesundheit und Hygiene</b>	<b>6%</b>	<b>6%</b>
G1	Qualität des Permeat	0	0
G2	Gesetzliche Anforderungen an Brauchwasser	6	6
<b>F</b>	<b>Finanzelle Kriterien</b>	<b>42%</b>	<b>38%</b>
F1	Direkt Finanzierung von der Regierung an die Anlage	6	4
F2	Indirekt Anreize an Betrib von Braunwasserbehandlung	6	4
F3	Investitionskosten ( Anlage, Leitungssystem )	6	4
F4	Betriebskosten (Wartung/Unterhalt)	5	4
F5	Strompreis	4	5
F6	Frischwasserpreis	6	7
F7	Abwasserpreis	6	7
F8	Grundstückpreis	3	3
<b>T</b>	<b>Technologie</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>
T1	Jährliche Wartung	0	0
T2	Stabilität der Operation und Qualität der Permeat	0	0
T3	Ausfälle	0	0
<b>U</b>	<b>Umgebung des Betribes</b>	<b>27.00%</b>	<b>41.00%</b>
U1	Wasserknappheit	6	12
U2	Frischwasserqualität	4	5
U3	Anzahl der Bewohner	6	8
U4	Anschluss an Kanalisation	3	8
U5	Besiedlungsdichte	2	2
U6	Urbanisationsgrad	3	2
U7	Nährstoffbedarf	3	4
U8	Akkumulation der Braunwasser	0	0
<b>S</b>	<b>Soziokulturelle Kriterien</b>	<b>25.00%</b>	<b>15.00%</b>
S1	Akzeptanze bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Braunwassers	5	4
S2	Ökologische Bewusstsein	5	4
S3	Pioniergeist	4	3
S4	Akzeptanze bezüglich der Nutzung der Menschlichen Exkrement als Dünger	5	4
S5	Pädagogische Maßnahmen der Regiung	6	0

## 3.5 Identifizierung den Globalen Hotspots

Die Identifizierung der Globalen Hotspots für die Übertragung der Braunwasserbehandlung durch MBR beruhe auf der Matrix von Nutzwertanalyse der internationalen Übertragbarkeit. Aber nur mit 5 ausgewählte Kriterien von der Dimension „Umgebung“. Die ganze Gewichtung beträgt 25%, in folgendem Kapitel werden die Ergebnisse der Suchung nach verschiedenen Ländern bei jedem Kriterium und die vollständig Nutzwert und deren Reihenfolge beschreibt.

### 3.5.1 Wasserknappheit

Die Weltkarte von UNESCO (Abbildung 26) stellt die Wasserknappheit der Welt dar [35]. Es ist deutlich zu sehen, dass die Länder/Gebieten mit Physikalische Wasserknappheit (Physical water Scarcity) oder sich anbahnende Wasserknappheit (Approaching physical water scarcity) sich um die beiden Seiten von Äquator verteilen, bzw. die meisten Gebiete von Mittel Ost, Süd Afrika, Süd West Asien und Zentralamerika. Außerdem treffen die Küsten-gebiet in Peru, Südafrika, Madagaskar und Südöstlich Australiens auch Wasserknappheit.

Auffällig ist, dass nicht nur „Physikalische Wasserknappheit“ sondern auch „ökonomische Wasserknappheit“ vorhanden ist. Im Vergleich zu dieser Extrem-trockenen-Klima beherrschte Regionen stehen oft die Regionen, die unter ökonomische Wasserknappheit leiden, in den ärmsten Ländern der Welt. Die Ursache dafür ist die Wasserqualität. In vielen Fällen gibt es eigentlich ausreichend Wasser, aber Sie werden von den Haushalten, der Industrie und Städten stark verseucht und unbrauchbar gemacht. Nur Wohlhabende können sich das aufbereitete Trinkwasser leisten. Gegenwärtig hat mehr als ein Viertel der Bevölkerung in Entwicklungsländern keinen Zugang zu qualitativ akzeptablem Wasser. Die fehlende Qualität verschärft häufig die bestehende Wasserknappheit [38].

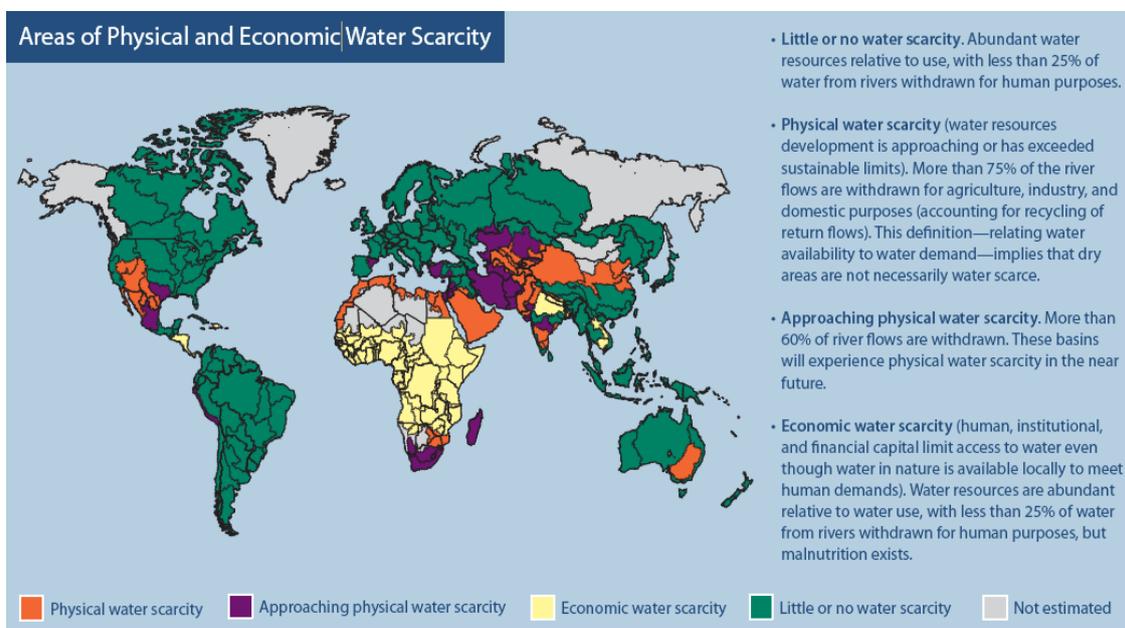


Abbildung 26 Gebiete von Physikalische und Ökonomische Wasserknappheit [35]

Da Wasserknappheit das dominante Kriterium in der Identifizierung globalen Hotspots (Tabelle 18) und die Grundlage besteht, wofür man das Braunwasser-Recycling braucht, werden die Untersuchungen der restlichen Kriterien sich in den Länder/Regionen, wo Wasserknappheit existiert, beschränken. Unter die Berücksichtigung der fehlenden oder nicht ausreichenden ökonomische Ertragsfähigkeit an die Investition wären die Länder, wo ökonomische Wasserknappheit existiert, in folgende Identifizierung von globalen Hotspots nicht sinnvoll sein. Aus diesem Grund sind lediglich in dieser Arbeit die Länder, wo physikalische Wasserknappheit existiert, in der Vorauswahl der globalen Hotspots zu betrachten. Gemäß oben liegender Weltkarte (Abbildung 26) werden insgesamt 35 Länder/Gebieten weltweit (Tabelle 28), die mit Violett (sich anbahnend physikalische Wasserknappheit) und Orange (existierte physikalische Wasserknappheit) markiert, identifiziert.

Tabelle 28 Länder mit Physikalische Wasserknappheit (Ausgewählt von Yue Wu)

<b>Land/Region</b>	<b>Zustand der Physikalische Wasserknappheit</b>
<b>Afghanistan</b>	sich anbahnend
<b>Ägypten</b>	existiert
<b>Algerien</b>	existiert
<b>Australien(Südost)</b>	existiert
<b>China (Nord)</b>	existiert
<b>Indien</b>	sich anbahnend
<b>Iran</b>	sich anbahnend
<b>Israel</b>	sich anbahnend
<b>Jemen</b>	existiert
<b>Jordanien</b>	existiert
<b>Kasachstan</b>	sich anbahnend
<b>Kirgisistan</b>	sich anbahnend
<b>Libanon</b>	sich anbahnend
<b>Libyen</b>	existiert
<b>Madagaskar</b>	sich anbahnend
<b>Marokko</b>	existiert
<b>Mauretanien</b>	existiert
<b>Mexico</b>	sich anbahnend
<b>Mosambik</b>	sich anbahnend

<b>Land/Region</b>	<b>Zustand der Physikalische Wasserknappheit</b>
<b>Namibia (Süd)</b>	sich anbahnend
<b>Oman</b>	existiert
<b>Pakistan</b>	sich anbahnend
<b>Peru (Küsten)</b>	sich anbahnend
<b>Saudi-Arabien</b>	existiert
<b>Spanien (Nordost)</b>	sich anbahnend
<b>Südafrika</b>	sich anbahnend
<b>Syrien (Süd)</b>	sich anbahnend
<b>Tunesien</b>	existiert
<b>Türkei (West)</b>	sich anbahnend
<b>Turkmenistan</b>	sich anbahnend
<b>U.S.A (Südwest)</b>	existiert
<b>Usbekistan</b>	existiert
<b>Vereinigten Arabischen Emirate</b>	existiert
<b>West-Sahara</b>	existiert
<b>Zypern</b>	sich anbahnend

### 3.5.2 Frischwasserqualität

Frischwasserqualität besteht das wichtigste Kriterium außer der Wasserknappheit zur Identifizierung der globalen Hotspots. Die Frischwasserqualität 163 Länder wurde von Universität Yale untersucht und bewertet. In ihre Environmental performance Index (EPI) 2010 wurde jeder betroffene Land ein WQI (Fresch water quality index) Wert zwischen 0 – 100 vergeben. Abbildung 27 stellt die Frischwasserqualität weltweit dar. Schlechtestes Frischwasser ist zumeist in Länder von Afrika und Asien vorhanden. Die Länder in Europa, Nordamerika und Südamerika hat eine wesentliche Frischwasserqualität. Die WQI Wert in die 34 Kandidatenländer ist in Tabelle 29 zusammengestellt.

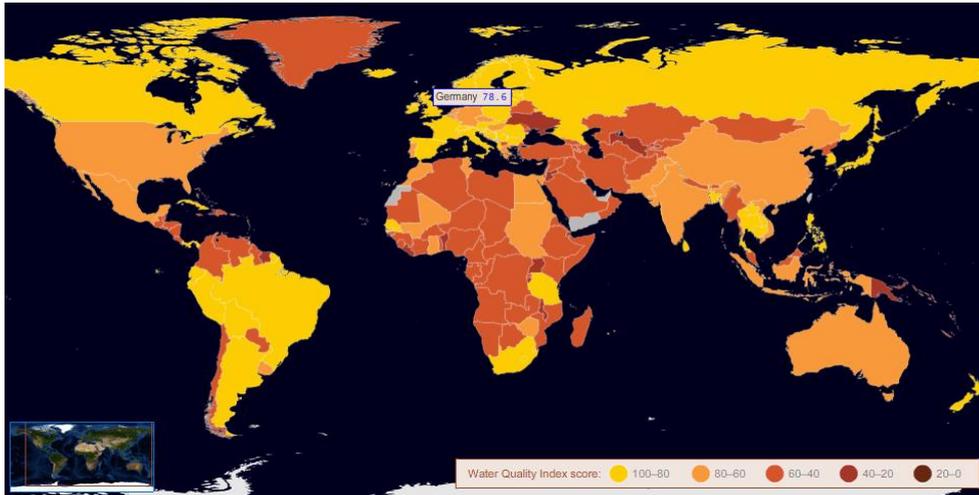


Abbildung 27: Frischwasserqualität der Welt [40]

Tabelle 29: Frischwasserqualität gemäß WQI Wert in 35 Kandidatenländer [40]

Land/Region	WQI Wert
Südafrika	84.2
Peru (Küsten)	83.4
Spanien (Nordost)	83.1
Indien	78.9
U.S.A (Südwest)	77.5
Zypern	75.3
Tunesien	63
Marokko	62.9
Pakistan	62.6
Ägypten	62.4
Australien(Südost)	61.7
Mexico	61.4
Algerien	58.3
China (Nord)	58
Türkei (West)	57.9
Israel	57.7
Iran	49.8
Libyen	49.4
Madagaskar	47.6
Mosambik	46.6
Mauretanien	45.8
Namibia (Süd)	45.7
Syrien	45
Turkmenistan	45
Afghanistan	44.8
Oman	44.2

Land/Region	WQI Wert
Kasachstan	43.4
Saudi-Arabien	42.4
Kirgisistan	41.3
Der Libanon	40.6
Usbekistan	38
Jordanien	30
Die Vereinigten Arabischen Emirate	-
Jemen	-
West-Sahara	-

### 3.5.3 Nährstoffbedarf

Da die Inhaltstoffe von Braunwasser durch Behandlung von MBR, in parallel die Stickstoff und Phosphor von Gelbwasser durch MAP- Fällung rückgewonnen werden können, trägt die neue Sanitärssystem die Näherung von Ackerpflanzen bei, indem der Verbrauch des synthetischen Düngers rückgehen würde. Die Tendenz (Tabelle 30) des Bedarfs zeigt, dass die Länder in Lateinamerika, Afrika, Südasien, Zentraleuropa, Osteuropa und Zentralasien hoch Bedarf von synthetischem Düngern haben.

Tabelle 30: Nährstoffbedarf der Welt in nächsten 4 Jahr [36]

#### World and regional growth in fertilizer demand, 2010 to 2014

Region	Annual growth rate (Compound)			
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Total (N+P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> +K <sub>2</sub> O)
World	1.8%	2.9%	5.0%	2.6%
Africa	3.6%	3.2%	4.5%	3.6%
America	1.9%	3.5%	4.9%	3.0%
- North America	1.1%	2.1%	3.8%	1.8%
- Latin America	3.6%	4.7%	6.0%	4.6%
Asia	1.7%	2.6%	5.4%	2.4%
- West Asia	1.4%	2.9%	7.7%	2.2%
- South Asia	2.8%	3.9%	4.8%	3.3%
- East Asia	1.2%	1.7%	5.6%	1.9%
Europe	1.9%	3.1%	4.0%	2.5%
- Central Europe	3.2%	2.8%	5.4%	3.5%
- West Europe	0.7%	1.9%	3.8%	1.4%
- East Europe & Central Asia	3.5%	5.1%	3.5%	3.8%
Oceania	1.9%	4.2%	4.7%	3.2%

### 3.5.4 Besiedlungsdichte

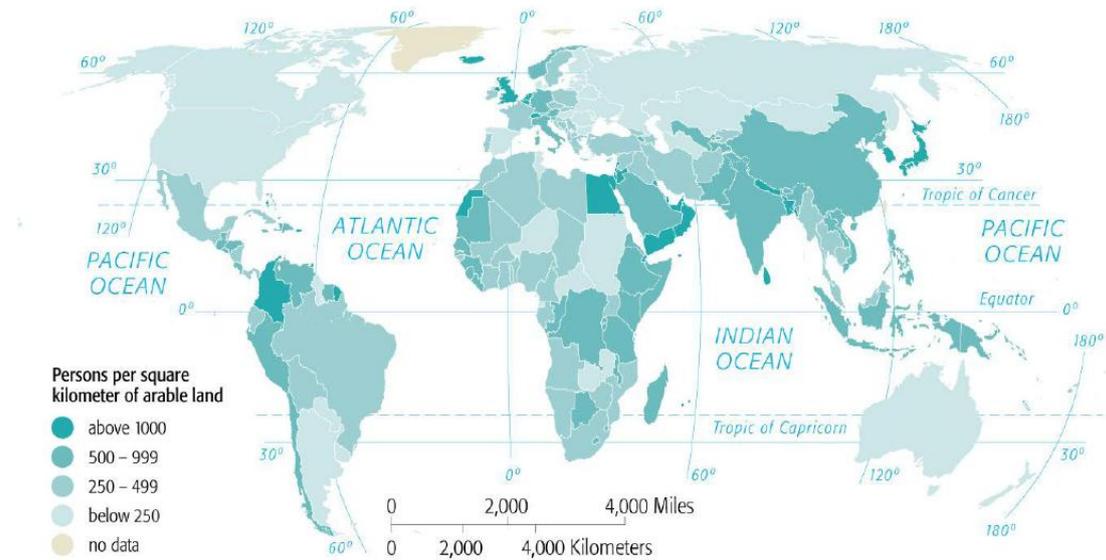


Abbildung 28 Physiologische Bevölkerungsdichte der Welt [54]

Die Bewertung von Besiedlungsdichte wird mittels „Physiologische Bevölkerungsdichte“ durchgeführt. Die Physiologische Bevölkerungsdichte bezieht sich auf die Bevölkerung pro  $\text{Km}^2$  Besiedelbarer Fläche. Die höchsten Physiologische Bevölkerungsdichte treten zumeist in die Länder auf, die entweder eine große Bevölkerung haben, wie China, Indian, oder die meisten Flächen nicht besiedelbar ist, wie Saudi – Arabien und Ägypten.

Die Physiologische Bevölkerungsdichte der 35 Kandidatenländer ist in Tabelle 31 gezeigt.

Tabelle 31 Physiologische Bevölkerungsdichte der 35 Kandidatenländer [54]

Land/Region	Physiologische Bediedlungsdichte $\text{E}/\text{Km}^2$
Oman	11780
West-Sahara	6780
Die Vereinigten Arabischen Emirate	6404
Ägypten	2688
Libanon	2290
Israel	2147
Jordanien	1886
Zypern	1628
Jemen	1350

<b>Land/Region</b>	<b>Physiologische Bediedlungsdichte E/Km<sup>2</sup></b>
<b>China (Nord)</b>	943
<b>Pakistan</b>	834
<b>Südafrika</b>	807
<b>Saudi-Arabien</b>	807
<b>Peru (Küsten)</b>	761
<b>Indien</b>	753
<b>Mauretanien</b>	657
<b>Madagaskar</b>	626
<b>Usbekistan</b>	601
<b>Namibia (Süd)</b>	535
<b>Mosambik</b>	473
<b>Mexico</b>	436
<b>Algerien</b>	431
<b>Kasachstan</b>	411
<b>Iran</b>	405
<b>Syrien</b>	404
<b>Marokko</b>	387
<b>Tunesien</b>	381
<b>Afghanistan</b>	381
<b>Libyen</b>	318
<b>Die Türkei (West)</b>	303
<b>Spanien (Nordost)</b>	297
<b>Turkmenistan</b>	224
<b>Die U.S.A (Südwest)</b>	179
<b>Kirgisistan</b>	69
<b>Australien(Südost)</b>	43

### 3.5.5 Urbanisierungsgrad

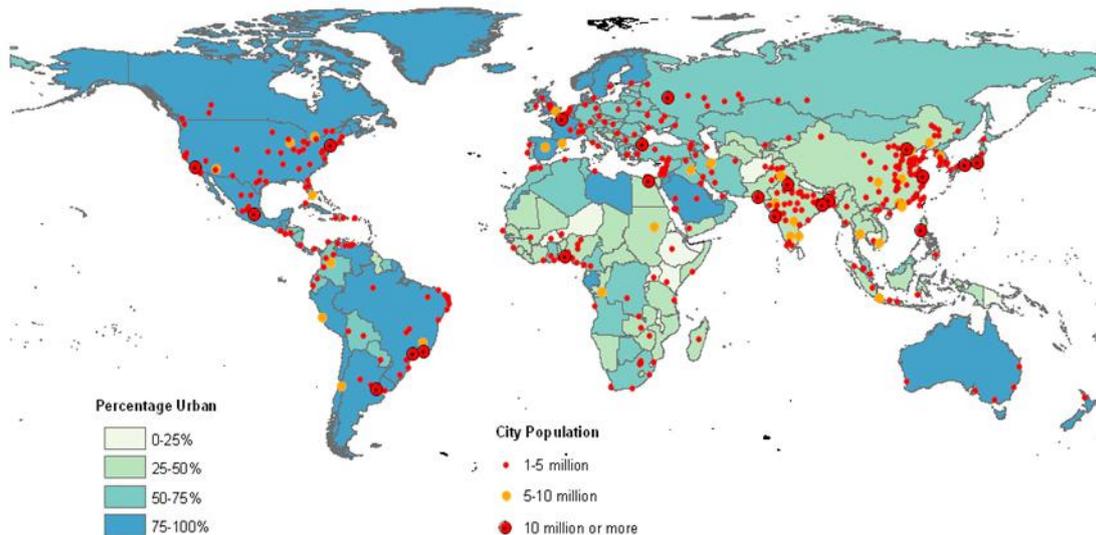


Abbildung 29 Agglomeration der Welt 2009 (Urbanisierungsgrad der Welt: 50.1%); [54]

Der Urbanisierungsgrad der Welt erhöht sich allezeit. Im 2008 lebten weltweit erstmals mehr Menschen in Städten als auf dem Land. Nach der Berechnung der Bevölkerungsfonds der Vereinten Nationen wäre 5 Milliarden Städtern im Jahr 2030. In Zukunft wird sich die Urbanisierung am stärksten in Afrika und Asien vollziehen. Als ein Kriterium, welche die Übertragung der Braunwasserbehandlung durch MBR in positive Richtung bewegen lässt, wird die Urbanisierungsgrad der 35 Kandidatenländer (Tabelle 32) basiert auf die 2009 Revision der World Urbanisation Prospekts untersucht [54].

Tabelle 32 Anteil der städtischen Bevölkerung in den 35 Kandidatenländer [54]

Land/Region	Anteil %
Israel	91.8
Australien(Südost)	88.9
Libanon	87.1
Vereinigten Arabischen Emirate	83.7
U.S.A (Südwest)	82
Saudi-Arabien	81.9
West-Sahara	81.6
Jordanien	78.5
Libyen	77.7
Mexico	77.5
Spanien (Nordost)	77.2
Peru (Küsten)	76.6
Oman	72.8
Iran	70.2
Zypern	70.1

Land/Region	Anteil %
Türkei (West)	69.2
Tunesien	66.9
Algerien	65.9
Südafrika	61.2
Kasachstan	58.2
Marokko	57.6
Syrien	55.3
Turkmenistan	49
China (Nord)	46.1
Ägypten	43.3
Mauretanien	41.2
Mosambik	37.6
Namibia (Süd)	37.4
Usbekistan	36.3
Pakistan	35.6
Kirgisistan	34.6
Jemen	31.2
Madagaskar	29.8
Indian	29.7
Afghanistan	22.3

### 3.5.6 Ergebnisse der Identifizierung der globalen Hotspots

Durch in Kapitel 2.4 dargestellte Methode werden die globalen Hotspots gemäß der Wasserknappheit, Frischwasserqualität, Nährstoffbedarf, Urbanisierungsgrad und Besiedlungsdichte in einer NWA mit Gesamtgewichtung von 25% bewertet. Die herausgearbeitete Gewichtung wird dann zu einzelnen Punkte umgesetzt. Tabelle 28 zeigt die Ergebnisse der Identifizierung. Zwei Länder, Jordanien und Usbekistan hat das größte Einsatzpotential mit 23 Punkte von 25 aufzuweisen.

Table 1 Resultat der Identifizierung globalen Hotspots (von Yue. W)

Land/Region	Wert
Jordanien	23
Usbekistan	23
Ägypten	21.5
Libyen	21.5
Tunesien	21.5
Australien(Südost)	20.7
Algerien	20.5

Land/Region	Wert
Israel	20.5
Marokko	20.5
Mauretanien	20.5
Oman	20.5
Saudi-Arabien	20.5
Vereinigten Arabischen Emirate	18
China (Nord)	17.9
Jemen	16.2
West-Sahara	16
Mexico	15.5
Pakistan	15.5
U.S.A (Südwest)	15.1
Kasachstan	14.5
Libanon	14.5
Mosambik	14.5
Namibia (Süd)	14.5
Kirgisistan	13.7
Madagaskar	13.7
Iran	13.5
Peru (Küsten)	13.5
Südafrika	13.5
Türkei (West)	13.5
Indian	12.7
Syrien	12.5
Zypern	12.5
Afghanistan	11.7
Spanien (Nordost)	9.9
Turkmenistan	9.7

In Abbildung 30 wird die regionale Verteilung der globalen Hotspots nach ihrem Wert in 3 Gruppen dargestellt. Es gibt 12 Länder in der erste Gruppe, welche den Wert 20 überschreiten haben. Diese Länder werden zu den beachtenswertesten Standorten eingestuft. In der zweiten Gruppe, welche der Wert zwischen 15 und 20 sind, stehen 7 Länder vom Ostereuropa und Zentalasien, Ostasien, Südasien, Nordamerika und Lateinamerika. Die restliche 15 Länder mit dem Wert weniger als 15 sind zwar Wasserknappheit betroffen, aber aufgrund ihre mittel bis hoch Frischwasserqualität (Südafrika, Peru, Spanien, Indien), niedriger Urbanisierungsgrad (Afghanistan, Madagaskar, Indien, Pakistan) und Besiedlungsdichte (Spanien, Afghanistan, Turkmenistan, Kirgisistan) erscheint sich weniger Bedarf für die Braunwasserbehandlung.

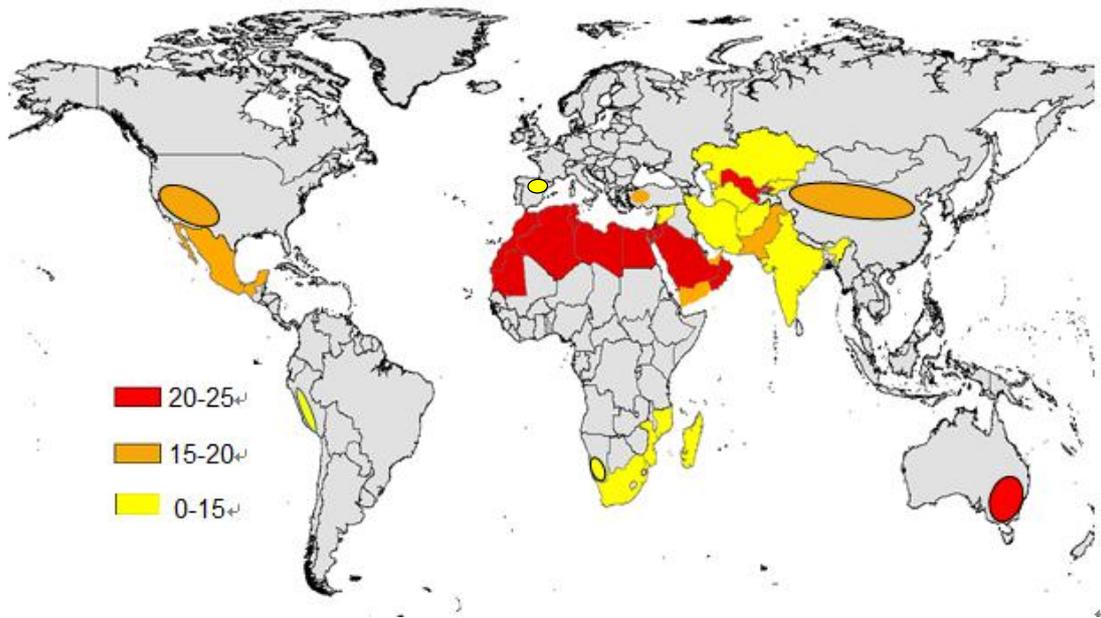


Abbildung 30: Regionale Verteilung der Kandidatenländern (präsentiert von Yue. W)

---

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Braunwasserbehandlung durch das MBR Verfahren ist eine Erprobung innerhalb eines neuen Sanitärsystems, das einzelne Abwasserteilströme betrachtet und behandelt. Das MBR-Verfahren verfügt über eine sehr effektive Reinigungsleistung, hohe hygienische Qualität des Permeats, einen geringen Flächenbedarf und ermöglicht sowohl die direkte Weiterverwendung des gereinigten Abwassers als Betriebswasser als auch die Nutzung der abgeschiedenen Feststoffe von Braunwasser und die im Retentat zurückgehaltenen Nährstoffe des Abwassers nach Behandlung als Dünger im landwirtschaftlichen Bereich. Bei vergleichsweise hohen Investitionskosten und Energiekosten. Die Braunwasserbehandlung durch MBRs hat voraussichtlich ein Einsatzpotential in Gebäuden in urbanen Räumen der Schwellen- und Entwicklungsländern, die unter Wasserknappheit leiden und wo kein Anschluss an zentrale Kläranlagen vorhanden ist. Eine Hypothese, innerhalb dieser Arbeit geprüft werden soll.

Die Untersuchungen dieser Arbeit setzen sich aus drei Abschnitten zusammen. In der ersten Phase geht es um die Analyse der in der GIZ installierten MBR-Technologie und Auswahl der Bewertungsverfahren zur weiteren Untersuchung. In der zweiten Abschnitten wurde eine fiktive Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Braunwasserbehandlung in Haus 1 der GIZ mittels der Abschätzung des anfallenden Braunwassers, Investitions- und laufende Kosten der Anlagen durchgeführt. Außerdem wurde in dieser Phase die Nutzwertanalyse (NWA) mit ihren Kriterien zur Bewertung der internationalen Übertragbarkeit durch Literaturrecherche, und halbstrukturierten Interviews mit Experten aus der GIZ und aus China erstellt. In der dritten Phase wurde die in zweiter Phase hergestellte Nutzwertanalyse der internationalen Übertragbarkeit mit 3 Projekte und die Identifizierung der globalen Hotspots mit 35 Ländern ausübt.

Die durch Literaturrecherche war zu erkennen, dass zurzeit noch keine gesonderten gesetzlichen Anforderungen an Braunwasser vorhanden sind. In Bezug auf die staatlichen Anforderungen weltweit von Betriebswasser hat das Permeat der MBR Anlage in Eschborn die meisten Parameter nicht überschritten, außer CSB [23].

Um das Übertragbarkeitspotentials der in Haus 1 der GIZ installierten Braunwasserbehandlungsanlage in Schwellen- und Entwicklungsländer zu untersuchen, wurden verschiedene mehrdimensionale Bewertungsverfahren der Entscheidungstheorie betrachtet. Aufgrund leichter Nachvollziehbarkeit, guter Zugänglichkeit der Modellstrukturen und Zuverlässigkeit der Bewertung bei Einführung neuer Alternativen wurde die Nutzwertanalyse für die Bewertung der internationalen Übertragbarkeit der Braunwasserbehandlung durch MBRs und Identifizierung der globalen Hotspots ausgewählt.

Ein Unterziel dieser Arbeit ist es, die Wirtschaftlichkeit des Braunwasserbehandlungssystems ungefähr zu ermitteln, um bessere Auskunft über die Betriebsbedingungen zu bekommen, unter denen die Anlage wirtschaftlich eingesetzt werden kann. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung in dieser Arbeit wurde lediglich die erste überschlägig hinsichtlich der Wiedernutzung des Permeats für Haus 1 der GIZ ausgearbeitet und kann nicht

---

mit einer tatsächlichen Wirtschaftlichkeitsberechnung verglichen werden kann. Das Ergebnis hat gezeigt, dass die Anwendung der Braunwasserbehandlung durch das MBR Verfahren in Deutschland ökonomisch rentabel ist. Hierbei spielen die Kriterien „Frischwasserpreis“, „Abwasserpreis“ und „Strompreis“ bei der Kosteneinsparung wichtigen Rollen. Mit den groben Abschätzungen aller einzelnen Kosten tritt eine Einsparung von 17376,41 € zum Ende des ersten Jahres auf. Die Gewinnschwelle wird in 3.54 Jahren der Inbetriebnahme überschritten. Die Rentabilität der Braunwasserbehandlung durch MBRs erweitert die Implementierungsmöglichkeit. Die Anlage kann in Länder oder Regionen mit niedriger bis keiner Wasserknappheit als eine Mittel zur Kosteneinsparung oder Wassereinsparung verwendet werden.

Die Bewertung der internationalen Übertragbarkeit wird in der NWA in 5 Dimensionen mit insgesamt 25 Kriterien mit einer Gesamtgewichtung von 100% durchgeführt. Die Dimensionen „Finanzielle Kriterien“ und „Umgebung des Betriebs“ sind die zwei wichtigsten Dimensionen und haben jeweils 38% und 41% eingenommen. Im Vergleich dazu hat die chinesischen Experten ihr Blick hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit Chinas mehr auf Finanzielle Kriterien geworfen, mit 42% an Dimension „Finanzielle Kriterien“ und 33% an „Umgebung des Betriebs“. Da keine anderen Projekt mit reinen Braunwasseranlagen verfügbar waren, wurden neben dem SANIRESCH Projekt das Hochtälli Projekt in der Schweiz und das KOMPLETT Projekt, die beide mit das Schwarzwasserbehandlung beschäftigen, als Alternativen in der NWA aufgestellt. Da das Hochtälli Projekt sich in einer speziellen Umgebung (Hochgebirgsregion bei Zermatt, 3286 m ü. M.) befindet, hat es in der Bewertung 69% von 100% bekommen. Im Vergleich dazu haben die beiden sich in deutschen Städten befindenden Forschungsprojekte lediglich 41,6% und 37,6% erreicht. Der Bedarf der Implementierung Braunwasserbehandlung mittels MBR in deutsche Städte hat sich nicht stark erscheint.

Da bei anderen Kriterien oftmals regionale Unterschied vorkommen, wurde die Identifizierung der globalen Hotspots mittels 5 Kriterien nämlich Zustand der physikalischen Wasserknappheit, Frischwasserqualität, Nährstoffbedarf, Besiedlungsdichte und Urbanisierungsgrad, welche eine räumliche aggregierte Darstellung erlauben, mit einer Gesamtgewichtung von 25% durchgeführt. In diesen 5 Kriterien hat „Wasserknappheit“ die größte Gewichtung von 12%. In der NWA. Aus diesem Grund wurden 35 Kandidatenländern gemäß deren Zustand der Physikalischen Wasserknappheit in der Vorauswahl ausgewählt. Die Identifizierung der globalen Hotspots wurde dann mit diesen 35 Ländern durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass 12 Ländern in Nordafrika und Westasien sowohl als der Südosten Australien sehr ideal für die Implementierung der Braunwasserbehandlung durch MBRs sind. Jordanien und Usbekistan haben das größte Einsatzpotential mit der Gewichtung von 23% aus 25%. Je höher die physikalische Wasserknappheit, je schlechter die Frischwasserqualität, je höher die Besiedelungsdichte und der Urbanisierungsgrad desto größer ist das Einsatzpotential der Implementierung.

Die weitere Entwicklung des neuen Sanitärsystems in urbanen Raum sowie Braunwasserbehandlung durch MBRs in dieser Arbeit könnte in folgendermaßen aussehen.

#### 1. Gesetzliche Anforderungen

---

Die gesetzliche Anforderung bezieht sich auf zwei Aspekte. Zum ersten, da es noch keine gesonderte gesetzliche Anforderungen an Qualität und Hygiene des gereinigten Brauwasser und seine Verwertung gibt, sollen die Verwertungsbereich und ihre technische ,hygienische Anforderung in Form von Gesetzen festgestellt werden.

Zum zweite, gemäß das Ergebnis einer Befragung [49] bei Landwirten und Verbrauchern besteht die Sorge um die juristische Haftbarkeit ein wichtige Hinderungsgrund für die Einsetzung von Urin als Dünger. Die gleiche Situation kann für Brauwasser bestehen. Aus diesem Grund ist ein eindeutiges Gesetz für die Nutzung von mit menschlichen Exkrementen von gedüngtem Nahrungsmittel erforderlich.

## 2. Finanzen

Da die Rahmenbedingungen zur Implementierung des Sanitärsystems durch die Regierung geschaffen werden, können so Anreize geschaffen werden. Durch direkte Finanzierung oder Finanzierungszuschüsse durch die Regierung und indirekt Anreize bei Betrieb von Brauwasserbehandlung kann die Implementierung von Brauwasserbehandlung in der Zukunft weiter gefördert werden. Der indirekte Anreiz kann z.B. in Form von Steuervergünstigungen oder Subvention beim Strompreis erfolgen.

## 3. Verbesserung der Technologie und Anlage

Die Verbesserung der Technologie und Anlage kann sich auf vieles auswirken. Bei höher Qualität des Permeats, länger Lebensdauer der Anlage, geringeren Stromkosten und günstigerer Wartungsarbeit wird die Einsatzmöglichkeit der Brauwasserbehandlung mit einer MBR in positiver Richtung beeinflussen. Zudem sind die Voraussetzung für die Sammlung von Brauwasser, Nachbesserungen beim Komfort und Reinigungsleistung der No-Mix Toiletten sinnvoll.

## 4. Sozio-Kultur

In der soziokulturellen Dimension sind die Akzeptanz der Verwertung sowohl des gereinigten Brauwasser als auch die Nährstoff einzubeziehen. Weiterhin sollte man an der Aufklärung der Öffentlichkeit zu Nutzen und Risiken bei der Wiederverwendung von gereinigten Abwässern arbeiten, um so die Akzeptanz zu verbessern.

---

## 5. Literaturverzeichnis

- [1]. Peter-Fröhlich, A.; Kraume, I.; Oldenburg, M. et al. (2003): Neue Sanitärkonzepte für die separate Erfassung und Behandlung der Teilströme Urin, Fäkalien und Grauwasser – Pilotprojekt. Conference Wasser Berlin 2003, Kompetenz Zentrum Wasser Berlin.
- [2]. UNhabitat (2010): Urban trends: Urbanisation and economic growth. Retrieved 18.11.2010, <http://www.unhabitat.org/documents/SOWC10/R7.pdf>
- [3]. <http://susana.org/images/documents/05-working-groups/wg06/final-docs/en-susana-thematic-paper-WG06-cities-version-1.2.pdf?phpMyAdmin=ef3a0671ec177f451334057e605208d9> (10.09.2011) Bracken et al. (2008): Sustainable sanitation for cities. Retrived 17.11.2010,
- [4]. Kaufmann Alves, I.; Knerr, H.; Schmitt, T.G.; Steinmetz, H. (2008): "Auswirkungen der Integration neuartiger Abwasserentsorgungskonzepte in bestehende Infrastruktursysteme", KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall 2008 (55) Nr.10, S.1074.
- [5]. Herbst, H. (2008a): Bewertung zentraler und dezentraler Abwasserinfrastruktursystem; Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; genehmigte Dissertation. Aachen: RWTH.
- [6]. Lang, J. & Otterpohl, R. (2000). Abwasser – Handbuch zu einer zukunftsfähigen Wasserwirtschaft. Donauschingen-Pföhren: Mall-Beton.
- [7]. Otterpohl, R., & Oldenburg, M. (2002): Innovative Technologien zur Abwasserbehandlung in urbanen Gebieten. Korrespondenz Abwasser, 49. Jhrg./Nr. 10, Oktober 2002
- [8]. UBA- Umweltbundesamt (2001): Bericht zur Klärschlamm Entsorgung, Berlin, 30.4.2001
- [9]. DIN4045, (2003): Abwassertechnik – Grundbegriffe. Düsseldorf: Beuth Verlag.
- [10]. Mörike;Betz K.D.; Mergenthaler E.W. (2001):Biologie des Menschen. 15. Auflage, Hrsg.:Quelle & Meyer Verlag, Wiebelsheim.
- [11]. Jönsson, H.; Richet-Stinzing, A.; Vinneras, B.; Salomon, E. (2004): Guidelines on the use of Urin and Faces in Crop Production. EcoSanRes Publications Series, Report 2004-2
- [12]. <http://www2.gtz.de/Dokumente/oe44/ecosan/de-begrifflichkeiten-kennzahlen-2008.pdf> (08.01.2012) Oldenburg, M.; Meinziger, F.; Nisipeanu, P.; Schneider, C. (2008): Begrifflichkeiten und Kennzahlen zur Zusammensetzung von Teilströmn neuartiger Sanitärsysteme.
- [13]. Gredigk, S.; Bolle, F.-W.; Wöffen, B.; Schröder, M.; Illing, F. (2001): Wasserstoff und regenerative Energieträger zur Energie- und Verfahrensoptimierung von Abwasserreinigungsanlagen, Abwasser – Energie – Wasserstoff – Die Zukunft hat begonnen. FIW-Tagung, 12.12.2001, Aachen.
- [14]. Herbst, H. (Offenlegungstag: 27.03.2008): Nährstoffrückgewinnung mit Beutelfiltrationssystemen. Offenlegungsschrift. Deutsches Patent- und Markenamt.

- 
- [15]. Stuetz, R. (2009): Principles of Water and waste water treatment Processes. IWA Verlag, 2009 Cranfield University.
- [16]. Heinrich, K., & Heinrich, S. (2008). Kleinkläranlagen Handbuch. Niederfrohna: Mironde Verlag.
- [17]. Melin, T. (2007): Strategien zur Foulingkontrolle bei Membranbelebungsanlagen in der kommunalen Abwasserbehandlung. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben.
- [18]. Thiemig, C. (2011): Die Bedeutung der Filtrationseigenschaften von belebten Schlämmen bei Betrieb von Membranbioreaktoren. Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; genehmigte Dissertation. Aachen: RWTH.
- [19]. GIZ (2011a). Auflaufplan des SANIRESCH Projekts. <http://www.saniresch.de/en/project-components>
- [20]. Winker, M. (2011a) Struktur der Sanitärbereich in Haus 1 der GIZ. (email, Interview)
- [21]. Winker, M.; Paris, S.; Montag, D.; Heyneamm, J. (2011): Erste Ergebnisse der Implementierung der Urin-, Braun- und Grauwasserbehandlung im Eschborner GIZ-Hauptgebäude. Wasserautarkes Grundstück. Darmstadt: Fachverreinigung Betriebs- und Regenwassernutzung (fbr) e.V. (15) S. 87-103
- [22]. HUBER SE. (2011a). Dokumentation, Projekt: BMBF Saniresch, Auftrags-Nr.: 810903 Braunwasserbehandlung. Berching: Huber SE
- [23]. Heyenmann, J. (2011). Präsentation Steuerungstreffen Sept. 2011 – Braun- und Grauwasser MBR. Giessen: THM.
- [24]. Arnim, B. (1978): Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung; Verlag Haupt - Berlin und Stuttgart.
- [25]. Schuh, H. (2001). Entscheidungsorientierte Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung, Empirische Analyse, theoretische Fundierung und Systematisierung am Beispiel der natürlichen Ressource Wasser. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. rer. pol. Dresden: Technischen Universität Dresden.
- [26]. Zangemaister, C. (1976): Nutzwertanalyse in der Systemtechnik. Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen, 4. Auflage, Berlin, S. 110
- [27]. Forman, E. H., & Selly, M. A. (2002): Decision by Objectives (How to convince others that you are right), Pittsburgh.
- [28]. Peters, L. M., & Zelewski, S. (2004): Möglichkeiten und Grenzen des „Analytic Hierarchy Process“ (AHP) als Verfahren zur Wirtschaftlichkeitsanalyse. Planung & Unternehmensteuerung 15, 295-324
- [29]. Ahlert, M. (2003): Einsatz des Analytic Hierarchy Process im Relationship Marketing. In: Prof. Dr. Bruhn.M.[Hrsg.] 1. Auflag, Gabler Verlag.

- 
- [30]. Labonde, B. (1986): Die Bedeutung der Nutzwert-Wirtschaftlichkeits-Analyse als Instrument zur stofflichen und finanzökologischen Bewertung von Arbeitssystem, Köln, S. 25
- [31]. Kroés, G. (1973): Nutzwertanalyse, Vergleichende Beurteilung von Aussiedlungen, Beiträge zum Siedlungs- und Wohnungswesen und zur Raumplanung, Band 8, Münster, S. 25
- [32]. Rohr, H. G. (1977): Nutzwertanalyse-eine Hilfe für die Stadtwiklungsplanung?, Hamburg, S. 85
- [33]. <http://www.susana.org> (08.01.2012) SuSanA. (2008): Mehr Nachhaltigkeit bei Sanitärversorgungskonzepten. Version 1.2 Eschborn: Sustainable Sanitation Alliance.
- [34]. Foxon, T. J.; Mcilkeny, G.; Gilmour, D.; Oltean-Dumbrava, C.; Souter, N.; Ashley, R. et al. (2002): Sustainability Criteria for Desion Support in the UK Water Industry. Journal of Enviromental Planning and Management, 45 (2), S. 285-301
- [35]. UN (2007): Water in a Chinging World. The United Nations World Water Development Report 3 New York, United Nations.
- [36]. <ftp://ftp.fao.org/ag/agp/docs/cwfto14.pdf> (08.01.2012) FAO. (2010): Current world fertilizer trands and outlook to 2014. Rome.
- [37]. Sieghart, L. (2005). Wasserrecycling in Moscheen – ein neuer Ansatz im Jemen, Entwicklungszusammenarbeit in islamisch geprägten Ländern: Erfahrungen und Perspektiven, Beispiel aus Asien, Afrika und Mittelereen Osten. Eschborn: GIZ.
- [38]. Jahresbericht 1997 EWAG, (1997) Düdendorf, Schweiz.
- [39]. Falkenmark, M., & Wildstrand, M. (1992): Population and water resources: a delicate balaaance. Population Bullrtin 47: 3. Waschington D.C.: population Reference Bureau.
- [40]. <http://epi.yale.edu/> (08.10.2012) Yale University. (2010). Environmental performance index 2010. Retrieved 11.15.2011.
- [41]. Feicht, M. (2011a). Unterlagen MCB. (e-mail, Interviewer).
- [42]. Feicht, M. (2011b). Feststoffabscheider Ro9-E. (e-mail, Interviewer)
- [43]. Winker, M., & Saadoun, A. (2011): Urin and Brpwnwater separation at GIZ mein office bilding Eschborn, Germany; Case Study of sustainable sanitation projekts. Eschborn: Sustainable Sanitation Alliance (SuSanA).
- [44]. Feicht, M. (2011c). Stromverbrauch MBR. (e-mail. Interviewer).
- [45]. Statistisches Bundesamt. (2011). Statisches Jahrbuch 2011. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- [46]. Feicht, M. (2011d). Wartungskosten MBR Anlage. (e-mail, Interviewer).
- [47]. Immowelt AG. <http://immowelt.de> Retrieved 24.12.2011.
- [48]. Hessisches Statistisches Landesamt (2010): Statisches Jahrbuch Hessen. Wiesbaden: Hessisches Statisches Landesamt

- 
- [49]. [http://www.kompetenz-wasser.de/index.php?id=353&type=0&jumpurl=fileadmin%2Fuser\\_upload%2Fpdf%2Fforschung%2Fscst%2FSCST\\_Abschluss\\_Muskolus\\_text.pdf](http://www.kompetenz-wasser.de/index.php?id=353&type=0&jumpurl=fileadmin%2Fuser_upload%2Fpdf%2Fforschung%2Fscst%2FSCST_Abschluss_Muskolus_text.pdf) (08.01.2012) Muskolus, A.; Ellmer, F. (2006): Düngeversuche mit Nährstoffen aus den SCST-Projekt und Ergebnisse aus Akzeptanzumfragen. SCST-Abschlusssymposium am 14. Dezember in Berlin. 9 S.
- [50]. [http://www.eawag.ch/forschung/eng/schwerpunkte/abwasser/toilettenabwasser/Schlussbericht-Hohtalli\\_d.pdf](http://www.eawag.ch/forschung/eng/schwerpunkte/abwasser/toilettenabwasser/Schlussbericht-Hohtalli_d.pdf) (01.01.2012) Bützer, S.; Böhler, M.; Joss, Adriano. et al. (2006): Dezentrale Reinigung und Wiederverwendung von Toilettenabwasser im alpinen Raum : Abschließender Bericht über die Aktivitäten und Untersuchungen im Projekt. Eawag.
- [51]. ReLL AG (2012): Information über die Elektrizitäts- und Netzungstarife.
- [52]. Knerr, H.; Einsfeld, K.; Engelhart, M.; Heck, A.; Legrix, J.-C.; Rechenburg, A.; Wölle, J. (2009): Modulare Gesamtlösung für dezentrales Wasserrecycling - Ergebnisse des BMBF-Verbundprojektes KOMPLETT. GWF Wasser Abwasser, 150 (2009) Nr.1, S. 64-71.
- [53]. <http://geoearth.uncc.edu/people/iheard/1105Notes/Aug%2030.ppt>, (01.01.2012) Person Education Inc. (2010). Persons per square kilometer of arable land, Retrieved 11,24, 2011.
- [54]. Muller, P. (2000). Physiologic population density for each of the world's states. St. Louis: University of Missouri
- [55]. UN (2007): World urbanization Prospects The 2007 Revision, Data Tables and Highlights. New York, United Nations.

---

# 6. Anhang

## 6.1 Technische Daten der Anlagenkomponenten des SANIRESCH Projekts

### Pumpen:

- Beschickungspumpe MBR (P1)  
Fabrikat : Netzsch  
Typ: NM015  
Leistung der Pumpe: 0,11 [m³/h] bei 2 m Förderhöhe
- Permeatpumpe (P2)  
Fabrikat : Timmer  
Typ: DP 60-A  
Leistung der Pumpe (max.): 0,18 [m³/h]  
Leistung vorgesehener Betrieb: 0,02 [m³/h] (je nach benötigten Durchsatz)
- Überschussschlammpumpe (P3)  
Fabrikat : Speck  
Typ: TOP 71WS  
Leistung der Pumpe: 9,4 [m³/h] bei 2 m Förderhöhe
- Betriebswasserpumpe (installiert im Grauw.-Betriebswasserspeicher)  
Fabrikat : Speck  
Typ: TOP 71WS  
Leistung der Pumpe: 9,4 [m³/h] bei 2 m Förderhöhe

### Vorlage:

- Volumen Vorlage max. 0,40 [m³]
- Schneckenantrieb (1)  
Fabrikat : Bauer Danfoss  
Typ: BF10-74 DXE08MA4  
Leistung: 0,37 [KW]
- Rührwerk (R2)  
Fabrikat: TURBO Misch- und Verfahrenstechnik  
Typ: SQ-0-0,09  
Leistung: 0,09 [KW]

### Biologische Stufe:

- Volumen Biologie max. 0,71 [m³]
- Typ Belüftungsgebläse Rietschle LP 150
- Membranrohrbelüfter Belüft. Fa. Ott, Schlitzweite 1,2 mm (2 Belüfterlanzen)

### Filtrationsstufe:

- Membranfläche 3,5 [m²]
- Auslegungsfluss 7 [l/(h\*m²)] (einstellbar)
- Auslegungstemperatur 20 [°C]
- Porengröße 0,038 [µm]
- Membranmaterial PES
- TMP\* Bereich - 350 [mbar]
- Standzeit der Membran 1[a] (nach Bedarf)
- Typ Spülluftgebläse Rietschle LP 80
- Membranrohrbelüfter Spülung Fa. Ott, Schlitzweite 2,0 mm

\*TMP = Transmembrandruck

## 6.6 Daten Tabelle der vorläufigen Kostenabschätzung

Jahr	Investitionskosten (2% Inflation/a)	Betriebskosten (2% Inflation/a)	Kosteneinsparung	Energiekosten (Teuerung 6.5 %/a)	Wartungskosten (inflation 2 %/a)	Wasserkosten (Teuerung 2 %/a)	Jahres Gewinnen
0	58447.41	4546,38	0.00	3255.11	1272.38	21903.90	17357.52
1	59616.36	4764.52	17376.41	3466.69	1297.83	22341.98	17577.46
2	60808.69	5015.81	34953.87	3692.03	1323.78	22788.82	17773.01
3	62024.86	5282.27	52726.87	3932.01	1350.26	23244.59	17962.33
4	63265.36	5564.85	70689.20	4187.59	1377.27	23709.49	18144.63
5	64530.66	5864.59	88833.83	4459.78	1404.81	24183.68	18319.08
6	65821.28	6182.58	107152.91	4749.67	1432.91	24667.35	18484.77
7	67137.70	6519.96	125637.69	5058.40	1461.56	25160.70	18640.73
8	68480.46	6877.99	144278.42	5387.19	1490.80	25663.91	18785.92
9	69850.07	7257.97	163064.34	5737.36	1520.61	26177.19	18919.22
10	71247.07	7661.31	181983.56	6110.29	1551.02	26700.73	19039.42
11	72672.01	8089.50	201022.98	6507.46	1582.04	27234.75	19145.24
12	74125.45	8544.13	220168.22	6930.44	1613.69	27779.44	19235.31
13	75607.96	9026.88	239403.53	7380.92	1645.96	28335.03	19308.15
14	77120.12	9539.56	258711.68	7860.68	1678.88	28901.73	19362.17
15	78662.52	10084.08	278073.86	8371.63	1712.46	29479.77	19395.68

## 6.7 Gewichtung der chinesischen Experten<sup>5</sup>

Kriterien und Dimensionen	Gewichtung von chinesischen Experten	Bewertung								Summe der gegebenen Wert	Gewichtung	Standardabweichung	
	Gewichtung	Experten 1	Experten 2	Experten 3	Experten 4	Experten 5	Experten 6	Experten 7	Experten 8				
	Σ= 100.00%												
<b>G</b> <b>Gesundheit und Hygiene</b>	<b>6%</b>									32	6.08	6	
G1 Qualität des Permeat	0												
G2 Gesetzliche Anforderungen an Brauchwasser	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	6.08	6	0
<b>F</b> <b>Finanzielle Kriterien</b>	<b>42%</b>									235	42.11	42	
F1 Direkt Finanzierung von der Regierung an die Anlage	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
F2 Indirekt Anreize an Betrib von Braunwasserbehandlung	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
F3 Investitionskosten ( Anlage, Leitungssystem )	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
F4 Betriebskosten (Wartung/Unterhalt)	5	4	3	3	4	4	3	3	3	27	4.84	5	0.51754917
F5 Strompreis	4	4	4	3	3	3	3	3	3	26	4.66	4	0.46291005
F6 Frischwasserpreis	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
F7 Abwasserpreis	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
F8 Grundstückpreis	3	3	3	2	2	2	3	4	3	22	3.94	3	0.707106781
<b>T</b> <b>Technologie</b>	<b>0%</b>												
T1 Jährliche Wartung	0												
T2 Stabilität der Operation und Qualität der Permeat	0												
T3 Ausfälle	0												
<b>U</b> <b>Umgebung des Betribes</b>	<b>27.00%</b>									150	26.88	27	
U1 Wasserknappheit	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
U2 Frischwasserqualität	4	3	3	4	3	3	3	3	3	25	4.48	4	0.353553391
U3 Anzahl der Bewohner	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0
U4 Anschluss an Kanalisation	3	2	2	1	1	2	2	2	1	13	2.33	3	0.51754917
U5 Besiedlungsdichte	2	2	2	1	1	1	1	2	1	11	1.97	2	0.51754917
U6 Urbanisationsgrad	3	2	2	2	3	2	3	2	2	18	3.23	3	0.46291005
U7 Nährstoffbedarf	3	2	2	3	3	3	2	2	2	19	3.41	3	0.51754917
U8 Akkumulation der Braunwasser	0												
<b>S</b> <b>Soziokulturelle Kriterien</b>	<b>25.00%</b>									141	25.27	25	
S1 Akzeptanz bezüglich der Wiederverwertung des gereinigten Braunwassers	5	4	4	3	4	4	3	4	4	30	5.38	5	0.46291005
S2 Ökologische Bewusstsein	5	4	4	3	3	3	4	4	3	28	5.02	5	0.534522484
S3 Pioniergeist	4	3	2	3	2	3	3	3	2	21	3.76	4	0.51754917
S4 Akzeptanz bezüglich der Nutzung der Menschlichen Exkrement als Dünger	5	4	4	4	4	4	3	3	4	30	5.38	5	0.46291005
S5 Pädagogische Maßnahmen der Regierung	6	4	4	4	4	4	4	4	4	32	5.73	6	0

<sup>5</sup> Kontakter der chinesischen Experten: Research Professor Herr Meixin, Yang in der Statische Verwaltung des Ozeans Chinas. Email: [xmyangdl@126.com](mailto:xmyangdl@126.com)

## 6.8 Komplett Version der NWA zur Identifizierung von globalen Hotspots

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung		Afghanistan		Ägypten		Algerien		Australien (Südost)	
		$\Sigma =$	25.00%	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert
U	Umgebung des Betribes		25.00%								
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	60	10	120	10	120	10	120
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	5	25	5	25	5	25	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	10	40	10	40	10	40
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	10	10	20	5	10	1	2
U5	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	1	2	5	10	5	10	10	20
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			Summenwert %	11.7		21.5		20.5		20.7	
			Rang	33		3		7		6	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	China (Nord)		Indien		Iran		Isreal		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	Umgebung des Betriebes	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	120	5	60	5	60	10	120
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	5	25	1	5	5	25	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	1	4	10	40	5	20	5	20
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	10	20	5	10	10	20
U5	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	10	1	2	10	20	10	20
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			Summenwert %	17.9		12.7		13.5		20.5	
			Rang	14		30		26		7	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	Jemen		Jordanien		Kasachstan		Krigisistan		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	<b>Umgebung des Betriebes</b>	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	120	10	120	5	60	5	60
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	0	0	10	50	5	25	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	5	20	10	40	10	40
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	10	20	5	10	1	2
U5	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	1	2	10	20	5	10	5	10
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			<b>Summenwert %</b>	16.2		23		14.5		13.7	
			<b>Rang</b>	15		1		20		24	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	Libanon		Libyen		Madagaskar		Marokko		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	Umgebung des Betriebes	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	60	10	120	5	60	10	120
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	5	25	5	25	5	25	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	10	40	10	40	10	40
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	5	10	5	10	5	10
U5	Urbanisierungsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	10	20	1	2	5	10
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			Summenwert %	14.5		21.5		13.7		20.5	
			Rang	20		3		24		7	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	Mauretanien		Mexico		Mosambik		Namibia (Süd)		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	<b>Umgebung des Betriebes</b>	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	120	5	60	5	60	5	60
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	5	25	5	25	5	25	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	40	10	40	10	40	10	40
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	10	5	10	5	10	5	10
U5	Urbanisierungsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	10	10	20	5	10	5	10
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			<b>Summenwert %</b>	20.5		15.5		14.5		14.5	
			<b>Rang</b>	7		17		20		20	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	Oman		Pakistan		Peru (Küsten)		Saudi-Arbien		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	<b>Umgebung des Betriebes</b>	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	120	5	60	5	60	10	120
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	5	25	5	25	1	5	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	10	40	10	40	5	20
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	10	20	5	10	10	20
U5	Urbanisierungsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	5	10	10	20	10	20
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			<b>Summenwert %</b>	20.5		15.5		13.5		20.5	
			<b>Rang</b>	7		17		26		7	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	Spanien (Nordost)		Südafrika		Syrien (Süd)		Tunesien		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	Umgebung des Betriebes	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	60	5	60	5	60	10	120
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	1	5	1	5	5	25	5	25
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	1	4	10	40	5	20	10	40
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	10	10	20	5	10	5	10
U5	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	5	10	5	10	10	20
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			Summenwert %	9.9		13.5		12.5		21.5	
			Rang	34		26		31		3	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung $\Sigma =$ 25.00%	Türkei (West)		Turkumenistan		U.S.A (Südwest)		Usbekistan		
			Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	
U	<b>Umgebung des Betriebes</b>	25.00%									
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	60	5	60	10	120	10	120
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	5	25	5	25	1	5	10	50
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	0	0	1	4	10	40
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	10	1	2	1	2	5	10
U5	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	5	10	10	20	5	10
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)								
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0								
			<b>Summenwert %</b>	13.5		9.7		15.1		23	
			<b>Rang</b>	26		35		19		1	

Kriterien und Dimensionen		Gewichtung	Verreinigten Arabischen Emirate		West-Sahara		Zypern		Land	
		$\Sigma =$	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert	Zielertrag	Wert
U	<b>Umgebung des Betriebes</b>	25.00%								
U1	Wasserknappheit(physikalisch)	12	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	120	10	120	5	60	
U2	Trinkwasserqualität	5	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0	0	0	0	0	1	5	
U3	Nährstoffbedarf	4	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	5	20	0	0	5	20	
U4	Besiedlungsdichte	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	10	20	10	20	
U5	Urbanisationsrate	2	Hoch = 10, Mittel = 5, Niedrig = 1, k.A. = 0	10	20	10	20	10	20	
U6	Anzahl der Bewohner	0	Groß (> 80 persons) = 10, Mittel (10 - 80 persons) = 5, Klein = 1 (< 10 persons)							
U7	Anschluss an Kanalisation	8	Hoch = 1, Mittel = 5, Niedrig = 10, k.A. = 0							
			Summenwert %	18		16		12.5		0
			Rang	13		16		31		