



ISOE-Materialien Soziale Ökologie **49**

**Dennis Becker, Alexander Frey, Christina Jungfer, Kerstin Krömer,
Philipp Kulse, Sebastian Maaßen, Engelbert Schramm,
Kristina Wencki, Barbara Zimmermann, Martin Zimmermann**

Marktpotenziale der Wasserwiederverwendung

**Anforderungen und Kriterien in unterschiedlichen Sektoren
und mögliche Zielmärkte für das MULTI-ReUse-Verfahren**



ISOE-Materialien Soziale Ökologie, Nr. 49

ISSN 1614-8193

Die Reihe „ISOE-Materialien Soziale Ökologie“ setzt die Reihe
„Materialien Soziale Ökologie (MSÖ)“ (ISSN: 1617-3120) fort.

**Dennis Becker, Alexander Frey, Christina Jungfer, Kerstin Krömer,
Philipp Kulse, Sebastian Maaßen, Engelbert Schramm,
Kristina Wencki, Barbara Zimmermann, Martin Zimmermann**

Marktpotenziale der Wasserwiederverwendung

Anforderungen und Kriterien in unterschiedlichen Sektoren und mögliche Zielmärkte für das MULTI-ReUse-Verfahren

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben
„MULTI-ReUse: Modulare Aufbereitung und Monitoring bei
der Abwasserwiederverwendung“ wird mit Mitteln des
Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem
Förderkennzeichen 02WAV1403 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung
liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Titelbild: © ISOE

Herausgeber:

Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH

Hamburger Allee 45

60486 Frankfurt am Main



Namensnennung – Weitergabe unter gleichen
Bedingungen 3.0 Deutschland (CC BY-SA 3.0 DE)

Frankfurt am Main, 2017

Inhalt

1	Zusammenfassung	3
2	Einführung und Hintergrund	5
2.1	Wasserwiederverwendung im globalen Kontext	5
2.2	Sektorübergreifende Auswahlkriterien.....	11
3	Technische und ökonomische Randbedingungen der Wasserwiederverwendung	13
4	Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte für spezifische Industriesektoren	14
4.1	Rahmenbedingungen.....	14
4.1.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	15
4.2	Potenzielle Zielmärkte für den industriellen Sektor	17
4.2.1	Best-Practice-Beispiele	21
4.2.2	Zielmärkte	24
5	Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte für die Landwirtschaft	30
5.1	Rahmenbedingungen.....	30
5.1.1	Rechtliche Rahmenbedingungen	30
5.1.2	Mengenmäßige Schwankungen und Infrastruktur	31
5.1.3	Akzeptanz	31
5.2	Potenzielle Zielmärkte für den Sektor Landwirtschaft	32
5.2.1	Best-Practice-Beispiele	33
5.2.2	Zielmärkte	36
6	Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft	42
6.1	Rahmenbedingungen für Betriebswasser.....	42
6.2	Potenzielle Zielmärkte für Betriebswasser in der Siedlungswasserwirtschaft	44
6.2.1	Best-Practice-Beispiele	46
6.2.2	Zielmärkte	49
6.3	Rahmenbedingungen für Trinkwasser.....	54
6.4	Potenzielle Zielmärkte für Trinkwasser in der Siedlungswasserwirtschaft	55
6.4.1	Best-Practice-Beispiele	56

7	Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte im Bereich der Grundwasseranreicherung	59
7.1	Rahmenbedingungen.....	60
7.1.1	Hydrogeologische und technologische Voraussetzungen	60
7.1.2	Rechtlicher Rahmen und Akzeptanz	61
7.2	Potenzielle Zielmärkte für Grundwasser als Wasserspeicher	62
7.2.1	Best-Practice-Beispiele	63
7.2.2	Zielmärkte	66
7.3	Potenzielle Zielmärkte für künstliche Grundwasseranreicherung als hydraulische Barriere.....	70
7.3.1	Best-Practice-Beispiel Wulpen-Torreele-St. André (Belgien).....	71
7.3.2	Zielmärkte	72
8	Fazit	75
9	Literatur	77
10	Institutionen und Personen.....	91

1 Zusammenfassung

Die Verfügbarkeit von Wasser in quantitativer und qualitativer Hinsicht ist ein Schlüsselfaktor für die Wirtschaft jeder Region der Welt. Der Wettbewerb um Wasserressourcen nimmt zu, insbesondere zwischen Landwirtschaft, Industrie und öffentlicher Wasserversorgung. Bei den meisten Aktivitäten mit Wasser fällt Abwasser an. Angesichts der stetig steigenden Nachfrage gewinnt Siedlungsabwasser als zuverlässige alternative Wasserquelle zunehmend an Bedeutung. Weltweit macht die Landwirtschaft 69 % des gesamten Wasserverbrauchs aus, im Vergleich zu 19 % für die Industrie und 12 % für den häuslichen Gebrauch. In den Industrieländern verbrauchen Industrien jedoch mehr als die Hälfte des für den menschlichen Gebrauch verfügbaren Wassers. Bisher ist die Wiederverwendung von behandeltem kommunalem Abwasser als solches nicht eindeutig auf EU-Ebene oder in Deutschland geregelt. Im globalen Kontext haben zwei große, dennoch entgegengesetzte Philosophien Wasserwiederverwendungskriterien maßgeblich beeinflusst, die WHO und die kalifornischen Verordnungen.

Das Ziel vom Projekt MULTI-ReUse ist es, aus konventionell gereinigtem kommunalem Abwasser anhand von modular aufgebauten Verfahrensketten Wasser mit klar definierten Qualitäten für die Wiederverwendung in verschiedenen Sektoren zu produzieren. Davon ausgehend zeigt dieses Dokument dem Leser Zielmärkte für die Wasserwiederverwendung in den Sektoren Industrie, Landwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft sowie in der Grundwasseranreicherung auf. Für die Auswahl der Zielmärkte wurden bestimmte sektorübergreifende sowie sektorspezifische Kriterien festgelegt. Weiterhin wird darauf eingegangen, welche Richtlinien und Verordnungen dabei zu beachten sind. Für jeden Verwendungszweck wird in den nachfolgenden Kapiteln die Herangehensweise beschrieben und auf potenzielle Zielmärkte eingegangen.

Industrie

Die Nutzung von Wasser im Rahmen verschiedenster industrieller Prozesse verlangt unterschiedliche Prozesswasserqualitäten. Neben Kühlwasser spielen Spül-, Transport-, Wasch-, Produktwasser und Kesselspeisewasser eine wichtige Rolle. Die Branchen mit der größten Wassernutzung sind die chemische Industrie, gefolgt von der Metallindustrie, der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie sowie der Papier- und Textilindustrie. Die Wiederverwendung von behandelten urbanen Abwässern für industrielle Zwecke ist nach EU-Rechtsvorschriften nicht explizit geregelt. Allerdings gibt es verschiedenen Richtlinien und Verordnungen auf globaler Ebene. Daneben gelten verschiedenste Verordnungen und Richtlinien, die die Wasserwiederverwendung am Rande betreffen. Neben den Rahmenbedingungen und ausgewählten Best-Practice-Beispielen (Niederlande und Mexiko) wurden anhand definierter Kriterien potenzielle Zielländer (Belgien und die Vereinigten Arabischen Emirate) identifiziert.

Landwirtschaft

Die Wasserwiederverwendung für die landwirtschaftliche Bewässerung ist derzeit in Deutschland und EU-weit noch nicht gesetzlich geregelt. Es gibt jedoch verschiedene Empfehlungen (u.a. US-EPA, FAO, WHO) und gesetzliche Richtlinien (u.a. Wasserrahmen-, Grundwasser- und Kommunalabwasserrichtlinie), in denen einzelne relevante Aspekte der Wasserwiederverwendung im Sektor Landwirtschaft festgelegt sind. Zur Vereinheitlichung der Qualitätsanforderungen bezüglich der landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung wird von der Europäischen Kommission in naher Zukunft eine EU-weite Regelung in Kraft treten. Anhand der Best-Practice-Beispiele Limassol (Zypern) und Water Conserv II (Florida, USA) werden verschiedene praxisrelevante Aspekte der landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung näher beleuchtet. Als potenzielle Zielmärkte wurden die Länder Spanien und China identifiziert, deren wasserwirtschaftliche Rahmenbedingungen genauer beschrieben werden.

Siedlungswasserwirtschaft

Die Wiederverwendung von Wasser ist in der Siedlungswasserwirtschaft vor allem für die Bewässerung von Stadtgrün, für die Straßenreinigung und für häusliches Betriebswasser möglich. Nur in extremen Einzelfällen wird bisher zur Herstellung von Trinkwasser auf Siedlungsabwasser als Ressource zurückgegriffen.

Die Versorgung mit häuslichem Betriebswasser verlangt den Aufbau eines weiteren Versorgungsnetzes, das sich entweder auf große Verbraucher (z. B. Schulen und Sportstätten) beschränkt oder flächendeckend angelegt sein muss. Seine Leitungen müssen verwechslungssicher gekennzeichnet werden. Auf jeden Fall ist der gesundheitliche Infektionsschutz zu beachten; das Betriebswasser ist immer in einer definierten Qualität abzugeben. Als Best-Practice-Beispiele wird die Wasserwiederverwendung in Hotelanlagen (Türkei) und die Versorgung von Bürogebäuden mit Toilettenspülwasser (Japan) vorgesehlt. Darüber hinaus werden die potenziellen Zielmärkte Spanien und Saudi-Arabien beschrieben.

Als Best-Practice-Beispiele für die Wiederverwendung als Trinkwasser gelten Windhoek (Namibia) und Singapur. Da die direkte Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser als Trinkwasser nur dann erfolgen sollte, wenn alle anderen Ressourcen zur Trinkwasserversorgung nicht ausreichend verfügbar sind, wurden für diese Anwendung keine konkreten Zielmärkte betrachtet.

Grundwasseranreicherung

Grundwasseranreicherung an sich stellt keine finale Nutzungsmöglichkeit für aufbereitetes Abwasser dar. Im Rahmen der Marktbetrachtung wird vielmehr zwischen der Nutzung der Grundwasseranreicherung zur saisonalen oder mehrjährigen Wasserspeicherung für eine spätere Wiederverwendung in Industrie, Landwirtschaft oder Siedlungswasserwirtschaft sowie der Anwendung als hydraulische Barriere zur Abwendung von Schadstoffströmen unterschieden. Die individuellen rechtlichen Rahmenbedingungen ergeben sich hierbei aus den

landesspezifischen Gesetzen und Regelwerken zur Grundwasseranreicherung mit gereinigtem Abwasser sowie den weiteren verwendungszweckspezifischen Vorgaben. Erstere lassen sich vornehmlich aus der amerikanischen und australischen Gesetzgebung ableiten. Zur Umsetzung von Grundwasseranreicherungsmaßnahmen sind ferner eine gute Kenntnis der hydrogeologischen Gegebenheiten sowie ein umfassendes Monitoring des Grundwassers unabdingbar. Dies ist in vielen nationalen und internationalen Gesetzen und Richtlinien bereits vorgeschrieben. Neben drei Best-Practice-Beispielen zur Grundwasseranreicherung mit gereinigtem Abwasser in Israel, China und Belgien werden im Rahmen dieser Marktbetrachtung für die betrachteten Anwendungsfälle jeweils zwei potentielle Zielmärkte (Israel und Indien zur Wasserspeicherung, Türkei und USA für hydraulische Barrieren) vorgestellt.

2 Einführung und Hintergrund

2.1 Wasserwiederverwendung im globalen Kontext

Wasser ist sowohl eine kostbare als auch begrenzte Ressource. Obwohl 72 % der Erdoberfläche mit Wasser bedeckt sind, macht Süßwasser nur 2,5 % davon aus. Das meiste Wasser davon ist in Form von Eis an den Polkappen und Gletschern gefroren. Das verbleibende Süßwasser liegt hauptsächlich als Grundwasser vor, nur ein kleiner Bruchteil ist oberirdisch oder in der Luft vorhanden (Europäische Kommission, 2017; WWAP, 2017). Wasserressourcen beschreiben das zur Verfügung stehende Wasser in einem bestimmten Gebiet, Land oder einer Region und umfassen Oberflächengewässer (also Küstengebiete, Seen, Flüsse und Bäche) und Grundwasser. Erneuerbare Wasserressourcen werden als Summe der internen Flüsse (Niederschlag minus tatsächliche Evapotranspiration) und externer Zuflüsse berechnet. Die Süßwasserverfügbarkeit in einem Land wird durch Klimaverhältnisse, Geomorphologie, Landnutzung und grenzüberschreitende Wasserströme bestimmt (siehe dazu auch Abbildung 1). Daher gibt es erhebliche Unterschiede zwischen einzelnen Ländern (Mudgal *et al.*, 2015).

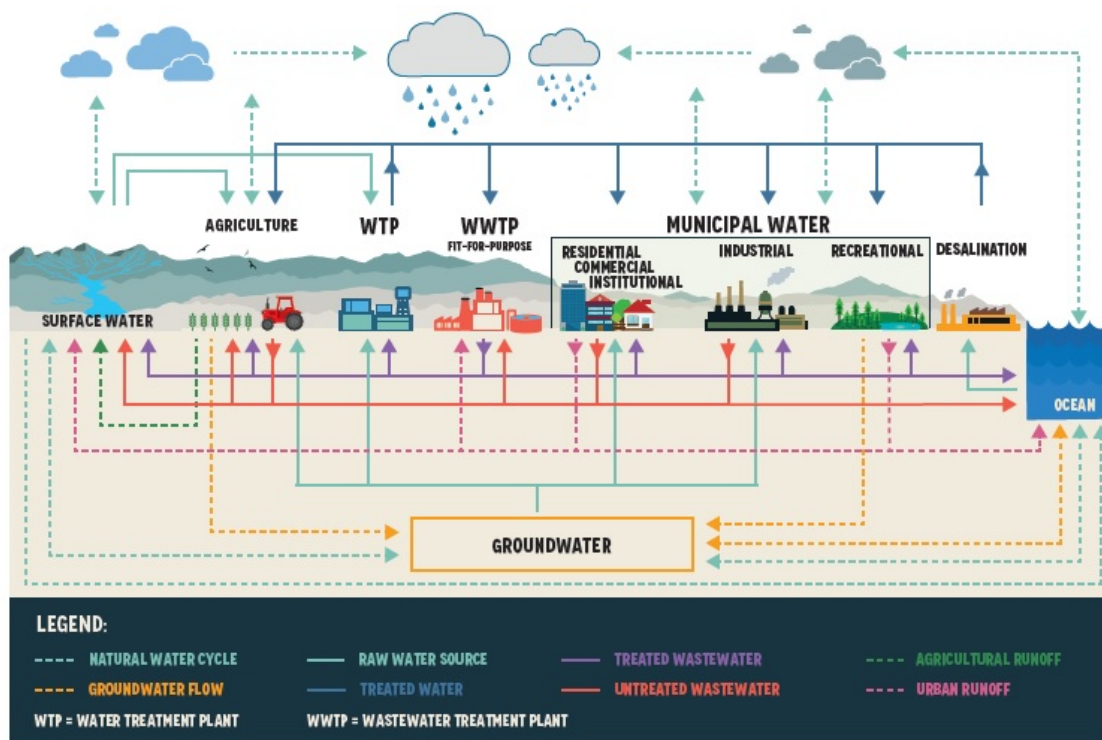


Abbildung 1: Wasserkreislauf (WWAP, 2017)

Weltweit spielt Süßwasser eine enorm wichtige Rolle in der Gesellschaft. Neben der häuslichen Nutzung wird Wasser ebenso für die landwirtschaftliche Bewässerung, als Kühlmittel in der Industrie und Energieerzeugung, als Medium für industrielle Prozesse und für weitere allgemeine Anwendungen in den verschiedenen Sektoren (Landwirtschaft, Industrie, Öffentlichkeit/Kommune) verwendet, wie beispielsweise zum Waschen oder für den Transport (Lens *et al.*, 2002). In Anbetracht der Tatsache, dass die globalen Wassermengen im Zeitverlauf relativ konstant sind und Landwirtschaft, Vieh und Energie mehr als 80 % des Wassers für den menschlichen Gebrauch in Anspruch nehmen, wird die Nachfrage nach Süßwasser durch Bevölkerungswachstum und zunehmende Lebensstandards die vorhandenen Wasserressourcen unweigerlich weiter belasten (Paranychianakis *et al.*, 2014). Bereits innerhalb der letzten 100 Jahre hat sich der Wasserverbrauch weltweit fast versechsfacht und eine von sechs Personen hat keinen regelmäßigen Zugang zu sicherem Trinkwasser (Wada *et al.*, 2016; Aoki *et al.*, 2004). Bei wachsenden Bevölkerungszahlen wird erwartet, dass der weltweite Wasserbedarf auch in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen wird. Neben dem Agrarsektor, der aktuell bereits für 70 % der weltweiten Wasserentnahmen verantwortlich ist, wird v. a. für die Industrie- und Energieproduktion ein starker Anstieg der Wassernachfrage vorausgesagt. Die beschleunigte Urbanisierung und der Ausbau der kommunalen Wasserversorgungs- und Sanitärsysteme tragen zusätzlich zu einer steigenden Nachfrage bei (WWAP, 2017). Die Konkurrenz um Wasserressourcen wird hierdurch insbesondere zwischen Landwirtschaft, Industrie und der öffentlichen Wasserversorgung weiter zunehmen (Lens *et al.*, 2002).

Die Verfügbarkeit von Wasserressourcen ist jedoch auch inhärent mit der Wasserqualität verbunden, da die Verschmutzung von Wasserquellen verschiedene Nutzungsmöglichkeiten verhindern kann. Die meisten Aktivitäten, bei denen Wasser verwendet wird, generieren auch Abwasser. Da die Gesamtnachfrage für Wasser wächst, steigt folglich auch die Menge erzeugten Abwassers und, bei unzureichender Behandlung, die damit einhergehende Gesamtbelastung weltweit kontinuierlich an (WWAP, 2017). Erhöhte Einleitungen von unbehandeltem Abwasser, kombiniert mit landwirtschaftlichem Abfluss und unzureichend behandeltem Abwasser aus der Industrie, haben in der Vergangenheit bereits zu einer Verschlechterung der Wasserqualität auf der ganzen Welt geführt. Im Durchschnitt behandeln Länder mit hohem Einkommen etwa 70 % des kommunalen und industriellen Abwassers, das sie erzeugen. Diese Quote sinkt in den Ländern mit höherem mittlerem Einkommen auf 38 % und in den Ländern mit niedrigerem mittlerem Einkommen auf 28 %. In Ländern mit niedrigem Einkommen werden lediglich 8 % des Abwassers behandelt. Diese Schätzungen untermauern den oft zitierten Näherungswert, dass weltweit über 80 % aller Abwässer ohne Behandlung in die Umwelt entlassen werden (WWAP, 2017). Viele große Flächen werden entsprechend auch mit unbehandeltem Abwasser bewässert (vgl. Abbildung 2).

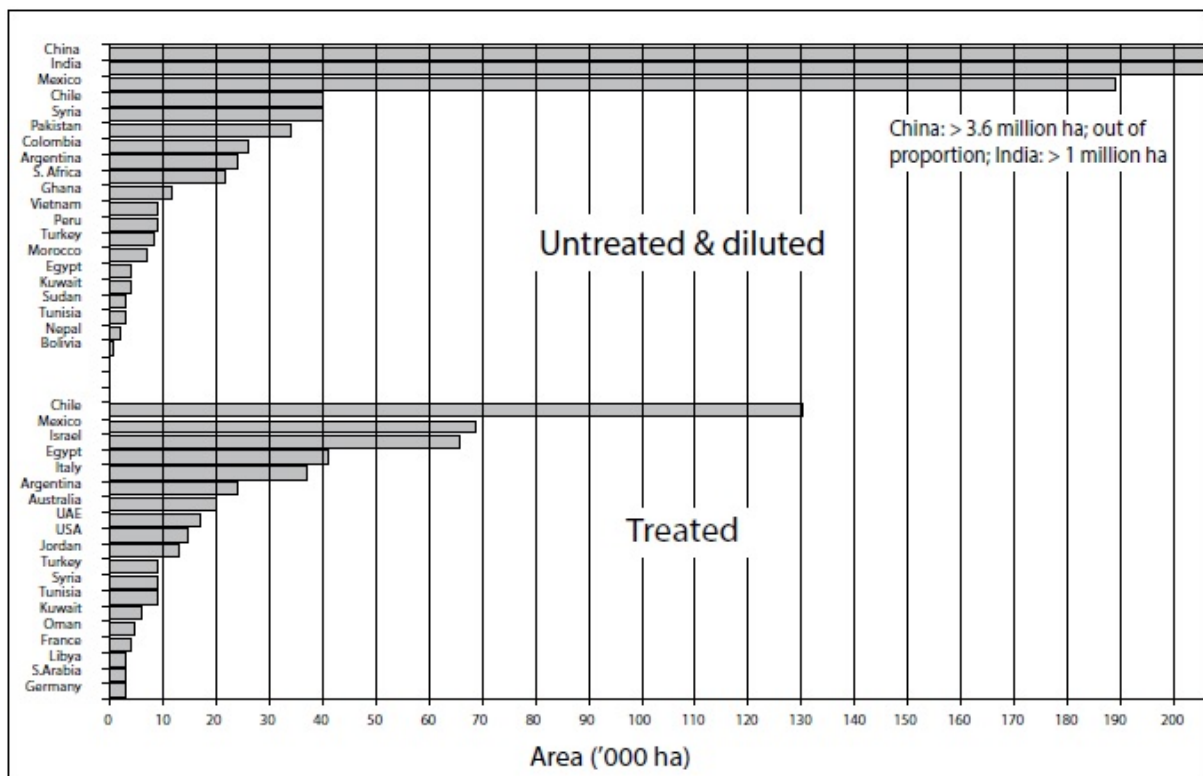


Abbildung 2: Länder mit den größten bewässerten Gebieten mit behandeltem und unbehandeltem Abwasser (Lautze et al., 2014)

Darüber hinaus wird erwartet, dass die projizierten klimatischen Veränderungen die Verfügbarkeit und die Qualität der Wasserressourcen stark beeinträchtigen, so dass die Diskrepanz zwischen Wasserversorgung und Nachfrage zunehmend verschärft wird. So besteht dringend die Notwendigkeit, integrierte Wasserbewirtschaftungspläne zu implementieren, die

alternative Wasserquellen einbeziehen und Maßnahmen zur Verbesserung der Wassernutzungseffizienz erlassen, die den Druck auf natürliche Gewässer reduzieren (Paranychianakis *et al.*, 2014).

Angesichts der stetig wachsenden Nachfrage gewinnt Abwasser als zuverlässige alternative Wasserquelle an Bedeutung und verlagert das Paradigma der Abwasserwirtschaft von "Behandlung und Entsorgung" hin zu "Wiederverwendung, Recycling- und Ressourcenverwertung" (WWAP, 2017). Neben der Verwendung von aufbereitetem Abwasser in der Landwirtschaft und Industrie wird Wasser für indirekte (über eine Grundwasseranreicherung) als auch direkte Nutzung als Trinkwasser wiederverwendet (Abbildung 3). Bedenken für die öffentliche Gesundheit und in geringerem Maße für die Umwelt sind jedoch wesentliche Faktoren, die den Ausbau der Wasserwiederverwendung nach wie vor hemmen (WHO, 2006). Um die potenziellen nachteiligen Auswirkungen zu verringern, setzen viele Länder Kriterien in Form von Vorschriften oder Richtlinien für Wasserwiederverwendungszwecke ein. Im globalen Kontext haben in der Vergangenheit zwei entgegengesetzte Philosophien die Entwicklung von Wasserwiederverwendungskriterien beeinflusst. Dies sind die Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation (WHO, 2006 & 2009) und die kalifornischen Verordnungen (State of California, 2011). Den Empfehlungen der WHO, welche auf kostengünstigen Technologien beruhen, die nur die Erntegutbewässerung abdecken, wird jedoch vorgeworfen, nicht strikt genug zu sein und die gesundheitlichen Risiken nicht angemessen zu adressieren (Paranychianakis *et al.*, 2014). Die kalifornischen Richtlinien enthalten demgegenüber weitergehende Behandlungsanforderungen und restriktivere Qualitätsschwellen, um für einen jeden Verwendungszweck sicheres, aufbereitetes Wasser zu schaffen. In vielen Ländern wird die Wasserwiederverwendung bereits praktiziert. Einzelne Staaten, die eigens Kriterien hierzu entwickelt haben, haben diese jedoch auf nicht trinkbare Verwendungen von recyceltem Wasser begrenzt.

Letztendlich hängt die Anwendung der Wasserwiederverwendung von verschiedenen Dingen ab, wie der Akzeptanz der Interessensgruppen, dem politischen Engagement, gesetzlichen Regelungen und der ökonomischen Umsetzbarkeit bzw. Konkurrenzfähigkeit zur bisherigen Versorgung, die sich im Großen und Ganzen von Land zu Land unterscheidet (Med EUWI, 2007).

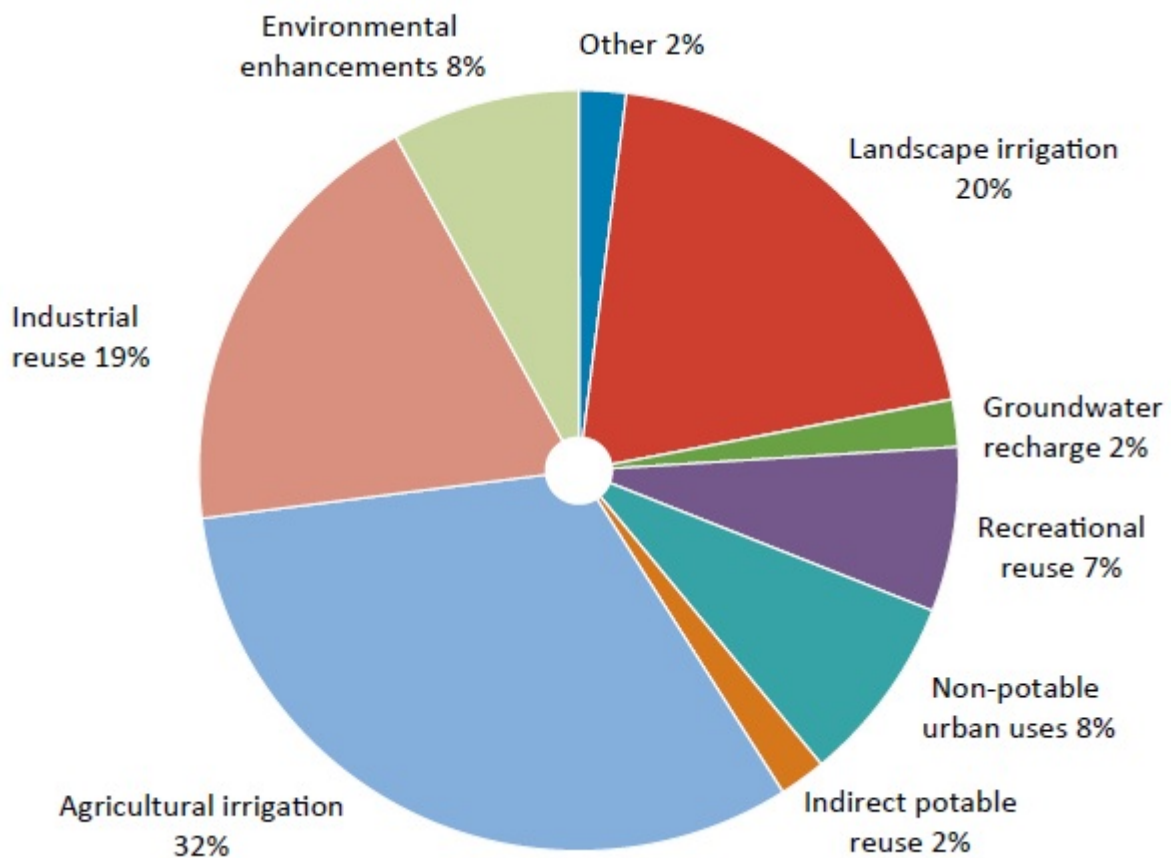


Abbildung 3: Globale Wasserwiederverwendung nach erweiterter (tertiärer) Abwasserbehandlung: Marktanteil nach Anwendung (Lautze et al., 2014)

Dass gerade in der Wirtschaft aktuell bereits ein hoher Bedarf an zusätzlichen Wasserressourcen besteht und dieser zukünftig auch weiter wachsen wird, ist offensichtlich: Alle Wirtschaftssektoren brauchen Wasser; Landwirtschaft, Industrie und die meisten Formen der Energieproduktion sind ohne Wasser nicht möglich. Im Durchschnitt werden 44 % des gesamten Wasserbedarfs in Europa für die Landwirtschaft verwendet, 40 % für Industrie und Energieproduktion (Kühlung in Kraftwerken) und 15 % für die öffentliche Wasserversorgung. Die südeuropäischen Länder nutzen den größten Anteil des Wassers für die Landwirtschaft. Dies macht in der Regel mehr als zwei Drittel des gesamten Wasserbedarfs aus. Die Bewässerung nimmt dabei den größten Anteil bezüglich des Wasserverbrauchs ein. Die mitteleuropäischen und die nordeuropäischen Länder nutzen den größten Anteil des Wassers zur Kühlung in der Energieproduktion, zur industriellen Produktion und in der öffentlichen Wasserversorgung (European Environment Agency, 2017).

Weltweit macht die Landwirtschaft 69 % des gesamten Wasserverbrauchs aus, im Vergleich zu 19 % für die Industrie und 12 % für den häuslichen Gebrauch. In den Industrieländern verbrauchen Industrien jedoch mehr als die Hälfte des für den menschlichen Gebrauch verfügbaren Wassers (FAO, 2017a).

Es liegt in der Natur des Wassers, dass nahezu jede Substanz, die von Menschen verwendet oder ausgeschieden wird, das Potenzial hat, in einer gewissen Konzentration im Abwas-

ser vorhanden zu sein. Die moderne Analytik ermöglicht die Erkennung von chemischen und biologischen Verunreinigungen in geringsten Konzentrationen sogar im Nanogramm (10^{-9}) und Pikogramm (10^{-12}) Bereich. Wenn daher Abwasser wiederverwendet werden soll, müssen die Auswirkungen von bedenklichen Stoffen auf die beabsichtigten Anwendungen bei der Auslegung der Behandlungssysteme berücksichtigt werden. Natrium und Bor haben bspw. das Potenzial, landwirtschaftliche Bewässerungspraktiken negativ zu beeinflussen, wenn sie spezifische Schwellenwerte überschreiten. Einige Bestandteile, wie mikrobielle Erreger und Spuren organischer Chemikalien, haben je nach Konzentration und Dauer der Exposition die Möglichkeit, die menschliche Gesundheit zu beeinträchtigen. Darüber hinaus sind nicht nur die Stoffe selbst wichtig zu betrachten, sondern auch mögliche Transformationsprodukte, in die sie sich während der (erweiterten) Abwasserbehandlung umwandeln können. Pathogene Mikroorganismen sind ein besonderer Schwerpunkt bei der Wasserwiederverwendung wegen ihrer akuten Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, und Viren erfordern besondere Aufmerksamkeit aufgrund ihrer niedrigen infektiösen Dosis, ihrer geringen Größe und Resistenz gegenüber einer Desinfektion (National Research Council, 2012).

Das vom BMBF geförderte Projekt MULTI-ReUse hat sich zum Ziel gesetzt, aus konventionell gereinigtem kommunalem Abwasser anhand von modular aufgebauten Verfahrensketten Wasser mit klar definierten Qualitäten für die Wiederverwendung in verschiedenen Sektoren zu produzieren (Abbildung 5). Die Voraussetzungen für die Vermarktung des MULTI-ReUse-Verfahrens und damit einer langfristig erfolgreichen Wasserwiederverwendung müssen mit einer stetigen Einhaltung definierter Qualitätsstandards einhergehen. Die jeweiligen Verordnungen und Richtlinien der Zielländer zur Wasserwiederverwendung sind dabei unbedingt einzuhalten. Falls keine Richtlinien im jeweiligen Zielland vorliegen, sollten mindestens die WHO-Standards eingehalten werden. Darüber hinaus spielt die Qualität des aufbereiteten Abwassers eine bedeutende Rolle. Diese Qualität entscheidet über die Leistungsfähigkeit des MULTI-ReUse-Verfahrens. Das aufbereitete Abwasser sollte mindestens eine erste und zweite Reinigungsstufe (inklusive biologischer Behandlung) durchlaufen haben, damit das MULTI-ReUse-Verfahren optimal anzuwenden ist. Eine effiziente und zuverlässige zweite Reinigungsstufe (biologische Behandlung) bei der Behandlung von städtischen Abwässern, ist eine Mindestvoraussetzung für die anschließende Wiederverwendung. In vielen Fällen gibt es mittlerweile auch eine dritte und vierte Behandlungsstufe, teilweise werden diese auch als erweiterte Behandlungsstufe bezeichnet. Dieses qualitativ hochwertiger aufbereitete Abwasser ist auch ein wichtiges Kriterium für das MULTI-ReUse-Verfahren.

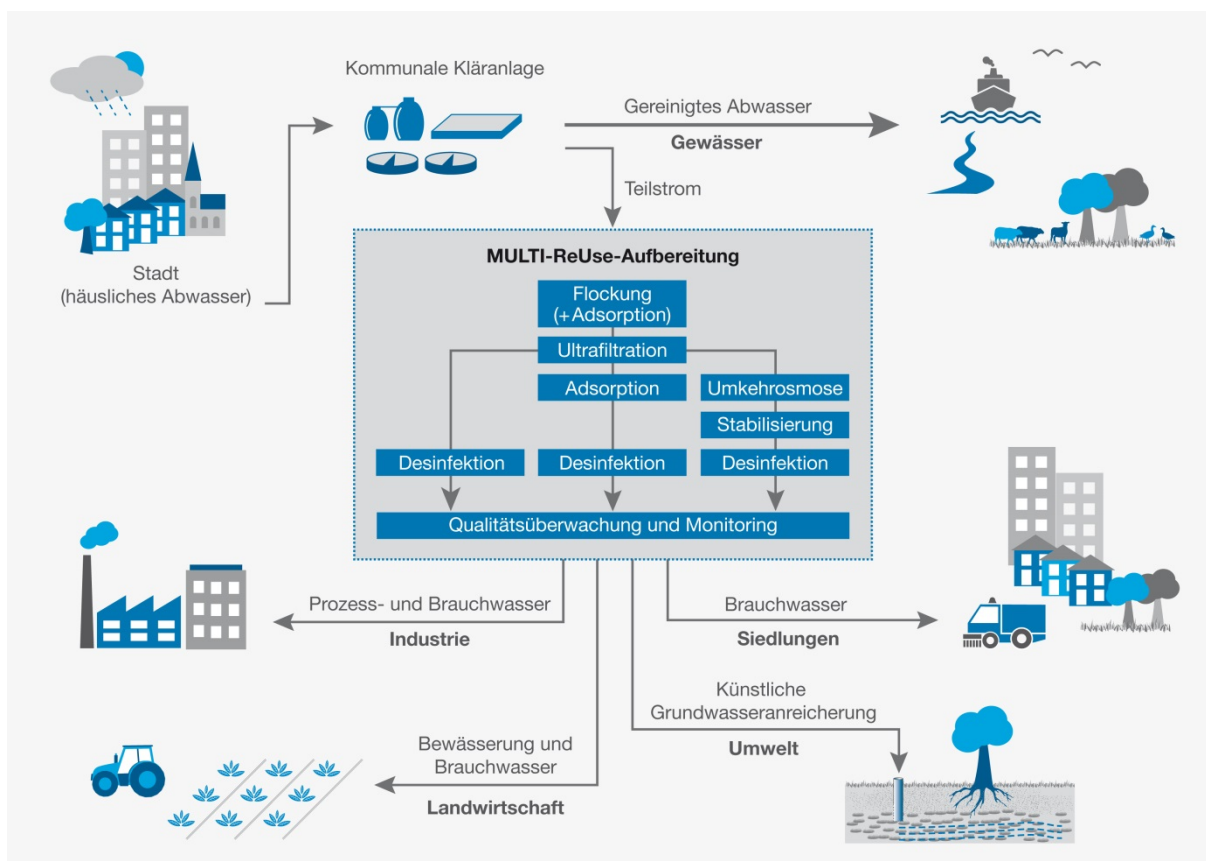


Abbildung 4: MULTI-ReUse-Aufbereitungsverfahren für die Wasserwiederverwendung in den Sektoren Industrie, Landwirtschaft und Siedlungswasserwirtschaft sowie für die Grundwasseranreicherung.

Dieses Dokument soll dem Leser ermöglichen, anhand von Beispielen zu erschließen, welche Zielmärkte für die jeweiligen Sektoren vorhanden sind. Es wird darauf eingegangen, welche Richtlinien und Verordnungen dabei zu beachten sind. Das Dokument wurde nach folgenden Sektoren bzw. Anwendungsfällen unterteilt: Industrie, Landwirtschaft, Siedlungswasserwirtschaft sowie Grundwasseranreicherung. Für jeden Verwendungszweck wird in den nachfolgenden Kapiteln die Herangehensweise beschrieben und auf potenzielle Zielmärkte eingegangen.

2.2 Sektorübergreifende Auswahlkriterien

Um Zielmärkte für das MULTI-ReUse-Verfahren zu ermitteln, wurden drei übergreifende Kriterien festgelegt. Für einen grundlegenden Bedarf an alternativen Wasserressourcen und damit auch dem MULTI-ReUse-Verfahren in einem Land oder einer Region, wird Wasserstress als erstes Kriterium herangezogen. Da das MULTI-ReUse-Verfahren behandeltes kommunales Abwasser als Ausgangsprodukt verwendet, muss dieses in ausreichender Menge vorhanden sein. Aufgrund dessen ist das zweite Kriterium die Verfügbarkeit von kommunalem behandeltem Abwasser. Weiterhin muss als drittes Kriterium eine gewisse technische Bereitschaft vorhanden sein, die neuen Technologien umsetzen zu wollen und zu können. Die technische Bereitschaft beschreibt die Umsetzbarkeit neuer Technologien in

einem Land. Dabei sollte abgeschätzt werden, ob eine technische Umsetzung mit vorhandenem Material, Werkzeug, Maschinen und Infrastruktur möglich ist und ob das nötige Know-how sowohl für Anlagenbau als auch für den Betrieb vorhanden ist. Dies beinhaltet verschiedene Aspekte, wie die Bereitschaft für Investitionen, ein vorhandenes Elektrizitätsnetz sowie Firmen, die bereit sind, in Forschung und Entwicklung zu investieren und Innovationen zu fördern. Darüber hinaus spielen Governance-Aspekte eine bedeutende Rolle, d. h. dass ein politischer und unternehmerischer Wille vorherrschen muss, diese Dinge umzusetzen zu wollen und zu fördern, inklusive einer Risikovorsorge durch Leitlinien oder Verordnungen und einem entsprechenden Kontrollorgan.

Das Kriterium Wasserstress wurde anhand von zwei Quellen ermittelt: World Resources Institute (WRI) (Gassert *et al*, 2014) und AQUASTAT (FAO, 2017a). AQUASTAT ist das globale Wasserinformationssystem der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen („Food and Agriculture Organization of the United Nations“, FAO). Der „Baseline Water Stress“ vom WRI ist beschrieben als das Verhältnis von der gesamten jährlichen Wasserentnahme (kommunal, industriell und landwirtschaftlich) zur gesamten verfügbaren jährlichen erneuerbaren Wasserversorgung (Grund- und Oberflächenwasser) eines Landes. Je höher der Wert, desto stärker ist der Wettbewerb unter den Sektoren. Dem ähnlich stellt AQUASTAT den Wasserstress als prozentuales Verhältnis der jährlichen Frischwasserentnahme zu den gesamten erneuerbaren Wasserressourcen dar. Beide Indikatoren liefern eine Liste von Ländern mit absteigendem Wasserstress. Diesen wurden Ränge zugeordnet. Aus beiden Rängen wurde im Anschluss die Rangsumme gebildet und daraus eine neue Liste erstellt, die den Wasserstress beider Indikatoren für diesen Bericht abbildet.

Das Kriterium der Abwasserverfügbarkeit wurde durch Daten aus AQUASTAT und diverse Quellen zur Weltbevölkerung¹ beschrieben. Hierfür wurden die Daten für behandeltes kommunales Abwasser aus der AQUASTAT-Datenbank genutzt und mit der jeweiligen Bevölkerungszahl ins Verhältnis gesetzt, um das behandelte kommunale Abwasser pro Einwohner zu ermitteln.

Um die technische Bereitschaft als Kriterium verwenden zu können, wurden folgende Indikatoren aus der Datenbank des Global Competitive Index (World Economic Forum, 2005-2015) herangezogen: *Quality of electricity supply, Availability of latest technologies, Firm-level technology absorption, Foreign Direct Investment (FDI) and technology transfer, Capacity for innovation, and Company spending on R&D*. Auch hier wurde den Ländern je Indikator ein Rang zugeordnet, anschließend aus allen sechs Indikatoren die Rangsumme gebildet und eine Liste für die sogenannte technische Bereitschaft erstellt.

¹ (1) United Nations Population Division. World Population Prospects, (2) Census reports and other statistical publications from national statistical offices, (3) Eurostat: Demographic Statistics, (4) United Nations Statistical Division. Population and Vital Statistics Report (various years), (5) U.S. Census Bureau: International Database, and (6) Secretariat of the Pacific Community: Statistics and Demography Programme.

Abschließend wurde aus den drei übergeordneten Kriterien die Rangsumme gebildet, um eine Länderliste zu generieren, die als Grundlage für die Auswahl geeigneter Zielländer dienen sollte. Ein weiterer Faktor für die Identifikation von Zielländern ist eine befürwortende Governance-Struktur inklusive Leitlinien/Verordnungen zur Risikominimierung. Darüber hinaus sind das Vorhandensein von Fallstudien (Best-Practice-Beispielen), aber auch weiterführende sektorspezifische Kriterien von Belang. Entsprechend wurden für jeden Sektor Länder identifiziert und die Gegebenheiten sowie der Markt vor Ort beschrieben. Die sektorspezifischen Kriterien sind in den entsprechenden Kapiteln aufgeführt.

3 Technische und ökonomische Randbedingungen der Wasserwiederverwendung

Die neuen technologischen Verfahren, welche im Projekt MULTI-Reuse entstehen, sollen durch Wasserwiederverwendung von behandelten kommunalen Abwässern in einer Gesamtbetrachtung ökologische und sozioökonomische Vorteile gegenüber der aktuellen Situation bieten. Für den Einsatz des MULTI-Reuse-Verfahrens muss ein Bedarf an industrieller, landwirtschaftlicher und siedlungswasserwirtschaftlicher Wasserwiederverwendung sowie nach Grundwasseranreicherung vorhanden sein. Hierzu müssen zunächst vielfältige Voraussetzungen erfüllt sein, welche in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengestellt sind.

Tabelle 1: Sinnvolle Voraussetzungen für das MULTI-Reuse-Verfahren

Volkswirtschaftliche/ökologische Kriterien

- Wasserknappheit
 - Gesellschaftliche Akzeptanz
 - Administrative Vorgaben (z. B. Subventionen)
 - Ökologische Vorgaben (z. B. Verringerung des Abwasseranteils in Bächen und Flüssen)
 - Ausreichende Menge an behandeltem kommunalen Abwasser
 - Technische Bereitschaft
 - Konkurrenzsituation bei Wassernutzung Industrie/Landwirtschaft/Kommunen
 - Gravierende Beeinträchtigungen der lokalen Grund- und Oberflächenwasserqualität
-

Betriebswirtschaftliche Kriterien

- Möglichkeit der Optimierung/Schließung eines Wasserkreislaufes
- Vorhandensein von Mitteln/Kapital für Wasseraufbereitung
- Kostenintensive Nutzung lokaler Wasserressourcen
- Keine bisherige Ausschöpfung des Marktes zur Wasserwiederverwendung durch andere Technologien

4 Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte für spezifische Industriesektoren

Als Teil der Wirtschaft befasst sich die Industrie bzw. das verarbeitende Gewerbe mit der kommerziellen Gewinnung, Bearbeitung und (Weiter)Verarbeitung von Rohstoffen oder Zwischenprodukten zu materiellen Gütern.

4.1 Rahmenbedingungen

Die Nutzung von Wasser im Rahmen verschiedenster industrieller Prozesse verlangt unterschiedliche Prozesswasserqualitäten. Neben Kühlwasser spielen Spül-, Transport-, Wasch-, Produktwasser sowie Kesselspeisewasser eine wichtige Rolle. Beim Kühlwasser differenziert man nochmal zwischen Kühlwasser und Kühlturmsatzwasser. Während Kühlwasser in geschlossenen Kühlprozessen oft geringe Anforderungen an die Wasserqualität hat, wird das Kühlturmsatzwasser aufkonzentriert und rezirkuliert, woraus in der Regel höhere Qualitätsansprüche resultieren. In Abhängigkeit von dem zur Verfügung stehenden Rohwasser und den Anforderungen an das Prozesswasser müssen diverse Aufbereitungsprozesse eingesetzt werden, um entsprechende Qualitäten zu generieren. Insbesondere die Bereitstellung von Wässern unterschiedlicher Qualität macht das MULTI-ReUse-Verfahren daher sehr interessant für industrielle Abnehmer. Die für die Industrie bedeutendsten Wasserqualitätsparameter sind insbesondere Trübung, Schwebstoffe, gelöste Mineralien, Desinfektionsmittel und spezifische anorganische und organische Verunreinigungen. Darüber hinaus spielt die mikrobielle Verunreinigung eine große Rolle, einerseits aufgrund von „Biofouling“ und Biofilmbildung, andererseits als Belastung durch potenzielle Pathogene wie Legionellen, coliforme Bakterien oder auch Viren. Die häufigsten Wasserqualitätsprobleme in Kühlwassersystemen sind Korrosion, biologisches Wachstum und Kesselsteinbildung (Lens *et al.*, 2002; Mudgal *et al.*, 2015).

Die Branchen mit der größten Wassernutzung sind im Allgemeinen die chemische Industrie, gefolgt von der Metallindustrie, der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie, der Papierindustrie und der Textilindustrie. Abgesehen von den industriellen Betrieben haben aber auch Kraftwerke einen hohen Wasserverbrauch, welcher vorwiegend in Form von Kühlwasser anfällt. In Deutschland wird ein Großteil dieses Kühlwasserbedarfs aus Oberflächenwasser gedeckt. Das MULTI-ReUse-Verfahren wäre in Deutschland somit in dieser Hinsicht nur in solchen Regionen konkurrenzfähig, in denen die Qualität des Oberflächenwassers unzureichend ist und/oder lokal große Nutzungskonkurrenzen vorherrschen. Der europäische und internationale Raum spielt zur Vermarktung des MULTI-ReUse-Verfahrens aufgrund der höheren Wasserknappheit in manchen Gebieten somit eine größere Rolle als Deutschland selbst. Beispiele zur Wasserwiederverwendung gering aufbereiteten Wassers für Kühlzwecke können im internationalen Kontext, wie in Mexiko am Beispiel von San Luis Potosí (Lazarova *et al.*, 2013), bereits gefunden werden.

4.1.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Wiederverwendung von behandelten urbanen Abwässern für industrielle Zwecke ist nach EU-Rechtsvorschriften nicht explizit geregelt. Auch für die industrielle Wasserwiederverwendung in Deutschland gibt es keinen definierten Rechtsrahmen. Um die zukünftige industrielle Wasserwiederverwendung auf nationaler und EU-Ebene zu regeln, müssen bei der Umsetzung der Rechtsvorschriften einige Umweltrichtlinien berücksichtigt werden. Bisher liegen aber nur in einigen europäischen Ländern nationale Richtlinien vor. In Deutschland existieren bspw. für die verschiedenen eingesetzten Prozesswässer Richtlinien und Merkblätter zu den „besten verfügbaren Techniken“ (BVT, bzw. „best available techniques“, BAT). Außerdem spielen verschiedene Verordnungen, bezüglich des entnommenen Wassers bzw. des Abwassers, eine Rolle. Die Vorgaben der EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) sind in Deutschland vollständig in das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) überführt. Neben der Wassersicherstellungsverordnung mit Hinweisen zur Beschaffenheit des Betriebswassers, sind die wichtigsten Richtlinien und Verordnungen für die Industrie in Deutschland wie folgt:

Kühlwasser

- Richtlinienreihe VDI 3803 "Raumluftechnik, Geräteanforderungen"
- Richtlinienreihe VDI 2047 "Hygiene bei Rückkühlwerken"
- "Reference Document on the application of Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems" (Best available techniques Reference document (BREFs) developed under the IPPC Directive and the IED, BREF (12.2001))

Trinkwasserähnliches Prozesswasser

- Trinkwasserverordnung (TrinkwV)
- 1. Wassersicherstellungsverordnung

Kesselspeisewasser

- DIN EN 12953-10 Großwasserraumkessel: Anforderungen an die Speisewasser- und Kesselwasserqualität
- DIN EN 12952-12 Wasserrohrkessel: Anforderungen an die Speisewasser- und Kesselwasserqualität
- TRD 611 Speisewasser und Kesselwasser von Dampferzeugern
- VdTÜV MB TECH 1453 VdTÜV-Richtlinien für Speisewasser, Kesselwasser und Dampf von Dampferzeugern bis 68 bar zulässigem Betriebsüberdruck
- VGB R 450 L Speisewasser-, Kesselwasser- und Dampfqualität für Kraftwerke/Industriekraftwerke
- Richtlinien bzw. Betriebsvorschriften des jeweiligen Kesselherstellers

Für die industriellen Abwässer gilt folgender Rechtsrahmen:

- Abwasserverordnung (AbwV)
- Oberflächengewässerverordnung (OGewV)
- Grundwasserverordnung (GrwV)
- Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)

- Industriekläranlagen-Zulassungs- und Überwachungsverordnung (IZÜV)
- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Als wichtige europäische Richtlinien, die für eine industrielle Wasserwiederverwendung zu beachten sind, gelten:

- Wasserrahmenrichtlinie (Water Framework Directive – 2000/60/EC)
- Trinkwasserrichtlinie (Drinking Water Directive – 80/778/EC revised with 98/83/EC)
- Badwasserrichtlinie (Bathing Water Directive – 2006/7/EC)
- Grundwasserrichtlinie (Groundwater Directive – 2006/118/EC)
- Umweltqualitätsstandards-Richtlinie (Environmental Quality Standards Directive – Directive 2008/105/EC)
- Kommunalabwasserrichtlinie (Urban Wastewater Treatment Directive – 91/271/EEC amended by 98/15/EEC)

Daneben müssen von industrieller Seite zusätzlich die „Directive 2010/75/EU on industrial emissions (IED)“ sowie weiterführende „Best Available Techniques and Reference Documents“ (BREFs²) beachtet werden. Die Richtlinie bildet den Rahmen zur Kontrolle industrieller Emissionen und schließt auch potenzielle Quellen und Ressourcen ein, bei denen bereits auf umsichtige Nutzung und Kontaminationen geachtet werden soll. Darüber hinaus existieren nationale Richtlinien zur Wasserwiederverwendung in den meisten mediterranen europäischen Mitgliedstaaten.

Nationale Verordnungen und Gesetze mit Bezug zur industriellen Wasserwiederverwendung:

- Griechenland (Joint Ministerial Decision (Κοινή υπουργική απόφαση) 145116/11)
- Italien (Decreto del Ministero dell'ambiente 185/2003)
- Portugal (Padrão Português NP4434, 2006)
- Spanien (Real Decreto 1620/2007)

Für den internationalen Raum hingegen findet man Richtlinien für die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser. Generelle Richtlinien wurden von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) zusammengestellt, aber auch Länder wie Japan, Australien, Südafrika oder die USA haben teilweise schon vor vielen Jahren die Problematik gesehen bzw. waren damit konfrontiert und haben entsprechend reagiert mittels Gesetzgebung in Form von Richtlinien.

Ein Auszug der wichtigsten internationalen Richtlinien zur Wasserwiederverwendung:

- WHO, 2006: Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater
- WHO, 2011: Guidelines for Drinking Water Quality
- WHO, 2017: Potable Reuse – Guidance for Producing Safe Drinking Water
- ISO/TC 282, Water reuse (under development)
- US EPA, 2012: Guidelines for water reuse
- California regulation related to Recycled Water, Title 22 of the Code of regulations, Title 22, Division 4, Chapter 3, section 60301 et seq (2009, updated in 2011)

² siehe <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

- NWQMS 2006, Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks (Phase 1)
- Japan, Tokyo: Reclaimed Water Quality Criteria
- South African Water Quality Guidelines, Volume 3, Industrial Use, Second Edition, 1996

Die WHO-Richtlinien gehen nicht explizit auf die Wasserwiederverwendung in der Industrie ein. Die WHO-Richtlinie von 2006 soll die Gesundheit der Landwirte, lokaler Gemeinden und der Endverbraucher schützen.

In Industrieländern werden meist strengere Richtlinien angewendet als die WHO-Richtlinien. Falls keine eigenen Richtlinien vorhanden sind, orientieren sich viele Länder an den amerikanischen oder australischen Richtlinien. Um mögliche Auswirkungen der Wasserwiederverwendung auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt besser bewerten zu können, sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich. Dadurch soll die Unsicherheit über potenzielle, unerwünschte Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit von der Exposition gegenüber wiederverwendeten Wassers verringert werden und damit einhergehend das Vertrauen in die Wasserwiederverwendung erhöht werden (Kamizoulis *et al.*, 2003). Kalifornien kann als Pionier in der Regulierung der Wiederverwendung von Wasser gesehen werden, da die ersten Wasserwiederverwendungsrichtlinien bereits 1918 veröffentlicht wurden (Mudgal *et al.*, 2015).

Ein weiteres Regelwerk von Belang in Bezug auf die Nahrungsmittelindustrie ist die „Regulation (EC) 852/2004 on the hygiene of foodstuffs“. Diese bezieht sich auf die Qualität des Wassers, welches mit dem Produkt in Berührung kommt oder selbst im Produkt vorhanden ist.

Des Weiteren ist eine ISO-Norm für die Wiederverwendung von behandeltem Abwasser in der Entwicklung, nach einem Antrag von Japan, China und Israel (ISO/TC 282 Ausschuss für Wasserwiederverwendung). Die laufende Arbeit betrifft die Vereinheitlichung der Wasserwiederverwendung jeglicher Art und für jeden Zweck.

Die US-EPA-Guidelines gehen am detailliertesten auf definierte Qualitätsstandards für die Industrie ein, und viele andere Richtlinien sind in Anlehnung an diese verfasst. Daher wäre es für das MULTI-ReUse-Verfahren bezüglich der industriellen Wasserwiederverwendung am sinnvollsten, sich für den internationalen Raum an diesen Richtlinien zu orientieren.

4.2 Potenzielle Zielmärkte für den industriellen Sektor

Neben den allgemeinen Kriterien, die in Kapitel 2.2 beschrieben sind, spielt für den Sektor Industrie das Kriterium „industrieller Wasserstress“ eine große Rolle. Auch in diesem Fall wurden die Daten des WRI und von AQUASTAT herangezogen.

In AQUASTAT wird sowohl die industrielle Wasserentnahme als auch die industrielle Wasserentnahme in Bezug zur Gesamtwasserentnahme (weiterführend als industrieller Wasserstress bezeichnet) beschrieben. Laut FAO Statistical Pocket Book (FAO, 2015) und Daten aus AQUASTAT von verschiedenen Jahren haben Estland, die Niederlande und Belgien den

größten industriellen Wasserstress. Interessanterweise befinden sich unter den 20 Ländern mit dem höchsten industriellen Wasserstress hauptsächlich europäische Länder. Global betrachtet fallen außerdem Kanada, Russland und die USA darunter.

Darüber hinaus ist die Gesamtwasserentnahme der Industrie von Belang (FAO, 2017a). Hier findet man unter den ersten 20 Ländern sieben europäische (Deutschland, Frankreich, Italien, Niederlande, Polen, Spanien und Belgien) – mit Deutschland, Frankreich und Italien unter den Top 10. Die mit Abstand größten globalen Wasserverbraucher für industrielle Zwecke sind die USA und China. Danach folgen Russland, Kanada, Indonesien, Indien, Brasilien, Japan und die oben genannten europäischen Staaten. Neben dem industriellen Wasserstress und der industriellen Wasserentnahme ist die Größe und Bevölkerung des Landes im Vergleich zur industriellen Wasserentnahme von großer Relevanz, da hierdurch zunehmend Konkurrenzen zwischen Industrie, der öffentlichen Wasserversorgung und der Landwirtschaft entstehen. Ferner spielen sowohl die Bereitschaft der Industrie Investitionen zu tätigen als auch die Bereitschaft der politischen Entscheider diese Technologien zu fördern eine entscheidende Rolle. Ein Beispiel ist der Kostenfaktor der Rohrleitungen insbesondere im bebauten urbanen Raum. Ideal wäre eine Abwasserbehandlungsanlage in unmittelbarer Nähe zu einem Netz aus Großkunden, für die ein separates Brauchwassernetz aufgebaut werden kann.

Potenzielle Zielmärkte für Technologien zur Wasserwiederverwendung im industriellen Sektor sind in Deutschland, Europa und international zu finden. Für Deutschland wurden Zielmärkte für die entwickelte Technologie in industriellen Ballungsräumen, an Küstenstandorten, städtischen Ballungsräumen oder in Regionen intensiver landwirtschaftlicher Nutzung anvisiert. Immerhin gehört Deutschland zu den Ländern mit dem höchsten Wasserbezug der Industrie bezogen auf die gesamte Wasserentnahme (FAO, 2017a). Abbildung 5 zeigt eine Übersicht über die industriellen Standorte in Deutschland. Über 42 % der Industrie bündeln sich in den Ballungsräumen Rhein-Ruhr, Rhein-Neckar, Rhein-Main und dem Raum Hannover/Braunschweig/Wolfsburg. Die größten Industriesektoren sind die Automobilindustrie, die chemische und pharmazeutische Industrie und die metallverarbeitende Industrie (Naumann, 2014).

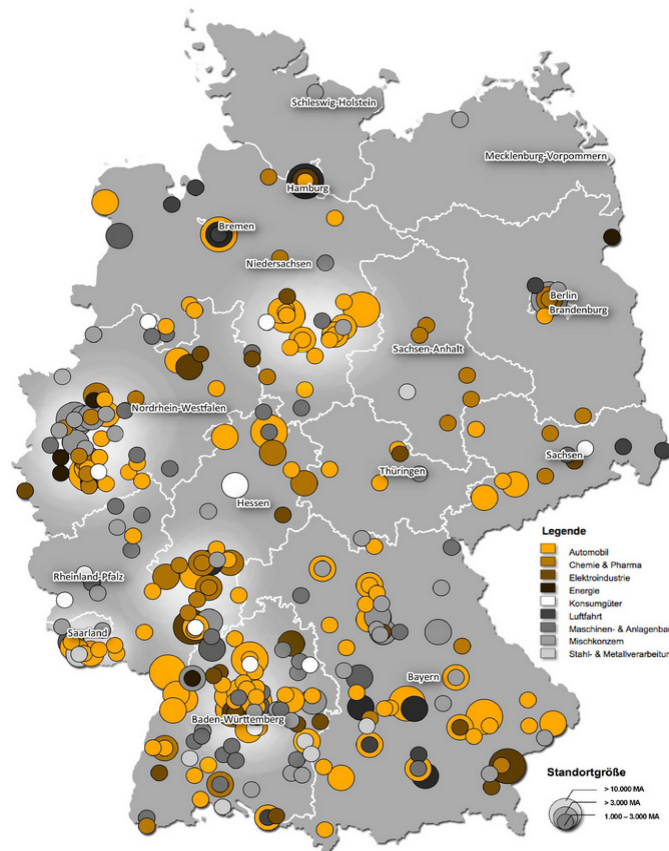


Abbildung 5: Industriestandorte in Deutschland, aus Naumann 2014.

In einzelnen Regionen Deutschlands wächst aufgrund verschiedener Rahmenbedingungen der Druck auf die verfügbaren Wasserressourcen. Die Region Wesermarsch in Niedersachsen besitzt keine eigene Trink- und Brauchwasserversorgung, sie ist auf die Versorgung aus umliegenden Regionen angewiesen. Der Grund dafür ist die Versalzung des Untergrundes durch die Nordsee sowie die mangelhafte Qualität des Grundwassers und des Wassers aus der Weser, welche keine einfache, kostengünstige Trinkwasseraufbereitung zulässt. Die Versorgung wird hier durch Zulieferung aus den „benachbarten“ Wasserwerken Sandelermöns, Nethen und Großenkneten sichergestellt. An diesen Standorten nehmen die Konkurrenz um Wasserentnahmerechte sowie der öffentliche Druck zu. Die Stadt Nordenham ist ein Zentrum der Industrie und des Gewerbes der Wesermarsch. Hier ist eine Vielzahl an wasserintensiven Industrien und Gewerben ansässig. Der Wasserbedarf für Prozesse mit sehr geringen Anforderungen an die Wasserqualität wird so weit wie möglich durch Weserwasser gedeckt. Für alle anderen Prozesse wird das Trinkwasser des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) genutzt. Langfristig könnte dies zu Versorgungsproblemen bei der Ansiedlung weiterer industrieller oder gewerblicher Wasserverbraucher führen. Daher werden für und an dem Standort Nordenham die modulare Aufbereitung und das Online-Monitoring zur Wasserwiederverwendung entwickelt, getestet und pilotiert.

Bezogen auf das MULTI-ReUse-Verfahren müssen gewisse Voraussetzungen erfüllt sein, um das neue Verfahren umsetzen zu können (siehe Kapitel 2.2). Dazu gehören sowohl die

genannten Kriterien Wasserstress, Abwasserverfügbarkeit und technische Bereitschaft als auch eine stabile Governance-Struktur und Risikovorsorge. Aus industrieller Sicht wurde im nächsten Schritt geschaut, wo insbesondere industrieller Wasserstress herrscht, wo große Mengen an Wasser in der Industrie verbraucht werden und ob eine gewisse Bereitschaft der Industrie vorhanden ist, die aufbereiteten Wässer zu verwenden, einhergehend mit dem Willen der Regierung, dies zu unterstützen.

Durch die Erschließung neuer und bedeutender Märkte kann Europa zunehmend zum Weltmarktführer in wasserbezogenen Innovationen und Technologien werden. Wasserversorgungs- und Managementsektoren stellen bereits 32 % der EU-Ökoindustrien dar, und die EU-Unternehmen halten mehr als 25 % des Weltmarktanteils im Wassermanagement (Mudgal *et al.*, 2015). Im Allgemeinen ist das Potenzial für die Wiederverwendung von Wasser in Europa sehr hoch. In Europa gibt es viele Regionen, die von einem gewissen Wasserstress betroffen sind, insbesondere der Süden aber auch Regionen mit einer hohen Bevölkerungsdichte und großen Industriestandorten oder Landwirtschaft. Zu den Ländern mit dem höchsten Wasserstress in Europa gehören Zypern, Spanien, Italien, Bulgarien, Malta als auch Belgien (Gassert *et al.*, 2014; FAO, 2017a; Angelakis & Gikas, 2014). Länder mit dem größten industriellen Wasserstress sind Estland, Litauen, die Niederlande, Belgien und Deutschland (FAO, 2017a; FAO, 2015). Das Wasserwiederverwendungsvolumen auf EU-Ebene im Jahr 2025 wird auf etwa 3 Mio. m³/Jahr geschätzt (Angelakis & Gikas, 2014). Dieser Markt wird auf ein Finanzvolumen von rund 1 Billion € geschätzt (Mudgal *et al.*, 2015). Wenn der Druck auf die Wasserressourcen durch die Wiederverwendung von Wasser entschärft werden soll, ist es ratsam, dies nicht nur bei der Bewässerung in Südeuropa, sondern insbesondere beim Kühlwasser oder anderen industriellen Anwendungen umzusetzen. Diese Wiederverwendung in der Industrie und beim Kühlwasser würde in den nordeuropäischen Regionen mehr Einfluss haben (FAO, 2017a; Thoeye *et al.*, 2005). Mögliche Zielländer in Europa wären entsprechend Belgien, Spanien, Italien, Portugal, Estland, Litauen, Griechenland, Malta, Niederlande oder Zypern. Die industrielle Wasserwiederverwendung hat auch international großes Potenzial. Global gesehen spielen die Maghreb-Staaten, der mittlere Osten, hier insbesondere die Mitgliedsstaaten des Golfkooperationsrats (GCC), aber auch die USA, Mexiko, China und Indien eine bedeutende Rolle.

4.2.1 Best-Practice-Beispiele

Im Folgenden werden zwei erfolgreiche Beispiele (aus den Niederlanden und Mexiko) zur Wasserwiederverwendung in der Industrie aufgezeigt.

4.2.1.1 Terneuzen (Niederlande)

Terneuzen, ein bedeutender Seehafen in den südwestlichen Niederlanden, ist zwar an drei Seiten von Wasser umgeben, jedoch muss die Region bereits seit Jahrzehnten frisches Wasser aus einer 120 km entfernten Quelle importieren, um den Bedürfnissen nach Trinkwasser und industriellem Wasserverbrauch gerecht zu werden. Ein Teil von Terneuzens Wasserknappheit ist dabei auf die Geographie der Region zurückzuführen. Die Stadt liegt annähernd auf Höhe des Meeresspiegels und steht vor einer ständigen Bedrohung durch Salzwasserintrusion in ihre flachen Grundwasserleiter. Die Region am Flussdelta der Schelde leidet zunehmend unter Wasserstress aufgrund des hohen Wasserbedarfs der ansitzenden Industrie, der Landwirtschaft sowie der Gemeinden und Naherholungsgebiete. Der Konzern „The Dow Chemical Company“ (Dow) betreibt hier seinen zweitgrößten Standort weltweit, nach dem Hauptsitz in den USA. Als Chemiestandort hat Dow Terneuzen einen hohen Verbrauch an Kühlwasser sowie Prozesswasser zur Dampferzeugung für den Betrieb. Die Gemeinde Terneuzen hat 55.000 Einwohner, das Land unmittelbar außerhalb der Stadt wird fast ausschließlich für Landwirtschaft und Gartenbau verwendet. Um den eigenen Wasserbedarf zu decken und unabhängiger von Frischwasser zu werden, begann Dow bereits vor einigen Jahren, alternative Wasserquellen zu erschließen (Groot, 2013; Pentair, 2017).

Seit den 90er Jahren arbeiten der kommunale Wasserverband der Stadt Terneuzen und der regionale Wasserversorger Evides mit Dow Terneuzen zusammen. Durch diese Zusammenarbeit wurde eine neue Herangehensweise im Wassermanagement geschaffen, was zu bemerkenswerten Einsparungen von Wasser und Energie führte. Ein Membranbioreaktor (MBR) wurde installiert, der kommunales Abwasser zu einer sehr hohen Qualität aufbereitet. Dieses behandelte Abwasser wird weiter entmineralisiert für die Herstellung von hochwertigem Prozesswasser. Dafür wird der Abfluss des MBR direkt in eine Umkehrosmose-Anlage eingespeist. Eine zuvor bestehende Mikrofiltrationsanlage wurde durch diese Prozesskette abgelöst. Evides versorgt mit dem Wasser eine nahe gelegene Anlage von Dow. Nachdem zuerst das Wasser von der Gemeinde genutzt wird, durchläuft es die Aufbereitung der kommunalen Abwasserbehandlungsanlage und wird anschließend weiter aufgereinigt für die Verwendung als Kesselspeisewasser und Kühlturmzusatzwasser. Typischerweise erfordern viele Anwendungen der beiden genannten Wässer einen Salzgehalt von weniger als 1 mS/cm. Nach der Nutzung als Dampf in den Produktionsprozessen wird das Wasser anschließend in Kühltürmen eingespeist, bis es schließlich in die Atmosphäre verdampft oder nach erneuter Aufbereitung in den Fluss eingeleitet wird. Durch dieses innovative Abwasser-Recycling-Programm nutzen Dow und seine Partner das behandelte Abwasser der Gemeinde somit doppelt und erzielen dadurch eine Dreifachnutzung des Wassers. Dow Terneuzen nutzt täglich 10.000 m³ kommunales Abwasser vom Wasserversorger Evides, der Trink- und

Brauchwasser in die südwestlichen Niederlande liefert. Im Vergleich zu den Energiekosten, die für die konventionelle Entsalzung von Meerwasser für den gleichen Gebrauch benötigt werden, hat Dow Terneuzen seinen Energieverbrauch um 95 % reduziert, indem es das recycelte Abwasser von Terneuzen nutzt – das entspricht einem Äquivalent zur Verringerung der Kohlendioxidemissionen um 60.000 Tonnen pro Jahr. Auch zukünftig soll der Anteil an aufbereitetem Abwasser weiterhin erhöht werden. Die MBR-Anlage bietet zusätzliche Behandlungskapazität für das kommunale Abwasser hinsichtlich der expandierenden Stadt Terneuzen und der ansässigen Industrie (Groot, 2013; Pentair, 2017).

4.2.1.2 *San Luis Potosí (Mexiko)*

Die Region San Luis Potosí ist eine einwohnerstarke Metropolregion im nördlichen Zentralmexiko. Aufgrund der semiariden klimatischen Bedingungen mit weniger als 400 mm jährlichem Niederschlag herrscht Wasserknappheit und die bestehenden Wasserressourcen werden überstrapaziert. In den 80er und 90er Jahren entwickelten sich die Industrie- und Dienstleistungssektoren in dieser Metropolregion rasant; weiterhin wurde eine Fläche von 700 ha landwirtschaftlich nutzbarer Fläche unbrauchbar durch die Bewässerung mit hochgradig belastetem Abwasser. Dadurch wurden Konflikte zwischen einzelnen Sektoren wie der Landwirtschaft und der Industrie hervorgerufen. Daraufhin hat die Landesregierung von San Luis Potosí beschlossen, einen integralen Plan für die Sanitärversorgung und die Wasserwiederverwendung zu implementieren, das sogenannte „Tenorio“-Wasserwiederverwendungsprojekt. Hauptziel dabei war es, die Grundwasserentnahme für Brauchwasser mit recyceltem Wasser zu ersetzen, insbesondere in den Bereichen der landwirtschaftlichen Bewässerung, der städtischen und industriellen Nutzung (hauptsächlich Kühlwasser für das Kraftwerk Villa de Reyes).

Für diesen Zweck wurde Folgendes umgesetzt:

- Bau und Inbetriebnahme der neuen kommunalen Abwasserbehandlungsanlage in Tenorio mit einer Kapazität von 90.720 m³/Tag,
- Bau von fünf großen Abwasserkanälen (18.9 km), 38 km Verteilungsleitungen (in lila, steht für recyceltes Wasser, Abbildung 6), 4.000 m³ Vorratstank für recyceltes Wasser für Kühlzwecke des Villa de Reyes Kraftwerks,
- Aufrüstung einer Bewässerungsanlage mit mehr als 500 ha Bewässerungsfläche,
- Sanierung des Tenorio Regenüberlaufbeckens zu einem künstlichen Feuchtgebiet (für spätere landwirtschaftliche Nutzung).

In der Abwasserbehandlungsanlage werden zwei Wasserqualitäten produziert: (1) durch erste Reinigungsstufe aufgereinigtes und desinfiziertes Abwasser für Bewässerungszwecke (57 %) und (2) durch drei Reinigungsstufen gereinigtes Abwasser für industrielle Zwecke, hauptsächlich als Kühlwasser (43 %).

Der erste Aufbereitungsschritt in der Tenorio-Abwasserbehandlungsanlage erfolgt über eine erweiterte erste Reinigungsstufe mit Chemikalieneinsatz (Abbildung 6). Anschließend erfolgt die weitere Reinigung in zwei Aufbereitungslinien:

- Linie 1 für landwirtschaftliche Wiederverwendung: 51.840 m³/d zusätzlich aufbereitet durch die Einleitung in das Feuchtgebiet (Rehabilitation des Tenorio Reservoir),
- Linie 2 für industrielle Zwecke als Kühlwasser für das Kraftwerk Villa de Reyes: zweite Reinigungsstufe für 38.880 m³/d mittels biologischer Behandlung im Belebtschlammverfahren, gefolgt von einer dritten Reinigungsstufe mit Enthärtung, Sandfiltration, Ionentauscher und Chlordesinfektion.

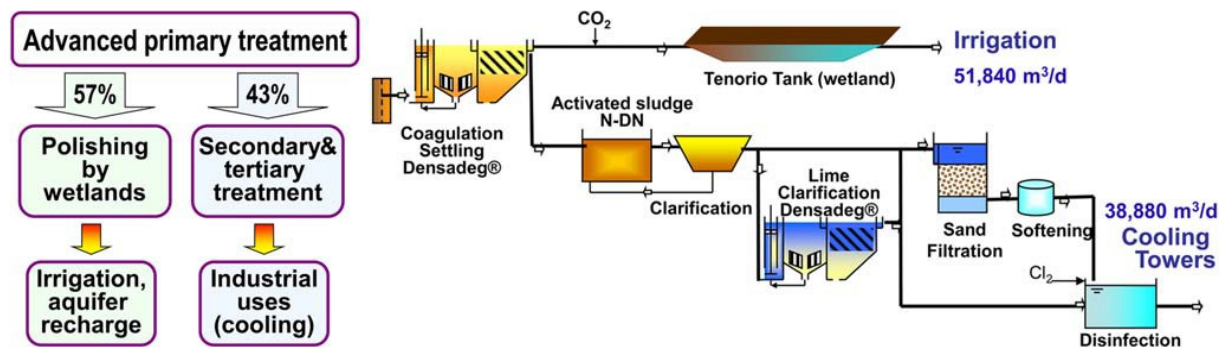


Abbildung 6: Fließschema des Abwasseraufbereitungsprozesses (Lazarova et al., 2013).

Die Kapitalkosten des Projektes Tenorio-Villa de Reyes betragen im Mai 2000 67,4 Mio. US \$. Mexikos Bundesregierung sichert durch staatliche Unterstützung über 40 % ab. Die restlichen 60 % der Kapitalanlage wurden durch Staatsanleihen und Eigenkapital finanziert. Nach mehreren Verhandlungen wurde der Preis für Recycling-Wasser für die industrielle Wiederverwendung auf 67 % der Grundwasserentgelte festgelegt. Diese Preisstrategie lieferte dem Kraftwerk erhebliche wirtschaftliche Vorteile, darunter 33 % Einsparungen bei den Kosten der internen Wasserversorgung und eine Verringerung der Betriebskosten für die Brunnen, die in der Vergangenheit genutzt wurden, um das Grundwasser zu entnehmen. Es ist wichtig zu betonen, dass Wasserkosten für industrielle Anwendungen in San Luis Potosí zu den teuersten im Land gehören. Sie liegen bei 1,14 US\$/m³, während die Kosten des recycelten Wassers bei nur 0,76 US\$/m³ liegen. Diese Umstellungen führten zu einer industriellen Wiederverwendung von 21.600 m³/d (bis zu 9,9 Mio. m³/Jahr) im 700 MW Kraftwerk Villa de Reyes für Kühlzwecke, derzeit werden 7,88 Mio. m³/Jahr Trinkwasser gespart. Weiterhin resultierte daraus eine durchschnittliche landwirtschaftliche Bewässerung von 60.480 m³/d (bis zu 23,9 Mio. m³/Jahr) für Nahrungspflanzen, die nicht roh verzehrt werden, wie Mais, Gerste und Luzerne sowie eine Verbesserung des Ökosystems und der Biodiversität mit der Wiederherstellung des Feuchtgebietes Tenorio Reservoir (Lazarova et al., 2013).

4.2.2 Zielmärkte

Nachfolgend wurden zwei ausgewählte Länder und deren Markt näher betrachtet für eine potenzielle Anwendung des MULTI-ReUse-Verfahrens. Hierbei wurden der europäische und der internationale Raum betrachtet und kurze Erläuterungen zur Wahl des jeweiligen Landes/Marktes gegeben.

4.2.2.1 Markt und Wasserversorgung der Industrie in Belgien

Im Vergleich mit anderen europäischen Ländern hat Belgien einen sehr hohen „Baseline Water Stress“ und einen der höchsten industriellen Wasserstresse. Belgien verfügt über aufbereitetes kommunales Abwasser; bisher wird jedoch relativ wenig Wasserwiederverwendung betrieben. Darüber hinaus gibt es eine hohe Industrieansiedlung, und auch die Bevölkerungsdichte ist in Belgien hoch. Aus diesen Gründen wird Belgien als potenzieller Markt für das MULTI-ReUse-Verfahren im Folgenden etwas detaillierter betrachtet.

Belgien ist in drei Regionen unterteilt: das niederländischsprachige Flandern im Norden, das frankophone Wallonien im Süden und Brüssel, die zweisprachige Hauptstadt. Belgiens moderne und offene Privatwirtschaft ist zurückzuführen auf die zentrale geografische Lage, das hoch entwickelte Verkehrsnetz und die diversifizierte Industrie- und Handelsbasis. Die Industrie konzentriert sich v. a. auf die stärker bevölkerte Region Flandern im Norden. Die größten Branchen sind die Stahl- und Metallverarbeitung, Kraftfahrzeugmontage, Chemie- und Pharmaindustrie, verarbeitete Lebensmittel und Getränke sowie Textil-, Glas- und Erdölindustrie. Der größte Teil der Bevölkerung konzentriert sich in den nördlichen zwei Dritteln des Landes. Der Südosten ist dünner besiedelt. Insgesamt hat Belgien eine der höchsten Bevölkerungsdichten der Welt, ca. 97 % leben in städtischen Gebieten (nationonline und cia factbook, 2017). Flandern, mit seinen 434 Einwohnern pro km² ist sogar das am dichtesten besiedelte Gebiet Europas, abgesehen von Stadtstaaten wie Monaco (Thoeve *et al.*, 2005).

Die Bevölkerungsverteilung und -dichte sind Schlüsselfaktoren, die die Verfügbarkeit von Wasserressourcen beeinflussen. Erhöhte Urbanisierung konzentriert den Wasserbedarf und kann zur Übernutzung der örtlichen Wasserressourcen führen (Thoeve *et al.*, 2005). Die Wasserressourcenausnutzung von erneuerbarem Süßwasser in Belgien ist eine der höchsten in Europa, 75 % werden jährlich entnommen. Darüber hinaus ist Flandern hochindustrialisiert, seine Landwirtschaft ist intensiv und übt einen starken Stress auf Boden- und Oberflächengewässer aus (Thoeve *et al.*, 2005).

Industrieller Einsatz und Kühlung sind die beiden Hauptfaktoren für den Wasserverbrauch in Belgien (Bixio *et al.*, 2005). Eine der größten Inanspruchnahmen von Wasser in der Europäischen Union wird für Kühlwasser verwendet. In einigen Ländern wie Frankreich und Deutschland macht Kühlwasser über 70 % des nationalen Bedarfs aus; in Belgien und den Niederlanden erreicht dieser fast 90 %. Darüber hinaus ist die Menge der natürlich erneuerbaren Süßwasserressourcen in Belgien relativ gering (817 m³/Einwohner/Jahr). Dies bedeutet indirekt eine schlechte Qualität der Rohwasserressourcen (Bixio *et al.*, 2006). Vor 30 Jahren wurden noch weniger als 30 % des aufkommenden Abwassers behandelt, dies

hat sich Anfang des 21. Jahrhunderts auf annähernd 40 % gesteigert. Mittlerweile werden über 70 % aufbereitet mit weiter steigender Tendenz. Gegenwärtig werden praktisch alle städtischen Abwässer behandelt, nur in ländlichen Gebieten bleiben einige Abwässer noch unbehandelt (Thoeye *et al.*, 2005; Raso, 2013).

Diese schnelle Zunahme an Abwasserbehandlungsanlagen hat die Perspektiven für eine mögliche Wiederverwendung verbessert. Allerdings hängt die Wiederverwendung stark von den relativen Kosten der traditionellen Wasserquellen und der wiederverwendeten Abwässer ab. Die Verringerung des Abwasseranteils in sensiblen Gewässern ist ein zusätzlicher Anreiz für die Wiederverwendung in Belgien (Raso, 2013). Trotz dieser Tatsache stellt die Wasserwiederverwendung bisher keine weit verbreitete Praxis dar. Weniger als 2 % des gesamten behandelten Abwassers wird bisher recycelt, aber es wird zunehmend zu einer verlässlichen Quelle, v. a. für industrielle Anwendungen (Paranychianakis *et al.*, 2014). Hier gibt es ein wachsendes Interesse an Recycling und Wiederverwendung, insbesondere als Kühlwasser in Kraftwerken, Lebensmittelverarbeitungsbetrieben, Textilindustrie, aber auch in der Landwirtschaft und für die Grundwasseranreicherung (Raso, 2013). Dies spiegelt das Potenzial wider, das noch ausgeschöpft werden kann. Die Regierung will die Grundwasserentnahme auf Verwendungen beschränken, die eine hohe Wasserqualität erfordern und daher die Wiederverwendung indirekt durch die Erhöhung der Entnahmegebühren fördern (Paranychianakis *et al.*, 2014). In letzter Zeit steigt die Nachfrage zur Wiederverwendung, v. a. wegen des günstigen Preis-Leistungs-Verhältnisses im Vergleich zu den Alternativen Grundwasser, Trinkwasser und Oberflächenwasser (Thoeye *et al.*, 2005).

Die flämische Landesregierung begann im Jahr 2003 mit der Einführung von Leitlinien und Zulassungen für die Wasserwiederverwendungspraxis, Mitte 2005 wurde die Wiederverwendung von Wasser als integraler Bestandteil des gesamten Wasserressourcenmanagements angesehen. Eine explizite Richtlinie oder Verordnung für die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser in der Industrie existiert bisher aber nicht.

Momentan sind Daten über Wiederverwendungsprojekte nur im nördlichen Teil des Landes gut dokumentiert. In Flandern und der Region Brüssel sind elf Wasserrekultivierungs- und -wiederverwendungsprojekte in Betrieb, wobei mehrere andere Systeme mehr oder weniger in der fortgeschrittenen Planungsphase liegen. Die meisten von ihnen betreffen die Bereitstellung von Kühlwasser oder industriellen Waschwässern (d. h. Anwendungen mit geringer Wasserqualität). Trotz der Tatsache, dass die Menge der Wasserrückgewinnung und -wiederverwendung in Flandern bislang begrenzt ist (etwa 17 Mm³/Jahr), wird die Wiederverwendung von behandelten kommunalen Abwässern zu einer akzeptierten und zuverlässigen Option, insbesondere in jenen Industrien, die große Mengen an "minderwertigem" Wasser benötigen sowie in Gebieten mit abnehmenden Grundwasserspiegeln oder einer hohen Nachfrage im Sommer, wie die Küstenregionen während der Touristensaison (Bixio *et al.*, 2006).

Unter Berücksichtigung der Punkte der SWOT-Analyse (Tabelle 2), die von Thoeye *et al.* (2005) für die industrielle Wasserwiederverwendung zu Kühlzwecken durchgeführt wurde,

wäre es sehr empfehlenswert, Erfolgsmodelle und Leitlinien der EU im Zusammenhang mit der Wiederverwendung von behandeltem Abwasser einzurichten und festzulegen. Solche Kriterien und/oder Leitlinien sollten zu einer besseren Bewirtschaftung der Wasserressourcen, einem besseren Schutz der öffentlichen Gesundheit und der Umwelt sowie einer nachhaltigeren Entwicklung beitragen.

Tabelle 2: SWOT-Analyse für die Verwendung von Abwasser als industrielles Kühlwasser (Theoye *et al.*, 2005)

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Minimale Wassermenge kann garantiert werden • Geringer BSB₅ • Wenig Schwebstoffe • Erfolgreiche Fallstudien 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Preis des aufbereiteten Abwassers • Geringe mikrobielle Qualität
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Gewässerschutzpolitik • Steigender Industriebedarf • Wahrnehmung und Akzeptanz industrieller Wiederverwendung in der Öffentlichkeit • Zunehmende Dürreperioden 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlende Gesetzgebung • Die Qualität des Oberflächenwassers wird immer besser

4.2.2.2 Markt und Wasserversorgung der Industrie in den Vereinigten Arabischen Emiraten

Global betrachtet gibt es viele Regionen, die von Wasserstress betroffen sind, aber der mittlere Osten ist besonders stark in Mitleidenschaft gezogen, insbesondere die Mitgliedsstaaten des Gulf Cooperation Council (GCC). Unter den 10 Ländern mit dem größten Wasserstress führen die Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) diese Liste an, gefolgt von Katar, Bahrain, Kuwait, Saudi Arabien und dem Oman. Neben den GCC-Staaten sind noch Barbados, Libyen, Malta und der Jemen unter den am stärksten vom Wasserstress betroffenen Staaten (siehe Kapitel 2.2).

Im internationalen Vergleich gehören die VAE zu den Ländern mit der geringsten Wasserressourcenneubildung pro Kopf und der höchsten Populationszuwachsrate weltweit (FAO, 2017a). Es wird davon ausgegangen, dass bei gleichbleibenden Entnahmemengen das Grundwasser innerhalb der nächsten 50 Jahre erschöpft sein wird (Pitman *et al.*, 2009). Daher nehmen mittlerweile alternative Wasserressourcen eine wesentliche Rolle ein. Aufgrund der niedrigen Energiepreise vor Ort wird bei der Wasserproduktion hauptsächlich auf thermische Meerwasserentsalzung gesetzt. Allerdings nimmt durch das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum der Bedarf an den vorhandenen Ressourcen zu und führt u. a. zu steigenden Preisen für Strom und Wasser (Gulf News, 2016). Daher soll die Meerwasserentsalzung in Zukunft unabhängiger von der Energieproduktion werden. So wurden bereits Teile der Meerwasserentsalzung von Wärmeverfahren auf Membranverfahren umgestellt. Hier könnte das MULTI-ReUse-Verfahren für die Industrie eine kostengünstige Alternative zum entsalz-

ten Wasser darstellen und für Entlastung sorgen. Das aride Klima und die schwindenden natürlichen Wasserressourcen führen dazu, dass die VAE sich aktiv mit Technologien und Konzepten für eine nachhaltige Wasserwirtschaft beschäftigen. Insbesondere bei der Bewässerung von Landwirtschaft und Grünflächen wird bereits auf aufbereitetes Abwasser zurückgegriffen. Durch das Wachstum sowohl der Wirtschaft als auch der Bevölkerung wird in Zukunft voraussichtlich die Konkurrenz um die Ressource Wasser weiter zunehmen. So werden kostengünstige alternative Wasserressourcen zunehmend wichtiger für den wachsenden industriellen Sektor in der Föderation. Dadurch stellen die VAE einen interessanten Markt mit hohem Potenzial für das Multi-ReUse-Verfahren dar.

Die VAE liegen im Südosten der arabischen Halbinsel am Persischen Golf. Es herrscht ein arides Klima und etwa zwei Drittel des Landes werden von Ausläufern der Wüste Rub al-Chali eingenommen. In dieser Region ist das Grundwasser stark begrenzt. Es wird geschätzt, dass 253.000 Mio. m³ Wasser, von dem allerdings nur etwa 8 % Frischwasser sind, in den Grundwasserspeichern des Landes vorliegen (Moreland *et al.*, 2007). Durch die Küstennähe weist das Grundwasser meist einen hohen Salzgehalt auf und fällt in die Kategorie Brackwasser. Wegen der niedrigen Wasserqualität wird das Grundwasser fast ausschließlich zur Bewässerung von Grünflächen und in der Landwirtschaft eingesetzt (McDonnell und Fragaszy, 2016). Entsprechend sind die VAE auf alternative Wasserquellen angewiesen. 2016 standen 1,23 Mrd. m³ entsalztes Wasser zur Verfügung. Der Wasserverbrauch lag bei 1,15 Mrd. m³ Wasser und damit etwa 75 Mio. m³ unter der verfügbaren Menge. Der größte Wasserverbrauch fand mit 42 % im häuslichen Gebrauch, mit 23 % im gewerblichen Sektor und mit 21 % in der Landwirtschaft statt. Für industrielle Zwecke wurden 31 Mio. m³ (2,7 %) des entsalzten Wassers eingesetzt (Statistics Centre – Abu Dhabi, 2017). Zwar kann genug Wasser zur Versorgung der Föderation produziert werden, jedoch stellt entsalztes Meerwasser eine energieaufwändige und dadurch kostspielige Lösung dar.

Die VAE besitzen in den städtischen Gebieten ein gut ausgebautes Netzwerk für kommunale Abwässer, durch das im Jahr 2016 332 Mio. m³ Abwasser behandelt wurde. Davon wurden 171 Mio. m³ zur Bewässerung in der Landwirtschaft und von Grünanlagen eingesetzt (Statistics Centre – Abu Dhabi, 2013). Das Abwasser wird bis zur dritten Stufe behandelt, welche die Qualitätsstandards des „Regulation and Supervision Bureau“ erfüllt (Environment Agency – Abu Dhabi, 2013).

Das Öl- und Gasgeschäft stellt nach wie vor den wichtigsten Wirtschaftszweig für die Vereinigten Arabischen Emirate dar. Bei der langfristigen ökonomischen Entwicklung wird auf Diversifizierung gesetzt. Dabei soll u. a. der Industriesektor weiter ausgebaut werden. Dieser soll in Zukunft einen signifikanten Beitrag zur Entwicklung einer Öl-unabhängigen Wirtschaft leisten. Die Industrie gewinnt daher in den Emiraten immer mehr an Bedeutung. Die wichtigsten Erzeugnisse dieses Sektors stellen dabei Polymere und Düngemittel dar. Zwischen 2010 bis 2016 stieg der Anteil der Industrie am Bruttoinlandsprodukt von 5,4 % auf 6,9 %, was ein Wachstum der Branche von 28 % bedeutet. Dabei nimmt aktuell die Petrochemie eine entscheidende Rolle ein, hier wuchs die Produktion 2016 um 8,8 %. Ein weiterer Aus-

bau der petrochemischen Downstream Produktion, d. h. der Produktion kundennaher Produkte, wird vorangetrieben (Statistics Centre – Abu Dhabi, 2017).

Trotz der Immobilienkrise 2009, des niedrigen Ölpreises und des dadurch eingetrübten Investitionsklimas bleibt das Baugewerbe und damit auch die Zementindustrie eine der wichtigsten Branchen in den VAE. Diese wird v. a. durch das Infrastrukturprogramm und Großprojekte wie der EXPO 2020, Dubai Creek Harbour und Dubai South weiterhin getragen (Germany Trade & Invest, 2016; Germany Trade & Invest, 2017, Wagner und Keggenhoff, 2017). Zudem soll die Metallindustrie weiter gestärkt werden, neben den bereits vorhandenen Aluminiumhütten, welche jährlich 2,3 Mio. t Aluminium produzieren, soll ein Metallproduzenten-Cluster in der Kizad Khalifa Industrial Zone entstehen (Germany Trade & Invest, 2017).

Stromerzeugung und Wasser nehmen in den VAE für die Entwicklungsplanung der Wirtschaft Schlüsselrollen ein. Der Stromverbrauch stieg von 2010 bis 2016 von 39,2 Mio. MWh auf 66,8 Mio. MWh, was einen Anstieg von 71 % darstellt (Statistics Centre – Abu Dhabi, 2017). Um dem steigenden Bedarf gerecht zu werden, wird v. a. auf Atomkraft gesetzt. Bis 2020 sollen vier Atomkraftwerke in Abu Dhabi in Betrieb gehen, zudem wird weiterhin auf fossile Brennstoffe gesetzt, aber auch erneuerbare Energiequellen sollen vermehrt genutzt werden. So soll Dubais Strom bis 2020 zu 7 % und bis 2035 zu 25 % aus erneuerbaren Energien stammen. Zudem sind die VAE schon heute der größte Erzeuger von Solarenergie im GCC (Germany Trade & Invest, 2017).

Wasserprojekte in den VAE fokussieren sich auf die Erhaltung des Grundwassers. Zu diesem Zweck wurde 2015 in Abu Dhabi die Water Technology Approval Group gegründet. Sie soll innovative Lösungen und neue Technologien zur Grundwassererhaltung untersuchen (Environment Agency – Abu Dhabi, 2015).

Neben Projekten der landwirtschaftlichen wie auch Grünflächenbewässerung mit behandeltem Abwasser oder salzhaltigem Grundwasser werden hauptsächlich Projekte mit entsalztem Wasser in der Grundwasseranreicherung zur Wiederherstellung und Sicherung strategischer Wasserspeicher, wie z. B. im Oasengebiet Liwa, gefördert. Eines der größten Projekte ist das Strategic Tunnel Enhancement Programme (STEP), welches bis zu 1.530 m³/h Grauwasser aus behandeltem Abwasser für Bewässerungszwecke liefern soll (McDonnell und Fragaszy, 2016).

Während sich aktuelle Projekte und Fördermaßnahmen v. a. mit der landwirtschaftlichen Bewässerung und Grundwasseranreicherung beschäftigen, ist das Potenzial für den Einsatz nachhaltiger Technologien auch für den industriellen Sektor sehr groß. Durch das zu erwartende Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum der Föderation wird die Konkurrenz um Wasser zwischen den Wirtschaftszweigen weiter zunehmen. Aufgrund steigender Preise für Energie und Wasser werden alternative Wasserquellen und optimierte Wasserkreisläufe für die Industrie zunehmend wichtig.

Aufbereitetes Abwasser wurde bereits als kostengünstige Wasserquelle für „Nichttrinkwasser“ durch das Ministerium für Umwelt und Wasser der VAE identifiziert (United Arab Emirates Ministry of Environment and Water, 2015). Das Vorliegen wasserintensiver Industrien wie der Petrochemie und der Zementindustrie sowie eines großen Energieerzeugungssektors stellen einen großen potenziellen Markt für das MULTI-ReUse-Verfahren dar.

Die Verwaltung des Wassers und Herausgabe entsprechender Fördermaßnahmen, Richtlinien und Genehmigungen verteilt sich auf verschiedene staatliche Organisationen je nach Ursprung des Wassers auf die Bereiche Grundwasser, entsalztes Wasser und recyceltes Wasser (McDonnell und Fragaszy, 2016). Durch das Gesetz Law No (2) wird der Wasser- und Elektrizitätssektor reguliert. Die Gesetzeszusätze Law No (19) und Law No (9) ermöglichen es, Aufträge zur Wassersammlung und -behandlung sowie zur Entsorgung von Abwasser an private Firmen zu vergeben (Regulation & Supervision Bureau, 2015).

Für den Abwassersektor ist das Gesetz Law No (17) von Belang. Zur Verwaltung des Sektors wurde die Abu Dhabi Sewerage Services Company (ADSSC) gegründet. Die Gesetzeszusätze Law No (12) und Law No (18) ermöglichen es, dass private Abwasser- und Kanalisationsdienstleister lizenziert werden und Anschluss zum Kanalisationsnetzwerk der ADSSC erhalten. Zudem wurde die ADSSC zum Verkauf von behandeltem Abwasser ermächtigt (Regulation & Supervision Bureau, 2015). Explizite Richtlinien oder Verordnungen zur Verwendung von aufbereitetem Abwasser für industrielle Zwecke sind nicht bekannt.

Im Rahmen der 2010 gestarteten nationalen Agenda „UAE Vision 2021“ wurde vom Emirat Abu Dhabi eine Fünfjahres-Roadmap für effizientes Management und Erhaltung der Wasserressourcen entwickelt. Dabei sollen übergreifende Richtlinien, Ziele und Initiativen geschaffen werden, um eine bessere Koordinierung und Abstimmung der verschiedenen Organisationen zu gewährleisten (Government of Abu Dhabi 2014). Hierzu sollen Benchmarks zur Evaluierung der verschiedenen staatlichen Wasserstrategien eingeführt werden. Für Grundwasser ist das von der „Environment Agency – Abu Dhabi“ veröffentlichte Strategiepapier „Strategic Plan 2016-2020“ zum Thema nachhaltige Wasserwirtschaft von aktuellem Interesse. Weiterhin finalisiert das Ministerium für Energie momentan den Plan für die „UAE Water Security Strategy 2036“.

5 Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte für die Landwirtschaft

5.1 Rahmenbedingungen

5.1.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für die landwirtschaftliche Bewässerung mit gereinigtem Abwasser gibt es derzeit keine einheitliche gesetzliche europäische Regelung. Der "EU-Blueprint to Safeguard Europe's Water" (2012) besagt, dass Wasserwiederverwendung für Bewässerungs- und industrielle Zwecke ein Problem darstellt, das auf EU-Ebene geregelt werden sollte. Das Fehlen einheitlicher Umwelt- und Gesundheitsstandards wird als ein Hindernis für die EU-weite Anwendung von Wasserwiederverwendung angesehen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, soll demnächst ein Dokument der Europäischen Kommission auf den Weg gebracht werden, in dem Qualitätsanforderungen für gereinigtes Abwasser für verschiedene Anwendungszwecke definiert werden. Im Zuge dieser Aktivitäten wurde vom Joint Research Centre der Europäischen Kommission (JRC) ein erstes Dokument verfasst, in dem minimale Qualitätsanforderungen für die Wasserwiederverwendung bei der landwirtschaftlichen Bewässerung und Grundwasseranreicherung diskutiert werden (JRC, 2017). Das Dokument befindet sich derzeit noch im Entwurfsstadium (Stand Dezember 2017). In seiner finalen Version sollen auch Risikomanagementpläne, Aufbereitungsnormen, Kontrollen der Aufbereitung und der Anwendung sowie Richtwerte für die Wasserqualität festgelegt werden. Der Umfang und die Entscheidung über eine Genehmigung der Wasserwiederverwendung soll allerdings weiterhin ein Vorrecht der EU-Mitgliedsstaaten bleiben.

Obwohl in der EU bisher keine einheitlichen gesetzlichen Regelungen zur Wasserwiederverwendung bestehen, existieren dennoch einige Richtlinien, die beachtet werden müssen (vgl. hierzu auch Kapitel 4.1.1). Die EU-Wasserrahmenrichtlinie dient dem Schutz der Oberflächengewässer und des Grundwassers. Der chemische und ökologische Zustand von Oberflächengewässern bzw. der chemische Zustand des Grundwassers dürfen nicht negativ beeinflusst werden. Dies muss bei einem Einsatz von gereinigtem Abwasser zur Bewässerung sichergestellt sein. Die EU-Grundwasserrichtlinie legt fest, dass der Eintrag gefährlicher Substanzen in das Grundwasser zu vermeiden bzw. zu minimieren ist. Die Kommunalabwasserrichtlinie der EU besagt, dass Abwasser nach Möglichkeit wiederverwendet werden sollte und dass im Verlauf dieser Wiederverwendung Belastungen der Umwelt auf ein Minimum zu begrenzen sind.

In einigen Ländern der EU ist die Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft seit Jahren gängige Praxis und teilweise sogar in nationalen Gesetzen für verschiedene Nutzungsanforderungen konkret geregelt (z. B. Spanien und Italien). In anderen Ländern dagegen ist die Wasserwiederverwendung lediglich in Normen oder Leitfäden beschrieben, die in Ergänzung zum bestehenden allgemeinen Wasserrecht zur Anwendung kommen (z. B. Portugal). Im Rahmen der EU-Projekte *AQUAREC* und *Reclaim Water* wurde bereits für die bestehen-

den Regularien und Standards eine vergleichende Analyse durchgeführt (Wintgens *et al.*, 2005; Hochstrat *et al.*, 2008).

Im internationalen Vergleich haben sich unterschiedliche Ansätze zur Minimierung des gesundheitlichen Risikos und eine Vielzahl an nationalen Regularien etabliert. Diese orientieren sich meist an den Richtliniendokumenten der WHO, FAO sowie den Leitfäden Australiens und der US-EPA, wie im vorigen Kapitel zum industriellen Sektor bereits ausgeführt wurde.

5.1.2 Mengenmäßige Schwankungen und Infrastruktur

Bei der Bewässerung mit gereinigtem Abwasser sollte auf eine bedarfsgerechte Bewässerung geachtet werden, um dadurch einen Stoffeintrag ins Grundwasser zu vermeiden. Der Wasserbedarf unterliegt sowohl starken saisonalen Schwankungen als auch Schwankungen zwischen nassen und trockenen Jahren. Außerdem sollte die Bewässerung auf den kulturspezifischen Wasserbedarf entsprechend der jeweiligen Entwicklungsstadien der Feldfrüchte eingestellt werden (Seis *et al.*, 2016).

Im Gegensatz zum ganzjährigen Anfall von Rohabwasser gibt es nur einen saisonalen Bedarf von Bewässerungswasser während der Beregnungssaison. Dadurch wird eine kurz- oder langfristige Wasserspeicherung notwendig, deren Bemessungsgröße sich am maximalen Tageswasserbedarf orientieren sollte. Bei ausschließlicher Bewässerung mit gereinigtem Abwasser sollte die täglich anfallende Abwassermenge zur Deckung des Wasserbedarfs ausreichen. Eine andere Möglichkeit zur Speicherung besteht in der Grundwasseranreicherung mit gereinigtem Abwasser und anschließender Entnahme zur landwirtschaftlichen Bewässerung (vgl. Kapitel 7.2).

Um das gereinigte Abwasser von der Abwasserbehandlungsanlage zu den Beregnungsflächen transportieren und es verteilen zu können, sind Förderanlagen und Wasserverteilungssysteme notwendig. Hierbei ist das Überwinden großer Distanzen über Zubringerleitungen mit hohen Investitionskosten verbunden, weshalb auch der Abstand der Abwasserbehandlungsanlage von der Beregnungsfläche ein wichtiges Kostenkriterium ist.

5.1.3 Akzeptanz

Trotz der erfolgreichen Anwendung der landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung in vielen Teilen der Welt sowie in einigen EU-Mitgliedstaaten gibt es doch noch immer einige Aspekte, welche die EU-weite Anwendung hemmen. Die beiden Hauptaspekte sind hierbei das mangelnde Bewusstsein bezüglich des potenziellen Nutzens sowie das Fehlen von gesetzlichen Rahmenbedingungen. Um dem entgegenzuwirken und um die sichere Anwendung der Wasserwiederverwendung zu fördern, will die Europäische Kommission Mindestqualitätsanforderungen für wiederverwendetes Wasser festlegen, das zur Bewässerung und für die Grundwasserneubildung verwendet werden soll.

Zur Vorbereitung dieses Dokuments wurde die EU-Konsultation „Legislation requirements Water Reuse and Aquifer Recharge“ angestoßen, welche zur Wiederverwendung für die

landwirtschaftliche Bewässerung sowie zur Grundwasseranreicherung durchgeführt wurde. Die Teilnehmer wurden hierbei hinsichtlich ihrer Meinung zu folgenden Punkten befragt: potenzieller Nutzen, Haupthindernisse für eine stärkere Verbreitung von Lösungen für die Wiederverwendung sowie Einschätzung der Wiederverwendung im Vergleich zur Wassergewinnung aus Flüssen bzw. Grundwasserleitern.

Bei der Umfrage gab es insgesamt 344 Teilnehmer (30 % Privatpersonen und 70 % Stakeholder und Experten) (Lockwood *et al.*, 2017). Sie kann deshalb nur als ein erstes Meinungsbild und nicht als repräsentativ angesehen werden. Als Ergebnis der Umfrage hat sich gezeigt, dass einerseits viele Vorteile der Wasserwiederverwendung gesehen, andererseits auch viele Hemmnisse erkannt werden. Die hierbei genannten Hauptbarrieren für die Wasserwiederverwendung sind die negative Wahrnehmung (Akzeptanz), fehlende rechtliche Rahmenbedingungen sowie ökologische Risiken. Außerdem werden ökonomische Barrieren aufgeführt, insbesondere die Preiskonkurrenz zwischen wiederverwendetem Wasser und konventionell erzeugtem Trinkwasser, das Potenzial für Handelsbarrieren für landwirtschaftliche Produkte, die mit gereinigtem Abwasser bewässert wurden, sowie hohe Zuleitungskosten zu den Bewässerungsflächen. Viele Umfrageteilnehmer schlugen vor, dass die EU-Regelungen auch andere Bereiche als die Landwirtschaft und Grundwasseranreicherung abdecken sollten. Es gab keinen Konsens über die Form der EU-Regelung bei den Umfrageteilnehmern. Einigkeit herrschte dagegen bezüglich der zu regelnden Aspekte: hygienische und chemische Parameter, Monitoring sowie weitere Aspekte wie das Risiko- und Nährstoffmanagement.

5.2 Potenzielle Zielmärkte für den Sektor Landwirtschaft

Allgemeine potenzielle Zielmärkte für eine Anwendung des MULTI-Reuse-Verfahrens wurden anhand der Kriterien Wasserstress, technologische Bereitschaft und Abwasserverfügbarkeit identifiziert (siehe Kapitel 2.2). Für die Betrachtung des landwirtschaftlichen Sektors im Speziellen wurden zusätzlich die Kriterien landwirtschaftliche Wasserentnahme, potenzielle Bewässerungsfläche, potenziell mit Abwasser bewässerbare Fläche sowie landwirtschaftliche Bewässerung mit gereinigtem Abwasser in die Analyse aufgenommen. Auch das Kriterium „Anteil der landwirtschaftlichen Wasserentnahme an den gesamten erneuerbaren Wasserressourcen“ wurde als Indikator für den landwirtschaftlichen Wasserstress aufgenommen. Analog zu Kapitel 2.2 wurden auch hier die jeweiligen Ränge aus der AQUASTAT-Datenbank (FAO, 2017) ermittelt. Da jedoch bei vereinzelt Ländern für bestimmte Kriterien keine Daten verfügbar waren und somit hier auch kein Rang gebildet werden konnte, wurde für die zusammenfassende Analyse der Rangmittelwert gebildet.

Sowohl der allgemeine als auch der landwirtschaftliche Wasserstress war für Länder in ariden Regionen am höchsten (z. B. Vereinigte Arabische Emirate, Katar, Saudi-Arabien). Auch Indien zeigt einen hohen Wasserstress aufgrund der Tatsache, dass in Indien die landwirtschaftliche Wasserentnahme weltweit am höchsten ist. Für Europa zeigte sich der höchste landwirtschaftliche Wasserstress in Spanien sowie in den Inselstaaten Malta und Zypern.

Neben Indien waren die landwirtschaftlichen Wasserentnahmen in China und den USA am höchsten. Hier zeigten sich auch die größten infrastrukturell ausgestatteten potenziellen Bewässerungsflächen. In Europa waren die Länder Spanien, Italien und Griechenland führend für diese Kriterien. Bei der Betrachtung der Flächen, die für die Bewässerung mit gereinigtem Abwasser ausgestattet sind, zeigte sich, dass China auch hier die Spitzenposition einnimmt, gefolgt von verschiedenen Ländern mit großen ariden Gebieten, wie Chile, Mexiko, Saudi-Arabien und Israel. Die potenziellen Bewässerungsflächen für gereinigtes Abwasser in Europa waren in Zypern, Griechenland, Frankreich und Italien am höchsten. Für Spanien waren in diesem Zusammenhang keine Daten verfügbar.

Die Tatsache, dass China sowohl bei den landwirtschaftlichen Wasserentnahmen und potenziellen Bewässerungsflächen, als auch bei den potenziell mit gereinigtem Abwasser bewässerbaren Flächen die Spitzenrolle einnimmt, lässt darauf schließen, dass hier ein hohes Marktpotenzial für das MULTI-ReUse-Verfahren vorhanden ist. Bei näherer Analyse stellte sich zwar heraus, dass die Bewässerungsinfrastruktur zu großen Teilen sanierungsbedürftig ist (siehe unten), jedoch ist hier ganz klar ein Potenzial erkennbar.

Auch bezüglich der Menge an gereinigtem Abwasser pro Einwohner ist China weltweit führend, gefolgt von den USA und weiteren asiatischen Staaten wie Japan, Südkorea und Indien. In Europa nimmt Deutschland für dieses Kriterium die führende Rolle ein, hohe Ränge waren auch für Großbritannien, Frankreich, Italien und Spanien zu verzeichnen.

Bei zusammenfassender Betrachtung aller Kriterien zeigten sich die höchsten Rangmittelwerte für die USA, Japan, Saudi-Arabien, China und Spanien. Im weltweiten Vergleich unter diesen fünf Ländern weist nur Saudi-Arabien einen hohen Rang in Bezug auf Wasserstress auf. Aus der Kombination mit den höchsten Rängen für die anderen Kriterien Abwasserverfügbarkeit (v. a. USA, Japan und China), Wasserwiederverwendung (v. a. Saudi-Arabien, China und Spanien), Bewässerung (v. a. USA und China) sowie technische Bereitschaft (v. a. USA) ließen sich somit die Länder mit einem hohen Marktpotenzial für das MULTI-ReUse-Verfahren ermitteln. Auf zwei „Best practice“ Beispiele aus Zypern und den USA sowie die Zielmärkte in Spanien und China wird im Folgenden näher eingegangen.

5.2.1 Best-Practice-Beispiele

5.2.1.1 Limassol (Zypern)

In der Region Limassol auf Zypern gibt es eine Vielzahl von kleinen Einzugsgebieten, deren Fließgewässer häufig austrocknen. Die Wasserressourcen sind stark limitiert und teilweise schwer zu erschließen. Es gibt starke zeitliche Niederschlagsschwankungen sowie Gebiete mit regelmäßigen und andauernden Trockenperioden. Der Wasserstress-Index nach WRI beträgt 5,0, was den höchsten erreichbaren Wert darstellt. Zypern nimmt in Europa eine Vorreiterrolle in der Wasserwiederverwendung ein. Etwa 96 % des gereinigten Abwassers wird wiederverwendet, v. a. für die landwirtschaftliche Bewässerung sowie die Bewässerung von Parks und Gärten (European Commission 2016, AQUASTAT). Ein politisches Ziel ist es, in Zypern bis zu 40 % des landwirtschaftlichen Wasserbedarfs aus gereinigtem Abwasser zu

decken. Die Kosten für den Bau und den Betrieb der Infrastruktur zur kommunalen Abwasser-sammlung und -behandlung werden von den Gemeinden durch Abwassergebühren begli-chen. Weitergehende Abwasserbehandlung sowie Verteilungsnetze für gereinigtes Abwas-ser werden dagegen von der Regierung über das Water Development Department des Landwirtschaftsministeriums finanziert und betrieben. Je nach Nutzung unterscheiden sich die Preise des wiedergewonnenen Wassers für die Endverbraucher.

Die Abwasserbehandlungsanlage in Limassol hat eine maximale Kapazität von 40.000 m³/d. Die Abwasserbehandlung erfolgt durch mechanische Reinigung (Rechen, Sandfang, Vor-klärbecken), biologische Stufe (Stickstoffentfernung, Belebtschlammverfahren), eine dritte Reinigungsstufe mittels Sandfiltration sowie einer Desinfektion. Die Desinfektion erfolgt durch Chlorung mit Natriumhypochlorid, das vor Ort mittels „on-site electrolytic chlorination“ aus Natriumchlorid und Wasser erzeugt wird (Papaiacovou, 2001).

Die landwirtschaftliche Bewässerung wird mittels Tröpfchenbewässerung und Minisprinkler-Systemen durchgeführt. Der durchschnittliche Bewässerungsbedarf in trockenen Jahren be-trägt je nach Fruchtart zwischen 5.000 und 10.000 m³/ha (500–1.000 mm). Die Verteilung und der Verkauf des gereinigten Abwassers zur landwirtschaftlichen Bewässerung, Garten-bewässerung und Grundwasseranreicherung erfolgt über das Water Development Depart-ment. Es wurde ein Verteilungsnetz von der Regierung errichtet mit einer 20 km langen Hauptleitung sowie einer Vielzahl von Pumpstationen und Speichern.

Die Hauptziele der Wasserwiederverwendung in Limassol, Zypern sind:

- Erschließung einer konstanten Wasserressource
- Verringerung des Düngemittleinsatzes durch Nutzung der Nährstoffe im Abwasser
- Steigerung der Ernteerträge
- Reduzierung von Wasserentnahmen aus dem Grundwasser und dadurch Entlastung der Grundwasserkörper
- Reduzierung von Schadstoffeinträgen in Oberflächengewässer
- Verminderung der Salzwasserintrusion

Es hat sich gezeigt, dass die Produktionskosten für gereinigtes Abwasser viel geringer sind als jene für entsalztes Wasser. Durch die Wasserwiederverwendung werden die Wasserres-sourcen effektiver genutzt. In Zypern wird das gereinigte Abwasser v. a. für die landwirt-schaftliche Bewässerung von Feldfrüchten genutzt, für die das Wasser nicht die höchsten Qualitätsanforderungen erfüllen muss (z. B. Nichtnahrungspflanzen). Dadurch kann das ver-fügbare Wasser höherer Qualität für Trink- und Siedlungswasserzwecke verwendet werden. Für eine kosteneffiziente Nutzung der natürlichen Wasserressourcen in Zypern sollte zukünf-tig angestrebt werden, die Nutzung von gereinigtem Abwasser, entsalztem Meerwasser so-wie natürlichem Süßwasser zu kombinieren.

5.2.1.2 Water Conserv II, Florida (USA)

In Orange County, Florida (USA) wurde 1986 mit Water Conserv II eines der weltweit größten Projekte zur landwirtschaftlichen Wasserrückgewinnung gestartet. Das gereinigte Abwasser wird in der Region v. a. zur Bewässerung von Zitrusfrüchten verwendet. Überschüssiges Wasser wird mittels Infiltrationsbecken (Rapid Infiltration Basins) zur Grundwasseranreicherung genutzt.

Ziele der Wasserrückgewinnung in Orange County sind v. a.:

- Verringerung der Grund- und Oberflächenwasserentnahmen
- Reduzierung der Nähr- und Schadstoffeinträge in Oberflächengewässer
- Grundwasseranreicherung

In der Anlage wird das Abwasser durch folgende Verfahrensschritte aufbereitet: mechanische Reinigung (Rechen, Sedimentation), biologische Reinigung (Belebtschlammverfahren), Multimedia-Filtration und Desinfektion mittels Chlorung. Das gereinigte Abwasser wird anschließend zum Verteilungszentrum gepumpt und von dort auf die Bewässerungsflächen verteilt. Die Anlage hat eine maximale Kapazität von ca. 300.000 m³/d (Cross, 2012). Etwa 60 % des gereinigten Abwassers werden für die landwirtschaftliche Bewässerung verwendet; die restlichen 40 % werden in die Infiltrationsbecken zur Grundwasseranreicherung geleitet. Die mittlere Durchsatzrate an gereinigtem Abwasser beträgt 95.000-115.000 m³/d. Die genehmigte Bewässerungsrate beträgt 148.000 m³/d und die genehmigte Infiltrationsrate 110.000 m³/d.

Das gereinigte Abwasser wird für die Bewässerung einer Fläche von ca. 1.800 ha mit Zitrusfrüchten verwendet. Die Früchte werden im Mittel mit ca. 250 mm/a bewässert (Andrade, 1999). Die Grundwasseranreicherung über die Infiltrationsbecken erfolgt auf einer Fläche von ca. 3.700 ha. Zwischen 1986 und 2006 wurde mit dem „Citrus Grower Agreement“ ein Vertrag zwischen Zitrusfarmern und den Behörden abgeschlossen, der eine kostenfreie Menge an aufbereitetem Abwasser, welches frei von Krankheitserregern ist, garantiert. Seit 2010 werden jedoch nur noch 5-Jahresverträge abgeschlossen, bei denen die Abgabe des gereinigten Abwassers nicht mehr kostenlos ist. Die zu zahlenden Preise sind nutzungsabhängig und liegen mit 0,04–0,18 US\$/m³ unterhalb des Trinkwasserpreises.

Die Richtlinie „Chapter 62-610 F.A.C.“ bildet den Rechtsrahmen für Water Conserv II. Die Richtlinie besagt, dass für die Bewässerung von Nichtnahrungspflanzen auf Flächen mit beschränktem öffentlichem Zugang das Abwasser mindestens die 2. Reinigungsstufe sowie eine Grunddesinfektion (z. B. UV-Behandlung) durchlaufen haben muss. Für die Bewässerung von Flächen mit Nahrungspflanzen sowie für die Bewässerung von Flächen mit öffentlichem Zugang muss zusätzlich zur 2. Reinigungsstufe eine wirksamere Desinfektion („high-level disinfection“, z. B. Chlorung) durchgeführt werden. Für die meisten Parameter erreicht das zurück gewonnene Wasser Trinkwasserqualität. Die Universität von Florida hat Qualitätsstandards für die Bewässerung von Zitrusbäumen entwickelt, die teilweise noch strenger

als die Trinkwasserstandards sind und zumeist auch eingehalten werden (Parson *et al.*, 2001).

Water Conserv II gilt als ein Meilenstein in der Geschichte der Wasserwiederverwendung für die Bewässerung von Nutzpflanzen (Lazarova & Azano, 2013). Mit diesem Projekt wurde eine verlässliche und nachhaltige Wasserressource geschaffen, die keine Kosten für die Errichtung von Brunnen und keine mengenmäßige Beanspruchung der Grundwasserleiter verursacht. Die Grundwasserleiter werden durch die Grundwasseranreicherung mittels Infiltrationsbecken entlastet, und die Nutzpflanzen zeigen ein besseres Wachstum sowie höhere Erträge. Gleichzeitig kommt es zu geringeren Einträgen in die Gewässersysteme, was zu einer erhöhten Biodiversität in den Gewässern führt.

5.2.2 Zielmärkte

5.2.2.1 Spanien

Landwirtschaftliche Bewässerung und Wasserwiederverwendung

In Spanien hat das ökonomische Wachstum in den letzten Jahrzehnten zu einem stark erhöhten Wasserbedarf und einer Überbeanspruchung der Grundwasserleiter geführt. Dies hat einen starken Konkurrenzdruck zwischen verschiedenen Endnutzern bis hin zu sozialen Konflikten zur Folge (Lecina *et al.*, 2010).

In großen Teilen Spaniens herrscht semiarides Klima mit wiederholten Trockenperioden und einer starken saisonalen Variabilität. Beim EU-weiten Vergleich ist Spanien das Land mit dem zweithöchsten Wasserstress. Bei Betrachtung der landwirtschaftlichen Wasserentnahme zeigt sich, dass in Spanien ca. 23 % der gesamten erneuerbaren Wasserressourcen für die landwirtschaftliche Bewässerung verwendet werden. Die Gesamtwasserentnahme beträgt sogar 33 % der erneuerbaren Wasserressourcen. In Bezug auf die Wasserentnahmen ist Spanien führend in der EU.

Bei Betrachtung des Marktpotenzials für die Bewässerung mit gereinigtem Abwasser hat Spanien den großen Vorteil, dass hier sehr große Flächen vorhanden sind, die bereits mit Bewässerungstechnik ausgestattet sind. Somit sind infrastrukturell die Grundlagen für landwirtschaftliche Bewässerung vorhanden, die mit Zuleitungs- und Speichersystemen noch für die Bewässerung mit gereinigtem Abwasser angepasst werden müssten. In den letzten Jahren gab es verschiedene Regierungsprogramme zur Modernisierung der Bewässerungsinfrastruktur und zur Steigerung der Bewässerungseffizienz, durch die Wasser eingespart und damit der Wasserknappheit entgegengewirkt werden soll (MAPA, 2001).

Im Jahre 2012 betrug die mit Bewässerungstechnik ausgestattete Fläche in Spanien 3,8 Mio. ha, was etwa 16 % der gesamten Landwirtschaftsfläche entspricht. Die Regionen mit den größten Bewässerungsflächen sind Andalusien (861.000 ha), Kastilien-La Mancha (519.000 ha) sowie Kastilien und Leon (492.000 ha) (FAO, 2017b). Die Wasserentnahme für die landwirtschaftliche Bewässerung entsprach ca. 68 % der Gesamtwasserentnahme. Der größte Teil des Bewässerungswassers (71 %) wurde aus Oberflächengewässern entnom-

men, die Entnahme aus dem Grundwasser betrug ca. 28 % (Dwyer, 2000). Das Wasser wird teilweise über Strecken von mehreren Hundert Kilometern transportiert, um in Regionen mit Wasserknappheit zur Bewässerung eingesetzt zu werden.

Das bewässerte Fruchtartenspektrum ist sehr breit gefächert, von Dauerkulturen (z. B. Oliven, Zitrusfrüchte) über Ackerkulturen (z. B. Weizen, Mais, Reis) bis hin zu Gewächshauskulturen an der spanischen Südküste. Ein Großteil der Kulturen wird ganzjährig bewässert ohne saisonale Unterschiede. Die größten Bewässerungsflächen im Jahre 2010 waren Getreide (21 % der Gesamtbewässerungsfläche), Olivenplantagen (16 %), Mais (10 %) und Zitrusfrüchte (10 %).

Die Menge an wiederverwendetem Wasser betrug in den Jahren 2005 bis 2007 ca. 10–16 % der Gesamtmenge an behandeltem Abwasser (Iglesias *et al.*, 2010). Damit liegt Spanien EU-weit an dritter Stelle nach Zypern (96 %) und Griechenland (18 %). Seitdem in Spanien mit dem Royal Decree 1620/2007 gesetzliche Regelungen bezüglich der Wasserwiederverwendung eingeführt wurden, gab es einen signifikanten Anstieg der Menge an wiederverwendetem Wasser. So wurden bspw. im Jahre 2006 noch 368 Mio. m³ Wasser wiederverwendet, während es im Jahre 2009 schon 414 Mio. m³ waren. Nach dem National Water Reuse Plan kann diese Menge noch bis auf 1.380 Mio. m³ ansteigen (WWRD). Der größte Anteil (71 %) des gereinigten Abwassers wird für die landwirtschaftliche Bewässerung eingesetzt (Iglesias *et al.*, 2010). Die Sektoren Umwelt (z. B. Landschafts- und Waldbewässerung, 18 %), Erholung (z. B. Golfplätze, 7 %) und Siedlungswasserwirtschaft (4 %) haben geringere Anteile, welche jedoch in den letzten Jahren angestiegen sind (Iglesias *et al.*, 2010). Wasserwiederverwendung wird v. a. in den Küstenregionen des Mittelmeers und des Atlantiks sowie auf den balearischen und kanarischen Inseln betrieben. Vereinzelt gibt es auch größere Wasserwiederverwendungsprojekte im spanischen Inland (z. B. Madrid und Vitoria-Gazteiz). In den Küstenregionen hat das Abwasser oft eine hohe Salinität, was die Abwasserbehandlung teilweise vor hohe Herausforderungen stellt, damit das gereinigte Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung verwendet werden kann (Iglesias & Ortega, 2008).

Rechtliche Bedingungen

Spanien verfügt mit dem Royal Decree (RD) 1620/2007 seit 2007 über ein konkretes Gesetz, das die Wasserwiederverwendung regelt. Das RD 1620/2007 regelt insgesamt 24 verschiedene Anwendungen für gereinigtes Abwasser, die in 5 Sektoren eingeteilt sind: Siedlungswasserwirtschaft, Landwirtschaft, Industrie, Erholung und Umwelt. Es werden auch Anwendungen genannt, für welche die Wasserwiederverwendung verboten ist, (z. B. Trinkwassergewinnung). Im Anhang von RD 1620/2007 werden für die jeweiligen Anwendungen Grenzwerte für verschiedene Parameter festgelegt (u. a. intestinale Nematoden, *Escherichia coli*, Schwebstoffe, Trübung). Neben Regelungen bezüglich Qualitätskriterien und Genehmigungsverfahren legt das RD 1620/2007 auch fest, dass die spanischen Bezirks- und Kommunalregierungen Pläne und Programme zur Förderung der Wasserwiederverwendung erstellen sollen. Das RD 1620/2007 ist also ein Gesetz, das die Wasserwiederverwendung nicht nur regelt, sondern auch fördert.

Nach dem RD 1620/2017 sind für die landwirtschaftliche Bewässerung von Nahrungspflanzen, bei denen auch die verzehrbaren Teile direkt mit Wasser in Kontakt kommen (Qualitätsstufe B), folgende Grenzwerte einzuhalten: *E. coli* 100-200 KBE/100 ml, intestinale Nematodeneier 1 Ei/10 L und *Legionella* spp. 100 KBE/L. Für Nahrungspflanzen ohne Direktkontakt erhöhen sich die Grenzwerte für *E. coli* auf 1000KBE/100 ml (Qualitätsstufe C) und für Industriepflanzen auf 10.000 KBE/100 ml (Qualitätsstufe D).

Kosten

Iglesias *et al.* (2010) haben zur Abwasserbehandlung bis zur Qualitätsstufe B folgende Verfahrenskette vorgeschlagen: Chemische Fällung, Tiefenfiltration und Desinfektion (UV-Behandlung mit Chlorung, evtl. Restchlor im Verteilungssystem). Die Qualitätsstufen C und D können durch die Anwendung von Tiefenfiltration und UV-Desinfektion mit Restchlor im Verteilungssystem erreicht werden. Für Qualitätsstufe B belaufen sich die kalkulierten Investitionskosten pro täglich produziertem Kubikmeter auf 28-48 € und die laufenden Kosten auf 0,06-0,09 €/m³_{prod}. Für Qualitätsstufen C und D wurden die Investitionskosten mit 9-22 €/m³_{prod} und die laufenden Kosten mit 0,04-0,07 €/m³_{prod} kalkuliert. Wenn das Abwasser aufgrund eines hohen Salzgehalts für die landwirtschaftliche Bewässerung entsalzt werden muss, erhöhen sich die Investitionskosten um das 10-fache und die laufenden Kosten um das 5-fache.

Ein Beispiel für ein spanisches Wasserwiederverwendungsprojekt ist das Projekt in Vitoria-Gasteiz im Norden von Spanien. Die Anlage hat eine Kapazität von 35.000 m³/d und versorgt die Region mit qualitativ hochwertigem Wasser, geeignet für die uneingeschränkte Bewässerung von Nahrungspflanzen. Das gereinigte Abwasser wird zur Bewässerung von verschiedenen Nahrungsmittelpflanzen (u. a. Obst- und Gemüseplantagen) auf eine Landwirtschaftsfläche von bis zu 10.000 ha verteilt. Die Anlage verfügt über ein Reservoir mit einem Speichervolumen von 7 Mio. m³ zur Speicherung des gereinigten Abwassers von Herbst bis Frühling und Bewässerung im Sommer. Die Abwasserbehandlung erfolgt hier mittels mechanischer Reinigung (Rechen, Sedimentation), biologischer Stickstoffelimination, Flockung und Sandfiltration sowie Desinfektion durch Chlorung.

Für das Projekt in Vitoria-Gasteiz wurden folgende Kosten ermittelt (Mujierjago & López, 2008):

- laufende Kosten Abwasserbehandlung: 0,065 €/m³_{prod}
- Investitionskosten Abwasserbehandlung: 0,26 €/m³
- Investitionskosten Wasserverteilung: 2,25 €/m³
- Investitionskosten Speicherung: 1,70 €/m³

Fazit

In Spanien sind die Voraussetzungen für die landwirtschaftliche Wasserwiederverwendung und damit auch für die Etablierung des MULTI-ReUse-Verfahrens sehr gut. Das Land weist in Europa den zweithöchsten Wasserstress und die höchsten Wasserentnahmen auf. Es verfügt über sehr große Flächen mit Bewässerungsinfrastruktur, die in den letzten Jahren in

vielen Regionen durch Regierungsprogramme saniert und modernisiert wurden. Demzufolge müsste die Infrastruktur für die Bewässerung mit gereinigtem Abwasser größtenteils nur angepasst und nicht vollkommen neu errichtet werden. Die Tatsache, dass Spanien über eine gesetzliche Regelung zur Wasserwiederverwendung verfügt, zeigt das große Interesse der Regierung, die Nutzung dieser alternativen Wasserressource unter sicheren Rahmenbedingungen zu fördern. Bereits jetzt liegt Spanien in der EU bezüglich der Menge an wiederverwendetem Wasser an dritter Stelle, wobei der größte Teil dieses Wassers für die landwirtschaftliche Bewässerung eingesetzt wird.

Verschiedene Projekte zur landwirtschaftlichen Wasserwiederverwendung (z. B. Vitoria-Gasteiz) haben gezeigt, dass dadurch ein verlässliches, modernes und ökonomisch nachhaltiges landwirtschaftliches Bewässerungssystem geschaffen werden kann. Die Minimierung von Trockenstress, die Vermeidung von Ernteausfällen, die gute Funktionalität eines modernen Bewässerungssystems sowie die kontinuierliche Unterstützung und ökonomische Vorteile für die Landwirte in diesen Projekten haben unter den Akteuren zu großen Teilen eine hohe Akzeptanz hinsichtlich der Wasserwiederverwendung geschaffen.

5.2.2.2 China

Landwirtschaftliche Bewässerung und Wasserwiederverwendung

China ist auf den ersten Blick ein Land mit geringem Wasserstress, dennoch gibt es hier aufgrund des rasanten Bevölkerungswachstums und der hohen Bevölkerungsdichte massive Probleme bezüglich der Wasserqualität und -quantität. Die Wasserverfügbarkeit pro Einwohner beträgt mit 2.300 m^3 (Rodrigues, 2014) etwa ein Viertel des Weltdurchschnitts (Cheng *et al.*, 2009), mit einer jährlichen Verringerung von ca. 1,7 % (National Bureau of Statistics of China, 2010). In China sind vier Klimazonen vorherrschend: arides und semiarides Klima im Westen und Nordwesten, semi-humides Klima im Nordosten sowie humides Klima im Süden und Südwesten (Aquastat, 2011). Dementsprechend ist die Wasserverfügbarkeit geographisch sehr ungleichmäßig verteilt mit einer höheren Wasserverfügbarkeit im Süden im Vergleich zum Norden, was im Zuge des Klimawandels noch verstärkt werden könnte. Im Mittel sind etwa 13 % der Landwirtschaftsfläche jedes Jahr von Dürren beeinträchtigt. Diesem Problem wird regierungsseitig mit verschiedenen Wassertransfer-Projekten, wie z. B. dem "Süd-Nord-Wassertransferprojekt", (Nanshui Beidao) begegnet, bei dem verschiedene große Flüsse umgeleitet werden sollen, um die Wasserverfügbarkeit im Norden zu stabilisieren. Etwa 72 % der Flüsse, 61 % der Seen und 37 % der Grundwasserkörper in China weisen eine geringere Wasserqualität als Trinkwasser auf (Rodrigues, 2014). Die Hauptgründe dafür sind Nähr- und Schadstoffeinträgen aus verschiedenen diffusen Quellen (z. B. landwirtschaftlicher Run-off) und aus kommunalem Abwasser, insbesondere in ländlichen Regionen.

In China, dem bevölkerungsreichsten Land der Erde, ist die Ernährungssicherheit eine große Herausforderung. Um diese zu gewährleisten, müssen viele Flächen, v. a. im wasserarmen Norden, bewässert werden. Die bewässerten Hauptfruchtarten sind Reis, Weizen, Mais, Baumwolle, Raps und Gemüse. Die Größe der bewässerten Fläche in China hat sich in den

letzten Jahrzehnten kontinuierlich erhöht und betrug im Jahre 2013 ca. 70 Mio. ha. Der größte Teil der Bewässerungsflächen (69 %) ist für die Bewässerung mit Oberflächenwasser ausgerüstet, der Flächenanteil für die Bewässerung mit Grundwasser beträgt 31 % (Aquastat Data, 2013). Die Wasserentnahme des landwirtschaftlichen Sektors übersteigt die Entnahmen der anderen Sektoren und beträgt im Mittel etwa 65 % der Gesamtentnahmen (Aquastat Data, 2013), teilweise sogar bis zu 80 % in der Hebei-Ebene (Xu *et al.*, 2005). Die Bewässerung mit Grundwasser hat zu starken Absenkungen des Grundwasserspiegels geführt, bspw. in der nordchinesischen Ebene seit 1970 um zwei Drittel (Zhang *et al.*, 2003). In Regionen mit starker landwirtschaftlicher Wasserentnahme herrscht teilweise ein großer Konkurrenzdruck mit anderen wasserintensiven Sektoren (Zhu *et al.*, 2013). Die chinesische Regierung hat verschiedene Wassermanagement-Institute damit beauftragt, die Konflikte zu schlichten und die gleichmäßige Wasserversorgung zu gewährleisten (Hutterer, 2008).

Die chinesische Bewässerungsinfrastruktur ist zu großen Teilen veraltet und sanierungsbedürftig. Im Mittel gehen etwa 60 % des Wassers auf dem Weg von der Entnahmestelle zum Bewässerungssystem aufgrund von defekten Rohrleitungen verloren (Zhu *et al.*, 2013). Dadurch werden viele Bewässerungssysteme ineffizient. In den letzten Jahren hat China in viele Projekte zum Neubau und zur Sanierung und Modernisierung der Bewässerungs-, aber auch der Wasserversorgungs- und -entsorgungsinfrastruktur investiert. Dass die Modernisierung der Bewässerungsinfrastruktur für die chinesische Regierung von großer Bedeutung ist, zeigt sich auch im den Zielen des 13ten Fünfjahresplans (2016-2020). Hier heißt es, dass wassersparende Bewässerungsprojekte gefördert werden sollen, um die Getreideproduktion und die Bewässerungseffizienz in verschiedenen Regionen zu steigern. Weiterhin sollen die Überbeanspruchung des Grundwassers im Norden sowie die Abwasserableitung im Süden reduziert werden. Neben wassersparenden Maßnahmen und Technologien sollen auch Projekte zur Nutzung alternativer Wasserressourcen (v. a. Regenwasser und gereinigtes Abwasser) gefördert werden. Der Wasserverbrauch soll bis zum Jahre 2020 um 23 % reduziert werden.

In den letzten Jahrzehnten ist die Infrastruktur zur Abwassersammlung und -behandlung stark ausgebaut worden, da aufgrund des hohen Bevölkerungswachstums auch die Abwassermenge stark zugenommen hat (Yi *et al.*, 2011). In Bezug auf die Abwasserbehandlung sieht der 13te Fünfjahresplan vor, die Abwasserbehandlungsraten in urbanen Regionen bis 2020 auf 95 % und in ländlichen Regionen auf 90 % zu steigern. Die Wasserwiederverwendungsrate in China ist derzeit noch relativ niedrig, wobei das Potenzial als sehr groß angesehen wird (Lyu *et al.*, 2016). Im Jahre 2013 wurden 7,8 % des gesamten gereinigten Abwassers wiederverwendet, davon nur 2,6 % für Bewässerungszwecke. Auch die Wasserwiederverwendung soll nach dem 13ten Fünfjahresplan gesteigert werden, um 15 % bzw. um 20 % in Trockengebieten.

Derzeit ist die Akzeptanz bezüglich der Wasserwiederverwendung noch relativ gering (Rodrigues, 2014). Viele Regionen mit geringerem Wasserstress verlassen sich noch immer auf die Wassertransfer-Programme, ohne die Möglichkeit der Wasserwiederverwendung in Be-

tracht zu ziehen (Yi *et al.*, 2011). Es wurden jedoch verschiedene Aus- und Weiterbildungsprogramme geschaffen, um den Zugang zur Wasserwiederverwendung zu erleichtern.

Rechtliche Bedingungen

Zwischen 2002 und 2005 wurde in China eine Serie mit Standards für die Wasserwiederverwendung in verschiedenen Sektoren veröffentlicht (Industrie, Umwelt, Siedlungswasserwirtschaft, Grundwasseranreicherung und Landwirtschaft). Der Qualitätsstandard für die Nutzung von Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung (GB 20922-2007) legt fest, dass das Abwasser für die Bewässerung von Nichtnahrungspflanzen (Baumwolle, Sisal, Hanf und Energiemais) nur die erste (physikalische) Reinigungsstufe durchlaufen haben muss. Für Nahrungspflanzen (z. B. Reis und Gemüse) muss das Abwasser zusätzlich biologisch aufbereitet werden (zweite Reinigungsstufe) (Liu, 2014). Die Richtlinie legt hygienische und chemische Grenzwerte fest, die sich teilweise für verschiedene Kulturpflanzenkategorien unterscheiden. In hygienischer Hinsicht wird für Fäkalcoliforme zwischen Gemüse (2.000 KBE/100 ml) und anderen Pflanzen (4.000 KBE/100 ml) unterschieden, wogegen für Nematoden für alle Anbauprodukte der Grenzwert von 2 Eiern/L gilt. Für die meisten chemischen Parameter werden Grenzwerte für Nahrungspflanzen sowie für Nichtnahrungspflanzen beschrieben, wobei für die Parameter BSB, CSB und Schwebstoffe eine weitere Aufteilung der Kategorien erfolgt. Die Grenzwerte für Fäkalcoliforme für Gemüse sind doppelt so hoch wie die entsprechenden Grenzwerte der WHO, wogegen die WHO-Anforderungen für alle anderen Anbauprodukte mit 10.000 KBE/100 ml schwächer sind als die chinesischen Standards. Die WHO-Grenzwerte für Nematoden sind mit 0,01 Eiern/L für Nahrungspflanzen zum Rohverzehr bzw. 0,1 Eier/L für alle anderen Anbauprodukte viel strenger als die chinesischen Standards. Für die chemischen Parameter sind die Grenzwerte mit anderen internationalen Standards vergleichbar (z. B. US-EPA).

Im Jahre 2012 sind von der chinesischen Regierung "*Technical Guidelines for Municipal Wastewater Reclamation and Reuse*" veröffentlicht worden, in denen die Planung, Konstruktion, Wartung sowie das Risikomanagement für Wasserwiederverwendungsprojekte beschrieben wird. Das Engagement der chinesischen Regierung der letzten Jahre, geregelte Rahmenbedingungen für die Wasserwiederverwendung zu schaffen und diese damit zu fördern und auszubauen, deutet darauf hin, dass hier ein großes Marktpotenzial für nachhaltige Technologien und Konzepte der Wasserwiederverwendung vorhanden ist.

Kosten

Ein großes Hindernis für die großflächige Verwendung von gereinigtem Abwasser für die landwirtschaftliche Bewässerung ist die sanierungsbedürftige oder fehlende Infrastruktur. Für die landwirtschaftliche Wasserwiederverwendung müssen die Abwasserbehandlungsanlagen in vielen Regionen hinsichtlich weitergehender Reinigungsstufen aufgerüstet und die Zu- und Ableitungssysteme saniert bzw. modernisiert werden. Im Zuge des 13ten Fünfjahresplans hat die chinesische Regierung vorgesehen, bis 2020 sehr große Geldsummen, insgesamt 564 Mrd. Yuan (73 Mrd. EUR), in Abwasser- und Wasserwiederverwendungsprojekte zu investieren (China Daily, 2017).

Die Wasserpreise und insbesondere die Preise für gereinigtes Abwasser sind in China sehr niedrig, weit unter dem Weltdurchschnitt (Hutterer, 2008). Beispielsweise betrug im Jahre 2012 der Preis für wiedergewonnenes Wasser in Peking 1 Yuan/m³ (0,14 €/m³) (Chang & Ma, 2012). Diese geringen Gebühren sind staatlich subventioniert und decken nur die Betriebskosten, keineswegs jedoch die Investitionskosten für die Abwasserbehandlung oder Verteilungsnetze (Yi *et al.*, 2011). Mit diesen staatlichen Subventionen soll die Wasserwiederverwendung gefördert werden und eine breitere Anwendung finden (Chang & Ma, 2012). Verschiedene Autoren schlagen vor, die Wasserpreise für Trink- und Brauchwasser zu erhöhen, um damit Wassersparmaßnahmen zu forcieren bzw. alternative Wasserquellen wie gereinigtes Abwasser zu etablieren (Hutterer, 2008). Außerdem können durch höhere Wasserpreise auch Investitionsprogramme der Regierung gegenfinanziert werden. Nach Chang & Ma (2012) sollten diese sich insbesondere auf die Infrastruktur und Verteilungsnetze fokussieren, um den Zugang der Bevölkerung zu aufbereitetem Abwasser zu ermöglichen.

Fazit

Die Wasserwiederverwendung wird in China derzeit zwar schon angewendet, ist jedoch noch nicht sehr weit etabliert. Regionaler Wasserstress, das rasante Bevölkerungswachstum sowie die meist relativ schlechte Wasserqualität haben die chinesische Regierung veranlasst, verschiedene Programme zur Nutzung alternativer Wasserquellen, zum Ausbau der Wasserver- und -entsorgungsinfrastruktur sowie zur Förderung der Akzeptanz der Wasserwiederverwendung zu initiieren. Die staatliche Subventionierung der Preise für gereinigtes Abwasser und die Festlegung gesetzlicher Qualitätsstandards sollen zu einer höheren Akzeptanz und damit zu einer breiteren Anwendung führen. All diese Rahmenbedingungen und insbesondere die Notwendigkeit der Ernährungssicherung im bevölkerungsreichsten Land der Erde zeigen den dringenden Bedarf von landwirtschaftlicher Wasserwiederverwendung in China und deuten auf ein sehr großes Marktpotenzial hin.

6 Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft

Unter Wasserwirtschaft wird entsprechend der DIN 4049 die zielbewusste Ordnung aller menschlichen Einwirkungen auf das ober- und unterirdische Wasser verstanden. Der Sektor der Siedlungswasserwirtschaft organisiert den Umgang mit Trinkwasser, Betriebswasser, Abwasser und Niederschlagswasser in den Siedlungen und deren Umfeld; ferner kann er auch für den Schutz der Siedlungen vor Überflutungen verantwortlich sein.

6.1 Rahmenbedingungen für Betriebswasser

Für Betriebswasser stehen im Siedlungsbereich unterschiedliche Quellen zur Verfügung (Grundwasser, Regenwasser, Oberflächenwasser sowie aufbereitetes Abwasser unterschiedlicher Qualität). Jenseits einer Verwendung auf dem eigenen Grundstück, welche (je nach Ortssatzung und wasserrechtlicher Situation) durch den Grundstückseigner oder Dritte

betrieben wird, kann Betriebswasser auch durch Akteure der Siedlungswasserwirtschaft bereitgestellt werden. Wasser einer solchen Qualität kommt im Sektor Siedlungswasserwirtschaft unabhängig von dessen Herkunft für verschiedene Einsatzzwecke in Betracht:

- für die Bewässerung von städtischem Grün (Parks), weiteren Grünanlagen (z. B. Golfplätzen, Friedhöfen) oder Erholungslandschaften sowie Vorgärten,
- für die innerhäusliche Verwendung (insbesondere zur Toilettenspülung; evtl. auch weitere Anwendungszwecke, z. B. Einsatz in Waschmaschinen möglich), aber auch als Toilettenspülwasser für Bürogebäude, Sportanlagen, Schulen oder andere öffentliche Einrichtungen, wie z. B. Flughäfen (vgl. Hessenwasser 2016),
- für die Bespeisung von Repräsentationsbrunnen und zur Straßenreinigung bzw. Staubbindung,
- als Löschwasser sowie zur Spülung der Kanalisation und zur
- Grundwasseranreicherung (vgl. Kapitel 7).

Für die meisten dieser Zwecke (Ausnahmen: Straßenreinigung, Kanalspülung) ist es wenig zielführend, wenn das Betriebswasser mit einem Lkw zum Einsatzort transportiert werden muss. Für den Einsatz als Betriebswasser für den menschlichen Gebrauch wird es folglich zumeist leitungsgeliefert an den Gebrauchsort transportiert werden. Je nach Einsatzzweck wird ein solches Leitungssystem ein flächendeckendes Netz oder eine kaum vernetzte Leitungsstrecke hin zu wenigen Hauptverbrauchern (z. B. städtischen Parks, Laufbrunnen usw.) sein. In ersterem Fall kommt es im Ideal zur Verdopplung des Wasserversorgungsnetzes mit Wasser einerseits in Lebensmittelqualität, andererseits in einer etwas niedrigeren Betriebswasserqualität.

Die Wasserwiederverwendung aus Abwasser wird in den Rechtsvorschriften der EU nicht auf der operativen Ebene geregelt; für einige als potenzieller Zielmarkt wichtige Mitgliedsstaaten (z. B. Spanien) bestehen jedoch rechtliche Vorschriften. Global sind auch für einige wichtige Zielmärkte (z. B. USA oder China) bereits Rechtssetzungen oder technische Normen in Kraft (vgl. die Ausführungen in Kapitel 4.1.1 und 5.1.1), die für den Betreiber einer entsprechenden Versorgung ausreichend Sicherheit bieten. In jedem Fall ist der gesundheitliche Infektionsschutz zu beachten.

Als ein besonderes Risiko des Einsatzes von Betriebswasser gilt grundsätzlich seine Verwechslung mit Trinkwasser. Es ist unter allen Umständen zu vermeiden, dass Betriebswasser versehentlich an seiner Stelle getrunken oder für die Zubereitung von Lebensmitteln verwendet wird. Große Aufmerksamkeit wird daher dem Vermeiden von Fehlan schlüssen, hier insbesondere Querverbindungen zwischen dem Trinkwassernetz und dem Betriebswassernetz, gewidmet (Friedler *et al.*, 2015; Wedrell *et al.*, 2003). Gut ausgebildetes Personal und farbig unterschiedlich gekennzeichnete Leitungssysteme gelten als Garant für die Vermeidung derartiger Risiken (Tolksdorff & Cornell, 2017), die insbesondere in der deutschen Trinkwasserverordnung geregelt sind. Betriebswasserversorgungen lassen sich folglich nachhaltig nur dann betreiben, wenn durch eine sehr hohe Prozessqualität eine entsprechende Garantienstellung gegeben werden kann.

Für Betriebswasser, mit dem Akteure der Siedlungswasserwirtschaft versorgen, müssen diese zudem ihren Kunden gegenüber gewährleisten, dass bestimmte Anforderungen einerseits bezogen auf die Qualität des gelieferten Wassers (chemische, physikalische, mikrobiologische Parameter), andererseits bezogen auf die Qualität der Versorgung (z. B. kontinuierliche Lieferung, bestimmter Versorgungsdruck) eingehalten werden. Hierzu können auch Vereinbarungen über evtl. Obergrenzen der Lieferung oder vorzuhaltende Mengen gehören; entsprechend müssen in dem Versorgungssystem für kommunales Betriebswasser auch Speicherwerke usw. vorgesehen werden.

6.2 Potenzielle Zielmärkte für Betriebswasser in der Siedlungswasserwirtschaft

Zentrale Voraussetzungen für den Einsatz des MULTI-ReUse-Verfahrens sind daher nicht alleine das Vorliegen von Wasserstress (bzw. politischen Entscheidungen, alternative Wasserressourcen verstärkt zu nutzen) und ausreichende Abwassermengen, um den Bedarf an Betriebswasser immer decken zu können, sondern auch das Vorliegen von Rahmenbedingungen, die eine in der Prozessqualität sehr hohe Umsetzung der Innovation (einschließlich sehr hoher Garantieleistungen im Betrieb) sicher gestatten. Entsprechend sind für die Bestimmung von Zielmärkten die unter 2.2 genannten Auswahlkriterien zu bestimmen.

Mangelhafte Wasserverfügbarkeit kann aus verschiedenen Gründen eintreten. Neben dem Klima (z. B. aride und evtl. auch semiaride Gebiete) kann dies auch in Regionen mit stark belastetem oder anthropogen gestörtem Grundwasserhaushalt (z. B. Bergbaureviere) oder mit sehr kleinen oder tendenziell erschöpften Grundwasserleitern (z. B. Inseln, Küstenregionen), evtl. auch in Gebieten mit nutzungsbedingt problematischen Karstgrundwasserleitern dort der Fall sein, wo nicht ausreichend auf Oberflächenwasser zurückgegriffen werden kann.

Als Einsatzzweck zunehmend wichtig für abwasserbürtiges Betriebswasser ist die Landschaftspflege. In Gebieten mit hoher touristischer oder Naherholungsfunktion kann ein hoher Bedarf an Bewässerungswasser bestehen, z. B. für eine dauerhafte Instandhaltung und Pflege von grünen Rasenflächen auf Golfplätzen oder in Park- und Grünanlagen. Der Bedarf für dieses Wasser zur Landschaftspflege ist in Europa meistens während der Sommermonate am größten bzw. andernorts in den Jahreszeiten mit minimaler Ressourcenerneuerung (wenig Niederschläge bzw. hohe Evapotranspiration), wodurch die Auswirkungen auf die Umwelt erheblich sein können. Die Lieferung von abwasserbürtigem Betriebswasser bietet eine Möglichkeit, diese Auswirkungen zu mildern. Allerdings liegen die großen Hotels bzw. Ferienanlagen meistens weit entfernt von den zentralen Abwasserbehandlungsanlagen der öffentlichen Wasserinfrastruktur. Daher wird üblicherweise bereits aus Kostengründen die dezentrale Wiedernutzung des eigenen Hotelabwassers propagiert (Cornel *et al.*, 2005; Störmer *et al.*, 2010). In Fällen, in denen große Hotel- und Ferienanlagen oder auch andere Landschaftsflächen mit hohem Bewässerungsbedarf (wie Golfplätze) in der Nähe einer zentralen Abwasserbehandlungsanlage liegen, ergibt sich eine andere Situation.

Objektiver Wasserstress wird nicht ausreichen, um zu einer systematischen und nachhaltigen Wiederverwendung von Kommunalabwasser im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft zu kommen. Hier wird es vielmehr auf eine politische Willensbildung ankommen, in der alternative Wasserressourcen nicht nur als mögliche „Nische“ gesehen, sondern aktiv propagiert werden. Ähnlich wie bei anderen Transformationen von Wasserinfrastrukturen auch kann es hier folglich für den Markterfolg entscheidend sein, dass es einen „Kümmerer“ gibt (Schramm & Kerber, 2017).

Entweder ist eine Misch- oder Trennkanalisation auf zentraler (evtl. auch auf semi-zentraler) Ebene bereits aufgebaut oder aber es werden gerade Anstrengungen unternommen, ein derartiges Abwassersystem mit anschließender Abwasserbehandlungsanlage aufzubauen. Im letzteren Fall kann es hier also zum sog. „Leap-Frogging“ kommen (Binz *et al.*, 2012; Chew *et al.*, 2010; Kluge & Schramm, 2016)³, so dass für die Bestimmung potenzieller Märkte die in Kapitel 2.2 genannte Voraussetzung (Abwasserverfügbarkeit und damit bereits erschlossenes Abwasser) relativiert werden kann. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit sind jedoch ausreichend große Abwasservolumen bei einer mittelhohen bis hohen Bevölkerungsdichte.

Aufgrund der (z. B. hygienischen) Risiken, die bei einer Versorgung mit abwasserbürtigem Betriebswasser ausgeschlossen werden müssen, ist es vorteilig, wenn in der Zielregion Institutionen zur Risikovorsorge ausreichend vorhanden sind (z. B. Genehmigungs- oder Aufsichtsbehörden im Bereich der Öffentlichen Gesundheitspflege, aber auch Rechtswege zu einer zivil- bzw. strafrechtlichen Ahndung). Auf jeden Fall müssen klare (und geteilte) Vorstellungen darüber vorhanden sein, wie im Eintrittsfall die Risiken zwischen dem Abwasserlieferanten, den Abwasserproduzenten, dem Betriebswasserlieferanten und dem Betreiber innerhäuslicher Verteilnetze geteilt werden.

Auch wenn wir in der Darstellung aus systematischen Gründen zunächst einmal die Sektoren Industrie, Landwirtschaft und Siedlungswasserwirtschaft getrennt haben: In der Realität werden, sofern die Mengen an aufbereitetem Wasser ausreichend sind und die Qualitätsanforderungen getroffen werden, auch weitere Verbraucher aus den anderen Sektoren eingeschlossen, z. B. Unternehmen, die Betriebswasser einsetzen, um daraus Zement oder Beton herzustellen oder damit die Wäsche von Kraftfahrzeugen betreiben.

Das Thema Wasser, Wasserwiederverwendung und Abwasser muss integraler Bestandteil moderner Städteplanung bei neuen Städten oder Stadtteilen, aber auch grundlegenden Stadtteilsanierungen sein. Es erfordert politische Unterstützung (und auch weitere monetäre Impulse), um mittelfristig ReUse-Projekte umsetzen zu können.

³ In der Volkswirtschaftslehre wird unter „Leapfrogging“ das Auslassen oder Überspringen von Entwicklungsstufen verstanden.

6.2.1 Best-Practice-Beispiele

6.2.1.1 Versorgung von Bürogebieten in Tokio

Die Wasserwiederverwendung hat in Japan eine über 60-jährige Geschichte und kann bis in das Jahr 1955 zurückverfolgt werden. In der Abwasserbehandlungsanlage Mikawashima in Tokio wurde zu jener Zeit kommunales Abwasser für industrielle Zwecke wiederaufbereitet, um der Überbeanspruchung der Grundwasserressourcen in der Bucht von Tokio entgegenzuwirken (Kitamura *et al.*, 2013). Seit den 1960er Jahren werden in Japan darüber hinaus einzelne Gebäude mit dezentralen Anlagen zur Wasserwiederverwendung ausgestattet (Kimura *et al.*, 2013). 1968 wurde begonnen, Bürogebäude in Tokio mit Betriebswasser zu versorgen. Dies wurde nach Dürren weiter ausgeweitet. Seit den 1980er Jahren wird wiederverwendetes Wasser als wertvolle alternative Ressource in urbanen Regionen erachtet. Seitdem haben viele Lokalregierungen Projekte zur Wasserwiederverwendung durchgeführt, die von der nationalen Regierung finanziert wurden (Ogoshi *et al.*, 2001; Funamizu *et al.*, 2008).

Die Metropolregion Tokio umfasst heute etwa 33 Mio. Einwohner. Trotz moderatem Klima und ca. 1.500 mm Niederschlag im Jahr beträgt die Wasserverfügbarkeit pro Kopf lediglich 900 m³ pro Jahr; was in etwa einem Drittel des japanischen Durchschnitts entspricht und im Wesentlichen auf die enorme Bevölkerungsdichte zurückzuführen ist (Kitamura *et al.*, 2013). Trockenperioden in der Regenzeit bringen die regionale Wasserversorgung an die Grenzen ihrer Funktionsfähigkeit. Als alternative Wasserressourcen wurden insbesondere Regenwassernutzung und Wasserwiederverwendung erschlossen (Sone, 2004).

Die Abwasserbehandlungsanlage Ochiai, versorgt bereits seit 1984 Bürohochhäuser im Tokioter Bezirk Shinjuku mit wiederaufbereitetem Betriebswasser zum Zwecke der Toilettenspülung (Kitamura *et al.*, 2013). Die Versorgung mit wiederaufbereitetem Betriebswasser erfolgt über ein zweites Verteilnetz, das neben dem Trinkwassernetz aufgebaut wurde. Das Bureau of Sewerage Works bittet die Hochhauseigentümer bzw. entsprechende Bauherren darum, bei der Planung der Gebäude die Installation von doppelten Leitungssystemen zu berücksichtigen. Im Falle des 1984 errichteten Systems in Shinjuku wurden zu Beginn neun Hochhäuser mit 1.400 m³ Betriebswasser pro Tag versorgt. Mittlerweile handelt es sich um 30 Gebäude auf 80 ha mit einem täglichen Betriebswasserbedarf von 3.000 m³ (Kitamura *et al.*, 2013).

In der Abwasserbehandlungsanlage Ochiai wird das Abwasser zunächst konventionell im Belebtschlammverfahren als zweite Behandlungsstufe aufbereitet. Als dritte Behandlungsstufe schließt sich ein Schnellsandfilter an. Das so produzierte Betriebswasser wird in das 9,1 km entfernte, mitten in Shinjuku gelegene, Water Recycling Center transportiert. Dort wird es mittels Chlorung desinfiziert und gespeichert, bevor es als Betriebswasser nach Bedarf in den Bürogebäuden verteilt wird.

Das Water Recycling Center befindet sich im Keller eines der versorgten Hochhäuser, dem Shinjuku International Building. Da es sich bei den 30 Hochhäusern fast ausschließlich um

Bürogebäude handelt, unterliegen die Wasserverbräuche großen Schwankungen, die vom Verteilzentrum berücksichtigt werden müssen. Das behandelte Abwasser wird nicht nur zum Water Recycling Center geleitet, sondern zudem für die Restauration von Oberflächengewässern verwendet.

Der Betriebswasserpreis in Shinjuku beträgt 3,41 US\$/m³, womit Investitionen, Betrieb und Instandhaltungskosten abgedeckt sind (Kitamura *et al.*, 2013). Mit Betriebswasserversorgung ausgestattete Gebäude haben um bis zu 23 % niedrigere Wasserver- und -entsorgungskosten als solche, die ausschließlich mit Trinkwasser versorgt werden, was im Wesentlichen auf die Wirtschaftlichkeit des zweiten Netzes aufgrund hoher städtischer Dichte und geringer Distanzen zurückzuführen ist (Funamizu *et al.*, 1998). Das Projekt stellt damit einen Meilenstein der Wasserwiederverwendung für häusliche Zwecke im urbanen Raum dar.

Seit den 1990er Jahren sind in Tokio weitere semizentrale Betriebswasserversorgungssysteme errichtet worden, und zwar in den Bezirken New Water Front, Shinagawa Ost, Ohsaki, Shiodome und später auch Nagata-Cho (Kitamura *et al.*, 2013). Mittlerweile gibt es in Tokio mit Yashio sieben Bezirke, in denen Wasserwiederverwendungsanlagen Betriebswasser für die Toilettenspülung bereitstellen. Die Gebiete umfassen insgesamt 1.137 ha einschließlich eines 82,5 km langen Leitungsnetzes, mit dem pro Tag ca. 9.100 m³ Betriebswasser bereitgestellt werden (Kitamura *et al.*, 2013). Etwa 9 % des anfallenden Abwassers wurden 2009 in den genannten Bezirken wiederverwendet.

Zu den Erfolgsfaktoren der Tokioter Systeme gehören die vergleichsweise geringen Kosten. Dabei haben die Erfahrungen ergeben, dass sich die Installationskosten für das duale Verteilnetz verringerten, wenn die Gebäude bereits frühzeitig in ihrer Entwurfsphase auf doppelte Leitungssysteme ausgelegt werden.

Ein weiterer Erfolgsfaktor war eine transparente Öffentlichkeitsarbeit, z. B. über die Funktionsweise der Systeme in Form einer anschaulichen Ausstellung, die zentral in Shinjuku gelegen und daher während ihres Bestehens zwischen 1986 und 2010 sehr gut besucht war. Abgesehen davon herrscht unter den Gebäudeeigentümern und -nutzern eine große Zufriedenheit in Bezug auf die qualitative und quantitative Zuverlässigkeit des Betriebswassers (Kitamura *et al.*, 2013).

Kommunales Abwasser wird in Tokio aufgrund der gemachten Erfahrungen als verlässliche Ressource erachtet, da es qualitativ und quantitativ vergleichsweise stabil anfällt. Die Tokioter Stadtregierung hat 1999 einen Water Recycling Masterplan aufgestellt, um die Nutzung der begrenzten Wasserressourcen effizienter zu gestalten und eine regionale Kreislaufführung der urbanen Wasserströme anzustreben (Kitamura *et al.*, 2013). Eines der Ziele des Bureau of Sewerage Works, das 20 Abwasserreinigungsanlagen im Großraum Tokio betreibt, ist die Entwicklung großflächiger Infrastrukturen zur Wasserwiederverwendung voranzutreiben.

6.2.1.2 Gartenbewässerung in Hotels an der türkischen Südwestküste

Seit den 1980er Jahren wird vereinzelt in Hotelanlagen im Mittelmeerraum (zunächst auf Zypern), in den Subtropen und den Tropen das eigene Abwasser biologisch aufbereitet und als Betriebswasser wiederverwendet. Mit dieser wasserwirtschaftlichen Lösung werden mehrere Zwecke verfolgt. Einerseits wird das Abwasser nicht in die Vorflut gegeben (das ist in der Regel das dem Hotel vorgelagerte Meer; so wird die Attraktivität als Badehotel erhalten). Zum anderen wird es möglich, Trinkwasser (und damit auch Kosten für Wasser) einzusparen, auch während der saisonalen Trockenzeiten die evtl. ausgedehnten eigenen Grünanlagen weiter zu erhalten und dort Rasen oder andere Grünpflanzen wachsen zu lassen.

In neuere Anlagen zur Aufbereitung des Betriebswassers, wie die im türkischen Ferienresort Iberotel Sarigerme Park⁴, wird zudem eine energetische Optimierung versucht. Das Hotel an der südtürkischen Ägäisküste hat eine Kapazität von 746 Betten in 373 Zimmern mit Erweiterungsmöglichkeiten auf über 900 Betten während der sommerlichen Hochsaison.

Das Hotel bezieht sein Wasser aus zwei Quellen: Trinkwasser aus dem öffentlichen Netz und für Bewässerungszwecke Grundwasser. Die verfügbare Grundwassermenge reicht jedoch nicht aus, um die große Anlage zu bewässern, so dass weiteres Wasser benötigt wird; hier wurde zunächst Trinkwasser eingesetzt. Je nach Belegungsrate variierte der Trinkwasserverbrauch im Hotel zwischen knapp 400 L/Gast^xd (volle Auslastung) und 1600 L/Gast^xd (Auslastung unter 20 % in der frühen Nebensaison). Die enorme Schwankungsbreite des Wasserbedarfs zeugt dabei von einem sehr hohen fixen Verbrauch für die Grundausstattung des Hotels.

Das anfallende Abwasser wird überwiegend in einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage behandelt; aus einem Teil des Abwassers wird seit 2005 in einer dezentralen Membranbelebungsanlage Betriebswasser bereitet (für technische Einzelheiten vgl. Antakyali *et al.*, 2008), das für den Gartenteich und dann in einer Kaskadennutzung für die Gartenbewässerung verwendet wird. Trotz einer sehr hohen Nährstofffracht lieferte die Anlage stabil ein Betriebswasser, das die erforderlichen chemischen und mikrobiologischen Parameter einhielt (Antakyali *et al.*, 2008, 2008a).

Die dezentrale Herstellung von Betriebswasser führte zu erheblichen Einsparungen beim Trinkwasserverbrauch (ca. 35 %) sowie zu einer Verringerung der Grundwasserentnahme für Bewässerungszwecke. Bei den meisten Hotelgästen stieß die Maßnahme auf überraschend positive Resonanz (Antakyali *et al.*, 2008a). Das Hotel erhält seit Jahren den Preis der TUI für sein qualifiziertes Umweltmanagement.

Der doppelte Anreiz, durch Erhöhung der Wassereffizienz Kosten zu sparen und durch bessere Umweltbedingungen Kunden zu binden, findet mittlerweile immer mehr Nachahmer (Gössling, 2015; TUI Group, 2014).

⁴ Seit Mai 2016 wird das Hotel mit der Nachbaranlage Palm Garden als TUI BLUE Sarigerme Park betrieben.

6.2.2 Zielmärkte

6.2.2.1 Der Betriebswassermarkt in Spanien (insbesondere Katalonien)

Aufgrund seiner naturräumlichen Situation leiden weite Teile Spaniens unter Wasserstress (vgl. im Einzelnen Kapitel 5.2.2.1). In Katalonien ist es seit 1989 mehrfach zu krisenhaften Situationen in der Wasserversorgung gekommen, zuletzt 2006/2008 (Doranova, 2013; March *et al.*, 2013). Im Zentrum Kataloniens liegt die Metropolregion Barcelona, in der mehr als drei Millionen Menschen leben und versorgt werden müssen. Versuche, noch mehr Trinkwasser aus anderen Einzugsgebieten (etwa aus Südfrankreich) zu erhalten, waren auf politischer Ebene gescheitert, zuletzt 2004, als nach dem Wahlsieg der Sozialisten in Katalonien der Plan aufgegeben wurde, sich aus dem Gebiet des Ebro mit weiterem Trinkwasser zu versorgen. Infolge dessen wurden bereits seit Mitte der 2000er Jahre Versuche unternommen, Trinkwasser zu substituieren (Domènech *et al.*, 2011; 2015).

Damit einher ging, dass aufbauend auf einer politischen Kritik an immer weiter räumlich ausgreifenden technischen Lösungen (wie dem Wassertransfer aus benachbarten oder weiter entfernten Einzugsgebieten) landesweit in Spanien zur Forderungen nach einer „neuen Wasserkultur“ kam, die auf einem Modell einer ausgeglichenen Regionalentwicklung aufbaute und von Bürgergruppen aufgegriffen wurde (Gross *et al.*, 2015). Bereits 2002 hatte die Stadt Sant Cugat del Vallès Regelungen zum Wassersparen erlassen, in denen auch die Substitution des Trinkwasser durch Regen- bzw. Grauwasser vorgesehen war (Domènech *et al.*, 2015).

In der Situation der Trinkwasserknappheit wurde 2008 nicht nur auf ordnungspolitische Maßnahmen („Notstandsverordnungen“ mit Verbot bestimmter Wassernutzungen), sondern zugleich auch auf Bewusstseinsbildung und Wassersparkampagnen zurückgegriffen. Weiterhin wurde vorgeschlagen, Trinkwasser aus neuen Quellen (Meerwasserentsalzung, Abwasser) zu gewinnen und teilweise auch durch Betriebs- und Niederschlagswasser zu ersetzen (Domènech *et al.*, 2013, March *et al.*, 2013, Seguí *et al.*, 2009).

Der spanische Staat reagierte frühzeitig ebenso wie die Autonome Gemeinschaft Katalonien mit Rechtssetzungen, die für Betreiber Sicherheit schufen und das Beschreiten dieser technischen Alternativen erlaubten. Begünstigt durch die Kommunalabwasserrichtlinie der Europäischen Gemeinschaft (91/271/EU), in der sich recht allgemein Überlegungen zur Wiederverwendung des Abwassers finden, war dieses Prinzip bereits 1995 in den Nationalen Abwasserplan Spaniens eingegangen. So kam es auch zu einer direkten Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser in mehreren Regionen Spaniens, darunter auch in Katalonien (Esteban & de Miguel, 2008, vgl. zur Rechtsetzung in Spanien ausführlicher Kapitel 0). Entsprechend gilt für die Wasserwiederverwendung die spanische Königliche Verordnung 1620 aus dem Jahr 2007 (Königreich Spanien 2007), welche u. a. die spanischen Qualitätskriterien für die Wasserwiederverwendung zum Zwecke der Toilettenspülung sowie für die öffentliche und private Gartenbewässerung enthält. Beinahe wichtiger als physikalische Werte sind hier zur Risikovorsorge die mikrobiologischen Parameter.

Im Rahmen des Agenda-21-Prozesses haben zahlreiche Kommunen in der Metropolregion Barcelona eine politische Willensbildung durchlaufen und zu kommunalen Entscheidungen geführt, durch die auch Wiedernutzungen von Abwasser bzw. Grauwasser möglich wurden. Zunächst wurde neben der Meerwasserentsalzung, die in der Stadt Barcelona im Zentrum stand, insbesondere in den Nachbargemeinden die dezentrale Nutzung von Regen- und Grauwasser präferiert (Domènech & Valle, 2014; Doranova, 2013).⁵

Aufgrund der Finanzkrise ist allerdings in Katalonien die Bautätigkeit zum Erliegen gekommen, sodass derzeit keine weiteren dezentralen Maßnahmen zur Nutzung von Regen- und Grauwasser mehr erschlossen werden (Domènech *et al.*, 2015). Um weiterhin Trinkwasser substituieren zu können, wird es folglich erforderlich werden, verstärkt zentral an der Abwasserbehandlungsanlage anzusetzen und von dort aus Betriebswasser für häusliche Zwecke zu verteilen.

Aufgrund zahlreicher Umsetzungen von häuslichen Regenwassernutzungen und dezentraler Grauwasserwiederverwendungen (Domènech *et al.*, 2013; Doranova, 2013; March *et al.*, 2013; Innovation´Seeds, 2016) haben Handwerker und auch deren Auftraggeber in der Metropolregion ausreichend Erfahrungen gesammelt (Molist, 2016), die auch bei der Installation von öffentlichen Betriebswassernetzen zur häuslichen Versorgung genutzt werden können. In der Abwasserbehandlungsanlage Gavà-Viladecans wurde eine dritte Behandlungsstufe installiert, um Betriebswasser zu erzeugen, das über ein eigenes Netz in Viladecans, einer Stadt westlich Barcelonas, verteilt wird. Zusätzlich wird dieses zusätzliche Versorgungsnetz mit Grundwasser gespeist. In erster Linie wird das Wasser zur Bewässerung der Grünanlagen und für die Straßenreinigung verwendet. In ersten Untersuchungen zur Akzeptanz zeigte sich, dass diese gegeben ist, auch wenn eine stärkere Präferenz für Regenwasser vorhanden ist (Domènech *et al.*, 2013; Gross *et al.*, 2015).

In den öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen Kataloniens werden jährlich mehr als 620 Mio. m³ Abwasser behandelt (Generalidad de Catalunya, 2017), davon mehr als 250 Mio. m³ alleine in der Metropolregion Barcelona (AMB, 2017). Für abwasserbürtiges Betriebswasser sind in Katalonien noch erhebliche Potenziale erschließbar. Bei konservativer Schätzung beträgt der Bedarf für die Toilettenspülung, die kommunale Grünpflege, Straßenreinigung und Spülung der Kanalisation in jenen Gemeinden, die auf gereinigtes Abwasser zurückgreifen können, ein gutes Drittel der anfallenden Abwassermenge. Der Bedarf an Betriebswasser beträgt in Katalonien mehr als 200 Mio. m³ und für den Großraum Barcelona mehr als 100 Mio. m³. 2014 wurden in der Metropolregion Barcelona nur 25,3 Mio. m³ Abwasser wiederverwendet, davon nur 1 % im häuslichen Bereich, ein Großteil im Bereich der Landwirtschaft und auch für Grundwasseranreicherung, also jenseits der hier ermittelten Potenziale. Während der Trockenperiode 2008 waren es 54,1 Mio. m³ (Molist, 2016). Neben der Metropolregion bieten sich insbesondere die touristisch geprägten Küstenregionen Kata-

⁵ Bei der Wiedernutzung von Abwasser steht derzeit der Einsatz für die Landschaftspflege (Selgui *et al.*, 2009) und die künstliche Grundwasseranreicherung, insbesondere zur Abwehr von Salzwasserintrusionen, im Vordergrund (Armento Ferrando, 2002; Molist, 2016).

loniens, die Costa Brava und die Costa Dorada, für die Einführung von Betriebswassersystemen an (Casado Cañeque *et al.*, 2016).

Bei einer Vermarktung sollten die Vorteile gegenüber den praktizierten wasserwirtschaftlichen Alternativen zur Trinkwassersubstitution klar benannt werden:

- deutlich geringerer Energieverbrauch als bei der Meerwasserentsalzung
- konstantes Volumen, unabhängig von Niederschlag und Temperatur
- leichte Nachrüstbarkeit im Siedlungsbestand (im Vergleich zu Regenwasser/dezentraler Grauwasserwiederverwendung), da nur ein zweites Verteilnetz eingebaut werden muss, aber keine doppelten Abwasserleitungen und auch keine Speicher in den Häusern; Konflikte um den Platz für die Speicher werden vermieden
- geringerer finanzieller und Arbeitsaufwand als beim Betrieb dezentraler Anlagen (insbesondere zur Grauwasseraufbereitung, Monitoring und Wartung der Anlagen)

Vor einer Vermarktung sind evtl. Finanzierungsmodelle zu entwickeln, mit denen die Kosten für das neue Verteilnetz leichter aufgebracht und getragen werden können. Angesichts des hohen gesellschaftlichen Interesses an der „neuen Wasserkultur“ in Katalonien könnte eine Option darin bestehen, hierfür Anleihen bei interessierten lokalen Bürgerinnen und Bürgern aufzunehmen.

Es ist anzunehmen, dass ausgehend von Katalonien auch in anderen Landesteilen Märkte für häusliches Betriebswasser aus Abwasserbehandlungsanlagen entstehen können, etwa auf den Kanarischen Inseln und den Balearen.

6.2.2.2 *Der Betriebswassermarkt in Saudi-Arabien*

Das Königreich Saudi-Arabien gilt als eines der trockensten Länder der Welt; 70 % der Landfläche sind (hyper)arid oder semiarid; teilweise beträgt der jährliche Niederschlag weniger als 50 mm (bei einer Evapotranspiration von mehr als 3.600 mm). Die Bevölkerung hat sich in den letzten vier Jahrzehnten mehr als vervierfacht – von 7 auf 26 Mio. Menschen. Die tatsächliche Nachfrage nach Wasser für den menschlichen Gebrauch hat bei den letzten Wasserbedarfsprognosen den Bedarf deutlich überschritten; für 2014 wurde ein Bedarf von 2,7 km³/a vorhergesagt (Chowdhury, 2012). Zugleich hat das Land aufgrund seiner durch den Ölreichtum begünstigten sozio-ökonomischen Entwicklung, zu der auch eine extreme Verstädterung gehört, den drittgrößten Wasserbedarf von allen Ländern der Erde (nach den USA und Kanada); pro Einwohner und Tag erfordert die Siedlungswasserwirtschaft 250 L. Um den Wasserbedarf zu decken, reichen die konventionellen Ressourcen (Grundwasser, Oberflächenwasser mit 302 Staubecken) nicht mehr aus. Zu bedenken ist dabei zudem, dass ein Großteil des geförderten Grundwassers fossiler Natur ist, d. h. sich nicht wieder Neubildet; damit werden die entsprechenden Vorkommen bei der derzeitigen Bewirtschaftung vor 2050 erschöpft sein. Im Jahr 2010 wurden 58 % des Gesamtwasserbedarfs Saudi-Arabiens durch sich nicht erneuernde Grundwasservorkommen gedeckt, 33,5 % durch Oberflächenwasser und Grundwasser aus sich erneuernden Vorkommen, 6 % durch Meerwasserentsalzung und 2,2 % durch aufbereitetes Abwasser (Caldera *et al.*, 2017; Ouda, 2015).

Wegen des weiteren Wachstums und um die wegfallende fossile Ressource zu substituieren, setzt Saudi-Arabien bisher in erster Linie auf die Meerwasserentsalzung, die 2012 bereits etwa 30 % des Wasserbedarfs bei einem Energiebedarf von 3.355 MW/a lieferte (Chowdhury, 2012; Drewes *et al.*, 2012). Abschätzungen ergaben, dass 2014 bereits 60 % des Wassers für den menschlichen Gebrauch in Saudi-Arabien aus entsalztem Meerwasser stammten und sich Ende 2015 entsprechend bereits 15 % der weltweiten Meerwasserentsalzungsanlagen in Saudi-Arabien befanden (Caldera *et al.*, 2017).

Die Wasserwiederverwendung wird von Saudi-Arabiens Intelligenz seit langem als eine der Möglichkeiten zur politischen Bekämpfung der Wasserknappheit diskutiert (Ouda, 2015). So stellten die islamischen Gelehrten des Landes bereits 1978 in einer „Fatwa“ fest, dass gut gereinigtes Abwasser als sauberes Wasser angesehen und wiederverwendet werden könnte, sofern Schädigungen der menschlichen Gesundheit verhindert werden. Folglich sei sein Genuss als Trinkwasser soweit wie möglich auszuschließen, andere Nutzungen seien jedoch mit dem Handeln von gläubigen Muslimen vereinbar. Abderrahman (2001) zufolge war diese Fatwa ein zentraler Schritt hin zur Wiederverwendung von Abwasserbehandlungsanlagenabläufen für unterschiedliche Zwecke. Seit diesem Zeitpunkt wurde behandeltes Abwasser nicht nur vereinzelt zur Bewässerung von Dattelpalmen eingesetzt, sondern auch zur Bewässerung von Grünanlagen und städtischen Parks in Dhahran, Jeddah, Jubail, Ryad und Taif.

Rechtliche Regelungen für die Wasserwiederverwendung wurden für Saudi-Arabien im Jahr 2000 getroffen und betreffen zuerst die Anwendungen in der Landwirtschaft. Neben Abwasserbehandlungsanlagenabfluss aus der dritten Behandlungsstufe konnte unter bestimmten Bedingungen auch der Abfluss aus der zweiten Behandlungsstufe zur Bewässerung von Pflanzen verwendet werden (Ouda, 2015). Abu-Rizaiza (1999) beklagte zu wenige Differenzierungsmöglichkeiten, sodass aufgrund der getroffenen Risikovorsorge der Aufwand zur Aufbereitung für zahlreiche Verwendungszwecke zu hoch sei. Im Jahre 2006 wurden die Richtlinien verändert; im selben Jahr veröffentlichte das neu zuständige Energieministerium zwei Broschüren mit Auslegungsrichtlinien für den Entwurf von Abwasserbehandlungsanlagen und mit den genauen Bedingungen (auch Kontrollen, Verstößen und Strafen) zu einer Verwendung der behandelten Abwasserbehandlungsanlagenabflüsse für die Bewässerung (Ouda, 2015). Seitdem ist nach Ansicht Oudas (2015) ausreichend Betreibersicherheit vorhanden, sodass sich sichere Praktiken bei der Abwasserbehandlung und der Bewässerung entwickeln konnten. Private Institutionen (wie die Königliche Kommission von Jubail und Yanbu) haben für sich die Richtlinien weiterentwickelt und strengere Parameter für Trübung, Fäkalkeime und TOS festgelegt (Ouda, 2015).

Drewes *et al.* (2012) stellten trotz der grundsätzlichen Toleranz der saudi-arabischen Gesellschaft für die Nutzung von abwasserbürtigem Betriebswasser fest, dass es bisher noch an nationalen Politiken fehle, diese Ressource in die künftige Wasserpolitik einzubeziehen. 2012 fehlte es noch an guten wissenschaftlichen Bewertungen der Abwasserpolitik des Landes und der sich daraus ergebenden Möglichkeiten, um die Bezahlung von Wasser, effizien-

te Bewässerungsstrategien und die Bekämpfung regionaler Wasserknappheit im Zusammenhang zu betrachten (Drewes *et al.*, 2012). Ouda (2015) kritisierte, dass bisher keine finanziellen Anreizstrukturen zur Wasserwiederverwendung (mit Ausnahme bei der Industrie) geschaffen worden seien; so wurde das Wasser bis 2014 stark subventioniert. Erst 2015 wurden Abwassergebühren erhoben. Im Vergleich mit den Nachbarstaaten sei die Abwasserbehandlung in Saudi-Arabien suboptimal. Auch fehlten Verteilungsnetze, um das Betriebswasser zu den Endkunden zu transportieren.

Die neuen Tarifstrukturen beabsichtigen insbesondere Gewerbekunden, wie Hotels, Einkaufsmalls, Ärztehäuser und Privatkliniken oder Vermieter von möblierten Wohnungen, darin zu bestärken, dass sie für alle entsprechenden Einsatzzwecke an der Stelle von Trinkwasser Betriebswasser einzusetzen (Ouda, 2015).

In den Abwasserbehandlungsanlagen Saudi-Arabiens werden insgesamt jährlich mehr als 670 Mio. m³ Abwasser behandelt, einschließlich des Abwassers aus der Industrie und Landwirtschaft (DeNicola *et al.*, 2015); somit stünde täglich ein Volumen von mehr als 6,7 Mio. m³ behandeltem Kommunalabwasser für die Wiederverwendung zur Verfügung (Drewes *et al.*, 2012). Insbesondere in den Großstädten wird aktuell diese Strategie eingeschlagen; in der Hauptstadt Riyad werden bereits 50 % des Kommunalabwassers im Kreis geführt, im Jahr fast 120 Mio. m³ (Ouda, 2015).

Für abwasserbürtiges Betriebswasser sind im saudischen Königreich noch erhebliche Potenziale erschließbar; in der Vergangenheit wurde ein Großteil des Kommunalabwassers bisher überhaupt nicht behandelt. Nach Chowdhury (2012) beträgt das Gesamtvolumen an Kommunalabwasser 1.500 Mio. m³/a. Aktuell werden nur etwa 9 % des behandelten Abwassers wiederverwendet. Der Rest wird derzeit bei Küstenstädten ins Meer entsorgt, ohne die ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile, die eine Wiederverwendung brächte, zu nutzen (Drewes *et al.*, 2012; Missimer & Ami, 2012). Das Abwasser aus Binnenstädten wird in der Wüste versickert, wobei auf Dauer das Risiko besteht, erhebliche Grundwasserschäden zu verursachen (Chowdhury, 2012). Das Königreich Saudi-Arabien gilt, nach der VR China und den USA, als drittgrößter Markt für Wasserwiederverwendung. Das ist offenbar auch in der eigenen Wahrnehmung der Entscheidungsträger angekommen (Drewes *et al.*, 2012; DeNicola *et al.*, 2015; Ouda, 2015). Um diese Rolle zu erreichen, sind allerdings substantielle Veränderungen in der Wasserwirtschaft, auch in den infrastrukturellen Voraussetzungen, erforderlich. So gelangen derzeit nur etwa 50 % des städtischen Abwassers in die Kanalisation, der Rest wird über Sickergruben und ähnliche Vorrichtungen dezentral abgeleitet (Ouda, 2015).

Das wiederverwendete Abwasser wird in Saudi-Arabien bisher nicht als Betriebswasser für häusliche Zwecke verwendet, sondern im Wesentlichen für die Industrie, zur landwirtschaftlichen Bewässerung bzw. Milchkuhhaltung, Landschaftspflege und Grundwasseranreicherung (Drewes *et al.*, 2012; Missimer & Ami, 2012; Ouda, 2015). Das hat wesentliche Gründe in der bei weitem nicht kostendeckenden Kostenstruktur, die die Kosten für die Abwasserbehandlung keinesfalls internalisiert, sondern durch den Staat subventionieren lässt. In den

letzten Jahren hat es hier Veränderungen bezogen auf die Industrie gegeben, nicht aber bezogen auf die kommunalen Nutzer, sodass für diese weiterhin wenig Anreize bestehen, weder Wasser zu sparen noch gereinigtes Kommunalabwasser wiederzuverwenden (Ouda, 2015).

2012 startete die National Water Company, in der etwa fünf Jahre zuvor die Wasser- und Abwasserbetriebe des Landes vereinigt wurden, um mehr wirtschaftliche Schlagkraft zur Wiederverwendung von Kommunalabwasser für landwirtschaftliche Zwecke zu entwickeln (MEW, 2012; Ouda, 2015). Der aufbereitete Abwasserbehandlungsanlagenabfluss wird dabei an private Unternehmen verkauft, die in Verbindung mit internationalen Unternehmen dieses weiter aufbereiten sollten (Arab News, 2012). Bis zum Jahr 2020 möchte die Regierung 65 % des anfallenden Abwassers wiederverwenden, bis 2040 sogar 90 %. In neueren Berichten wird nun die Verwendung als Betriebswasser im Industriebereich genannt (Al Wazir, 2016).

Insbesondere die im Westen nahe Mekka gelegene Provinz al-Bahah, deren Haupteinnahmequelle der Tourismus ist und in der fast 400.000 Menschen leben, könnte einen ersten Markt für häusliches Betriebswasser bilden, da dort keine Konkurrenzen mit anderen Einsatzzwecken zu erwarten sind. Folgemärkte bilden die Provinzen Nadschran (600.000 Einwohner), al-Qasim (1,4 Mio. Einwohner), Ha'il (680.000 Einwohner) und al-Dschauf (360.000 Einwohner). Alle diese Provinzen liegen im Landesinneren, sodass eine Versorgung mit Wasser aus Meerwasserentsalzung über größere Distanzen gehen müsste; nur in al-Quasim werden bisher 5 % des Wasser über Meerwasserentsalzung gesichert (Drewes *et al.*, 2012).

Es ist davon auszugehen, dass neben Saudi-Arabien auch in anderen Teilen der Arabischen Halbinsel (und damit der sog. Golf-Region) Märkte für häusliches Betriebswasser aus Abwasserbehandlungsanlagen entstehen können (siehe dazu auch Kapitel 4.2.2.2).

6.3 Rahmenbedingungen für Trinkwasser

Für Trinkwasser werden im Allgemeinen nur die besten Ressourcen verwendet; anders als für Betriebswasser sind dies häufig Ressourcen außerhalb der Siedlungen. Hierbei wird zunächst an Grundwasser oder an besonders geschütztes Oberflächenwasser, z. B. aus Talsperren fernab landwirtschaftlicher oder industrieller Tätigkeit, gedacht.

Nicht nur in den Industriestaaten wie Deutschland besteht grundsätzlich ein hoher gesellschaftlicher Anspruch an das Trinkwasser. Dabei gilt die Reinheit des Trinkwasser als ein hohes gesellschaftliches Gut: „Wasser muss für den menschlichen Gebrauch [...] so beschaffen sein, dass durch seinen Genuss oder Gebrauch eine Schädigung der menschlichen Gesundheit, insbesondere durch Krankheitserreger, nicht zu besorgen ist.“ (Trinkwasserverordnung, 2001). Diese Verordnung legt für Deutschland fest, dass ein unbedenklicher Genuss von Trinkwasser über das ganze Leben eines Menschen zu gewährleisten ist. Dort ist ferner ein Minimierungsgebot festgeschrieben (§6 TrinkwV 2001), das weitaus stärker gefasst ist als entsprechende Rechtsvorschriften auf EU-Ebene (dort gibt es nur für Nitrat ähnliche Überlegungen). Durch das Minimierungsgebot ist in Deutschland nicht nur dafür Sorge

zu tragen, dass Krankheitserreger, Schwermetalle und Umweltgifte entsprechend der Trinkwasserrichtlinie aus dem Trinkwasser zu entfernen sind; es sind auch solche Schadstoffe zu minimieren, von denen aktuell noch kein Gefährdungspotenzial ausgeht (Hässelbarth, 1986).

Fremdstoffe im Trinkwasser sind auch dann gesellschaftlich unerwünscht, wenn keine konkrete Gefährdung von ihnen ausgeht. Die sogenannte Trinkwasserästhetik stellt ein weiteres wichtiges Beurteilungskriterium in Bezug auf das Trinkwasser dar, das möglichst naturbelassen sein soll. Fremdstoffe sollen darin nicht enthalten sein, egal ob sie eine schädliche Wirkung entfalten oder nicht (Dieter & Schmidt, 2011).

Während in Mitteleuropa oder weiten Teilen Nordamerikas klar ist, dass die Versorgung mit Trinkwasser rund um die Uhr funktioniert, ist das in anderen Gebieten nicht der Fall. Dort erfolgt die Zulieferung ins Haus bspw. einmal täglich zu einer bestimmten Zeit. Das Trinkwasser wird dann in einem Tank (häufig auf dem Dach) gespeichert und von dort, je nach Bedarf, abgegeben. Insbesondere aus nicht-planifizierten Siedlungen in den Tropen ist bekannt, dass das Trinkwasser entweder an Brunnen oder Fassungsstellen abgeholt und über eine längere Wegstrecke nach Hause transportiert oder auf der Straße vor dem Haus für teures Geld von Händlern verkauft und in Kanistern oder ähnlichem angeboten wird (vgl. Kluge & Schramm, 2016).

Der leitungsgebundene Transport erlaubt es hingegen, z. B. Kontaminationen zu vermeiden oder wenigstens gering zu halten, insbesondere durch die Reduzierung längerer Standzeiten in den Leitungen. Optimal ist es, wenn innerhalb des Hauses nicht eine einzige Abgabestation besteht, sondern eine Versorgungsleitung in die verschiedenen Wohnungen und möglichst auch zu den unterschiedlichen Verbrauchsstationen eines Haushaltes (z. B. Küche, Dusche und Handwaschbecken, Toilette).

6.4 Potenzielle Zielmärkte für Trinkwasser in der Siedlungswasserwirtschaft

Zentrale Voraussetzungen für den Einsatz des MULTI-ReUse-Verfahrens für die Produktion von Trinkwasser sind neben dem Vorliegen von Wasserstress (bzw. politischen Entscheidungen, alternative Wasserressourcen verstärkt zu nutzen) ausreichende Abwassermengen und Rahmenbedingungen für eine exzellente Umsetzbarkeit der Innovation. Entsprechend können analog zu den Überlegungen für potenzielle Zielmärkte in Hinblick auf Betriebswasser die unter 2.2 genannten Auswahlkriterien verwendet werden. Allerdings sind zur Trinkwassernutzung von vornherein sozio-kulturelle Akzeptanzüberlegungen besonders zu berücksichtigen, da ein objektiver Wasserstress aufgrund häufig sehr hoher Akzeptanzprobleme für die direkte Trinkwasserverwendung vermutlich nicht ausreichen wird, um das MULTI-ReUse-Verfahren hier zu etablieren.

Nach der DIN 2000 soll Trinkwasser nicht nur farblos, klar, kühl, geruchlos und geschmacklich einwandfrei, sondern zugleich appetitlich sein und zum Genuss anregen. Entsprechend soll das Trinkwasser in Deutschland möglichst aus dem Grundwasser stammen und nach Möglichkeit nicht aufbereitet werden; soweit eine Aufbereitung notwendig ist, soll sich diese an natürlichen Prozessen orientieren. Diese Grundphilosophie der deutschen DIN 2000 ist

zwar nicht in internationalen Normen oder Rechtsetzungen hinterlegt, aber dennoch als Hintergrund für die Wahrnehmung und Bedeutung des Trinkwassers auch in anderen Kulturen nutzbar.

Der damit einhergehende, von Dieter & Schmidt (2011) besonders herausgestellte Gedanke der „Trinkwasserästhetik“ kann anleitend sein, um die in der Praxis weltweit beobachtbaren Akzeptanzprobleme in Bezug auf Trinkwasser aus Abwasser besser zu verstehen (vgl. dazu Leong, 2016; Po *et al.*, 2003 sowie Aitken *et al.*, 2014; Browne *et al.*, 2007; Hartley, 2006; Kemp *et al.*, 2012; Nancarrow *et al.*, 2009; Ormerod und Scott, 2013; Toze, 2006).

In Europa wie auch Nordamerika ist es um die öffentliche Akzeptanz einer Wasserwiederverwendung zur direkten Nutzung für Trinkwasserzwecke schwierig gestellt (Dishman *et al.*, 1989). Für Europa lässt sich entsprechend eine direkte Verwendung ausschließen (Bixio *et al.*, 2006), wenngleich bereits Beispiele zur indirekten Wiederverwendung z. B. in Belgien existieren, wo eine Grundwasseranreicherung als Vorstufe der Wassergewinnung dient. Als Rohwasser für die Trinkwasseraufbereitung wird dann das Mischwasser aus angereichertem Grundwasser und natürlichem Grundwasser verwendet. Eine indirekte Wiederverwendung findet auch dort statt, wo Oberflächengewässer als Wasserressource genutzt werden, die gleichzeitig als Vorfluter dienen.

Die im Folgenden dargestellten „Best-Practice-Beispiele“ weisen darauf hin, dass bei einer derzeitigen Anwendung vergleichbarer Technologien immer versucht wird, neben Verdünnungsprozessen auch hier (letztlich analog der DIN 2000) Naturprozesse in die Aufbereitung des Trinkwassers einzubeziehen. Die Best-Practice-Beispiele zeigen, dass Trinkwasser aus gut aufbereitetem Abwasser nur im Extremfall eingesetzt werden wird.

Letztlich lässt sich daraus folgern, dass die direkte Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser als Trinkwasser eine „ultima ratio“ sein sollte, die dann greift, wenn alle anderen Ressourcen zur Trinkwasserversorgung nicht zur Verfügung stehen, z. B. aufgrund eines Notstandes. Eine exemplarische Betrachtung konkreter Zielmärkte wird aus diesen Gründen hier nicht weiterverfolgt.

6.4.1 Best-Practice-Beispiele

6.4.1.1 Singapur

Der auf einer Insel gelegene Stadtstaat Singapur verfügt über keine nennenswerten Grundwasservorkommen und war daher zunächst auf Frischwasser aus dem malaysischen Umland angewiesen. 1961 und 1962 wurden zwei langfristige Verträge mit dem benachbarten Malaysia ausgehandelt, um mit Fernwasser aus Johor, Malaysia, den Wasserbedarf der Insel zu sichern. Der eine dieser Verträge hatte eine Laufzeit bis 2011, der andere läuft noch bis 2061 (Schramm, 2016).

Erste Ideen zur Wasserwiederverwendung für Trinkwasserzwecke in Singapur sind auf das Jahr 1974 zurückzuführen. Neben dem steigenden Wasserbedarf und Bevölkerungswachstum war hier das politische Interesse, nicht von Wasserlieferanten im Ausland erpressbar zu

sein, maßgeblich (Lim & Sea, 2013; Schramm, 2013 & 2016). Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung werden von dem staatlichen Public Utilities Board (PUB) betrieben.

Neben dem Fernwasser und dem Wasser, das in Singapur zur Verfügung stand (einschl. Regenwasser) wurde einerseits auf die Meerwasserentsalzung, andererseits auf aufbereitetes Abwasser zurückgegriffen.

Technische Verfahrensschritte bei dieser Wiederaufbereitung umfassen u. a. die Umkehrosmose (RO) und UV-Desinfektion. Anlagen hierzu werden seit 2003 systematisch aufgebaut. Das Produkt wird unter dem Namen NEWater vermarktet und deckt derzeit bereits 30 % des Wasserbedarfs von Singapur, für 2020 ist eine Deckung von 40 % und für 2060 von 50 % geplant. Ein Großteil des NEWater wird direkt an die Industrie geliefert, wo damit Trinkwasser substituiert wird. Ein kleinerer Teil geht in die Trinkwasserversorgung ein (Lim & Sea, 2013). Hierfür wird das wiederaufbereitete Wasser mit Wasser aus Reservoirs verschnitten. Die Trinkwasserqualität wird durch die Environmental Public Health (EPH) reguliert. Entsprechende Grenzwerte beziehen sich auf die WHO-Trinkwasserrichtwerte.

In Singapur hat die bewusste Förderung der Wasserwiederverwendung dazu geführt, die Vulnerabilität bezogen auf Wasserknappheit deutlich zu vermindern; so brauchte der 2011 auslaufende Vertrag nicht verlängert werden (Lim & Sea, 2013; Schramm, 2016). Dies war jedoch nur durch einen starken politischen Willen, sorgfältige und ganzheitliche Planung und harte Arbeit möglich. Von den Betreibern wird hierbei die zentrale Rolle bei den Entscheidungsträgern gesehen. Der verfolgte Ansatz eines ganzheitlichen Wasserressourcenmanagement führte nach Ansicht der Betreiber zu einer höheren „Wassernachhaltigkeit“ (Lim & Sea, 2013).

Herausforderungen waren aus Sicht der Betreiber die anfängliche Skepsis von Industriewasserkunden aus der Halbleiterindustrie gegenüber dem NEWater, die Anstrengungen bezogen auf die Transformation der Wasserinfrastruktur (z. B. auch der Aufbau von neuen Verteilungsnetzen zu den Reservoirs und Industriekunden) und nicht zuletzt der Aufbau einer strengen operativen Kontrolle der Wasseraufbereitung, um so immer eine ausreichende NEWater-Qualität zu gewährleisten (Lim & Sea, 2013). Für eine Erhöhung der Akzeptanz bei den Trinkwasserkunden wurden zudem, eingebettet in eine spezifische PR-Strategie, innovative Ansätze gewählt, etwa die Verteilung von in Flaschen gefülltem NEWater auf Festen, das dann auch von Politikern öffentlich getrunken wurde usw. (Schramm, 2013).

6.4.1.2 Windhuk (Namibia)

Bereits in den 1960er Jahren hat die Stadt Windhuk, aufgrund regelmäßig auftretender Dürren und andauernder schwerer Wasserknappheit, Untersuchungen zur Wiederverwendung des Wassers der kommunalen Abwasserreinigungsanlage Gammams Water Care Works und des Stausees Goreangab Dam für Trinkwasserzwecke veranlasst. Der erfolgreiche Verlauf der Pilotphase führte 1968 zum Bau des Old Goreangab Water Reclamation Plant (OGWRP) (Lahnsteiner *et al.*, 2013). In der zweiten Hälfte der 1990er Jahre, nach fast 30 Jahren Betrieb, entsprach die Anlage nicht mehr dem Stand der Technik und dem steigen-

den Wasserbedarf, weshalb in unmittelbarer Nähe das New Goreangab Water Reclamation Plant (NGWRP) errichtet wurde, das 2002 in Betrieb ging und von der Windhoek Goreangab Operating Company (WINGOC) betrieben wird (Lahnsteiner *et al.*, 2013).

Das im Südwesten Afrikas gelegene Namibia wird flankiert von der Namib-Wüste im Westen sowie der Kalahari im Osten und ist das trockenste Land südlich der Sahara. In der zentral gelegenen Hauptstadt Windhuk beträgt der durchschnittliche jährliche Niederschlag 360 mm, während die jährliche Verdunstungsrate bei etwa 3.400 mm liegt (Lahnsteiner *et al.*, 2013). Das nächstgelegene Fließgewässer, der Okavango, ist ca. 700 km entfernt, der atlantische Ozean im Westen etwa 300 km. Aufgrund dieser großen Distanzen sowie der Höhe Windhuks von 1.600 m über dem Meeresspiegel ist bspw. die Meerwasserentsalzung keine tragfähige Option.

Windhuk verfügt über eine Bevölkerung von schätzungsweise 350.000 Einwohnern mit einer Wachstumsrate von etwa 5 % jährlich (Lahnsteiner *et al.*, 2013). Damit lebt knapp ein Fünftel der namibischen Bevölkerung in der Hauptstadt. Die Wasserversorgung Windhuks wird durch zeitweilig wasserführende Flüsse (ephemere Gewässer) und Grundwasser gespeist. Stark schwankende Niederschlagsraten führen regelmäßig zu Wasserknappheit oder sogar zu schweren Dürren, weshalb die Wasserversorgung nicht durchgehend gewährleistet werden kann.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen hat die Stadt Windhuk 1994 ein integriertes *Water Demand Management Program* aufgestellt, das gesetzliche, technische und finanzielle Maßnahmen sowie Aspekte der Öffentlichkeitsarbeit umfasst (van der Merwe, 2000). Das oben erwähnte NGWRP deckt mit zurückgewonnenem Wasser aus kommunalem Abwasser nun 28 % des jährlichen Wasserbedarfs der Stadt Windhuk von 25 Mio. m³ (Lahnsteiner *et al.*, 2013). Weitere 65 % zur Deckung des Wasserbedarfs stammen aus Stauseen und 7 % aus Brunnen. Möglichkeiten zur künstlichen Grundwasseranreicherung (Managed aquifer recharge, MAR) ergeben sich aufgrund hoher Salzgehalte des zurückgewonnenen Wassers und zu hoher DOC-Werte nicht (Tredoux, 2009).

Die Wasserwiederverwendung zur Gewinnung von Trinkwasser ist in der in Windhuk praktizierten Form weltweit einzigartig. Um die Qualität des Wassers sicherzustellen, wird ein dreiteiliger Multi-Barrieren-Ansatz verfolgt, der sich aus den Stufen *non-treatment*, *treatment* und *operational barriers* zusammensetzt (Lahnsteiner *et al.*, 2013). Zu den Non-Treatment-Barrieren zählt insbesondere die strikte Trennung von häuslichem und industriellem Abwasser. Letzteres wird in einer separaten Abwasserbehandlungsanlage behandelt. Ferner gehören ein umfassendes Monitoring der Wasserqualität im Zu- und Ablauf sowie die Verschneidung der genannten Wasserressourcen zu den Non-Treatment-Barrieren, wobei maximal 35 % des wiedergewonnenen Wassers mit aufbereitetem Rohwasser aus dem Stausee und Grundwasser verschnitten wird. Die betrieblichen Barrieren umfassen u. a. den Einsatz zusätzlicher Reinigungsstufen, wie z. B. Pulveraktivkohle im Bedarfsfall.

Die Vorbehandlung des kommunalen Abwassers findet in der Abwasserbehandlungsanlage Gammans statt, bevor das so vorbehandelte Wasser im NGWRP zu Trinkwasser aufbereitet

wird. Die Gammans-Anlage verfügt über konventionelle mechanische und biologische Behandlungsstufen, einschließlich Stickstoff- und Phosphorentfernung, Belebtschlammverfahren und Tropfkörper. Die Trinkwasseraufbereitung im NGWRP umfasst eine Reihe von Behandlungsverfahren, u. a. Koagulation, Flotation, Ozonierung, Aktivkohlefiltration, Ultrafiltration und Chlorung (Du Pisani, 2006; Van der Merwe *et al.*, 2008).

Die maximale Kapazität des NGWRP von 21.000 m³ pro Tag wird derzeit mit täglich etwa 16.000 m³ produzierten Trinkwassers nicht voll ausgeschöpft, wobei ein steigender Wasserbedarf erwartet wird (Lahnsteiner *et al.*, 2013). Die Betriebskosten, einschließlich Kapitalkosten, belaufen sich auf 0,95 €/m³, womit die Wasserwiederverwendung deutlich günstiger als bspw. eine Fernwasserversorgung vom Okavango mit Kosten von schätzungsweise 14 €/m³ ist (Lahnsteiner *et al.*, 2013).

Seit 1995 wird eine ausgeprägte Öffentlichkeitsarbeit in Schulen und Medien betrieben, einschließlich „Tage der offenen Tür“ mit Möglichkeiten zur Besichtigung der Anlagen. Abgesehen davon scheint die Akzeptanz gegenüber dem wiedergewonnenem Trinkwasser in der Bevölkerung sehr hoch zu sein, da praktisch keine Beschwerden von Abnehmern hervorgebracht werden, zumal seit der Inbetriebnahme 1968 keinerlei Gesundheitsprobleme bekannt geworden sind oder in epidemiologischen Studien nachgewiesen wurden (Lahnsteiner *et al.*, 2013). Hervorzuheben ist, dass der erfolgreiche Betrieb der Wasserwiederverwendung in Windhuk trotz der widrigen technischen und finanziellen Rahmenbedingungen eines Entwicklungslandes wie Namibia möglich ist. Zu den aktuell größten Herausforderungen des Systems gehört der hohe Salzgehalt des Rohwassers im Zulauf der NGWRP, weshalb momentan ergänzend Entsalzanlagen pilotiert werden.

7 Identifikation ausgewählter internationaler Zielmärkte im Bereich der Grundwasseranreicherung

Grundwasseranreicherung an sich stellt keine finale Nutzungsmöglichkeit für aufbereitetes Abwasser und somit auch kein Anwendungsgebiet für das MULTI-ReUse-Verfahren im engeren Sinne dar. Vielmehr erfolgt die künstliche Grundwasseranreicherung mit dem Ziel der Wasserspeicherung für eine spätere Nutzung als Brauchwasserressource für industrielle Zwecke (Kapitel 4), zur landwirtschaftlichen Bewässerung (Kapitel 5), in Siedlungsbereichen (Kapitel 6) oder zur Stabilisierung stark beanspruchter Ökosysteme (z. B. Wälder, Seen und Flüsse). In wenigen internationalen Fallbeispielen wird hochaufbereitetes Wasser sogar zur Ergänzung der Trinkwasserversorgung eingesetzt. Neben der Funktion der Wasserspeicherung (Kapitel 7.2) für diese unterschiedlichen Nutzungsbereiche wird die Grundwasseranreicherung häufig auch noch zur weiteren Reinigung vorgeklärten Abwassers über die Bodenpassage eingesetzt. In MULTI-ReUse wird die mögliche Reinigungsleistung einer Bodenpassage technologisch jedoch nicht bewertet, sodass diese Funktion nicht im Fokus der Markt Betrachtung steht. Eine weitere Nutzungsmöglichkeit besteht jedoch darüber hinaus noch in der Errichtung hydraulischer Barrieren zur Verhinderung einer qualitativen Beein-

trächtigung der lokalen Grundwasserressourcen (Kapitel 7.3) durch Salzwasserintrusion oder ähnliche Phänomene.

7.1 Rahmenbedingungen

7.1.1 Hydrogeologische und technologische Voraussetzungen

Künstliche Grundwasseranreicherung (kurz: MAR) ist ein wichtiges wasserwirtschaftliches Instrument und kommt bspw. in der Wasserversorgung zum Einsatz, wenn nicht genügend Grundwasser oder Oberflächenwasser in geeigneter Qualität zur Verfügung steht. Zur Infiltration wird überwiegend Oberflächenwasser genutzt, wie z. B. in Deutschland bei der Uferfiltration entlang der Ruhr oder des Rheins. Eine Grundwasseranreicherung kann jedoch nur dort betrieben werden, wo die hydrogeologischen Voraussetzungen stimmen (Durchlässigkeit, Mächtigkeit des Grundwasserleiters). Durch den Kontakt mit dem Untergrund und je nach vorherrschenden Milieubedingungen verändert sich die Wasserqualität des infiltrierten Wassers. Dies ist bei der Wiedernutzung und der Beurteilung von Umweltauswirkungen (z. B. Grundwasserqualität, Durchlässigkeit des Bodens) zu beachten. Eine möglichst genaue Kenntnis der lokalen hydrologischen und hydrochemischen Gegebenheiten ist daher eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Grundwasseranreicherung.

Je nach Zielstellung und lokalen Gegebenheiten kommen hierbei unterschiedliche Infiltrationstechnologien zum Einsatz (Abbildung 7). Grundsätzlich unterscheidet man zwischen oberirdischer Infiltration, unterirdischer Infiltration und Uferfiltration. Die einzelnen Infiltrationstechniken wirken sich unterschiedlich auf den Flächenbedarf, die Anforderungen an die Qualität des zu infiltrierenden Wassers und Veränderungen der Wasserqualität im Zuge des Infiltrationsprozesses aus. Einer oberirdischen Infiltration wird dabei bspw. die höchste Reinigungsleistung zugeschrieben, sie hat jedoch auch den größten Flächenbedarf und erfolgt gegenüber der unterirdischen Infiltration vergleichsweise langsam.

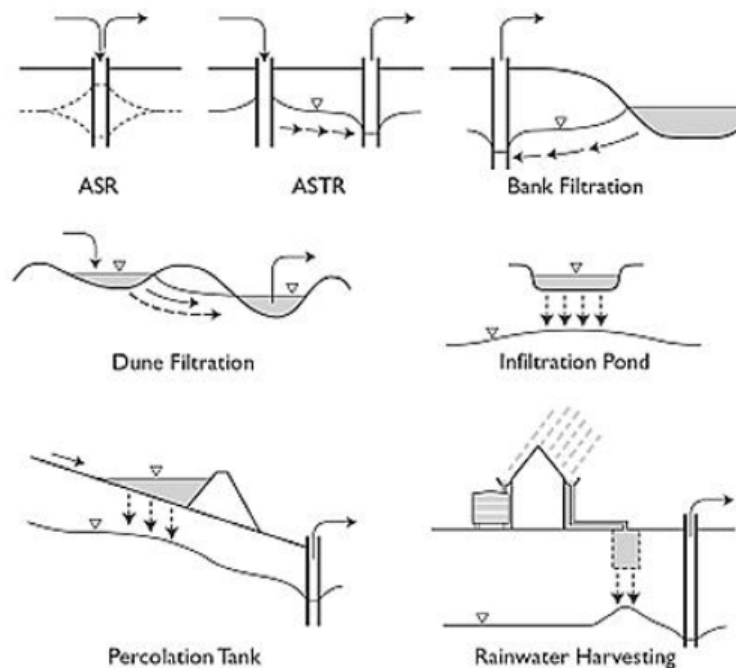


Abbildung 7: Übersicht häufig genutzter MAR-Techniken (Gale und Dillon, 2005)

Im Sinne des Umwelt- und Verbraucherschutzes ist neben der Kenntnis der hydrogeologischen Gegebenheiten ein umfassendes Monitoring des Grundwassers notwendig. Dies ist in vielen nationalen und internationalen Gesetzen und Richtlinien bereits vorgeschrieben. Die EU-Grundwasserrichtlinie (Groundwater Directive – 2006/118/EC) legt bspw. fest, dass der Eintrag gefährlicher Substanzen in das Grundwasser zu vermeiden bzw. zu minimieren ist. Insbesondere mit dem Wissen um persistente organische Spurenstoffe und der Gefahr, dass immer neue Stoffe in die Abwässer gelangen, die (noch) nicht überwacht werden, wird das Risiko einer nachhaltigen Verschlechterung der Grundwasserqualität durch eine Grundwasseranreicherung mit aufbereitetem Abwasser und der damit verbundene langfristige Schaden in vielen Staaten als sehr hoch eingeschätzt. Es besteht außerdem die Befürchtung, dass die technologischen Möglichkeiten der Wasseraufbereitung vor der Infiltration aus Kostengründen nicht angewendet werden und eine umfassende Überwachung nicht möglich ist.

7.1.2 Rechtlicher Rahmen und Akzeptanz

Trotz der erwähnten Risiken und notwendigen Voraussetzungen wird bereits in einigen Ländern mit hohem Wasserstress Grundwasseranreicherung mit aufbereitetem Abwasser betrieben. Unterschiedliche Risikobewertungen und weitere Gründe, wie z. B. der Stand von Wissenschaft und Technik und der Gesetzgebung zum Zeitpunkt der Planung, haben zum Einsatz verschiedener Technologien zur Vorbehandlung des Infiltrationswassers geführt (siehe Fallbeispiele in Kapitel 7.2 und 7.3). Ebenso wie in anderen Anwendungssektoren der Wasserwiederverwendung sind auch bei der Grundwasseranreicherung die Gesetze und Regelwerke, die Wahrnehmung der Thematik bei Entscheidern sowie die technologische Bereitschaft und entsprechend ausgebildetes Personal entscheidende Voraussetzungen. Auf Seiten der Gesetzgebung und der Technologie spielen die USA durch die „US-EPA Guide-

lines for Water Reuse“ und weitere Vorschriften innerhalb einiger Staaten der USA eine Vorreiterrolle. Ebenso dienen die „Australien Guidelines for Water Recycling: Managed Aquifer Recharge“ mit ihrem risikobasierten Bewertungsansatz international als Vorlage für Projektplanungen und Gesetzgebung.

Zusätzlich zu technologischen und rechtlichen Aspekten der Wasserwiederverwendung sowie Fragen der Risikobewertung und Akzeptanz sind bei der Grundwasseranreicherung gegebenenfalls auch grundsätzliche Fragestellungen hinsichtlich Eigentumsrechten („Ist Grundwasser Privatbesitz oder Gemeingut?“) und Verträge zu grenzüberschreitenden Grundwasserkörpern zu beachten.

Die Marktbetrachtung in MULTI-ReUse basiert allgemein auf der Annahme, dass durch die eingesetzten Technologien (Ultrafiltration und UV-Desinfektion) mindestens ein partikelfreies und hygienisch unbedenkliches Wasser für die Infiltration zur Verfügung gestellt wird. Zusätzlich wird die Konzentration an gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen (DOC) und bei Bedarf die Konzentration der im Abwasser enthaltenen Spurenstoffe durch den Einsatz von Adsorption/Biofiltration oder Umkehrosmose-Filtration verringert. Eine Einschränkung der Anwendungsfelder für die künstliche Grundwasseranreicherung aufgrund der Qualität des Infiltrationswassers wird daher zunächst nicht getroffen. Es wird auch nicht auf regionale hydrologische Voraussetzungen und Infiltrationstechniken eingegangen oder darauf, ob die Grundwasseranreicherung als weitere Reinigungsstufe (so genanntes Soil-Aquifer-Treatment; für weiterführende Informationen vgl. FAO, 1992) betrieben wird. Im Fokus der nachfolgenden Marktbetrachtung stehen ausschließlich die Nutzung der Grundwasseranreicherung zur saisonalen oder mehrjährigen Wasserspeicherung für eine spätere Wiederverwendung (Kapitel 7.2) und die Anwendung als hydraulische Barriere zur Abwendung von Schadstoffströmen (Kapitel 7.3).

7.2 Potenzielle Zielmärkte für Grundwasser als Wasserspeicher

Aufgrund des zunehmenden Drucks auf die vorhandenen Wasserressourcen, durch den Klimawandel und andere externe Faktoren, wird die Speicherung von Rohwasser für eine spätere Verwendung in naher Zukunft immer wichtiger werden. Besonders in ariden Gebieten ist die Speicherung von Wasser an der Oberfläche möglich, jedoch meist mit hohen Verlusten durch Evaporation und qualitativen Einbußen verbunden. Eine unterirdische Bevorratung von Wasser im Sinne einer Grundwasseranreicherung erscheint vor diesem Hintergrund eine sinnvolle Alternative, da so die natürlichen Speicher gefüllt und vor Verdunstung geschützt werden können. Die mit dieser Nutzungsmöglichkeit verbundenen Marktpotenziale sollen im Folgenden anhand von zwei Anwendungsbeispielen und zweier beispielhafter Zielmärkte näher erläutert werden.

Zusätzlich zu den in Kapitel 2.2 angeführten Kriterien Wasserstress, technologische Bereitschaft und Abwasserverfügbarkeit, welche zur Identifikation allgemein in Frage kommender Zielmärkte für das MULTI-Reuse-Verfahren herangezogen worden sind, sollten bei der Erarbeitung von Zielmärkten für eine gesonderte Anwendung des Verfahrens zwecks Grundwas-

seranreicherung darüber hinaus jedoch noch weitere Faktoren Berücksichtigung finden. Für die Auswahl der nachfolgenden Zielmärkte zur Grundwasseranreicherung zwecks Wasserspeicherung wurden bspw. ergänzend solche Kennzahlen herangezogen, welche auf die Identifizierung von Ländern mit großen Flächen sehr geringer Verfügbarkeit von frischem Grundwasser, regionalem Grundwasserstress (Grundwasserentnahme > Grundwasserneubildung) und/oder einer hohen jährlichen Grundwasserentnahme abzielen. Bei letzterem Kriterium wurde neben der absoluten Grundwasserentnahme – als Anhaltspunkt für die bestehende Grundwassernachfrage – ein besonderes Augenmerk auf die jährliche Grundwasserentnahme von fossilem Grundwasser, welches nicht neu gebildet wird und daher nur sehr begrenzt zur Verfügung steht, gelegt.

Als Datenquellen wurden die entsprechenden Länderlisten des World Resources Institute (WRI) und das Global Groundwater Information System (GGIS) des International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC) herangezogen. Auf Basis dieser Informationen konnte festgestellt werden, in welchen Ländern grundsätzlich das höchste Potenzial zu Grundwasseranreicherung besteht und welche somit die beste Perspektive für den Einsatz des MULTI-ReUse-Verfahrens zu diesem Verwendungszweck bieten. Des Weiteren wurden Daten der „Global MAR“-Plattform, einer Datenbank, die zahlreiche, bereits durchgeführte MAR-Projekte beinhaltet, herangezogen. Der darüber ableitbare Erfahrungswert mit MAR-Technologien und ein eventuell bereits vorhandener Markt innerhalb eines Landes konnten somit mit in die Bewertung einfließen.

Entsprechend den Ranglisten wurden den Ländern Punktwerte je Kriterium zugeteilt, wodurch eine zusammenfassende Rangliste erstellt werden konnte. Diese Einzelpunktwerte wurden anschließend aufsummiert, wodurch man zum Ende des Auswahlprozesses eine Rangliste mit potenziell geeigneten Zielmärkten für den Einsatz des MULTI-ReUse-Verfahrens zur Wasserwiederverwendung zwecks Grundwasseranreicherung erhält.

Die Auswahl der zwei Zielmärkte Israel und Indien orientierte sich stark an den Ergebnissen dieser Auswertungen, wurde jedoch auch von weiteren Kriterien beeinflusst. Israel besitzt bspw. eine gut ausgebaute Infrastruktur, und einige Projekte im Bereich der Wasserwiederverwendung wurden auf Landesebene bereits durchgeführt. Israel kann damit stellvertretend für alle entwickelten Länder mit ähnlichen wasserwirtschaftlichen Problemen gesehen werden. Indien unterscheidet sich davon nicht zuletzt aufgrund seines Entwicklungsstandes und seiner enormen Einwohnerzahl deutlich.

7.2.1 Best-Practice-Beispiele

7.2.1.1 Shafdan (Israel)

Techniken der Wasserwiederverwendung kommen in Israel bereits seit einigen Jahrzehnten zur Anwendung. In der israelischen Dan Region wird bspw. seit 1977 unter der Bezeichnung „Dan region sewage recalcation project“ ein Projekt zur Abwasseraufbereitung und -wiederverwendung durchgeführt. Die Abwasserbehandlungsanlage Shafdan, die das Abwasser aus der Dan Region (Großraum Tel-Aviv) behandelt, wird von Mekorot Water Co.

betrieben. Das behandelte Abwasser wird über fünf Versickerungsbecken in den Untergrund infiltriert und nach einer Bodenpassage von mehreren Monaten wieder als Brauchwasser entnommen.

Die Inbetriebnahme der Anlage lässt sich in mehrere Projektphasen einteilen. In Phase 1 wurde 1977 mit der Behandlung eines Abwasservolumens in Höhe von 20 Mio. m³/a begonnen. Das Bevölkerungswachstum der umliegenden Städte machte den sukzessiven Ausbau der Anlage in den folgenden Jahrzehnten jedoch unabdingbar, da nur so eine vollständige Aufbereitung der erhöhten Abwassermengen garantiert werden konnte. Im Jahr 2011 lag die gesammelte und aufbereitete Abwassermenge nach mehreren Ausbaustufen der Anlagen mit mehr als 110 Mio. m³/a dann bereits bei einem fünffachen der Ausgangsmenge. In der finalen Ausbaustufe soll die Anlage aber noch einmal 40 bis 60 Mio. m³/a Abwasser mehr erfassen und aufbereiten können.

Zur Abwasserbehandlung werden eine mechanische und eine anaerob-biologische Reinigungsstufe eingesetzt. Anschließend erfolgt die Infiltration mittels „Soil Aquifer Treatment“, bei der das Wasser über große Sandflächen langsam versickert wird. Durch die langsame Versickerung und den Kontakt des Wassers mit den verschiedenen Bodenschichten erfolgt eine weitere Reinigung, wodurch die Qualität des Wassers im Grundwasserleiter deutlich erhöht wird. Im fortlaufenden Infiltrationszyklus der Anlage folgen auf einen Tag der Flutung der Teiche stets zwei bis drei Tage der Infiltration.

Um eine dauerhaft hohe Qualität des Versickerungswassers sicherstellen zu können, wird ein kontinuierliches Monitoring durchgeführt. Die hierfür angesetzten Qualitätsstandards orientieren sich an den israelischen Vorgaben zur Einleitung von Wasser in Grundwasserleiter.

Der Nutzen der Anlage besteht in der Bereitstellung von Bewässerungswasser für die Landwirtschaft. Ein Teil des aufbereiteten und infiltrierten Wassers wird zu diesem Zweck wieder an die Oberfläche gefördert und über die Stadtgrenze hinweg durch eine Versorgungsleitung in den südlichen Teil des Landes zur Wüste Negev geleitet, um die dort ansässigen Bauern mit Bewässerungswasser zu versorgen. In der israelischen Öffentlichkeit wird das Projekt grundlegend positiv bewertet.

Wasseranalysen und Modellierungen zeigten, dass nach mehr als 10-jährigem Betrieb der Abwasserbehandlung und Versickerung die Mangankonzentration in einigen Entnahmebrunnen anstieg. Zurückgeführt wurde dies auf die hohe organische Fracht und Ammonium, deren biologischer Abbau zu Sauerstoffzehrung führte, wodurch anoxische Zonen im Grundwasserleiter entstanden, die eine Mobilisierung von Mangan aus dem Untergrund verursachten. Die hydrogeochemischen Voraussetzungen lassen jedoch die Einschätzung zu, dass das mobilisierte Mangan bei Kontakt mit oxischen Bodenzonen wieder ausfällt und sich nicht weiter im Grundwasser verbreitet.

Auch hinsichtlich der Versickerungskapazität stößt das System an seine Grenzen. Da bei geringer werdenden Infiltrationsraten mehr Abwasser anfällt, jedoch bisher keine Erweite-

rungsfläche vorhanden ist, werden die Versickerungsfelder mit einer kürzeren hydraulischen Aufenthaltszeit betrieben, wodurch die Abbauleistung des SAT abnimmt.

Nicht zuletzt vor dem Hintergrund der Erkenntnis, dass anthropogene Spurenstoffen, die mit dem Abwasser in den Untergrund gelangen und dort nur zum Teil zurückgehalten werden, mit dem Bewässerungswasser weiter in der Umwelt verteilt werden, werden in aktuellen Pilotuntersuchungen weitere Vorbehandlungsstufen getestet.

Weitere Stufen der Abwasserbehandlung wurden in einer Pilotstudie vergleichend untersucht. Hierzu zählten eine biologisch aktive Zweischichtfiltration sowie Ozonung. Um ausreichend Sauerstoff zum Abbau der organischen Stoffe und des Ammoniums in den Filtern zu gewährleisten, wurde eine Wasserstoffperoxid-Dosierung vorgesehen. Außerdem wurde zur Verbesserung der Filtrierbarkeit ein Flockungsmittel eingesetzt. Die anschließende Ozonung vor der Versickerung soll die Abbaubarkeit der organischen Stoffe verbessern und wiederum die Sauerstoffkonzentration erhöhen, um anoxische Zonen im Untergrund zu vermeiden. Die Kostenschätzung ergab, dass für die Behandlung von 1000 m³/h zusätzlichem Abwasser Gesamtkosten (OPEX+CAPEX) von 0,13 bis 0,22 €/m³ entstehen.

Weitere Informationen zum Fallbeispiel können u. a. den Fachartikeln von Kanarek und Michail (1996), Ickson-Tal *et al.* (2003), Nadav *et al.* (2012) und der Veröffentlichung aus dem EU-Projekt DEMOWARE „Deliverable D1.4: Pretreatment requirements and design guidelines for SAT technologies, and two SAT case studies“ (Lakretz *et al.*, 2017) entnommen werden.

7.2.1.2 Zhengzhou (VR China)

Die chinesische Stadt Zhengzhou liegt in einer Region mit stetig steigendem Wasserbedarf. Allein in der Zeit von 1980 bis 2004 stieg die Wassernutzung im Stadtgebiet um etwa 69 % an. Die Grundwasserentnahme hat sich im gleichen Zeitraum annähernd verdoppelt und im Jahr 2004 ein Volumen von rund 1 Mrd. m³ erreicht. In der Folge verschärften sich die Nutzungskonkurrenzen um das Wasser in der Stadt zunehmend, weshalb die Suche nach alternativen Wasserressourcen von den Anspruchsgruppen gemeinsam forciert wurde.

Eine Möglichkeit zur Bereitstellung zusätzlicher Wassermengen durch den Leitungstransport von Rohwasser aus dem wasserreichen Süden Chinas in den Norden wurde erstmals im „Süd-Nord-Wassertransferprojekt“ untersucht (siehe dazu auch Kapitel 5.2.2.2). Da sich dieser Ansatz aufgrund der langen Transportwege und der damit einhergehenden hohen Kosten jedoch als wenig nachhaltig erwies, wurde fortan der Grundsatz „first water saving, then transfer water“ verfolgt. Im Zuge dessen müssen alle Städte zunächst ein Wassermanagementkonzept vorlegen, um Wassermengen über das Wassertransferprojekt beziehen zu können. Zhengzhou ist seit dem Jahr 2005 eine von sechs Städten, die sich als eine solche „water saving society“ bezeichnen darf.

Parallel wurde mit der Implementierung eines Wasserwiederverwendungssystems begonnen, um die Erholung des Grundwasserleiters, eine Verringerung des Wassermangels und

der Umweltverschmutzung sowie ein zuverlässiges Grundwasseranreicherungsmanagement zu gewährleisten. Als Teilmaßnahme hiervon werden künstliche Feuchtgebiete in der Region geschaffen, indem 1.000 m³ Wasser pro Tag aus dem Jialu River in ausgewiesene Feuchtgebiete gepumpt werden. Des Weiteren werden zusätzlich Abwässer durch Filtration über Sand und Faserbälle vorgereinigt, einer Aktivkohlebehandlung unterzogen, mittels Ozonung desinfiziert und schließlich mithilfe von Infiltrationsbecken und „Soil Aquifer Treatment“ dem Grundwasser zugeführt. Die Kosten der reinen Abwasserbehandlung belaufen sich dabei auf 0,1366 €/m³.

Überwacht wird die Qualität des eingeleiteten Wassers durch tägliches und monatliches Monitoring. Leitfähigkeit, pH-Wert, Trübung, Phosphat, Nitrat, Ammonium sowie weitere Werte werden täglich überwacht. Saisonal abhängig werden zusätzlich monatliche Messungen zur Bestimmung der Schwermetallkonzentration in verschiedenen Wassertiefen und im Aquifer vorgenommen. Die Vorgaben des nationalen Standards zur Grundwasseranreicherung werden damit eingehalten. Das gereinigte Abwasser erfüllt die Kriterien der Klasse III der chinesischen Qualitätsstandards für Grundwasser (GB/T 14848-93, 1993) und ist somit freigegeben für Fischerei, Industrie und Landwirtschaft.

Ein Regelwerk zur Grundwasseranreicherung mit aufbereitetem Abwasser ist in China bereits etabliert. Dies wird von der Regierung unterstützt und entsprechend honoriert. Bedingt durch ein stetiges Bevölkerungswachstum der chinesischen Metropolen, wird die ausreichende Wasserversorgung jedoch auch in Zukunft eine große Herausforderung in der Region bleiben.

Diese und weitere Informationen zum Fallbeispiel können u. a. den Fachbeiträgen von *Jin & Luo (2010)* und *Sun & Giordano (2009)* entnommen werden.

7.2.2 Zielmärkte

7.2.2.1 Markt für Grundwasseranreicherung in Israel

Fast 95 % der Landesfläche Israels wird von semiaridem, aridem oder vollaridem Klima beherrscht. Gemessen am regionalen Wasserbedarf fällt nur in einem kleinen Teil des Landes Niederschlag in ausreichender Menge. In den semiariden Zonen besteht hingegen sogar große Gefahr der Wüstenbildung mit Verlust von fruchtbarem landwirtschaftlich nutzbarem Boden, ebenso in Teilen der ariden Zone des Negev und um die Stadt Beersheba (Tal, 2006). Das jährliche Volumen der erneuerbaren Wasserreserven pro Einwohner beträgt lediglich 200 m³. Bei knapp 8,6 Mio. Einwohnern (im Jahr 2016) sieht sich Israel damit langfristig einer dauerhaft großen Herausforderung gegenüber, die Wassernachfrage des Landes zu decken.

Verstärkt wird das Problem dadurch, dass die v. a. in früheren Jahren unzureichende Behandlung von Abwässern und das Infiltrieren von verschmutztem Sickerwasser in Oberflächen- und Grundwasserkörper vielerorts bereits zu irreversiblen Wasserqualitätsminderun-

gen der Grundwasserleiter geführt hat. Durch die anthropogene Verschmutzung der Oberflächen- und Grundwasserressourcen und deren grenzüberschreitenden Schadstoffaustrag entsteht zusätzliches Konfliktpotenzial entlang der Grenzgebiete (Shevah, 2014).

Eine dauerhafte Lösung der Problematik könnte bei weiter steigender Bevölkerungsanzahl die Wiederverwendung des anfallenden Abwassers darstellen. In Israel wird allerdings bereits ein großer Anteil des aufbereiteten Abwassers wiederverwendet. Den vorliegenden Literaturwerten zufolge liegt die aktuelle Wasserwiederverwendungsquote für die landwirtschaftliche Bewässerung oder zur Bewässerung von öffentlichen Parkanlagen zwischen 70 % (Shevah, 2014) und 85 % (Zaibel *et al.*, 2016). Erklärtes politisches Ziel ist es jedoch, israelisches Abwasser mittel- bis langfristig vollständig für die Bewässerung nutzbar zu machen (Tal, 2006).

Alternative Ansätze zur Erschließung neuer Wasserressourcen, wie Meerwasserentsalzung, weisen aufgrund der günstigen geografischen Lage Israels ebenfalls ein hohes Potenzial auf. Die Kosten dieser energieintensiven Prozesse fallen jedoch in der Regel hoch aus und können sich inkl. Transportkosten in einer Größenordnung von 0,99 US\$/m³ bis 1,26 US\$/m³ bewegen (Garcia & Pargament, 2015; Rejwan, 2011). Die Kosten für aufbereitetes Abwasser werden demgegenüber als deutlich geringer angegeben. Das größte israelische Wasserversorgungsunternehmen Mekorot gibt bspw. einen Preis zwischen 0,24 US\$/m³ bis 0,31 US\$/m³ für landwirtschaftliche Nutzer an (Kislev, 2011). Weitere Kostenvorteile könnten sowohl aus betriebs- als auch aus volkswirtschaftlicher Sicht aus einer weniger starken Aufbereitung des Wassers resultieren.

Mittel- bis langfristig ist jedoch eher mit einem weiteren Ausbau von Abwasserbehandlungsanlagen in Israel zu rechnen. Aufgrund des gestiegenen Salzgehalts im gesamten Wasserkreislauf werden in Zukunft verstärkt Membrantechnologien und verwandte Verfahren zur Entfernung dieser Stoffe benötigt, um die Produktivität der Landwirtschaft zu erhalten, welche einen wichtigen Wirtschaftszweig des Landes darstellt (Wasserwirtschaft Israel, 2010).

Die israelische Gesetzeslage in Bezug auf Wasserwiederverwendung ist verhältnismäßig umfangreich. Die Vorgaben für die Nutzung von gereinigtem Abwasser in Israel werden im Allgemeinen als ähnlich restriktiv wie die spanischen Vorgaben angesehen (Molinos-Senante *et al.*, 2011). So gibt es u. a. klar definierte Grenzwerte und Vorgaben zum zulässigen Nährstoffgehalt, Schwermetallen und anderen toxischen Substanzen für verschiedene zugelassene Verwendungszwecke (Zaibel *et al.*, 2016). Allgemeine Vorgaben zum Umgang mit der Ressource Wasser sind zudem im nationalen Wassergesetz (1959) und in der Verordnung zur öffentlichen Gesundheit (1974/2000) festgelegt. Im Jahr 2000 wurden die bis dahin geltenden Bestimmungen zur Trinkwasserqualität um Grenzwerte für zulässige Konzentrationen verschiedener Chemikalien und Mikroben im Trinkwasser ergänzt. Fünf Jahre später folgten Grenzwerte für die landwirtschaftliche Anwendung von Abwasser zur Bewässerung und zur Einleitung in Gewässer (Tal, 2006).

Bedingt durch die vergleichsweise geringe Anzahl an Einwohnern und die bereits sehr weit fortgeschrittene Wasserwiederverwendung im Land ist das Marktpotenzial für Technologie-

anbieter in Israel langfristig als eher gering anzusehen. Dennoch bietet das Land in jedem Fall die erforderliche technische Infrastruktur und das benötigte Fachwissen, welches zur Anwendung des MULTI-ReUse-Verfahrens erforderlich ist, weshalb der Zielmarkt Israel auch zukünftig keinesfalls außer Acht gelassen werden sollte.

7.2.2.2 Markt für Grundwasseranreicherung in Indien

Mit über 1,25 Mrd. Einwohnern (2015) ist Indien nach China das zweitbevölkerungsreichste Land der Welt (BMWl, 2016a). Bedingt durch die große Landesfläche von 3,2 Mio. m² unterscheiden sich die klimatischen Bedingungen in den einzelnen Bundesstaaten des Landes zuweilen stark. Im Süden herrscht tropisches Klima, bestimmt durch eine Hitzeperiode von April bis Juni und den Südwestmonsun von Juli bis September. Der Norden hingegen zeichnet sich durch einen extremen Wechsel der Jahreszeiten aus. Auch die Niederschlagshöhen in den einzelnen Landesteilen unterscheiden sich stark voneinander. In einigen Regionen bleibt es bei einem Niederschlag von 500 mm, der größtenteils in der Monsunzeit fällt, so trocken, dass kaum eine lukrative Bewirtschaftung der Felder möglich ist. In anderen Regionen fallen dagegen bis zu 3.500 mm jährlich (90 % davon in der Monsunzeit) (Alex, 2007). Eben diese saisonalen Schwankungen in der natürlichen Wasserverfügbarkeit machen eine Bewässerung der landwirtschaftlichen Fläche unabdingbar. Dementsprechend werden derzeit in Indien rund 79 % des verfügbaren Trinkwassers für landwirtschaftliche Zwecke genutzt. Die Anteile der privaten Haushalte (6 %) und des industriellen Sektors (5 %) sind demgegenüber vergleichsweise gering (BMWl, 2016a).

Über die letzten Jahrzehnte hinweg hat die Regierungspolitik die Grundwassernutzung durch Kredite zum Brunnenbau sowie Subventionierung der für den Betrieb der Förderpumpen notwendigen Energie nachhaltig gefördert. Die Brunnenzahl ist dadurch von etwa 100.000 im Jahr 1960 auf über 12 Mio. im Jahr 2006 angestiegen (Sakthivadivel, 2007). Das Wasserentnahmerecht ist in Indien dahingehend geregelt, dass ein Grundstücksbesitzer beliebige Mengen an Grundwasser auf seinem Grundstück an die Oberfläche fördern darf. Eine nachhaltige Nutzung der vorhandenen Ressourcen kann dadurch nicht gewährleistet werden (CGWB, 2000; BFAI, 2003). Besonders in den ländlichen Gebieten basiert die Trinkwasserversorgung Indiens nahezu ausschließlich auf Grundwasser, wobei in der Regel keine Aufbereitung erfolgt. Besonders problematisch sind deshalb erhöhte Gehalte an toxischem Arsen in vielen Grundwässern der indischen Bundesstaaten West Bengalen, Jharkhand, Bihar, Uttar Pradesh, Assam und Chattisgarh.

Das Wasserrecht in Indien wird im Allgemeinen maßgeblich durch den „Easement Act“ (1882) geregelt. Aufgrund aufkommender Konflikte zwischen den verschiedenen Landesteilen wurde dieser nachträglich um den „Interstate River Water Disputes Act“ (1956) ergänzt, welcher sich jedoch ausschließlich auf die Nutzung von Oberflächengewässer beschränkt. In der jüngeren Vergangenheit wurden weitere Wasserschutzgesetze erlassen, welche die Strukturen und Rahmenbedingungen der Wasserver- und Abwasserentsorgung gesetzlich regeln sollen. Richtlinien und Industriestandards wie der IS 10500-1991 wurden auf nationa-

ler Ebene als verbindlicher Standard im Bereich Trinkwasser etabliert (Alex, 2007; BFAI, 2003; Litty, 2008).

Zur künstlichen Grundwasseranreicherung existieren auf nationaler Ebene seit einigen Jahren verschiedene Aktionspläne und Strategiepapiere. Die gemeinsame Grundlage dieser Initiativen bildet der „Guide on Artificial Recharge to Ground Water“ (CGWB, 2000), in dem aufbereitetes kommunales Abwasser zwar als potenzielle Wasserquelle aufgeführt wird, allerdings keine einzuhaltenden Grenzwerte angegeben werden (BFAI, 2003). In 2013 wurde schließlich der „Master Plan for Artificial Recharge to Ground Water in India“ in seiner überarbeiteten Form verabschiedet (MPARGW, 2013). Technische Anleitung zur Grundwasseranreicherung hierzu gibt das „Manual of Artificial Ground Water Recharge“ (MARGW, 2007) aus dem Jahr 2007. Beide Richtlinien wurden durch das „Central Ground Water Board“ von Indien publiziert, welches für die Qualität und Verfügbarkeit der Grundwasserressourcen Indiens zuständig ist.

Auf politischer Ebene herrscht in Indien grundlegend Einigkeit darüber, dass die Probleme der Wasserversorgung in naher Zukunft gelöst werden müssen und ein schonender Umgang mit der Ressource Wasser notwendig ist. Allerdings bestehen starke Nutzungskonkurrenzen und Interessenskonflikte zwischen der Trinkwasserversorgung, der landwirtschaftlichen Bewässerung und der Industrie sowie auch zwischen den verschiedenen Regionen Indiens aufgrund der unterschiedlichen saisonalen Wasserverfügbarkeit, die ein konsequentes und gemeinsames Vorgehen in diesem Bereich bremsen (Alex, 2007). Belange des Umweltschutzes werden dabei an einigen Stellen nach wie vor den wirtschaftlichen Interessen untergeordnet, eine Überwachung der Compliance umweltrechtlicher Vorgaben scheitert vielerorts am Personalmangel (Alex, 2007). In der indischen Bevölkerung selbst scheint ein ausgeprägtes Umweltbewusstsein lediglich in den oberen Schichten Indiens etabliert zu sein. In den unteren Bevölkerungsschichten führt mangelhafte Bildung zu einem weniger fest verankerten Bewusstsein, allerdings ist auch dort eine steigende Tendenz feststellbar (Litty, 2008).

Im Jahr 2016 lag das Marktvolumen der Wasserwirtschaft in Indien mit 102,3 Mrd. Rupien (ca. 1,4 Mrd. €) rund 62 % höher als im Jahr 2011. Auch langfristig wird prognostiziert, dass die Ausgaben für Technologien der industriellen Abwasserbehandlung jährlich weiter um 5 % bis 10 % steigen werden. Es ist somit davon auszugehen, dass die indische Wasserwirtschaft auch in Zukunft ein großes Potenzial für Technologieanbieter im Bereich der Wasseraufbereitung und Abwasserreinigung birgt (BMWl, 2016a; GTAI, 2014).

Für westliche Unternehmen bestehen derzeit jedoch noch massive Eintrittsbarrieren zum indischen Markt. Diese beginnen zumeist bereits mit den Preisen für westliche Technologien, welche für den indischen Markt zumeist als zu teuer wahrgenommen werden. Einheimische Produkte mit einem geringeren Anschaffungspreis werden demnach zum Teil bevorzugt, ungeachtet der gesamten Lebenszykluskosten der Anlagentechnologien (GTAI, 2014; Wasserwirtschaft Indien, 2010). Darüber hinaus existieren auch institutionelle und strukturelle Hemmnisse durch Korruption und die Schwerfälligkeit sowie Undurchschaubarkeit der

Verwaltungs- und Justizapparate (Litty, 2008). So gibt es zahlreiche Ministerien und Behörden, welche einen Bezug zur Wasserversorgung und Abwasserentsorgung aufweisen. Zu nennen wären hier neben dem Central Ground Water Board bspw. das Ministerium für Wasservorkommen (Ministry of Water Resources), welches für den Erhalt und das Management der Wasserressourcen zuständig ist, jedoch keine direkte Weisungsbefugnis gegenüber einzelnen Bundesstaaten hat und das Ministerium für Landwirtschaft, welches für die ländliche Wasserversorgung und Abwasserentsorgung verantwortlich ist.

Ferner existieren auch auf betrieblicher Ebene noch Hemmnisse wie der akute Fachkräftemangel in der Abwasserwirtschaft als Resultat einer allgemein niedrigen gesellschaftlichen Stellung praktischer Arbeit, der geringen berufspraktischen Ausbildungsquote und des Fehlens betrieblicher Ausbildungslehrstellen. Besonders theoretisch ausgebildete Hochschulabgänger suchen sich vielfach Stellen in anderen Branchen. Bedingt dadurch werden wasserwirtschaftliche Anlage zu einem erheblichen Teil mit ungelerntem Personal besetzt, das zuweilen unter sehr schlechten Bedingungen arbeitet und geringe Gehälter bezieht (Litty, 2008). In Summe kann dies unter Umständen einen unzureichenden Betrieb der Anlagen zur Folge haben.

7.3 Potenzielle Zielmärkte für künstliche Grundwasseranreicherung als hydraulische Barriere

Neben der Wasserspeicherung besteht in der Errichtung hydraulischer Barrieren zur Verhinderung einer qualitativen Beeinträchtigung der lokalen Grundwasserressourcen durch Salzwasserintrusion oder ähnliche Phänomene ein weiterer Anlass zur Grundwasseranreicherung und somit eine weitere potenzielle Nutzungsmöglichkeit für das MULTI-ReUse-Verfahren. Die damit verbundenen Marktpotenziale sollen im Folgenden anhand eines Anwendungsbeispiels und zweier beispielhafter Zielmärkte vorgestellt werden.

Für die künstliche Grundwasseranreicherung zum Zwecke der Bildung einer hydraulischen Barriere können gegenüber der Grundwasseranreicherung zur Wasserspeicherung weitere Kriterien von zentraler Bedeutung sein. Deshalb rücken vor dem Hintergrund dieses Anwendungszwecks auch abweichende Zielmärkte in den Fokus eines Technologieanbieters.

Ähnlich wie bei der Auswahl der vorangegangenen Zielmärkte wurden auch für die Anwendung der künstlichen Grundwasseranreicherung als hydraulische Barriere in einem ersten Schritt Länder und Regionen mit einer hohen Grundwasserentnahme über entsprechende Kriterien herausgearbeitet, um ausschließlich solche Zielmärkte zu erfassen, in denen grundsätzlich auch ein hoher Bedarf an der Ressource Grundwasser besteht. Der Fokus der Markt Betrachtung sollte in diesem Fall darüber hinaus jedoch insbesondere auf dem Vorhandensein national bekannter Salzwasserintrusionsproblematiken liegen. In die Auswahl der potenziellen Zielmärkte sind aus diesem Grund folgende Kriterien eingeflossen: Länder mit großflächiger Salzwasserintrusion, Länder mit einem hohen Anteil an verunreinigtem Grundwasser und Einträge der globalen MAR-Datenbank mit Fokus auf eine Verbesserung der Wasserqualität des Aquifers.

Wie zuvor wurden entsprechende Ranglisten erstellt, welche in Verbindung mit Aspekten der Datenverfügbarkeit zur Auswahl der beiden Zielmärkte Türkei und USA geführt haben. In den USA (insbesondere in Kalifornien) wurden bereits mehrere Wasserwiederverwendungsprojekte durchgeführt. Die nationalen gesetzlichen Grundlagen in Bezug auf Wasserwiederverwendung sind hier klar definiert. In der Türkei hingegen sind die Strukturen in der Wasserwirtschaft dahingehend noch nicht so weit entwickelt. In vielen Bereichen der Wasserversorgung besteht in Zukunft nach wie vor akuter Handlungsbedarf.

7.3.1 Best-Practice-Beispiel Wulpen-Torreele-St. André (Belgien)

Aufgrund eines kontinuierlichen Bevölkerungszuwachses und des zunehmenden Tourismus in der Region, ist das Grundwasserniveau in Koksijde, einer Gemeinde an der westflämischen Küste, über die letzten Jahrzehnte hinweg stark gesunken. Langfristig sieht sich der Küstenort zudem zunehmend dem Risiko einer Salzwasserintrusion in die Grundwasserleiter ausgesetzt, welche die lokale Trinkwassergewinnung gefährdet. Die Wiederverwendung von aufbereitetem Abwasser aus der Abwasserbehandlungsanlage Wulpen zur Anreicherung der örtlichen Wasserressourcen ist vor diesem Hintergrund bereits vor einigen Jahren in den Fokus der lokalen Interessengruppen gerückt, um die Grundwasserspeicher unter den Dünen anzureichern und das Eindringen von Salzwasser zu verhindern.

Zu Beginn des Vorhabens wurden im Jahr 1997 zunächst die Mikro- und Ultrafiltrationskomponenten sowie die Umkehrosmoseeinheiten zahlreichen Tests unterzogen. Im Jahr 2002 konnte schließlich damit begonnen werden, die Prozesse des Pilotvorhabens weiter zu optimieren.

Bevor das geklärte Abwasser zur Anreicherung des Grundwasserleiters genutzt werden kann, wird es in der Abwasserbehandlungsanlage Wulpen zunächst verschiedenen Verfahren unterzogen. Hierbei kommen u. a. Techniken der Mikrofiltration, Umkehrosmose und UV-Strahlung zum Einsatz (für nähere Informationen zur technischen Verfahrenskette vgl. van Houtte & Verbauwhede, 2008, 2013). Um eine hohe Qualität des behandelten Wassers dauerhaft sicherstellen und eine unkomplizierte weitere Verwendung garantieren zu können, werden die wichtigsten Parameter täglich, wöchentlich oder monatlich überwacht. Die Infiltration des aufbereiteten Wassers in den Grundwasserleiter erfolgt schließlich oberirdisch in der Grundwasseranreicherungsanlage in St. André über Infiltrationsteiche und -becken mit einem Gesamtvolumen von 18.200 m³.

Die spezifischen Kosten der Abwasserreinigung und anschließenden Grundwasseranreicherung belaufen sich in Summe auf 0,46 €/m³ infiltriertes Wasser. Der Investitionskostenanteil beträgt 0,15 €/m³; die laufenden Instandhaltungskosten liegen bei 0,10 €/m³. Das durch die Umkehrosmose entstehende Konzentrat muss gesondert abgeleitet werden und verursacht dadurch zusätzliche Betriebskosten in Höhe von 0,06 €/m³.

Durch die Anstrengungen im Bereich der Grundwasseranreicherung konnte das Grundwasserniveau wieder deutlich angehoben werden, weiterhin wurden positive ökologische Auswirkungen auf das umliegende Dünengebiet von St. André festgestellt.

Weitere Informationen zum Fallbeispiel können u. a. Herrier *et al.* (2005) sowie van Houtte & Verbauwede (2008) und (2013) entnommen werden.

7.3.2 Zielmärkte

7.3.2.1 Markt für Grundwasseranreicherung in der Türkei

Die im Südosten von Europa gelegene Türkei beheimatet rund 78,74 Mio. Einwohner (2016) auf einer Gesamtfläche von 780.000 km². Aufgrund seiner geografischen Lage verfügt das Land über eine lange gebirgige Küstenregion, wodurch die Gefahr einer Meerwasserintrusion in die Grundwasserleiter grundsätzlich gegeben ist (Gemici *et al.*, 2006).

Die kommunale Wasserversorgung des Landes wird derzeit vornehmlich über Stauwerke (35,7 %), Brunnen (27,1 %) und Quellen (26,7 %) gedeckt (BMWl, 2016b). Die entsprechenden Wasserentnahmen sind im Zeitraum von 2004 bis 2014 um 61,5 % gestiegen. Allgemein betrachtet werden die größten Wassermengen in der Türkei durch die bewässerte Landwirtschaft bezogen, deren Anteil an der Gesamtwasserentnahme des Landes rund 72 % beträgt (FAO, 2017a). Die Menge des für die landwirtschaftliche Bewässerung eingesetzten Wassers unterliegt dabei teils hohen saisonalen Schwankungen (BMWl, 2016b). Leitungswasser kann in der Türkei nicht allorts uneingeschränkt als Trinkwasser genutzt werden. Die Behandlung des Trinkwassers mit Chlor ist meist so stark, dass eine geschmackliche Beeinträchtigung von Getränken oder Speisen zu befürchten ist. In weiten Teilen des Landes ist es daher üblich, Trinkwasser nur abgefüllt in Kanistern zu kaufen (Uycan & Atalay, 2012).

Laut den Angaben des türkischen Statistikamts wurden im Jahr 2008 insgesamt rund 3,26 Mrd. m³ Abwasser in den Kanalisationsnetzen des Landes gesammelt und abgeleitet. An eine Abwasserreinigungsanlage angeschlossen waren von der Gesamtbevölkerung jedoch nur etwa 46 %. Gegenüber den Jahren 1994 (12 %) und 2002 (34 %) zeigte dies zwar eine große Verbesserung, allerdings bedeutete es nach wie vor, dass von den 28 Küstenregionen mit insgesamt 1.257 Kommunen im gleichen Jahr noch etwa 399 kein funktionstüchtiges Kanalnetz besaßen. Diese Kommune allein ließen jährlich etwa 2 Mrd. m³ Abwasser in das angrenzende Mittelmeer fließen – davon etwa 537 Mio. m³ ungeklärt. Seither wurden im Bereich der Abwasserreinigung jedoch zahlreiche Infrastrukturmaßnahmen umgesetzt, wodurch in den letzten Jahren eine stetige Verbesserung der Abwasserklärung zu beobachten war. Der Anteil des geklärten Abwassers stieg bspw. im Zeitraum von 2004 bis 2014 deutlich von etwa 9,9 % auf 81,1 % an. Betrachtet man ausschließlich industrielles Abwassers, liegt der Anteil des geklärt abgegebenen Abwassers nun sogar bei über 90 % (Uycan & Atalay, 2012).

Den gesetzlichen Rahmen zur Trinkwasseraufbereitung und Abwasserentsorgung in der Türkei bildet das nationale Umweltgesetz (Çevre Kanunu) von 1983, welches 2006 novelliert wurde. Weitere Verordnungen hinsichtlich des Betriebs und der Förderung von Abwasserbehandlungsanlagen, der Entsorgung von Klärschlammen und der Kontrolle von umweltgefährdenden Stoffen sind ebenfalls auf nationaler Ebene verankert (Uycan & Atalay, 2012).

Nach wie vor befindet sich der türkische Wasser- und Abwassermarkt in einer Wachstumsphase. Gemäß Umweltstrategie der europäischen Union (2007-2023) benötigt die Türkei jedoch noch weitere Investitionen in Höhe von 82,2 Mrd. US\$, um die Umweltvorschriften der EU erfüllen zu können (Uycan & Atalay, 2012). Die benötigten Investitionen sind jedoch nicht nur auf technischer Ebene (veraltete Infrastruktur), sondern auch auf struktureller, organisatorischer Ebene (unklare Zuständigkeiten, lückenhafte Gesetzeslage, Fehlen einer Abfallsteuer) verankert. Das Wachstum des Sektors wird zudem durch Fachkräftemangel und eine unzureichende Datenbasis verlangsamt (Uycan & Atalay, 2012). In Summe kann dies unter Umständen in einem unzureichenden Betrieb der Anlagen münden.

Um diesen hemmenden Faktoren entgegenzutreten, wurde von der türkischen Regierung eigens ein Förderungssystem für Projekte im Wasser- und Abwassersektor verabschiedet. Art und Umfang dieser Förderung können je nach Standort und Empfänger der Förderungen unterschiedlich ausfallen. Die Befreiung von Einfuhrabgaben und der Mehrwertsteuer für importierte Maschinen und Anlagen stellen zwei der zentralen allgemeinen Förderungsmittel dar. Über ausgewählte Banken und Institutionen können zusätzliche Kredite für Abwasserentsorgungssysteme und Tiefbauprojekte zur Verfügung gestellt werden. Die türkische Stiftung für Technologieentwicklung (TTGV) stellt bspw. langfristige, zinsfreie Darlehen für Projekte der Technologieentwicklung, der Gewinnung von erneuerbare Energien sowie der Verbesserung der Energieeffizienz und der Verringerung der Umweltauswirkungen bereit. Zu den wichtigsten Banken zur Förderung der Abwasserentsorgungssysteme in der Türkei gehört u. a. die Provinzbank (İller Bankası A.S), die Europäische Bank für Wiederaufbau und Entwicklung, die Weltbank und die Türkische Entwicklungsbank (Türk Sınai Kalkınma Bankası A.S./TSKB) (Uycan & Atalay, 2012).

Ausländisches Expertenwissen wird im Bereich der Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung durchaus geschätzt. Deutsche Unternehmen genießen einen guten Ruf hinsichtlich Qualität, Zuverlässigkeit und fortschrittlicher Technologien. Aus diesem Grund stand die Türkei einer Zusammenarbeit mit deutschen Unternehmen in der Vergangenheit positiv gegenüber (Uycan & Atalay, 2012). Ob dies auch in Zukunft weiterhin der Fall sein wird oder inwiefern politische Spannungen einen Einfluss auf den Marktzugang deutscher Technologieanbieter haben könnten, kann zu diesem Zeitpunkt nicht beurteilt werden.

7.3.2.2 Markt für Grundwasseranreicherung in den USA

Die Vereinigten Staaten von Amerika besitzen mit einer Fläche von ca. 9,06 Mio. km² in etwa das 25-fache der Fläche Deutschlands. Damit sind die USA nach Kanada und Russland das flächenmäßig drittgrößte Land der Welt. Aufgrund der enormen Größe des Landes ist die Bevölkerungsdichte trotz einer Einwohnerzahl von mehr als 321 Mio. (Stand 2016) mit 33 Einwohnern pro km² relativ gering (AHK, 2016).

In einigen Bundesstaaten stellt der erhöhte Salzgehalt in Grundwasserleitern und Oberflächenströmungen ein gravierendes Wasserqualitätsproblem dar. Der stetige Anstieg des Salzgehaltes ist ein Resultat exzessiver Bewässerung und steigenden urbanen Wasserge-

brauchs. Langfristig können hierdurch die Balance des Ökosystems nachhaltig verändert und somit die Produktivität der Böden für den landwirtschaftlichen Gebrauch gemindert werden. Im Endeffekt führt dies zu Kostensteigerungen auf Seiten des Verbrauchers (John, 2000).

In Kalifornien bestehen die größten Probleme mit dem Salzgehalt in den Aquiferen im südlichen Central Valley und am Salton Sea. Der von landwirtschaftlichen Drainagen im unteren Teil des San Joaquin River ausgelöste hohe Salzgehalt, hat in der Vergangenheit bereits die landwirtschaftliche Produktion verringert, in Städten wie Stockton und Lathrop den Zugang zu sauberem Grundwasser erschwert sowie den Lebensraum einheimischer Fischarten eingeschränkt. In den westlichen Regionen des San Joaquin Rivers und des Tulare Basins haben Salzanreicherungen im Boden und Grundwasser großflächige Landstriche für die Landwirtschaft nicht mehr nutzbar gemacht. Eine Abschwächung des Trends ist derzeit nicht erkennbar (AHK, 2016). Weitere Eintragswege von Salzen ins Grundwasser sind über Salzwasserintrusionen im Küstengebiet gegeben.

Der US-Wassersektor erwirtschaftet einen jährlichen Umsatz von über 157 Mrd. US\$ (Stand 2015) und ist mit einem durchschnittlichen Wachstum von ca. 4 % einer der zukunftssträchtigen Märkte für globale Investoren und neue Technologien aus dem Bereich Wasser. Der Markt wird durch verschiedene externe Einflussgrößen wie Regulierungen oder die angebotenen Finanzierungsinstrumente beeinflusst, welche dazu führen, dass sich der Wassersektor in ständigem Wandel befindet (EBI, 2016).

Das Wasserentnahmerecht ist in den USA, bedingt durch die Größe des Landes, sehr heterogen geregelt. Im Osten und mittleren Westen des Landes findet in den meisten Staaten das Riparian Law Anwendung, welches die Wasserentnahme an das Grundstückseigentum knüpft. Derjenige, dem das Land mit der Wasserquelle gehört, darf das Wasser im vernünftigen Rahmen verwenden. Was unter vernünftiger Verwendung zu verstehen ist, bleibt jedoch Auslegungssache und wird im Zweifelsfall von den zuständigen Gerichten entschieden. In manchen Staaten bedarf es zusätzlich einer Genehmigung der zuständigen Umweltbehörde zur Wasserentnahme. In den westlichen Staaten ist dagegen überwiegend die Prior Appropriation Doctrine vertreten. Nach diesem Gesetzestext genießt die Wassernutzung zum Wohle der Allgemeinheit (*Beneficial Use*) Vorrang. Die Wasserentnahme ist dadurch unabhängig vom Grundstückseigentum. In Kalifornien und den anderen verbleibenden Staaten werden Aspekte von beiden Systemen zu einem hybriden System kombiniert (AHK, 2016).

Auf Bundesebene gibt es darüber hinaus zahlreiche Gesetze und Executive Orders, welche die praktische Umsetzung der Umweltgesetze vorgeben. Der „Clean Water Act“ und der „Safe Drinking Water Act“ sind die beiden wichtigsten Gesetze im Bereich Wasserqualität und Abwasserbehandlung. Zuständig für die Umsetzung dieser beiden Gesetze ist das Office of Water (AHK, 2016). Der „Clean Water Act“ reguliert sämtliche Abwässer, die in US-Gewässer abfließen, und legt Schadstoffgrenzwerte sowie Qualitätsstandards der Oberflächengewässer fest. Zum Schutz des Trinkwassers besteht der „Safe Drinking Water Act“, welcher für Grundwasser und Oberflächenwasser, die zur Trinkwasseraufbereitung verwendet werden können, gleichermaßen gilt und von allen Anlagenbetreibern eingehalten werden

muss. Die Einführung und Durchsetzung dieser Gesetze liegt allerdings in der Verantwortung der einzelnen Bundesstaaten und ist stark von umweltbedingten und industriellen Einflüssen abhängig (AHK, 2016).

Für die Verwendung von recyceltem Abwasser gibt es darüber hinaus eigene Richtlinien und Standards auf Bundesstaatebene. Vorreiter war in diesem Fall einmal mehr der Bundesstaat Kalifornien. Das „California Department of Public Health“ (CDPH) beschloss im Jahre 2014, Abwasser zu recyceln und dem Grundwasser anzureichern, um es anschließend als Trinkwasser zu nutzen. Die gesetzlichen Regelungen in Kalifornien hierzu sind detaillierter als alle zuvor erlassenen Gesetze und Regelungen und dienen als Grundlage für eine Vielzahl an Projekten zur Wasserwiederverwendung (AHK, 2016).

Zusammenfassend bleibt demnach festzuhalten, dass in Teilen der USA durchaus ein großer Markt für künstliche Grundwasseranreicherung als hydraulische Barriere zu existieren scheint. Ob dieser jedoch mit Wasserwiederverwendungsprojekten zu bedienen ist, ist aufgrund der breit diversifizierten, Bundestaat-spezifischen Gesetzeslage pauschal nur schwerlich zu beantworten. Eine fallspezifische Überprüfung der lokalen Gesetzeslage erscheint vor diesem Hintergrund unerlässlich.

8 Fazit

In der vorliegenden Marktbetrachtung zur Wasserwiederverwendung in den einzelnen Sektoren hat sich das Bild, das in früheren Untersuchungen erarbeitet wurde, zum Teil bestätigt, zum Teil aber auch relativiert. So kommen Chen *et al.* (2013) bspw. zu dem Ergebnis, dass v. a. in weniger entwickelten Volkswirtschaften (behandeltes oder teilbehandeltes) Kommunalabwasser in der Landwirtschaft verwendet wird, während in Industrieländern abwasserbürtiges Betriebswasser v. a. für industrielle und für häusliche Zwecke genutzt wird. Im Rahmen der vorangegangenen Analysen hat sich für die Landwirtschaft jedoch ein komplexeres Bild ergeben: Auch in hochentwickelten Ländern wie Spanien ist hier ein sehr großes Marktpotenzial vorhanden, wenn eine qualitativ hochwertige Aufbereitung garantiert werden kann. Für industrielle Zwecke wächst auch in Schwellenländern das Marktpotenzial. Insofern relativiert die vorliegende Untersuchung das bislang vorliegende Bild.

Bestätigt wurde jedoch der Befund von Chen *et al.* (2013), dass nur in wenigen Ausnahmefällen Trinkwasser aus Kommunalabwasser produziert wird, auch wenn dies aus technischer Sicht mit den vorhandenen Verfahrenskombinationen zur Aufbereitung bei entsprechendem Monitoring sehr gut möglich wäre. Hingegen wurden die Potenziale zur Grundwasseranreicherung und v. a. zur Verbesserung des Landschaftshaushaltes mit abwasserbürtigem Wasser in der Literatur eher bescheidener gesehen als sie gemäß diesen Untersuchungen eingeschätzt werden können.

Wie bereits mehrfach in den vorherigen Kapiteln zur Wasserwiederverwendung in den einzelnen Sektoren angeklungen, ist es für die Praxis wenig realistisch, sich bei der Erschließung eines Marktes für die Wasserwiederverwendung nach dem MULTI-ReUse-Verfahren in

allen Fällen auf einen einzigen Nutzungszweck zu beschränken. Vielmehr wird deutlich, dass abwasserbürtiges Betriebswasser, gerade bei sich verschärfendem Wasserstress, für viele der Nutzungszwecke eingesetzt werden kann. Allerdings könnte eine wenig zielgerichtete Entwicklung der Vertriebsaktivitäten unter Umständen dazu führen, dass bestimmte Märkte nicht wirklich erschlossen, sondern nur marginal bedient werden.

Auch aufgrund unterschiedlicher Begleitinvestitionen, zu denen der Aufbau erforderlicher Infrastrukturen und Institutionen gezählt werden muss (z. B. zur Wasserspeicherung und Verteilung im Bereich der Bewässerungslandwirtschaft), sollten bestimmte Nutzungszwecke besser systematisch erschlossen werden. Denn eine zu starke Ausrichtung von Vertriebsaktivitäten auf eine Generierung kurzfristiger Gewinne oder unbedachte Reaktionen auf zunehmende Marktkonkurrenz können schlimmstenfalls sogar dazu führen, dass sich kurzfristig zwar kleinere Gewinne (z. B. durch Erschließung einiger Verbraucher über sehr kurze Verteilstrecken) generieren lassen, dadurch aber Gelegenheitsfenster zur Erzielung langfristig größerer Gewinne über strategische Nutzungsmöglichkeiten (z. B. häusliche Einsatzzwecke bei einem Neubau von Siedlungen) aufgrund eines anfänglich höheren Anschubfinanzierungsbedarfs vertan werden.

Um geordnet Auswege aus einer Krise zu suchen, ist es für die Wasserwirtschaft einer Region mit Wasserstress erforderlich, sich von einem solchen „freien Spiel der Kräfte“ unabhängig zu machen um nicht aufgrund einer bestimmten Anfangskonstellation in problematische Pfadabhängigkeiten zu geraten. Insofern ist es aus Sicht einer Region, die mit dem MULTI-ReUse-Verfahren eine Wasserkrise beseitigen möchte, sinnvoll, die Wasserwiederverwendung im Kontext eines Integrierten Wassermanagements zu betrachten. In einer späteren Arbeit wird der MULTI-ReUse-Verbund nähere Hinweise darauf geben, wie dieser Gesichtspunkt bei einer Markterschließung vorweggenommen werden kann.

9 Literatur

- Abderrahman, W.A. (2001): *Water demand management in Saudi Arabia*. In: Faruqi, N.I., Biswas, A.K., und M. J. Bino (Hrsg.), *Water management in Islam*. Tokyo, New York, Paris: UNUP: 68-78.
- Abu-Rizaiza, O.S. (1999): *Modification of the standards of wastewater reuse in Saudi Arabia*. *Water Research*, 33(11), 2601-2608.
- Abwasserverordnung (AbwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 121 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist.
- AHK (2016): *Wasserwirtschaft Kalifornien Zielmarktanalyse 2016 mit Profilen der Marktakteure*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 106 S.
- Aitken, V., Bell, S., Hills, S. und L. Rees (2014): *Public acceptability of indirect potable water reuse in the south-east of England*. *Water Science & Technology: Water Supply*, 14(5), 875-885.
- Alex, B. (2007): *Wassertechnik und Wassermanagement in Indien*. Bundesagentur für Außenwirtschaft, ISBN/ISSN ISBN 3-86643-505-3.
- AlWazir, W. (2016): *Saudi Arabia's Water Sector Sees New Demands, Developments, and Opportunities*. US-Saudi Arabian Business Council. <https://www.us-sabc.org/i4a/pages/index.cfm?pageID=4382>.
- AMB (2017): *Saneamiento – Àrea metropolitana de Barcelona*. <http://www.amb.cat/es/web/medi-ambient/aigua/cicle-de-l-aigua/sanejament>.
- Andrade, A. (Hrsg.) (1999): *Reclaimed Water Guide. Southwest Florida Water Management District*.
- Angelakis, A. und P. Gikas (2014): *Water reuse: Overview of current practices and trends in the world with emphasis on EU states*. *Water Utility Journal* 8: 67-78.
- Antakyali, D., Krampe, J. und H. Steinmetz (2008): *Dezentrale Abwasserreinigung in Ferienanlagen mit dem Ziel der Wasserwiederverwendung*. *gwf Wasser/Abwasser* 149 (13): 12-17.
- Antakyali, D., Krampe, J. und H. Steinmetz (2008a): *Practical application of wastewater reuse in tourist resorts*. *Water Science & Technology*, 57(12): 2051-2057.
- Aoki, C., Memon, M.A. und H. Mabuchi (2004): *Water and wastewater reuse: An Environmentally Sound Approach for Sustainable Urban Water Management*. United Nations Environment Programme (UNEP), Global Environment Centre Foundation (GEC).
- Arab News, (2012): *Treated sewage effluent initiative aims to ease water shortages*. <http://www.arabnews.com/treated-sewage-effluent-initiative-aims-ease-water-shortages>.
- Armento Ferrando, J.L. (2002): *Spain, mainland*. In: World Health Organization (Hrsg), WHO Expert Consultation on Health Risks in Aquifer Recharge Using Reclaimed Water: report on a meeting of an expert group, Budapest, Hungary 9-10 November 2001: 11-12.

- BFAI (2003): *Indien – Wassermanagement und Wassertechnik – Ausgangslage, Institutionen, Ver- und Entsorgung*. Bundesagentur für Außenwirtschaft.
- Binz, C., Truffer, B., Li, L., Shi, Y. und Lu, Y. (2012): *Prospective analysis of leapfrogging trajectories—An analytical framework and a case study in the Chinese wastewater sector*. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(1): 155-171.
- Bixio, D., C. Thoeye, J. De Koning, D. Joksimovic, D. Savic, T. Wintgens und T. Melin (2005): *Wastewater reuse in Europe*. *Desalination* 187: 89-101.
- Bixio, D., C. Thoeye, T. Wintgens, R. Hochstrat, T. Melin, H. Chikurel, A. Aharoni und B. Durhamh (2006): *Wastewater Reclamation and Reuse in the European Union and Israel: Status Quo and Future Prospects*. *International Review for Environmental Strategies* 6(2): 251-268.
- BMWi (2016a): *Daten und Fakten: Indien: Wasser- und Abwasserwirtschaft*. BMWi-Markterschließungsprogramm für KMU, Berlin, 3 S.
- BMWi (2016b): *Factsheet Türkei: Wasserver- und -entsorgung im kommunalen und industriellen Bereich*. BMWi, Berlin, 5 S.
- Browne, A.L., Leviston, Z., Greenhill, M. P., Nancarrow, B.E., Tucker, D.I. und N.B. Porter (2007): *Structuring dimensions of risk: technical and community perceptions of risk in the reuse of wastewater for irrigation and indirect potable supply*. National Research Flagships, CSIRO, Australia.
- Casado Cañeque, F., Smith, D. und F. Casado (2016): *Market Analysis of Key Water Reuse Technology. Deliverable 4.1. Project Demoware* (Innovation: Demonstration for a Competitive and Innovative European Water Reuse Sector). <http://demoware.eu/en/results/deliverables/deliverable-d4-1-market-analysis-of-key-water-reuse-technologies.pdf>.
- Central Intelligence Agency (CIA) (2017): *The World Factbook* [online] <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/be.html> (abgerufen am 20.06.2017).
- CGWB (2000): *Guide on Artificial Recharge to Ground Water*. Ministry of Water Resources, New Delhli, 59 S.
- Chang, D. und Z. Ma (2012): *Wastewater reclamation and reuse in Beijing: influence factors and policy implications*. *Desalination* 297: 72-78.
- Chen, Z., Ngo, H.H. und W. Guo (2013): *A critical review on the end uses of recycled water*. *Critical reviews in environmental science and technology* 43(14): 1446-1516.
- Cheng, H, Hu, Y. und J. Zhao (2009): *Meeting China's water shortage crisis: current practices and challenges*. *Environmental Science and Technology* 43: 240-244.
- Chew, M.Y., Watanabe, C. und Y. Tou (2010): *Technology Leapfrogging: Findings from Singapore's Water Industry*. *Journal of Technology Management for Growing Economies*, 1(2).
- China Daily (2017): *This day, that year* (24.04.2017). <https://www.pressreader.com/china/china-daily/20170424/281578060547079> (abgerufen am 17.07.2017)

- Choshen, E. und R. Laster (2005): *Environment, Administration, and Law in Israel: Government Ministries Part III*. Jerusalem Institute for Israel Studies, Jerusalem, 18 S.
- Chowdhury, S., (2012): *Water Resources and Water Consumption in Saudi Arabia*. http://www.wstagcc.org/WSTA_10th_Conference/S2_L5_Water_Resources_and_water_consumption_Shawkat_Chowdhury.pdf.
- Cornel, P., Kirchhoff, W., Menzel, U., Orth, H., Pinnekamp, J., Rudolph, K.U., Schneider, T. und M. Wagner (2005): *Anforderungen an die Abwassertechnik in anderen Ländern*. Abschlussbericht zum BMBF-Vorhaben 02WA0452. Bochum, 163 S.
- Cross, P. (2002): *Water Conserv II – a world renowned irrigation and rapid infiltration basin water reuse project*. Tour Guide.
- CWF (2014): *Clean Water Fund Annual Report*. Clean Water Fund, Washington DC, 15 S.
- DeNicola, E., Aburizaiza, O.S., Siddique, A., Khwaja, H. und D.O. Carpenter (2015): *Climate change and water scarcity: the case of Saudi Arabia*. *Annals of global health*, 81(3): 342-353.
- Deshmukh, S. und M.P. Wehner (2009): *The Groundwater Replenishment System: The First Year*. Fountain Valley, 12 S.
- Dieter, H.H. und R. Schmidt (2011): *Ästhetik & Akzeptanz aufbereiteter Wassers*. In: Lozán, J., Graßl, L.H., Hupfer, P., Karbe L. und C.-D. Schönwiese (Hrsg.): *Warnsignal Klima: Genuß Wasser für alle?* 3.Auflage http://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal_klima_wasser_kap2_2.5_dieter.pdf.
- DIN 2000 (2000): *Zentrale Trinkwasserversorgung – Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen – Technische Regel des DVGW*. Berlin: Beuth.
- Dishman, C.M., Sherrard, J.H. und M. Rebhun (1989): *Gaining support for direct potable water reuse*. *Journal of Professional Issues in Engineering* 115(2): 154-161.
- Domènech, L. und M. Vallès (2014): *Local regulations on alternative water sources: greywater and rainwater use in the metropolitan region of Barcelona*. *Investigaciones Geográficas* 61: 87-96.
- Domènech, L., March, H. und D. Saurí (2013): *Degrowth initiatives in the urban water sector? A social multi-criteria evaluation of non-conventional water alternatives in Metropolitan Barcelona*. *Journal of Cleaner Production* 38: 44-55.
- Domènech, L., March, H., Vallès, M. und D. Saurí (2015): *Learning processes during regime shifts: Empirical evidence from the diffusion of greywater recycling in Spain*. *Environmental Innovation and Societal Transitions* 15(1): 26-41.
- Doranova, A., (2013): *Implementation of greywater and rainwater reuse systems in the housing sector in the Barcelona Metropolitan Area*. Case Study C.1. In: Peter, V., van der Veen, G., Doranova, A. und M. Miedszinski (2013), *Screening of Regulatory Framework*. Final Re-

port., 101-106. <https://ec.europa.eu/research/innovation-union/pdf/KI-04-13-129-EN-N-RegulatoryScreening.pdf>.

Drewes, J.E., Patricio Roa Garduño, P. und G.L. Amy (2012): *Water reuse in the Kingdom of Saudi Arabia – status, prospects and research needs*. Water Science & Technology: Water Supply 12(6): 926-936.

Du Pisani, P.L. (2006): *Direct reclamation of potable water at Windhoek's Goreangab reclamation plant*. Desalination 188: 79-88.

Dwyer, J. (Hrsg.) (2000): *The environmental impacts of irrigation in the European Union – A report to the Environmental Directorate of the European Commission*.

EBI (2016): *U.S. Environmental Industry Generates \$353.7 Billion in Revenues* <https://ebionline.org/updates/3878-us-environmental-industry-generates-354-billion-dollar-in-revenues> (abgerufen am 07.08.2017).

Environment Agency – Abu Dhabi (2013). *Maximizing recycled water use in the emirate of Abu Dhabi*, Annual Policy Brief, Abu Dhabi: Environment Agency – Abu Dhabi.

Environment Agency – Abu Dhabi (2015): *ANNUAL REPORT 2015*, Abu Dhabi: Environment Agency – Abu Dhabi.

Environmental issue report No 19 (2001). *Sustainable water use in Europe – Part 2: Demand management*. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

Erste Wassersicherstellungsverordnung vom 31. März 1970 (BGBl. I S. 357)

Esteban, R.I. und E.O. de Miguel (2008): *Present and future of wastewater reuse in Spain*. Desalination 218(1-3): 105-119.

Europäische Kommission, 2017. *Water Reuse – Background and policy context*. <http://ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm> (abgerufen am 05.05.2017).

European Commission (2016): *EU-level instruments on water reuse – Final report to support the Commission's Impact Assessment*. 292 S.

European Environment Agency (EEA) (2017): *Water Use by Sectors*. <https://www.eea.europa.eu/themes/water/water-resources/water-use-by-sectors> (abgerufen am 12.05.2017).

Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung (fbr) (2005): fbr-Hinweisblatt H 201, Grauwasser-Recycling-Anlagen für mehrere Haushalte und für den öffentlichen/gewerblichen Bereich. Darmstadt: Fachvereinigung Betriebs- und Regenwassernutzung.

FAO (1992): *Aquifer recharge with wastewater*. In: FAO (Hrsg.), *Wastewater treatment and use in agriculture*. FAO irrigation and drainage paper 47, chapter 4. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2015): *FAO Statistical Pocketbook 2015: World Food and Agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- FAO (2016): *Irrigation Areas in Spain*. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/irrigationmap/ESP/print1.stm> (abgerufen am 17.07.2017)
- FAO (2017a). *AQUASTAT Main Database*. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html> (abgerufen 23.06.2017-04.08.2017)
- FAO (2017b): *Drought characteristics and management in Central Asia and Turkey*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom, 114 S.
- Friedler, E. (2008): *The water saving potential and the socio-economic feasibility of grey-water reuse within the urban sector – Israel as a case study*. International Journal of Environmental Studies 65(1): 57-69.
- Friedler, E., Alfiya, Y., Shaviv, A., Gilboa, Y., Harussi, Y. und O. Raize (2015): *A continuous active monitoring approach to identify cross-connections between potable water and effluent distribution systems*. Environmental monitoring and assessment 187(3): 131.
- Funamizu, N., S. Ohgaki und T. Asano (1998): *Wastewater reuse and water environment*. In: Takahashi, H. und Y. Kawada (Hrsg.), *Water Cycle and its Environment*, Iwanami, Japan: 211-239.
- Funamizu, N., T. Onitsuka und S. Hatori (2008): *Water reuse in Japan*. In: Jimenez, B. and T. Asano (Hrsg.), *Water Reuse: An International Survey of Current Practice*, London: IWA Publishing: 373-386.
- Gale, I. und P. Dillon (2005). *Managed Aquifer Recharge (MAR)*. UNESCO-IHP, Paris.
- Garcia, X. und D. Pargament (2015). *Reusing wastewater to cope with water scarcity: Economic, social and environmental considerations for decision-making*. Resources, Conservation and Recycling 101: 154-166.
- Gassert, F., Landis, M. Luck, M., Reig, P. und T. Shiao (2014): *Aqueduct Global Maps 2.1*. Washington, DC: World Resources Institute. <http://www.wri.org/publication/aqueduct-metadata-global>.
- GB/T 14848-93 (1993): *Quality Standard for Ground Water*. State bureau of technical supervision.
- Gemici, U., Ak, M. und A. Turkman (2006): *Salinity problems and Desalination in Turkey*. Konferenzbeitrag Tenth International Water Technology Conference Alexandria: 745-755.
- Generalidad de Catalunya (2017): *Wastewater treatment plants. Overall performances 2015*. <http://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=235&lang=en> (abgerufen am 14.07.2017).
- Germany Trade & Invest (2016): *Wirtschaftstrends Jahresmitte 2016 – Vereinigte Arabische Emirate*, Berlin: Germany Trade & Invest.
- Germany Trade & Invest (2017): *Produktmärkte in den Vereinigten Arabischen Emiraten (VAE) 2017*, Berlin: Germany Trade & Invest.

Gössling, S. (2015): *New performance indicators for water management in tourism*. Tourism Management 46: 233-244.

Government of Abu Dhabi (2014): *The water resources management strategy for the Emirate of Abu Dhabi 2014-2018*, Abu Dhabi: Government of Abu Dhabi.

Groot, C. (2013). *Fresh thinking to improve business and sustainability*.
http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_08d9/0901b803808d92c4.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-50111.pdf (abgerufen am 26.07.2017).

Gross, A., Maimon, A., Alfiya, Y., und E. Friedler, (2015): *Greywater recycling*. Boca Raton: CRC Press.

Grundwasserverordnung (GrwV) 2010: vom 9. November 2010 (BGBl. I S. 1513), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. Mai 2017 (BGBl. I S. 1044) geändert worden ist.

GTAI (2014): *Indiens Wasserver- und Abwasserentsorgung sieht sich großen Herausforderungen gegenüber*. Germany Trade & Invest, Bonn, 4 S.

Gulf News (2006). *Electricity and water tariff revised in Abu Dhabi*.
<http://gulfnews.com/news/uae/government/electricity-and-water-tariff-revised-in-abu-dhabi-1.1931425> (abgerufen am 03.08.17).

Hartley, T.W. (2006): *Public perception and participation in water reuse*. Desalination 187(1-3): 115-126.

Haruvy, N. (1998). *Wastewater reuse – regional and economic considerations*. Resources, Conservation and Recycling 23(1): 57-66.

Hässelbarth, U., (1986): *Die Regelung chemischer Stoffe in der Trinkwasserverordnung*. In: K. Aurand, U. Hässelbarth, G. v. Nieding et al. (Hrsg.), *Die Trinkwasserverordnung. Einführung und Erläuterung für Wasserversorgungsunternehmen und Überwachungsbehörden*. Berlin: 138-146.

Herrier, J.-L., Mees, J., Salman, A., Seys, J., Van Nieuwenhuysse, H. und I. Dobbelaere (2005): *Proceedings 'Dunes and Estuaries 2005'*. International Conference on Nature Restoration Practices in European Coastal Habitats, Koksijde. VLIZ Special Publication, 7 S.

Hessenwasser, 2016. *Wassersparen auf andere Art. Brauchwasser deckt über ein Fünftel des Wasserbedarfs im Frankfurter Flughafen*. Inside Out 2/2016: 19-21.

Hochstrat, R., Wintgens, T. und T. Melin (2008): *Development of integrated water reuse strategies*. Desalination 218, 208-217.

Hutterer, J. (2008): *China's Water Market – Opportunities for Foreign Investors*. China aktuell 2/2008: 157-177.

Icekson-Tal, N., Avraham, O., Sack, J. und H. Cikurel (2003): *Water reuse in Israel – the Dan Region Project: evaluation of water quality and reliability of plant's operation*. Water Science and Technology: Water Supply 3(4): 231-237.

- Iglesias, R. und E. Ortega (2008): *Present and future of wastewater reuse in Spain*. Desalination 218: 105-119.
- Iglesias, R., Ortega, E., Batanero, G. und L. Quintas (2010): *Water reuse in Spain: Data overview and costs estimation of suitable treatment trains*. Desalination 263: 1-10.
- Industriekläranlagen-Zulassungs- und Überwachungsverordnung (IZÜV) vom 2. Mai 2013 (BGBl. I S. 973, 1011, 3756), die durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist.
- InnovationSeeds (2016): *Rainwater and greywater reuse systems in the Barcelona*. <http://www.innovationseeds.eu/Policy-Library/Core-Articles/Rainwater-And-Greywater-Reuse-Systems-In-The-Barcelona.kl> (abgerufen am 11.07.2017).
- IRC (2017): Infrastructure Report Card. 6 S.
- Izeckson, N. (2012): *Dan Region Wastewater Treatment and Reclamation-Plant Operation Report 2011*. Mekorot, Tel-Aviv.
- Jin, M.L.X. und Z.B.J. Luo (2010): *Achieving groundwater supply sustainability & reliability through managed aquifer re-charge*. Abu Dhabi. Integrative technologies for safely managed groundwater recharge using reclaimed water in Zhengzhou, 6 S.
- John, L. (2000): *Soil salinity poses challenges for sustainable agriculture and wildlife*. California Agriculture 54(2): 43-48.
- Kamizoulis, G., Bahri, A., Brissaud, F. und A.N. Angelakis (2003): *Wastewater recycling and reuse practices in Mediterranean region: Recommended Guidelines*. http://www.a-angelakis.gr/files/pubrep/recycling_med.pdf (abgerufen am 09.06.2017).
- Kanarek, A. und M. Michail (1996): *Groundwater recharge with municipal effluent: Dan Region Reclamation Project*. Water Science 34(11): 227-233.
- Kemp, B., Randle, M., Hurlimann, A. und S. Dolnicar (2012): *Community acceptance of recycled water: can we inoculate the public against scare campaigns?* Journal of Public Affairs 12(4): 337-346.
- Kimura, K., Funamizu, N. und Y. Oi (2013): *On-site water reclamation and reuse in individual buildings in Japan*. In: Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A. und J. Anderson (Hrsg.), Milestones in Water Reuse. The Best Success Stories, London: IWA Publishing: 169-174.
- Kislev, Y (2011): *The water economy of Israel*. Taub Center for social policy studies Israel, Jerusalem, 138 S.
- Kitamura, K., Saeki, K. und N. Funamizu (2013): *Semi-decentralized water recycling in megacities: the example of Tokyo Shinjuku Area*. In: Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A. und J. Anderson (Hrsg.), Milestones in Water Reuse. The Best Success Stories, London: IWA Publishing: 151-159.
- Kluge, T. und E. Schramm (2016): *Wasser 2050 – Mehr Nachhaltigkeit durch Systemlösungen*. München: oekom verlag.

Königreich Spanien (2007): Rechtsrahmen für die Wiederverwendung von gereinigtem Abwasser. Spanien: RD 1620/2007. Madrid: Ministerium für Umwelt, Ministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Fischerei, Ministerium für Gesundheit.

Lahnsteiner, J., du Pisani, P., Menge, J. und J. Esterhuizen (2013): *More than 40 years of direct potable reuse experience in Windhoek*. In: Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A. und J. Anderson (Hrsg.), *Milestones in Water Reuse. The Best Success Stories*, London: IWA Publishing: 351-364.

Lautze, J., Stander, E., Drechsel, P., da Silva, A.K. und B. Keraita (2014): *Global experiences in water reuse*. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI). CGIAR Research Program on Water, Land and Ecosystems (WLE). Resource Recovery and Reuse Series 4.

Lazarova, V. und T. Asano (2013): *Milestones in water reuse: main challenges, keys to success and trends of development. An overview*. In: Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A. und J. Anderson (Hrsg.), *Milestones in Water Reuse. The Best Success Stories*, London: IWA Publishing.

Lazarova, V., S. Hills und R. Birks (2003). *Using recycled water for non-potable, urban uses: a review with particular reference to toilet flushing*. *Water Science and Technology: Water Supply* 3(4): 69-77.

Lazarova, V., T. Asano, A. Bahri und J. Anderson (eds.), 2013. *Milestones in Water Reuse. The Best Success Stories*, London: IWA Publishing.

Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E. und R. Aragüés (2010): *Irrigation Modernization in Spain: Effects on Water Quantity and Quality – A Conceptual Approach*. *International Journal of Water Resources Development* 26(2): 265-282.

Lens, P., L. Hulshoff Pol, P. Wilderer und T. Asano (2002): *Water recycling and resource recovery in industry – analysis, technologies and implementation*. *Integrated Environmental Technology Series*, IWA Publishing.

Leong, C. (2016): *The role of emotions in drinking recycled water*. *Water* 8(11): 548-565.

Lim, M.H. und H. Sea (2013): *NEWater: A key element of Singapore's water sustainability*. In: Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A. und J. Anderson (Hrsg.), *Milestones in Water Reuse. The Best Success Stories*, London: IWA Publishing: 53-62.

Litty, K. (2008): *User Oriented Wastewater Treatment Technology in Developing and Newly Industrialising Countries*. Dissertation an der TU Karlsruhe.

Liu, X. (2014): Annex to Rodrigues (2014) – *Water quality standard for reclaimed wastewater in China*. IWA Publishing.

Lyu, S., Chen, W., Zhang, W., Fan, Y. und W. Jiao (2016): *Wastewater reclamation and reuse in China: Opportunities and challenges*. *Journal of Environmental Sciences* 39: 86-96.

MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación) (2001): *Plan Nacional de Regadíos Horizonte 2008*. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Madrid, Spain.

- March, H., Domènech, L. und Saurí, D. (2013): *Water conservation campaigns and citizen perceptions: the drought of 2007-2008 in the Metropolitan Area of Barcelona*. *Natural Hazards* 65(3): 1951-1966.
- MARGW (2007): *Manual on Artificial Recharge of Ground Water*. Ministry of Water Resources Central Ground Water Board, Faridabad, 198 S.
- McDonnel, R. und S. Fragaszy (2016): *Groundwater Use and Policies in Abu Dhabi – IWMI Project Report No. 13 – Groundwater governance in the Arab World*, Sri Lanka: International Water Management Institute.
- Med EUWI (2007): Mediterranean EUWI Wastewater Reuse Working Group: *Mediterranean Wastewater Reuse Report*. <http://www.emwis.net/topics/WaterReuse> (abgerufen am 04.07.2017).
- Missimer, T. und G.L. Ami (2012): *Water Reuse in Saudi Arabia: Approaches to Increase Use and Acceptance*. https://www.researchgate.net/publication/280880634_Wastewater_reuse_in_Saudi_Arabia (abgerufen am 14.7.2017).
- Molinos-Senante, M., Hernández-Sancho, F. und R. Sala-Garrido (2011): *Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: A case study for Spanish wastewater treatment plants*. *Journal of Environmental Management* 92(12): 3091-3097.
- Molist, J. (2016): *Water reuse experiences in Catalonia*. Water Reuse Conference Demoware, Barcelona. http://demoware.eu/en/events/water-reuse-conference-barcelona-13-14-june-2016/14-june-2016/water-reuse-catalonia_j-molist_140616.pdf (abgerufen am 07.07.2017).
- Moreland, J.A., Clark, D.W und J.L. Imes (2007): *Groundwater – Abu Dhabi's hidden treasure*, Abu Dhabi: National Drilling Company.
- MPARGW (2013): *Master Plan for Artificial Recharge to Ground Water in India*. Ministry of Water Resources Central Ground Water Board, New Delhi, 225 S.
- Mudgal, S., van Long, L., Saidi, N., Haines, R., McNeil, D., Jeffrey, P., Smith, H. und J. Knox (2015): *Optimization Water Reuse in EU: Final Report*. BIO by Deloitte: Brussels, Belgium.
- Mujierjago, R. und J. López (2008): *Water reuse and integrated water resources management in Vitoria-Gasteiz, Spain*. *Water Practice & Technology* 3(2).
- Nadav, T., Arye, G., Tarchitzky, J. und Y. Chen (2012): *Enhanced infiltration regime for treated-wastewater purification in soil aquifer treatment (SAT)*. *Journal of Hydrology* 420: 275-283.
- Nancarrow, B.E., Leviston, Z. und D.I. Tucker (2009): *Measuring the predictors of communities' behavioural decisions for potable reuse of wastewater*. *Water Science & Technology* 60(12): 3199-3209.
- National Bureau of Statistics of China (2010): *China Statistical Yearbook (2010)*: China Statistics Press, Beijing.

National Research Council (2012): *Water reuse: potential for expanding the nation's water supply through reuse of municipal wastewater*. National Academies Press, Washington, D.C., USA.

Naumann, J.-P. (2014): *Industriestandorte in Deutschland – Eine Bestandsaufnahme*, Dr. Jörg-Peter Naumann Gesellschaft für Unternehmensberatung mbH, Hannover. http://www.jpnaumann.de/publikationen/JPN_Publikation_Industriestandorte.pdf (abgerufen am 03.05.2017).

Nolde, E. und W. Dott (1991): *Verhalten von hygienisch relevanten Bakterien und Pilzen im Grauwasser – Einfluß der UV-Desinfektion und Wiederverkeimung*. gwf Wasser/Abwasser 132(3): 108-114.

Oberflächengewässerverordnung (OGewV) vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373).

OCWD (2016): *GWRS Groundwater Replenishment System*. Orange County Water District, Orange County Sanitation District, Fountain Valley, 32 S.

Ogoshi, M., Suzuki, Y. und T. Asano (2001): *Water reuse in Japan*. Water Science and Technology 43(10): 17-23.

One World Nations Online (2017): Belgium <http://www.nationsonline.org/oneworld/belgium.htm> (abgerufen am 20.06.2017).

Ormerod, K.J. und C.A. Scott (2013): *Drinking wastewater: Public trust in potable reuse*. Science, Technology & Human Values 38(3): 351-373.

Ouda, O.K. (2015): *Treated wastewater use in Saudi Arabia: challenges and initiatives*. International Journal of Water Resources Development 32(5): 799-809.

Papaiacovou, I. (2001): *Case study – waste water reuse in Limassol as an alternative water source*. Desalination 138: 55-59.

Paranychianakis, N.V., Salgot, M., Snyder, S.A. und A.N. Angelakis (2014): *Water reuse in EU-States: necessity for uniform criteria to mitigate human and environmental risks*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 45(13): 1409-1468.

Parson, L.R., Morgan, K.T., Wheaton, T.A. und W.S. Castle (2001): *Wastewater and reclaimed water – disposal problem or potential resource?* Proceedings of the Florida State Horticultural Society 114: 79-100.

Pentair (2017): *Terneuzen, the Netherlands – municipal wastewater*. <http://advancedfiltration.pentair.com/pt-pt/case-studies/de-drie-ambachten> (abgerufen am 26.07.2017).

Pitman, K., McDonnell, R. und M. Dawood (Hrsg.) (2009): *Abu Dhabi Master Water Resource Plan*. Abu Dhabi: Environment Agency Abu Dhabi. Po, M., Nancarrow, B.E. und J.D. Kaercher (2003): *Literature review of factors influencing public perceptions of water reuse*. CSIRO Land & Water Technical Report 54/03.

Raso, J. (2013): *Updated report on wastewater reuse in the European Union*. TYPASA. http://ec.europa.eu/environment/water/blueprint/pdf/Final%20Report_Water%20Reuse_April%202013.pdf. (abgerufen am 11.07.2017).

Regulation & Supervision Bureau (2009): *Laws and regulations*. <http://rsb.gov.ae/en/sector/laws-and-regulations> (abgerufen am 07.08.2017).

Rejwan, A. (2011): *The state of Israel: national water efficiency report*. Ministry of National Infrastructures Planning Department, 41 S.

Rodrigues, S. (2014): *China reclaimed water reuse regulations*. IWA Publications.

Sakthivadivel, R. (2007): *The groundwater recharge movement*. In: International C (Hrsg.), *The agricultural groundwater revolution: opportunities and threats to development*, CAB International, 195-210.

Saurí, D. und L. Palau-Rof (2017): *Urban drainage in Barcelona: from hazard to resource?* *Water Alternatives* 10(2): 475-492.

Schramm (Hrsg.), *Wasserinfrastruktur: Den Wandel gestalten. Technische Varianten, räumliche Potenziale, institutionelle Spielräume*. Edition Difu – Stadt Forschung Praxis 16. Berlin: Difu: 57-69.

Schramm, E. (2013): *Vom Tiger lernen – Orientierung am technisch vollendeten Wasserkreislauf von Singapur?* *Scheidewege* 43: 121-141.

Schramm, E. (2016): *Abwasser als Frischwasser: Wasserautonomie in Singapur als integrierte Dienstleistung*. In: Kluge, T. und E. Schramm (Hrsg.), *Wasser 2050. Mehr Nachhaltigkeit durch Systemlösungen*. München: oekom verlag: 91-99.

Schramm, E. und H. Kerber (2017): *Transformation von Wasserinfrastrukturen: Fördernde und hemmende Faktoren aus Sicht zentraler Akteure*. In: Winker, M., Trapp, J.H., Libbe, J. und E. Segui, L., Alfranca, O. und J. Garcia (2009): *Techno-economical evaluation of water reuse for wetland restoration: a case study in a natural park in Catalonia, Northeastern Spain*. *Desalination* 247: 180-190.

Seis, W., Lesjean, B., Maaßen, S., Balla, D., Hochstrat, R. und B. Düppenbecker (2016): *Rahmenbedingungen für die umweltgerechte Nutzung von behandeltem Abwasser zur landwirtschaftlichen Bewässerung*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, TEXTE 34/2016, 215 S.

Shevah, Y. (2014): *Water scarcity, water reuse, and environmental safety*. *Pure and Applied Chemistry* 86(7): 1205.

Sone, K. (2004): *Wastewater reuse in Tokyo, Japan*. Newsletter, October 2004, 2-5, International Water Association, Specialist Group on Water Reuse.

State of California (2011): *California Code of Regulations, Title 22 Social Security, Division 4 Environmental Health, Chapter 3 Water Recycling Criteria* (2009, updated in 2011).

Statistics Centre – Abu Dhabi (2013): *Statistical Yearbook of Abu Dhabi 2013*, Abu Dhabi: Statistics Centre – Abu Dhabi.

Statistics Centre – Abu Dhabi (2017): *Statistical Yearbook of Abu Dhabi 2017*, Abu Dhabi: Statistics Centre – Abu Dhabi.

- Störmer, E., Binz, C. und B. Truffer (2010): *Globale Herausforderung für die Siedlungswasserwirtschaft. Ein Roadmapping für dezentrale Wassertechnologien im Jahr 2020*. TaTuP 19(1): 40-48.
- Sun, R., Jin, M., Giordano, M. und K.G. Villholth (2009): *Urban and rural groundwater use in Zhengzhou, China: challenges in joint management*. Hydrogeology Journal 17: 1495-1506.
- Tal, A. (2006): National report of Israel 2006 to the United Nations convention to combat desertification. State of Israel, 26 S.
- Thoeve, C., Cauwenberghs, J., Wintgens, T., Van Houtte, E., Bixio, B. und G. De Gueldre (2005): *Overview and background of water reuse practice in Flanders, Belgium*. Technical Workshop: The integration of reclaimed water in water resource management Lloret de Mar, Costa Brava, Girona, October 2005.
- Tolksdorf, J. und P. Cornel (2017): *Separating grey-and blackwater in urban water cycles – sensible in the view of misconceptions?* Water Science and Technology 76 (5): 1132-1139.
- Toze, S. (2006): *Water reuse and health risks – real vs. perceived*. Desalination 187(1): 41-51.
- Tredoux, G. und B.F. van der Merwe (2009): *Artificial recharge of the Windhoek aquifer, Namibia: water quality considerations*. Boletín Geológico y Minero 120(2): 269-278.
- Trinkwasserverordnung (TrinkwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. März 2016 (BGBl. I S. 459), die durch Artikel 4 Absatz 21 des Gesetzes vom 18. Juli 2016 (BGBl. I S. 1666) geändert worden ist.
- TUI Group (2014): Mehr grüne Hotels bei TUI. Hannover. https://www.tuigroup.com/de-de/medien/presseinformationen/deutschland-meldungen/2014/September/22_umwelt_champion.
- United Arab Emirates Ministry of Environment and Water (2015): *UAE state of green economy report 2014*, Abu Dhabi: United Arab Emirates Ministry of Environment and Water.
- US EPA (2012): *Guidelines for Water Reuse*. Report EPA/600/R-12/618. U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC, USA, 643 S.
- Uycan, D. und S. Atalay (2012): *Zielmarktanalyse – Wasserwirtschaft in der Türkei*. Deutsch-Türkische Industrie- und Handelskammer, 103 S.
- Van der Merwe, B.F. (2000): *Integrated water resource management in Windhoek, Namibia*. Water Supply 18(1): 376-380.
- Van der Merwe, B.F., du Pisani, P., Menge, J. und E. Koenig (2008): *Water reuse in Windhoek, Namibia: 40 years and still the only case of direct water reuse for human consumption*. In: Jimenez, B. und T. Asano (Hrsg.), *Water reuse – An international survey of current practice, issues and needs*. London: IWA Publishing: 434-454.
- Van Houtte, E. und J. Verbauwheide (2008): *Operational experience with indirect potable reuse at the Flemish Coast*. Desalination 218(1-3): 198-207

Van Houtte, E. und J. Verbauwheide (2013): *Long-time membrane experience at Torreele's water reuse facility in Belgium*. *Desalination and Water Treatment* 51(22-24): 4253-4262.

Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) vom 18. April 2017.

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., van Vliet, M.T.H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P. und D. Wiberg (2016): *Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches*. *Geoscientific Model Development* 9: 175-222.

Wagner, J. und I. Keggenhoff (2017): Länderprofil zur Kreislauf- und Wasserwirtschaft in den Vereinigten Arabischen Emiraten http://www.germanwaterpartnership.de/fileadmin/pdfs/gwp_materialien/Laenderprofile/170518_Laenderprofil_VAE_Gesamt_final.compressed.pdf (abgerufen am 19.10.2017)

Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. Juli 2017 (BGBl. I S. 2771) geändert worden ist.

Wasserwirtschaft Indien. (2010): Institut für Siedlungswasserwirtschaft RWTH Aachen, 32 S.

Wasserwirtschaft Israel. (2010): Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen, 32 S.

West Basin Municipal Water District (2017): Edward C. Little Water Recycling Facility. <http://www.westbasin.org/water-supplies-recycled-water/facilities> (abgerufen am 08.05.2017).

Wintgens, T., Melin, T., Hochstrat, R., Jeffrey, J. und M. Salgot (2005): *Political and legislative framework conditions for wastewater reclamation and reuse in Europe*. In: 20th Annual Water Reuse Symposium, Denver, USA, 18-21.09.2005.

World Economic Forum, 2005-2015, <http://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-2016/>.

World Health Organization (WHO) (2006): *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and grey water, volume 2: wastewater use in agriculture*. Geneva, Switzerland.

World Health Organization (WHO) (2011): *Guidelines for drinking-water quality*. Fourth Edition, Geneva, Switzerland.

World Health Organization (WHO) (2017): *Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water*. Geneva, Switzerland.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme) (2017): *The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource*. Paris.

Xu, Y.Q., Mo, X.G., Cai, Y.L. und X.B. Li (2005): *Analysis on groundwater table drawdown by land use and the quest for sustainable water use in the Hebei Plain in China*. *Agricultural Water Management* 75(1): 38-53.

Yi, L., Jiao, W., Chen, X. und W. Chen (2011): *An overview of reclaimed water reuse in China*. *Journal of Environmental Sciences* 23: 1585-1593.

Zaibel, I., Zilberg, D., Groisman, L. und S. Arnon (2016): *Impact of treated wastewater reuse and floods on water quality and fish health within a water reservoir in an arid climate*. *Science of the Total Environment* 559: 268-281.

Zhang, X.Y., Pei, D. und C.S. Hu (2003): *Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain*. Irrigation Science 21(4):159-166.

Zhu, X., Li, Y., Li, M., Pan, Y. und P. Shi (2013): *Agricultural irrigation in China*. Journal of Soil and Water Conservation 68(6): 147-154.

10 Institutionen und Personen



Dennis Becker
Alexander Frey
Dr.-Ing. Christina Jungfer
<https://dechema.de>



Leibniz-Zentrum für
Agrarlandschaftsforschung e.V.

Dr. Sebastian Maaßen
www.zalf.de



IWW Rheinisch-Westfälisches Institut
für Wasserforschung gGmbH

Kristina Wencki
Philipp Kulse
Barbara Zimmermann
www.iww-online.de



Dr. Engelbert Schramm
Dr. Martin Zimmermann
www.isoe.de



Kerstin Krömer
www.oowv.de