

TWIST++ Arbeitspapier – AP 5

Bewertung der alternativen Wasserinfrastruktur in Lünen (1. Ausbaustufe)

Autoren:

Dr. Dr. Christian Sartorius (Fraunhofer ISI)

Dr. Eve Menger-Krug (Fraunhofer ISI)

Dr. Jutta Niederste-Hollenberg (Fraunhofer ISI)

Dr. Christian Sorge (IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung)

Dr. Thomas Hillenbrand (Fraunhofer ISI)

Stand: November 2016

Inhalt

Abkürzungen	iv
1 Einleitung	1
2 Beschreibung des zu bewertenden Systems	2
3 Bewertung	5
3.1 Ökologische Ziele	5
3.1.1 Belastung durch Nährstoffe (Gewässerschutz): P und N	5
3.1.2 Belastung durch ökotoxikologische Stoffe (Gewässerschutz): Metalle Cu und Zn, Arzneimittel Diclophenac und Biozid Terbutryn	6
3.1.3 Belastung durch sauerstoffzehrende Stoffe (Gewässerschutz): CSB	8
3.1.4 Belastung durch ökotoxische Stoffe (Bodenschutz): Cd, Pb, PAK	9
3.1.5 Emission klimarelevanter Gase (Treibhausgase – THG)	11
3.1.6 Beeinflussung des Mikroklimas (durch bauliche Maßnahmen)	12
3.1.7 Ressourcenverbrauch	13
3.1.8 Ressourcenrückgewinnung	14
3.1.9 Flächenverbrauch (Ver- und Entsorgungsanlagen)	15
3.2 Sicherheitsrelevante Ziele	17
3.2.1 a) Hygiene (Keimzahl)	17
3.2.1 b) Geruch/Trübung	18
3.3 Ökonomische Ziele	19
3.3.1 Aufwendungen: Investitions- und Nettobetriebskosten	19
3.3.2 Flexibilität/Systemwechselbereitschaft	21
3.4 Soziale Ziele	23
3.4.1 Bequemlichkeit (Servicequalität)	23
3.4.2 Wirtschaftliche Belastung (Bezahlbarkeit)	23
3.4.3 Belästigung der Nutzer oder Dritter im Betrieb	24
3.5 Technische Ziele	25
3.5.1 Anfälligkeit für Prozessstörungen (im Normalbetrieb)	25
3.5.2 Auswirkungen eines Versagenszustandes	26

3.5.3	Bereitstellung von Löschwasser	28
3.5.4	Flexibilität bzgl. sich ändernder Rahmenbedingungen	28
3.5.5	Anforderungen an andere Infrastrukturbereiche	29
4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	32
	Quellen	34

Abkürzungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
aRWB	Abzuschreibender Restbuchwert
AW	Abwasser
bND	Bilanzielle Nutzungsdauer
BPW	Bruttoproduktionswert
BW	Betriebswasser
C	Symbol für chem. Element Kohlenstoff
CAN	Calciumammoniumnitrat (Trivialname: Kalkammonsalpeter)
CH ₄	Chem. Formel für Methan
GK	Größenklasse
CO ₂	Chem. Formel für Kohlendioxid
Cu	Symbol für chem. Element Kupfer
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
DüMV	Düngemittelverordnung
GW	Grauwasser
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
LF	Leistungsfähigkeit (i.d.R. zwischen 0 und 100%, entspricht Teilnutzwert)
N	Symbol für chem. Element Stickstoff
N ₂ O	Chem. Formel für Lachgas
ÖFL	Ökologische Flächenleistung
P	Symbol für chem. Element Phosphor
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe Heterogene Stoffgruppe, von denen 16 durch Konvention des U.S. EPA als repräsentativ ausgewählt und als Summenwert analysiert werden (Σ EPA-PAK ₁₆)
PUS	Planungsunterstützungstool
THG	Treibhausgas
TS	Trockensubstanz
TSP	Triplesuperphosphat
TW	Trinkwasser
Zn	Symbol für chem. Element Zink

1. Einleitung

Neben der Entwicklung alternativer Wasser- und Abwasserinfrastrukturen besteht ein Ziel des Projektes TWIST++ darin, diese Alternativen im Vergleich zur bestehenden, konventionellen Infrastruktur zu bewerten (AP 5). Anhand des vorliegenden Entwurfspapieres soll anhand der konkreten Umsetzung im Modellgebiet Lünen dargestellt werden, wie die im Rahmen des Projektes entwickelten technischen Infrastrukturalternativen untereinander und mit der existierenden Referenzinfrastruktur vergleichend bewertet werden können. Hierzu wurde im Vorfeld, in TAP 5.1, die Nutzwertanalyse als geeignetes mehrdimensionales Bewertungsverfahren identifiziert und in TAP 5.2 ein Set von Indikatoren entwickelt, auf Basis derer die Bewertung durchgeführt werden kann.

Die unterschiedlichen Dimensionen der Bewertung werden innerhalb eines dreistufigen Zielsystems abgebildet und mit Kriterien ergänzt. Um einen Vergleich zu ermöglichen, wird zu jedem Kriterium mindestens ein Indikator als Messgröße identifiziert. Um die Teilnutzwerte der verschiedenen Kriterien vergleichbar zu machen, werden sie mittels Transformationskurven normalisiert; die dafür notwendigen Fixpunkte werden ebenfalls für jeden Indikator angegeben. Die Indikatoren und ihre Verwendung im Rahmen der Nutzwertanalyse wurden im TWIST++ AP 5-Arbeitspapier mit dem Titel "Indikatoren zur Bewertung alternativer Wasserinfrastrukturen im Projekt TWIST++" beschrieben. Im vorliegenden Entwurfspapier wird diese Bewertungsmethodik auf das Modellgebiet Lünen angewendet.

2. Beschreibung des zu bewertenden Systems

In Lünen wurde die Süggelstraße (im Folgenden als „Süggelquartier“ bezeichnet) als Modellgebiet für die Umsetzung von i.WET ausgewählt. Im Rahmen einer ersten Quartiertransmutationsstufe ist zunächst eine Umsetzung von i.WET in fünf Hochhäusern der Süggelstraße geplant (Süggelstraße 13, 15, 17, 19 und 21), die laut Eigentümer, dem Bauverein Lünen, zur Sanierung anstehen. Jedes Hochhaus umfasst 24 Wohneinheiten, das ergibt 120 Wohneinheiten im gesamten Modellgebiet. Darin wohnen insgesamt rund 250 Personen, d.h. ca. 50 pro Hochhaus.

i.WET beschreibt ein flexibles und integriertes Wasserver- und Abwasserentsorgungssystem, welches die Wiederverwertung von behandeltem Grauwasser und Regenwasser mit Wärmerückgewinnung und der Produktion von Bioenergie kombiniert. Dieses System ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

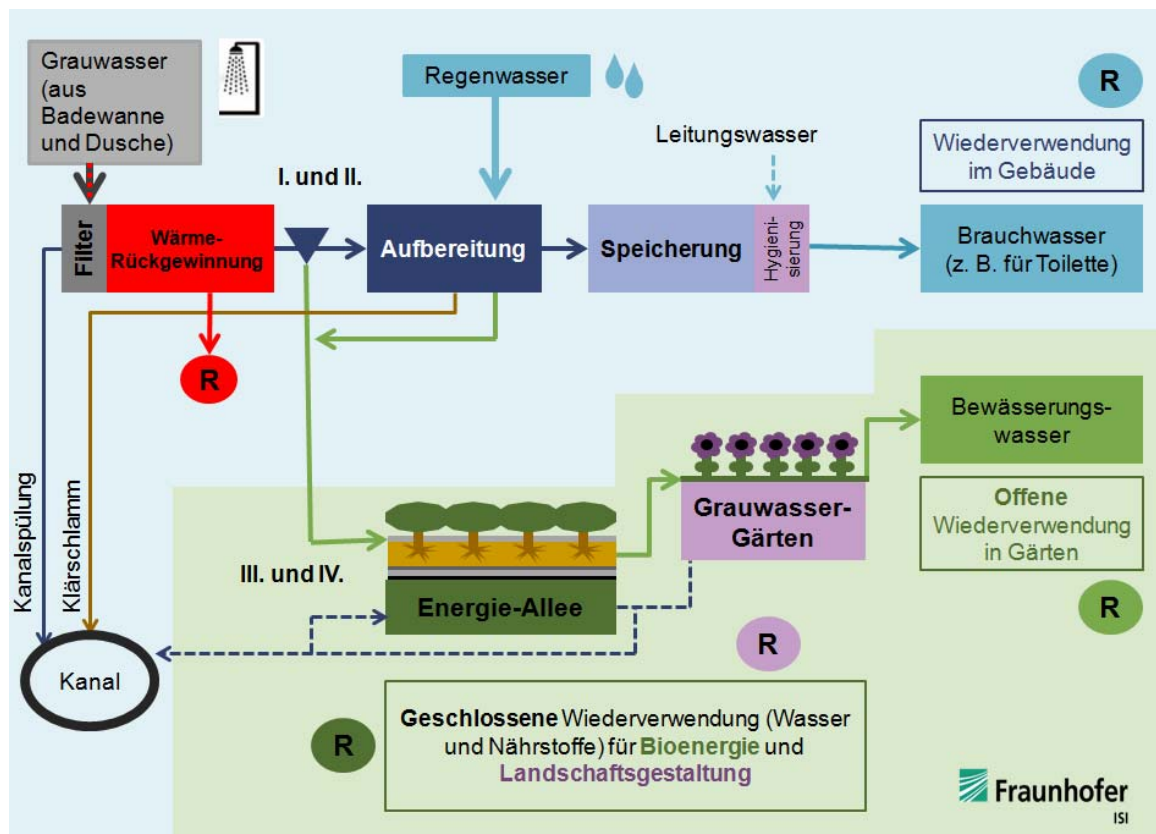


Abbildung 1: Schematische Darstellung von i.WET mit den beiden komplementären Wiederverwendungswegen innerhalb und außerhalb der Gebäude (blau bzw. grün hinterlegt)

Grundsätzlich werden bei i.WET zwei Wiederverwendungspfade unterschieden. Die technische Aufbereitung von Grau- und Regenwasser im Gebäude (I.) inklusive Wärmerückgewinnung (II.) werden als „blauer“ Wiederverwendungspfad bezeichnet. Der „grüne“ Wiederverwendungspfad umfasst die naturnahe Aufbereitung im Außenbereich zu Bewässerungswas-

ser (III. und IV.) inklusive Bioenergieproduktion und weiteren Ökosystemdienstleistungen. Die Elemente der Wiederverwendung werden im Folgenden genauer erläutert:

(I) Grauwasserrecycling und Regenwassernutzung

Innerhalb des Gebäudes wird im Rahmen von i.WET Regenwasser und Grauwasser technisch zu Brauchwasser aufbereitet, so dass Letzteres z.B. für die Toilettenspülung oder Waschmaschine verwendet werden kann. Bei i.WET erfolgt die Wasseraufbereitung nach Bedarf, das heißt, dass zunächst Regen- und, wenn erforderlich, auch Grauwasser nur im erforderlichen Umfang zu Betriebswasser aufbereitet werden. Dadurch wird der Energieverbrauch der Anlage möglichst gering gehalten. Nicht verwendetes Regen- und Grauwasser stehen für eine Aufbereitung im Außenbereich (d.h. Energieallee, Grauwassergarten) zur Verfügung (Fraunhofer ISI 2015).

(II) Wärme-Recycling aus Grauwasser

Die im Grauwasser gespeicherte thermische Energie wird mittels eines Wärmetauschers zurückgewonnen und dazu verwendet, Frischwasser vor der eigentlichen Warmwasserbereitung vorzuwärmen.

(III) Energie-Allee und (IV) Grauwassergarten

Die Energie-Allee stellt die Kerntechnologie des „grünen“ Wiederverwendungswegs dar. Das Grau- und Regenwasser, welches nicht als Betriebswasser im Gebäude benötigt wird, wird mit der Energie-Allee, d.h. einem Bodenfilter, im Außenbereich naturnah aufbereitet. Außerdem erfolgt eine Wiederverwertung von Nährstoffen und Wasser (z.B. für Gartenbewässerung, Kanalspülung) im Zuge einer Kurzumtriebsplantage, die zeitgleich die Gewinnung von Bioenergie ermöglicht. Des Weiteren stellt die Energie-Allee ein landschaftsgestaltendes Element dar, welches in Wohngebiete integriert oder als Straßenbegleitgrün installiert werden kann. Durch die Energie-Allee gereinigtes und nicht von den Pflanzen aufgenommenes Wasser, kann gesammelt und z. B. zur Bewässerung von Grauwassergärten verwendet werden, die nicht der Biomassegewinnung, sondern vorwiegend ästhetischen und ökologischen Zwecken dienen.

Neben dem schwach belasteten Grauwasser aus Duschen, Badewannen und Handwaschbecken, das mit i.WET recycelt wird, fallen im Gebäude auch noch stark belastetes Grauwasser (z. B. Küchenabwässer) und Schwarzwasser (Abwässer aus Toiletten) an. Diese Abwasserteilströme müssen weiterhin in das Kanalsystem geleitet und anschließend in Kläranlagen aufbereitet werden. i.WET kann somit das bestehende Abwasserentsorgungssystem nicht gänzlich ersetzen, sondern kann als Ergänzung angesehen werden, mit der auf der einen Seite Trinkwasser eingespart und auf der anderen Seite das Abwassersystem entlastet werden kann. Die Implementierung von i.WET setzt also ein zumindest teilweise weiterbestehendes Kanalsystem voraus. Dieses kann in der hier bewerteten ersten Ausbaustufe (= erste Phase der Transformation) aus einem konventionellen Abwasserkanal bestehen, an

dessen Ende das Abwasser konventionell behandelt wird, oder, in einer weiteren Ausbaustufe (= zweite Phase der Transformation), aus einem Kanal mit Unterdruckentwässerung, der die Möglichkeit zur energieeffizienteren, anaeroben Abwasserbehandlung eröffnet.

Zusätzliche Vermaschung des Trinkwassernetzes

Jenseits der genannten Innovationen seitens der Entsorgung und Behandlung von Abwasser wird im Trinkwassernetz der Stadt Lünen eine zusätzliche Vermaschung dergestalt durchgeführt, dass aktuell vereinzelt auftretende Stagnation vermieden wird. Die Stagnationsbereiche, die aktuell nach Modellrechnungen ca. ein Zehntel der Haushalte betreffen, können, wie in Abbildung 2 dargestellt, durch das Herstellen von zusätzlichen Verbindungen zwischen einzelnen Netzabschnitten und die gezielte Anpassung von Leitungsquerschnitten in einzelnen Netzabschnitten vollständig vermieden werden.



Abbildung 2: Trinkwassernetzabschnitte in Lünen mit Stagnationswahrscheinlichkeit (rote Abschnitte) vor (linke Karte) und nach zusätzlicher Vermaschung und Querschnittsanpassung (rechte Karte)

Um Kosten und Ressourcen zu sparen, wird diese Maßnahme über einen längeren Zeitraum hinweg im Rahmen der üblichen Instandhaltung durchgeführt. Dadurch wird sie voraussichtlich nicht zum Ende der ersten, sondern eher der zweiten Ausbaustufe von i.WET fertiggestellt sein. Daher erfolgt die Bewertung dieser Anpassung der TW-Infrastruktur getrennt von den Veränderungen der ersten Ausbaustufe des innovativen Sanitärsystems.

3. Bewertung

3.1. Ökologische Ziele

3.1.1. Belastung durch Nährstoffe (Gewässerschutz): P und N

Die Umsetzung von i.WET zielt auf die innovative Behandlung (eines Teils) des Abwassers ab; daher spielt die Reduzierung des Nährstoffgehaltes eine wichtige Rolle. Relevant für die Bewertung sind die Frachten von Phosphor (P) und Stickstoff (N) pro Einwohner(wert) im Ablauf, wobei im Prinzip zwei Übergabepunkte in die Umwelt identifiziert werden können: der Ablauf der Kläranlage, der das schwere Grauwasser und das Schwarz- und Gelbwasser zugeführt werden, sowie der Ablauf von Energieallee und ggf. Grauwassergarten, wo nur Regen- und leichtes Grauwasser behandelt werden. Da der Anteil der Nährstofffrachten im letzten der beiden Ströme gering ist und diese außerdem dem Grauwasser in der Energieallee weitestgehend entzogen werden, wird für die Bewertung nur die Nährstoffeliminierung in der Kläranlage als relevant angesehen. In diesem Zusammenhang unterscheidet sich i.WET dahingehend von der konventionellen Abwasserbehandlung, dass die der Kläranlage zufließende Nährstofffracht zwar im Wesentlichen unverändert ist, die Nährstoffkonzentration im Zufluss aber größer ist. Ursache dafür ist, dass durch die Grauwassernutzung in i.WET das Wasservolumen, welches als Trink- oder Regenwasser den Häusern im Söggelquartier zugeführt und entsprechend mit dem Abwasser wieder ausgeschleust wird, geringer ist als in Häusern mit konventioneller Wasserver- und Abwasserentsorgung. Bezüglich der Kläranlage wird davon ausgegangen, dass diese ohne zusätzliche Maßnahmen in der Lage ist, die Nährstoffe auch aus dem höher konzentrierten Abwasser so zu eliminieren, dass die sonst üblichen Ablaufkonzentrationen eingehalten werden. Die Ablauffracht wird dadurch im Vergleich zum konventionellen System in dem Maße (d.h. proportional) reduziert wie auch das Volumen reduziert wird.

Bewertung des konventionellen Systems

Für die Ermittlung der Transformationskurve, die eine Übersetzung der Ablauffrachten in entsprechende Werte der Leistungsfähigkeit (LF) erlaubt, werden, wie in der Anleitung zur Umsetzung der Bewertung (Sartorius et al. 2015) dargestellt, 800 g N und 62 g P pro EW und Jahr als Durchschnittsfrachten im Ablauf und damit als Referenzwerte angesehen und mit einer Leistungsfähigkeit von 50% gleichgesetzt. Eine Ablauffracht von 0 würde annahmegemäß 100% LF entsprechen, wobei die LF mit sinkender Fracht proportional steigt. Als Referenz für das Modellgebiet Lünen wird nun aber nicht dieser deutschlandweite Durchschnittswert verwendet, sondern die Ablauffrachten, die für eine Kläranlage der Größenklasse (GK) 5 gelten, wie sie in Lünen für das Modellgebiet relevant ist. Dafür betragen die im Leistungsvergleich der DWA (2010) genannten Frachten 767 g N bzw. 38 g P pro EW und Jahr. Das entspricht LF-Werten von 52,1% für die N- und 69,4% für die P-Eliminierung (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Nährstofffrachten im Ablauf der Kläranlage und daraus abgeleitete Bewertung

	Konventionelle Abwasserbehandlung in Deutschland		Konventionelle Abwasserbehandlung in Lünen (GK5)		Innovative Abwasserbehandlung in Lünen	
Nährstoff	Fracht (g/E/a)	LF (%)	Fracht (g/E/a)	LF (%)	Fracht (g/E/a)	LF (%)
N	800	50	767	52,1	685	57,2
P	62	50	38	69,4	34	72,6

Die in der Bewertungsanleitung bei Berücksichtigung der direkten Nährstoffeinträge aus der Kanalisation genannten Referenzwerte von 93 g P bzw. 831 g N werden hier nicht berücksichtigt, da unklar ist, welchen Einfluss der Regenwasserrückhalt in der Energieallee auf diese Einträge hat. Erst wenn in einer späteren Ausbaustufe Regenwasser flächendeckend den dann existierenden Energiealleen zugeführt und schweres Grau- und Schwarzwasser mittels Vakuumkanalisation der Kläranlagen zugeführt würde, kann davon ausgegangen werden, dass Nährstoffeinträge aus der Kanalisation nicht mehr erfolgen. Nur in diesem Fall wäre die Anwendung des entsprechenden höheren Referenzwertes sinnvoll.

Bewertung von i.WET

Zur Berechnung der veränderten Nährstofffrachten im Modellgebiet Lünen wird berücksichtigt, dass durch die Betriebswassernutzung das den Haushalten von außen zugeführte Wasser und damit auch das der Kanalisation (und damit der Kläranlage) zugeführte Abwasservolumen um 27% reduziert wird. Außerdem macht im Modellgebiet der häusliche Abwasserstrom 40% des Gesamtabwasserstroms aus. Da angenommen wird, dass das Kläranlagenablaufvolumen in gleichem Umfang reduziert wird und die Ablaufkonzentrationen dennoch konstant gehalten werden können, reduzieren sich die Ablaufrachten für N und P auf 685 bzw. 34 g/EW/a, was LF-Werten von 57,2 bzw. 72,6% entspricht. Für die Nährstoffe insgesamt betragen die arithmetischen Mittelwerte 60,8% für die konventionelle Infrastruktur und 64,9% für i.WET.

3.1.2. Belastung durch ökotoxikologische Stoffe (Gewässerschutz): Metalle Cu und Zn, Arzneimittel Diclophenac und Biozid Terbutryn

Von den für den Gewässerschutz aus ökotoxikologischer Perspektive grundsätzlich als relevant erachteten Stoffen Cu, Zn, Diclophenac und Terbutryn sind die beiden ersten für die Bewertung von i.WET auf jeden Fall relevant, da die mit dem Regenwasser von entsprechenden Oberflächen abgespülten Mengen einen großen Teil der Frachten ausmachen, die in konventionellen Abwasserinfrastrukturen gesammelt und den Kläranlagen zugeführt werden. Gleiches gilt für Terbutryn, das ebenfalls überwiegend durch das Niederschlagswasser dem Abwasserstrom zugeführt wird. Im Gegensatz dazu ist Diclophenac in Regenwasser i.d.R. nicht und in Grauwasser nur in sehr geringem Umfang (z.B. durch Abwaschen von Diclophenac enthaltenden Hautcremes) enthalten. Dagegen gelangen mehr als 97% des Gesamteintrags an Diclophenac mit dem Urin über das Schwarzwasser ins Abwasser. Diclo-

phenac ist daher für die Bewertung insbesondere der hier betrachteten ersten Ausbaustufe nicht relevant.

Bewertung des konventionellen Systems

Da für die Elimination von Cu, Zn und Terbutryn keine für die Verhältnisse im Modellgebiet Lünen spezifischen Daten vorliegen, können der Bewertung der konventionellen Infrastruktur nur die in Tabelle 2 angegebenen durchschnittlichen Eliminationsraten zugrunde gelegt werden. In einer Mischabwasserkanalisation, wie sie im Modellgebiet vorliegt, sind dabei die Werte für "Komm. Kläranlagen + Kanalisation" relevant. Diese entsprechen unmittelbar der jeweiligen Leistungsfähigkeit der konventionellen Infrastruktur.

Tabelle 2: Eintragspfadabhängige Eliminationsraten (in %) für ausgewählte ökotoxikologische Stoffe und die daraus abgeleiteten Bewertungen (Erläuterungen in Sartorius et al. 2015)

Eintragspfad	Cu	Zn	Terbutryn	Diclophenac
Kommunale Kläranlagen	88	79	30	40
Komm. Kläranlagen + Kanalisation	20	19	17	39
LF der konventionellen Infrastruktur	20	19	17	39
Anteil der Schadstofffracht aus dem Regenwasser, der i.WET zugeführt wird	43	19	1	0
Anteil der Schadstofffracht aus dem gesamten Ab- und Regenwasser, der i.WET zugeführt wird	21	12	0,1	0
Komm. Kläranlage (inkl. Kanalisation) + i.WET	37	29	17	39
LF von i.WET (+ konv. Infrastruktur)	37	29	17	39

Bewertung von i.WET

Zur Bewertung von i.WET wird unterstellt, dass der Anteil der ökotoxikologischen Stoffe, der in die Energieallee gelangt, dort im Zuge der Bodenpassage adsorbiert oder von den Pflanzen aufgenommen wird. Dieser Anteil wird in i.WET vollständig eliminiert und gelangt daher nicht in die Kanalisation und die angeschlossene Kläranlage. Die Eliminationsleistung der Energieallee addiert sich folglich zur Eliminationsleistung der kommunalen Kläranlage. Dabei ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass bei der Aufbereitung des gesammelten Regenwassers ein Teil der Schadstoffe im Klärschlamm bzw. Filterrückstand der Anlage gebunden und der Kanalisation zugeführt wird. Dadurch ist der Anteil der Schadstoffe, die in die Energieallee gelangen, kleiner als wenn das Regenwasser unbehandelt in die Energieallee geleitet würde. Allerdings ist dieser Aspekt nur relevant, wenn das Regenwasser von größeren Flächen in Energiealleen behandelt würde, was in der ersten Ausbaustufe von i.WET aber nicht der Fall ist. Daher wird hier nur Regenwasser betrachtet, welches zum Zwecke der Aufbereitung gesammelt wurde. Für diesen Wasser(teil)strom liegt der Anteil der in der Energieallee zurückgehaltenen Schadstofffrachten zwischen 43% für Cu und 1% für Terbutryn.

Bezogen auf den gesamten Abwasserstrom der Haushalte im Sügge Quartier (d.h. einschließlich Schwarz- und schwerem Grauwasser) liegen die auf die Energieallee zurückzuführenden Eliminationsraten naturgemäß deutlich niedriger (s. Tabelle 2), weil die Schadstofffrachten in diesen Wasserteilströmen von vorneherein nicht der Energieallee, sondern dem Mischabwasserkanal zugeführt werden. In der Gesamtschau müssen diese niedrigen Eliminationsraten dann aber durch die Eliminierungsleistung ergänzt werden, die weiterhin in der kommunalen Kläranlage stattfindet. Es ergeben sich folglich Gesamteliminationsraten zwischen 37% für Cu und 17% für Terbutryn, die unmittelbar den LF-Werten entsprechen (siehe Tabelle 2). Dass sich die Eliminationsraten für Terbutryn im konventionellen System und in i.WET fast nicht unterscheiden, ist darauf zurückzuführen, dass entlang des betrachteten Regenwasserpfades nur 1% der Terbutrynfracht in die Energieallee gelangt – 99% werden letztlich konventionell behandelt. Dieses Verhältnis würde sich deutlich ändern, wenn das Regenwasser – in einer späteren Ausbaustufe – auch unbehandelt in die Energieallee gelangen würde.

Der Gesamtwert der LF im Bereich der ökotoxikologischen Stoffe ermittelt sich als arithmetischer Mittelwert der Einzelwerte und beträgt 23,8% für die konventionelle Infrastruktur und 30,5% für i.WET.

3.1.3. Belastung durch sauerstoffzehrende Stoffe (Gewässerschutz): CSB

Die Logik bei der Bewertung von i.WET hinsichtlich der Eliminierung von CSB ist analog der Logik bei der Nährstoffeliminierung (s. Kap. 3.1.1). Da das der Energieallee zugeführte leichte Grau- und Regenwasser nur einen im Verhältnis zum gesamten Abwasser geringen CSB aufweist, resultiert die Wirkung von i.WET auf den CSB fast ausschließlich darauf, dass das Volumen des zur Kläranlage gelangenden Abwassers geringer ist als bei Anschluss an die konventionelle Abwasserinfrastruktur. Das bedeutet bei unveränderter CSB-Konzentration im ebenfalls unveränderten Ablaufvolumen, dass ein größerer Teil der Fracht eliminiert wird.

Bewertung des konventionellen Systems

Die Transformationskurve, die eine Übersetzung der CSB-Ablauffrachten in entsprechende LF-Werte erlaubt, basiert auf einer Geraden, die durch zwei Punkte bestimmt ist: 100% LF, wenn keinerlei CSB emittiert würde und 0% LF wenn die CSB-Emissionen den gesetzlichen Grenzwert voll ausschöpfen. Wie in Tabelle 3 dargestellt, emittiert eine Kläranlage der GK 5, wie sie auch in Lünen betrieben wird, im deutschen Durchschnitt 2,54 kg CSB pro EW und Jahr, was bei einer durchschnittlich angeschlossenen EW-Zahl von 62,79 Mio. und einer behandelten Abwassermenge von 4,72 Mrd. m³ einer durchschnittlichen CSB-Konzentration im Ablauf von 33,8 mg/l entspricht. Damit wird der Grenzwert von 75 mg/l zu 45% ausgeschöpft, was einer LF von 55% entspricht.

Anders gerechnet entspräche die vollständige Ausschöpfung des Grenzwertes von 75 mg/l bei der angegebenen EW-Anzahl und Abwassermenge einer durchschnittlichen CSB-Fracht von 5,64 kg/(EW*a). Mit einer tatsächlichen CSB-Fracht von 2,54 kg/(EW*a) wird die maxi-

mal zugelassene Fracht natürlich ebenfalls zu 45% ausgeschöpft, was wieder einem LF von 55% entspricht. Diese alternative Berechnungsweise ist trotz der Gleichheit des Ergebnisses wichtig, weil bei der Bewertung im konkreten Fall auf die Änderung der Fracht und nicht die Änderung der Konzentration abgehoben wird.

Tabelle 3: Tatsächliche CSB-Frachten und CSB-Grenzwerte für Kläranlagen verschiedener Größenklassen und deren gewichteten Mittelwert.

	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4	GK 5	Mittelwert
Tatsächliche CSB-Fracht (lt. DWA 2011) (kg/(EW*a))	3,58	3,07	2,39	2,17	2,54	2,42
CSB-Grenzwert (lt. AbwV) (mg/l)	150	110	90	90	75	92,9
Jahresabwassermengen (Mio. m ³)	113	528	511	4.114	4.722	9.988
Angeschlossene EW (Mio.)	1,11	4,51	4,90	46,37	62,79	119,68
Dem Grenzwert entsprechende CSB Fracht (kg/(EW*a))	15,27	12,88	9,39	7,98	5,64	7,75

Wird zusätzlich noch die CSB-Fracht im Regenwasser berücksichtigt, so ändert sich an dieser LF nichts, da die Fracht nur um wenige Prozent steigt und unterstellt werden kann, dass sich die Ablaufkonzentration dadurch nicht ändert.

Die CSB-Fracht, die darüber hinaus im Falle von Starkniederschlägen aus der Kanalisation abgeschlagen wird, braucht bei Betrachtung der ersten Ausbaustufe von i.WET nicht berücksichtigt zu werden, da dieser Teil des (konventionellen) Abwassersystems von i.WET nicht beeinflusst wird.

Bewertung von i.WET

Wie im Fall der Nährstoffe (Kap. 3.1.1) kann auch im vorliegenden Fall davon ausgegangen werden, dass durch i.WET das der kommunalen Kläranlage zugeführte häusliche Abwasservolumen um 11% reduziert wird. Dies impliziert bei entsprechend reduziertem Ablaufvolumen und unveränderter Ablaufkonzentration eine Reduktion der Ablauffracht um ebenfalls 11%. Diese reduziert sich dadurch von 2,54 auf 2,26 kg CSB pro Einwohner und Jahr und die LF steigt von 55,0 auf 60,0%.

3.1.4. Belastung durch ökotoxische Stoffe (Bodenschutz): Cd, Pb, PAK

Ein großer Teil der Schadstoffe, die in der Kläranlage aus dem Abwasser entfernt werden, verbleibt im Klärschlamm und wird bei landwirtschaftlicher Nutzung in den Boden eingetragen (→ Bodenschutz). Teilweise (vor allem bei Cd) wird dieser negative Effekt dadurch reduziert, dass durch die Klärschlammverwertung Mineraldünger ersetzt werden, die ihrerseits schadstoffkontaminiert wären. i.WET wirkt auf diese Schadstoffbelastung des Bodens in dreifacher Weise:

- Der Teil der Schadstoffe, der in die Energieallee gelangt und nicht als Restwasser wieder der Kanalisation zugeführt wird, wird von den Energiepflanzen aufgenommen und entlastet in diesem Umfang die kommunale Kläranlage und damit letztlich die Böden.
- Das Bewässerungswasser am Ende der Energieallee ist in geringerem Umfang schadstoffbelastet und belastet in diesem Umfang unmittelbar die Böden.
- Die Düngewirkung des Grauwassers (und in geringerem Umfang des Regenwassers) substituiert Mineraldünger und die darin enthaltenen Schadstoffe.

Bewertung des konventionellen Systems

Würde in Lünen der gleiche Anteil des Klärschlammes landwirtschaftlich verwertet wie bundesweit, dann würden dadurch die Grenzwerte für Cd, Pb und PAK zu 52%, 25% bzw. 66% ausgeschöpft, was LF-Werten von 48, 75 bzw. 34% entspräche. Tatsächlich wird der Klärschlamm aus Lünen verbrannt und die Asche deponiert, so dass es zu keiner Kontamination des Bodens kommt. Daher ist im Modellgebiet in Lünen dem konventionellen System die LF von 100% zuzuordnen.

Bewertung von i.WET

Für die Bewertung der Schadstoffbelastung des Bodens im Modellgebiet Lünen wurde zuerst ermittelt, welcher Anteil der Schadstoffe Cd, Pb und PAK mit dem leichten Grau- und Regenwasser in die Energieallee geleitet. Bis auf den Anteil dieser Schadstoffe, die am Ende die Energieallee als Restwasser verlassen und wieder der Kanalisation zugeführt werden (und daher von der anfänglich entzogenen Menge subtrahiert werden müssen), sind diese Schadstoffe (d.h. 46% des Cd und knapp 6% des Pb und der PAK) dem konventionellen System entzogen und leisten auf diesem Weg keinen Beitrag zur Schädigung des Bodens. Da im konventionellen System der Klärschlamm nicht landwirtschaftlich verwertet wird und daher den Boden nicht schädigt, kommt dieser Effekt bei i.WET nicht zum Tragen.

26%, 14% bzw. knapp 2% der Cd-, Pb- bzw. PAK-Frachten, die i.WET zugeführt und nicht am Ende der Energieallee wieder der Kanalisation zugeführt werden, gelangen mit dem erzeugten Bewässerungswasser direkt in den Boden. Demgegenüber ersetzt die Düngewirkung des Grau- (und Regen)wassers Mineraldünger und reduziert dadurch Cd- und Pb-Immissionen (kein PAK) im Umfang von 67% bzw. 4% der in i.WET behandelten Mengen. Das bedeutet, dass deutlich mehr Cd-Immissionen substituiert (d.h. vermieden) werden als durch die Bewässerung verursacht werden. Bei Pb und PAK sind die netto den Boden belastenden Mengen zwar positiv, aber viel geringer, weil von vorne herein der i.WET zugeführte Anteil deutlich geringer ist. Das bedeutet, dass die Belastung des Bodens durch i.WET im Falle von Cd negativ und in den anderen Fällen im Verhältnis zu den Grenzwerten der DÜMV und der BBodSchV sehr gering ist. Daraus resultieren für Cd, Pb und PAK LF-Werte von 109,7, 99,9 bzw. 99,9%, im Durchschnitt also eine Leistungsfähigkeit von 103,2% (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Belastung des Bodens durch ökotoxikologische Schadstoffe und die entsprechende Bewertung im Modellgebiet und im deutschen Durchschnitt

	Grenzwert		Deutschland (Durchschnitt)		i.WET in Deutschland		Lünen konventionell		i.WET im Mo- dellgebiet Lünen	
Schad- stoff	(g/t TS)	(mg/ EW)	Fracht (mg/EW)	LF (%)	Fracht (mg/EW)	LF (%)	Fracht (mg/EW)	LF (%)	Fracht (mg/EW)	LF (%)
Cd	1,5	11	6	48,1	2	81,5	0	100	-1,1	109,7
Pb	150	1107	271	75,5	257	76,8	0	100	1,5	99,9
PAK	10	74	49	34,0	46	37,6	0	100	0,0	99,9
Mittel				52,5		65,3		100		103,2

Würde i.WET in einem Gebiet installiert, dessen Abwasserentsorgung dem deutschen Durchschnitt (mit Verwertung von 48% des Klärschlammes) entspräche, so wäre sein Vorteil wegen des der kommunalen Kläranlage vorenthaltenen Schadstoffanteils deutlich größer. Sein LF-Wert betrüge im Durchschnitt 65,3% (gegenüber 52,5% für die konventionelle Alternative; vgl. Tabelle 4)

3.1.5. Emission klimarelevanter Gase (Treibhausgase – THG)

Relevante Mengen an THG entstehen im Rahmen der Wasserver- und Abwasserentsorgung im Zusammenhang mit der Bereitstellung und Nutzung der für Gewinnung, Verteilung und Aufbereitung des Wassers sowie die Sammlung und Behandlung des Abwassers erforderlichen (fossilen) Energieträger. Außerdem werden entsprechend dem Vorgehen im Nationalen Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar (UBA 2014) die unmittelbaren CH₄ und N₂O- (nicht CO₂-)¹ Emissionen einbezogen, die unmittelbar im Behandlungsprozess (Belüftung, Faulung, Denitrifikation) entstehen. Gleiches gilt für die Biomasseerzeugung (z.B. in der "Energieallee"), die zu einer entsprechenden CO₂-Gutschrift führt. (Faulungs-)Prozesse in der Kanalisation und dadurch ggf. verursachte Methan-Emissionen werden dagegen wegen fehlender Daten nicht berücksichtigt.

Bewertung des konventionellen Systems

Für die konventionelle Wasserver- und Abwasserentsorgung in Lünen werden die gleichen THG-Emissionsquellen unterstellt wie im deutschen Durchschnitt (vgl. Bewertungsanleitung):

- 12,7 kg/(EW*a) CO₂ für den für die Trinkwasserversorgung benötigten Strom
- 18,4 kg/(EW*a) CO₂ für den für die Abwasserentsorgung benötigten Strom (GK 5)
- 19,6 kg/(EW*a) CO₂-Äquivalente für die N₂O-Emissionen aus der De-/Nitrifikation der Kläranlage

¹ Vgl. Bewertungsanleitung (Sartorius et al. 2015).

Die THG-Emissionen aus der Klärschlammverwertung werden nicht berücksichtigt, weil der Klärschlamm aus Lünen verbrannt und deponiert wird.

Insgesamt ergeben sich daraus für die konventionelle Wasserver- und Abwasserentsorgung in Lünen um $1,1 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ niedrigere Emissionen von CO_2 -Äquivalenten als im Referenzfall ($51,8 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$) und damit ein LF-Wert von 51,1%.

Bewertung von i.WET

Gegenüber dem konventionellen System wird beim Einsatz von i.WET im Süggelquartier berücksichtigt, dass

- für den Betrieb der Grau- und Regenwasseraufbereitung und -wiederverwendung sowie die Ernte der Biomasse zusätzlicher Strom verbraucht wird;
- für die Wasserver- und Abwasserentsorgung im Umfang des aus der Brauchwassernutzung resultierenden Minderverbrauchs weniger Strom verbraucht wird;
- die in i.WET produzierte Biomasse CO_2 bindet ($\rightarrow$ Gutschrift);
- die in der Energieallee von den Pflanzen verwerteten Nährstoffe Düngemittel substituieren, die ebenfalls THG-Emissionen verursacht hätten;

diese vier Punkte zusammen ergeben Mehremissionen von $0,2 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$;

- durch die geringere der Kläranlage zugeführte Stickstofffracht im Zuge der De-/Nitrifikation in der Kläranlage weniger N_2O emittiert wird (das ergibt Minderemissionen in Höhe von $0,4 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ CO_2 -Äquivalenten) und
- die aus dem Grauwasser zurückgewonnene Wärmemenge den Aufwand an Wärmeenergie für die Warmwasserversorgung und daraus resultierende CO_2 -Emissionen um $48 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ reduziert.

In der Summe führen diese Effekte dazu, dass die Wasserver- und Abwasserentsorgung mit Emissionen von nur noch $2,5 \text{ kg}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ CO_2 -Äquivalenten fast klimaneutral werden. Die LF beträgt dadurch 97,6%.

3.1.6. Beeinflussung des Mikroklimas (durch bauliche Maßnahmen)

Gemäß Bewertungsanleitung ist hier vorgesehen, eine qualitative Diskussion der Vor- und Nachteile des konventionellen und innovativen Systems hinsichtlich Mikroklimawirksamkeit anhand der Indikatoren versiegelte Fläche, typische Lage, Wärmeausstoß und Gebäudekubatur durchzuführen. Die Bewertung soll dann anhand eines Bonus-Malus-Systems erfolgen, bei dem ausgehend von $\text{LF} = 50\%$ folgende Zu und Abschläge getätigt werden:

- Versiegelung von $>5\%$ eines Kaltluftentstehungsgebietes $\rightarrow -10\% \text{ LF}$;
- Versiegelung von $>50\%$ eines Kaltluftentstehungsgebietes $\rightarrow -20\% \text{ LF}$;
- Freisetzung zuvor versiegelter Kaltluftentstehungsgebiete $\rightarrow +10\% (+20\%) \text{ LF}$;
- Baukörper mit Breite $\leq 20\%$ der Breite einer Luftleiterbahn $\rightarrow -10\% \text{ LF}$;
- Baukörper mit Breite $>20\%$ der Breite einer Luftleiterbahn $\rightarrow -20\% \text{ LF}$;

- Freisetzung entsprechender zuvor verbauter Luftleiterbahnen → +10% (+20%) LF.

Im Modellgebiet Lünen werden im Zuge des Einsatzes von i.WET weder Gebiete versiegelt, noch Baukörper erstellt, die sich auf das Mikroklima auswirken könnten. Da die bestehende Abwasserentsorgung zumindest in der ersten Ausbaustufe vollständig bestehen bleibt, ist an dieser Stelle auch keine Entlastung dahingehend zu erwarten, dass aufgrund der Einführung von i.WET bestehende Strukturen im konventionellen System zurückgebaut werden könnten. Es bliebe also für beide Infrastrukturen, die konventionelle und die innovative bei einer LF von 50%.

Trotzdem sind wir (ISI) überzeugt, dass insbesondere die Energieallee als "grüne Lunge" mit vor allem im Sommer temperatursenkender und feuchtigkeitssteigernder Funktion durchaus eine positive Wirkung auf das Mikroklima haben kann. Wir versuchen deshalb, auf der Grundlage des Evapotranspirationspotenzials eine Ergänzung des Mikroklima-Indikators zu entwickeln, der diesen Vorteilen Rechnung tragen könnte. Einstweilen gelten aber die oben gemachten Aussagen und Bewertungen

3.1.7. Ressourcenverbrauch

Wie in der Bewertungsanleitung dargestellt, wird der Ressourcenverbrauch zwecks angemessener Gewichtung der verschiedenen Ressourcen in monetärer Form, d.h. in Euro dargestellt. Dennoch spiegelt dieser Indikator nicht einfach das Ergebnis der Kostenermittlung im ökonomischen Teil (in Kap. 3.3.1) der Bewertung, weil auf die Kosten fokussiert wird, die auf Ressourcenverbrauch zurückzuführen ist. Das sind, wie in der Bewertungsanleitung dargestellt, die Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, insbesondere Energie (d.h. Strom und Wärme). Obwohl ebenfalls mit einem substanziellen Ressourcenverbrauch verbunden, wird die Bauphase, d.h. die Investitionskosten, nicht mit einbezogen, da die teilweise pauschalen Investitionskostensätze, die bspw. für die Sanierung des Mischabwasserkanals oder die Verlegung eines neuen Schmutzwasserkanals zum Ansatz kämen, eine Reihe von Elementen (z.B. Lohnkosten, Wertschöpfung inkl. verwendetes Knowhow) aufweisen, die keine Rohstoffe darstellen.. Andere Kosten wie Personalkosten oder unterstützende Dienstleistungen werden ebenfalls nicht berücksichtigt, obwohl auch sie zweifellos einen Ressourcenverbrauch nach sich ziehen; eine unmittelbare Zuordnung (eines Teils) dieses Ressourcenverbrauchs zur Wasserver- und Abwasserentsorgung wäre aber kaum möglich. Aus diesem Grund ist, wie sich noch zeigen wird, der Wert der letztlich pro Einwohner und Jahr verbrauchten Ressourcen auch deutlich niedriger als der entsprechende Wert der gesamten Wasserver- und Abwasserentsorgung.

Bewertung des konventionellen Systems

Für die Ermittlung der Kosten für Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe wird der in der Bewertungsanleitung beschriebene Ansatz mit den dort angegebenen Zahlen verwendet. Hinzu kommen die Investitionskosten für das Referenzszenario ohne i.WET, in dem der Mischabwasserkanal saniert und zusätzlich ein Schmutzwasserkanal neu gebaut wird. Damit ist die Abwas-

serentsorgung berücksichtigt. Investitionen zur Trinkwasserversorgung und Abwasserbehandlung bleiben dagegen unberücksichtigt, weil sie von der Einführung von i.WET nicht betroffen und in beiden Fällen identisch sind. Die Zahlen im Einzelnen sind in Tabelle 5 aufgeführt und resultieren für die konventionelle Infrastruktur in 18,23 EUR pro Person und Jahr.

Tabelle 5: Bewertung des Ressourcenverbrauchs von i.WET und der konventionellen Alternative anhand der entsprechenden Kosten (in EUR/EW/a)

Art der Kosten	Konventionell	i.WET
Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe	15,05	
... abzügl. Einsparungen f. reduzierte Wassernutzung in i.WET		11,66
Mehraufwand für Betrieb d. Grau- u. Regenwasseraufbereitung		+2,16
Energieeinsparung durch Wärmerückgewinnung aus Grauwasser		- 7,50
Kosten für Rohwasser	+3,19	+2,34
Betriebsmittelkosten, gesamt	18,24	8,66
Leistungsfähigkeit LF	50,0%	76,2%

Bewertung von i.WET

Die Ressourcenkosten der Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur im Fall des Einsatzes von i.WET werden ausgehend von den Ressourcenkosten der konventionellen Infrastruktur anhand folgender Zu- und Abschläge berechnet (vgl. auch Tabelle 5):

- Einsparung an Betriebsmitteln (insbes. Energie) für die reduzierte Inanspruchnahme von Trinkwasser und die Behandlung eines entsprechend geringeren Abwasservolumens,
- Zusätzlicher Einsatz von Energie (Strom) für den Betrieb der Grau- und Regenwasseraufbereitung und die Verteilung des daraus hergestellten Betriebswassers,
- Energieeinsparung durch die Wärmerückgewinnung aus Grauwasser,
- Geringere Kosten für das Rohwasser (entsprechend dem durchschnittlichen Entnahmentgelt),

Im Ergebnis werden für das i.WET-Szenario Gesamtressourcenkosten in Höhe von 8,66 EUR pro Person und Jahr ausgewiesen. Das sind 52% weniger als im konventionellen Szenario und hat zur Folge, dass im Vergleich zur konventionellen Infrastruktur (LF = 50%) die LF im i.WET-Szenario 76,2% beträgt.

3.1.8. Ressourcenrückgewinnung

Die Berechnung des Rückgewinnungs- bzw. Recyclinggrades erfolgt im Kontext der Wasserver- und Abwasserentsorgung für vier Stoffe: Wasser, die Nährstoffe Phosphor (P) und Stickstoff (N) sowie Kohlenstoff (C). Die Berechnung für Wasser wird durchgeführt, indem die Menge des zurückgewonnenen Wassers zum Verbrauch des Trinkwassers in der konventionellen Infrastruktur ins Verhältnis gesetzt wird. Bei mehreren Aufbereitungsschritten zählt nur die TW-Menge, die am Ende tatsächlich substituiert wird. Rückgewinnungsanteile

(in %) von P und N beziehen sich auf das Verhältnis von zurückgewonnenem zu im Abwasser (am Zulauf zur Behandlung) enthaltenem P bzw. N. Rückgewinnungsanteile (in %) von C entsprechen dem Anteil vom CSB im Zulauf. Die Energierückgewinnung wird hier nicht berücksichtigt, da sie schon beim Energieverbrauch (siehe Teilziel 3.1.7) eingerechnet wurde.

Der Wert eines bestimmten Rückgewinnungsgrades hängt davon ab, um welchen Rohstoff es sich handelt (d.h. wie viel Aufwand für seine Gewinnung getrieben werden musste) und welche Menge am Ende zurückgewonnen wird. Daher wird ein gewichteter Durchschnittswert aus allen Recyclingquoten (= Prozentzahlen) gebildet. Erfolgt eine Preis-Gewichtung anhand der relativen Mengen (z.B. 122 Liter Wasser, 60 g CSB, 11 g N und 2 g P pro Person und Tag) und der jeweiligen Preise, dann beträgt die Gewichtung, wie im vorliegenden Fall, $0,25\text{€} : 0,005\text{€} : 0,003\text{€} : 0,002\text{€} = 96\% : 2,0\% : 1,2\% : 0,8\%$.

Bewertung des konventionellen Systems

In der konventionellen TW-Ver- und AW-Entsorgung findet Rohstoffrückgewinnung nur im Rahmen der landwirtschaftlichen Nutzung des Klärschlammes statt. Da in Deutschland im Durchschnitt 30% des Klärschlammes landwirtschaftlich genutzt werden und N und P dabei zu Anteilen von 34 bzw. 20% pflanzenverfügbar sind (vgl. Bewertungsanleitung), betrügen die effektiven Rückgewinnungsraten in diesen Fällen 10,2 bzw. 6%, woraus LF-Werte von 10,2 bzw. 6% resultieren würden. Tatsächlich findet im Modellgebiet keine Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft statt. Daher betragen alle Rückgewinnungsraten und damit auch alle LF-Werte und ihr Durchschnitt 0%.

Bewertung von i.WET

Durch die Aufbereitung von Grau- und Regenwasser zu Betriebswasser reduziert sich die Inanspruchnahme von Trinkwasser in i.WET um 27%. Da der Anteil der Nährstoffe P und N im Grau- und Regenwasser niedrig ist, führt auch die Verwertung dieser Nährstoffe in der Energieallee nicht zu hohen Rückgewinnungsquoten. Sie betragen in beiden Fällen knapp 1%. Der im Grauwasser enthaltene Kohlenstoff wird schon bei der Aufbereitung größtenteils eliminiert und der Kanalisation zugeführt. Hier findet demzufolge keine Rückgewinnung statt. Werden die ermittelten Quoten (= LF-Werte) im oben angegebenen Verhältnis von 96 : 2 : 1,2 : 0,8 gewichtet und der Mittelwert gebildet, dann resultiert daraus ein Gesamt-LF-Wert von 26,2%.

3.1.9. Flächenverbrauch (Ver- und Entsorgungsanlagen)

In der Bewertungsanleitung wurde festgelegt, dass sich der Flächenverbrauch an der kommunalen Flächenbilanz (Katasterflächen) orientieren sollte, wobei diese nicht die eigentliche bauliche Versiegelung dokumentiert, sondern nur die baurechtliche Festsetzung als „Gebäu-

de- und Freifläche“ oder „Betriebsfläche“ für Ver- und Entsorgung (Schlüssel: GFVS, GFES, BFVS, BFES)² in den entsprechenden Planwerken als Indikator herangezogen. Diese Flächen stehen der Allgemeinheit nicht mehr als überplanbare Freiflächen zur Verfügung und sind baurechtlich somit „verbraucht“, auch wenn sie möglicherweise nicht vollständig versiegelt sind. Für die Bewertung wird dann der Quotient r_F gebildet, der den Flächenverbrauch der innovativen Infrastruktur zur konventionellen Variante (= Status quo) in Relation setzt. Folgende Transformationsfunktion kommt dabei zur Anwendung:

$r_F = 0$ (kein Flächenverbrauch) $\rightarrow$ LF = 100%;

$r_F = 1$ (Netto-Null-Verbrauch) $\rightarrow$ LF = 50% (= langfristige politische Zielsetzung);

dazwischen lineare Interpolation.

Da Kanäle häufig im öffentlichen Straßenraum liegen (baurechtlich: Verkehrsfläche), tauchen sie in der Flächenbilanz meist nicht auf und stellen keinen zusätzlichen Flächenverbrauch dar.

Bewertung der konventionellen Infrastruktur

Es ist unklar, wozu die Flächeninanspruchnahme der bestehenden (konventionelle) Infrastruktur ins Verhältnis gesetzt werden soll. Wird hier von vorneherein ein r_F -Wert von 1 angenommen, dann wird ihr ein LF-Wert von 50% zugeordnet.

Bewertung von i.WET

Die Flächeninanspruchnahme durch die Kläranlage (nur sie ist flächenrelevant) beträgt ca. 2 m² pro Einwohner. Flächenrelevant in i.WET ist die Energieallee, für die in der ersten Ausbaustufe 1 m² pro Einwohner veranschlagt wird. Dieser Wert ist den 2 m² hinzuzurechnen, da in der ersten Ausbaustufe i.WET die Kläranlage (und Kanalisation) nicht überflüssig werden lässt. Der resultierende r_F -Wert würde nach Interpolation der oben angegebenen Eckpunkte der Transformationsfunktion zu einem LF-Wert von 25% führen. Allerdings soll die Energieallee im Söggelquartier im Bereich der Straßenrandbepflanzung eingerichtet werden, auf einer Fläche also, die sowieso schon den Siedlungs- und Verkehrsflächen zugeordnet ist. Es tritt also gar keine Verschlechterung auf. Der resultierende LF-Wert beträgt also ebenfalls 50%.

² GFVS = Gebäude- und Freifläche zu Versorgungsanlagen; GFES = Gebäude- und Freifläche zu Entsorgungsanlagen; BFVS = Betriebsfläche Versorgungsanlagen; BFES = Betriebsfläche Entsorgungsanlagen

3.2. Sicherheitsrelevante Ziele

3.2.1. a) Hygiene (Keimzahl)

Die Implementierung von i.WET wirkt sich auf die Trinkwasserversorgung nur dadurch indirekt aus, dass durch das Grauwasserrecycling weniger Trinkwasser in Anspruch genommen wird und durch die entsprechend verringerte Strömungsgeschwindigkeit u. U. eine Verkeimung begünstigt werden könnte. Der daraus resultierende Unterschied in der Bewertung der Qualität des Trinkwassers mit und ohne i.WET sollte aber vergleichsweise gering sein.

Relevant dürfte dagegen die Hygiene als sicherheitsrelevantes Ziel für das Betriebswasser sein, welches im Zuge des Grauwasserrecyclings und der Regenwasseraufbereitung in i.WET für die Toilettenspülung bereit gestellt wird. Wir betrachten in diesem Zusammenhang vor allem das Grauwasserrecycling, da hier die Keimbelastung ggf. deutlich höher ist als beim Regenwasser.

Bewertung von i.WET

Wie Li et al. (2009) feststellen, können in leichtem Grauwasser, wie es in i.WET aufbereitet wird, bis zu 340.000 kbE fäkale Coliforme pro 100 ml enthalten sein. Mittels Membranfiltration, wie sie auch in den in i.WET eingesetzten MBR-Anlagen zum Einsatz kommt, kann diese Keimzahl um 4 bis 6 Zehnerpotenzen reduziert werden. Folglich werden im Ablauf von zur Grauwasserbehandlung verwendeten MBR-Anlagen weniger als 100 KbE/100 ml fäkale Coliforme gemessen. Für die Toilettenspülung empfiehlt Nolde (1999) eine Anzahl von fäkalen Coliformen von <10/ml, d.h. <1000/100 ml als Standard. Dieser Standard entspricht ungefähr der durch die EU Badegewässer-Richtlinie für Badegewässer vorgeschriebenen maximalen Konzentration von E. coli von 900 KbE/100 ml. Es kann also festgestellt werden, dass das Betriebswasser in i.WET den Grenzwert um mindestens den Faktor 9 unterschreitet. Da das Betriebswasser im Modellgebiet Lünen nur für die Toilettenspülung verwendet wird, für die Bewertung aber (im Gegensatz zum Trinkwasser) nur relevant ist, dass der Grenzwert überhaupt eingehalten wird, ist i.WET hier ein LF-Wert von 100% zuzuordnen.³

Bewertung des konventionellen Systems

Das konventionelle System stellt kein Betriebswasser zur Verfügung. Stattdessen wird für die Spülung der Toiletten und ggf. auch für die Bewässerung von Außenanlagen Trinkwasser verwendet, welches 0 KbE/100ml coliforme aufweisen muss und daher im vorliegenden Kontext mit LF = 100% bewertet wird.

³ Dieser Bewertung liegt eine Transformationskurve mit einer Sprungstelle zugrunde, die bei Keimzahlen bis zum Grenzwert 100%, oberhalb des Grenzwertes hingegen 0% LF zuweist.

Was die Hygiene des Trinkwassers in Lünen angeht, konnte anhand von Modellrechnungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Trinkwassernetz von Lünen festgestellt werden, dass es im Einzugsbereich von 10% der Wohnungen wahrscheinlich zu Stagnation (d.h. Strömungsgeschwindigkeit $< 0,005 \text{ m/s}$) kommt und dass dieser Wert durch den aufgrund von i.WET verringerten TW-Verbrauch auf 13% ansteigt. Ginge man davon aus, dass Stagnation von TW gleichbedeutend mit einer Verkeimung im Bereich des Grenzwertes ist, betrüge die LF im konventionellen System 90%, da 90% des TW mit 100% (keine Verkeimung) und 10% mit 0% LF (Verkeimung $\geq$ Grenzwert) bewertet würden. Im Vergleich und analog dazu würde das TW im i.WET-Fall mit 87% LF bewertet, was für die Wasserversorgung insgesamt (d.h. unter Berücksichtigung der jeweiligen Anteile von Trink- und Betriebswasser) ebenfalls auf einen LF-Wert von $(0,73 \cdot 0,87 + 0,27 \cdot 1,0 =) 90\%$ hinausliefe. Die Berücksichtigung der Stagnation würde also bei unveränderter Differenz in beiden Fällen zu einer schlechteren Bewertung führen. Da es außerdem von einer Reihe zusätzlicher Faktoren abhängt, ob Stagnation tatsächlich zu Verkeimung führt, könnte als Argument dafür dienen, in beiden Fällen dennoch LF-Werte von 100% anzusetzen. Andererseits sind Änderungen in der Struktur des TW-Netzes denkbar, die Stagnation gänzlich vermeiden, und damit sich diese Verbesserungen dann in einer besseren Bewertung niederschlagen können, werden in beiden Fällen die niedrigeren LF-Werte von 90% angesetzt.

3.2.1 b) Geruch/Trübung

Geruch und Trübung sind im Trinkwasserkontext sicherheitsrelevante Indikatoren, da sie zwar selbst nicht notwendigerweise einen Schaden hervorrufen, aber auf Umstände hinweisen, die einen (Gesundheits-)Schaden (z.B. durch verstärkte Verkeimung) begünstigen können. Zu diesen Umständen zählt die Stagnation von TW in den entsprechenden Leitungen.

Da das im Modellgebiet Lünen bereitgestellte Betriebswasser nicht für den menschlichen Genuss (auch nicht Duschen oder Waschmaschine), sondern nur für die Toilettenspülung bestimmt ist, haben Geruch und Trübung dafür als Sicherheitsindikatoren keine Relevanz. Deshalb bezieht sich dieser Teil der Bewertung ausschließlich auf den Teil der Wasserversorgung, für den die Sicherheitsrelevanz vorliegt: das Trinkwasser. Obwohl auch in diesem Fall Stagnation nicht zwangsläufig mit Geruch und Trübung gleichzusetzen ist, wird wie im Abschnitt 3.2.1 a) die Stagnationswahrscheinlichkeit als Proxi für die Bewertung angesehen. Für die konventionelle Wasserversorgung in Lünen resultiert sie in einem LF-Wert von 90%.

Durch die Implementierung von i.WET reduziert sich der Trinkwasserverbrauch um nahezu 30%. Durch die daraus resultierende Herabsetzung der Fließgeschwindigkeit steigt die Stagnationswahrscheinlichkeit auf 13%, woraus ein LF-Wert von 87% resultiert.

Insbesondere der Geruch könnte grundsätzlich – jenseits der Sicherheitsrelevanz – auch bei Verwendung in der Toilette sehr wohl eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens verursachen; dieser wird aber durch die Bewertung der Akzeptanz (4.3) im Rahmen der sozialen Ziele Rechnung getragen.

3.3. Ökonomische Ziele

3.3.1. Aufwendungen: Investitions- und Nettobetriebskosten

Die Ermittlung der Kosten der alternativen Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastrukturen im Modellgebiet erfolgt auf Basis eines Life Cycle Costing, d.h. es kommen alle Kosten (und ggf. Erlöse) zum Ansatz, die im Verlaufe der Nutzungsdauer anfallen. Um die verschiedenen Infrastrukturen vergleichen zu können, werden alle über einen einheitlichen Zeitraum von 80 Jahren betrachtet. Wenn die Nutzungsdauer von Infrastrukturkomponenten diesen Zeitraum nicht abdeckt, werden auch (u.U. mehrfache) Ersatzinvestitionen berücksichtigt. Insgesamt werden folgende Kostenkategorien berücksichtigt:

- **Investitionskosten:** Kosten für Komponenten der Grauwasser-Recycling-Anlage, die baulichen Komponenten der Energie-Allee, die Verrohrung in den Gebäuden und im Außenbereich (für den Grauwasser- und Brauchwassertransport) sowie die entsprechenden Bau- und Installationskosten.
- **Reinvestitionskosten:** Kosten für die Komponenten der Grauwasser-Recycling-Anlage, deren Nutzungsdauer den Betrachtungszeitraum unterschreiten, und pauschal festgelegte Reinvestitionskosten für die Energie-Allee.
- **Betriebskosten:** Stromkosten (für die Wasseraufbereitung, die Wärmerückgewinnung und das Verteilen des Wassers in den Gebäuden und im Außenbereich), Kosten für Betriebsmittel (z. B. zur Membranreinigung), Erntearbeiten und Pflege der Kurzumtriebsplantage, Wartungs- und Instandhaltungskosten.
- **Einsparungen/Erlöse:** Eingesparte Energiekosten (durch Wärmerückgewinnung) oder Trinkwasserkosten (durch Grau- bzw. Regenwassernutzung) sowie Erlöse aus dem Verkauf des Energieholzes werden mit den Betriebskosten verrechnet.

Um alle Kostenelemente miteinander vergleichen zu können, wird die dynamische Kostenrechnung angewendet, d.h. es werden alle Ein- und Auszahlungen von dem Jahr, in dem sie getätigt wurden, auf das Basisjahr ($t=0$) abdiskontiert und aggregiert. Auf Basis dieses Kapitalwertes werden dann unter Zugrundelegung der Nutzungsdauer von 80 Jahren und eines Zinssatzes von 1,5% Annuitäten ermittelt, die die durchschnittliche jährliche Kostenbelastung widerspiegeln.

Da es sich bei i.WET um ein System zur Abwasserbehandlung inklusive der Bereitstellung von Betriebswasser handelt, wird die Trinkwasserversorgung zumindest aus technischer Sicht nicht tangiert. Daher wird die (Netto-)Kostenberechnung nur für i.WET (d.h. für das Grauwasserrecycling inklusive Wärmerückgewinnung und die Energieallee inkl. Grauwassergarten) sowie die Sanierung des vorhandenen Mischwasserkanals durchgeführt, durch den auch weiterhin das Schwarzwasser der Kläranlage zugeführt werden muss. In der hier betrachteten ersten Ausbaustufe bleibt die Abwasserbehandlung in der Kläranlage unberücksichtigt, da daran auch in der innovativen Variante keine Veränderungen vorgenommen werden.

Im Falle der konventionellen Referenzinfrastruktur umfasst die Kostenrechnung die (notwendige) Sanierung des Mischwasserkanals, über den zukünftig das Regenwasser entsorgt würde, und den zusätzlichen Bau einer Vakuumkanalisation, über den das Schmutzwasser der Kläranlage zugeführt würde.

Bewertung von i.WET

Für die Bewertung von i.WET werden folgende Kosten/Erlöse berücksichtigt:

- Beschaffung und Installation der Grauwasseraufbereitungsanlage inkl. Betriebskosten;
- Beschaffung und Einbau der zusätzlichen Verrohrung, mit der das Betriebswasser seiner Verwendung in den Toiletten zugeführt wird;
- Beschaffung und Anschluss des Wärmetauschers zur Wärmerückgewinnung aus dem Grauwasser inkl. Betriebskosten und abzüglich des Erlöses für die eingesparte Wärmeenergie;
- Einrichtung, Anschluss und Unterhalt der Energieallee abzüglich möglicher Erlöse aus dem Verkauf des abgeernteten Kurzumtriebsholzes und des Bewässerungswassers;
- Sanierung und Betrieb des Mischwasserkanals anteilig entsprechend der einwohnerspezifischen Kanallänge für die angeschlossenen Einwohner.

Insgesamt lassen sich für die Einrichtung und den Betrieb von i.WET und die Sanierung des Mischwasserkanals in der ersten Ausbaustufe jährliche Durchschnittskosten (= Annuitäten) in Höhe von 84,16 EUR pro Einwohner ermitteln. Hinzu gerechnet werden als Kosten für die Trinkwasserversorgung die in der Bewertungsanleitung aufgeführten Kosten ($91,60 \text{ EUR}/(E \cdot a)$) abzüglich eines Anteils von 20% an den eingesparten Trinkwasserkosten ($4,90 \text{ EUR}/(E \cdot a)$). Es werden nur 20% der Kosten des eingesparten Wassers abgezogen, weil sich die Kosten für die Wasserversorger nur um diesen variablen Kostenanteil verringern; der fixe Kostenanteil bleibt unverändert. Hinzu gerechnet werden müssen außerdem die Kosten für die Abwasserbehandlung in der Kläranlage, die für das konventionelle und das innovative System in der ersten Ausbauphase in gleichem Umfang anfallen. Sie betragen ausgehend von Investitionskostenzahlen von Horstmeyer et al. (2014) und Betriebskostenzahlen von Günthert und Reicherter (2001) ungefähr 30 EUR pro Einwohner und Jahr. Insgesamt ergeben sich damit Kosten in Höhe von 170,86 EUR pro Einwohner und Jahr für die gesamte Wasser- und Abwasserinfrastruktur.⁴ Angesichts von Referenzkosten in Höhe von 184,99 EUR pro Einwohner (siehe Bewertungsanleitung) und Jahr ergibt sich daraus ein LF-Wert von 45,7% (vgl. Tabelle 6).

⁴ Tatsächlich sind die Gesamtkosten höher, da die Kosten der Kläranlage und Overheadkosten der Ver- bzw. Entsorgungsunternehmen nicht berücksichtigt sind. Da dies aber für die innovative und die konventionelle Infrastruktur in gleicher Weise zutrifft, bleibt die Differenz zwischen beiden (die für die Bewertung relevant ist) unverändert.

Tabelle 6: Einwohnerspezifische, jährliche Kosten von innovativer und konventioneller Infrastruktur und daraus resultierende Bewertung

	i.WET	konventionell
Kosten d. Abwasserableitung (EUR/(E*a))	84,16	93,10
Kosten der Abwasserbehandlung (EUR/(E*a))	30,00	30,00
Kosten der TW-Versorgung (EUR/(E*a))	86,70	91,60
Gesamtkosten (EUR/(E*a))	200,86	214,70
Referenzkosten (EUR/(E*a)) [LF = 50%]	184,99	184,99
LF-Wert (%)	45,7	42,0

Bewertung des konventionellen Systems

Das Vorgehen bei der Ermittlung der Kosten der konventionellen Infrastrukturalternative erfolgt analog zu i.WET, wobei folgende Komponenten berücksichtigt werden:

- Sanierung und Betrieb des Mischwasserkanals anteilig entsprechend der einwohnerspezifischen Kanallänge für die angeschlossenen Einwohner und
- Bau und Betrieb des Schmutzwasserkanals anteilig entsprechend der einwohnerspezifischen Kanallänge für die angeschlossenen Einwohner.

Die Annuität beträgt hier 93,10 EUR pro Einwohner und Jahr. Nach Addition der Kosten für die Trinkwasserversorgung (ohne Gutschrift: 91,60 EUR/(E*a)) resultieren daraus Gesamtkosten in Höhe von 184,70 EUR pro Einwohner und Jahr und ein LF-Wert von 42%.

3.3.2. Flexibilität/Systemwechselbereitschaft

Zur Bewertung der Flexibilität bzw. Systemwechselbereitschaft werden zwei Indikatoren betrachtet:

- (1) Der **abzuschreibende Restbuchwert** (aRWB) bestimmt, welcher Wert bei Ersatz der vorliegenden (konventionellen) Infrastruktur durch eine (z.B. innovativere) Alternative obsolet würde und abgeschrieben werden müsste und damit Kosten in entsprechendem Umfang verursachen würde. Daher ist damit zu rechnen, dass die im Falle eines hohen Restbuchwerts anfallenden hohen Kosten die Bereitschaft zum Wechsel substantiell senken.
- (2) Die **bilanzielle Nutzungsdauer** (bND) der neu zu errichtenden Infrastruktur beeinflusst die Möglichkeit zu einem Wechsel zu einem späteren Zeitpunkt, wenn dies aufgrund jetzt noch nicht absehbarer Veränderungen geboten erscheint. Je länger die Nutzungsdauer (der neu errichteten Infrastruktur), desto höher zu jedem Zeitpunkt der Restbuchwert und damit die Kosten des Wechsels zu einer anderen Alternative.

Beide Faktoren wirken kumulativ.

Bewertung von i.WET

Für die Ermittlung der Wechselbereitschaft ist im Falle von i.WET der aRWB des Teils der bestehenden, konventionellen Infrastruktur maßgeblich, der ggf. durch i.WET ersetzt und damit obsolet würde. Da der vorhandene Mischwasserkanal nach Sanierung weiter verwendet wird, ist der aRWB im konkreten Fall gleich Null. Da die Wechselbereitschaft aus dieser Perspektive als in keiner Weise eingeschränkt ist, ist diesem Aspekt der LF-Wert von 1 zuzuordnen.

Die bND von i.WET wurde so ermittelt, dass die Nutzungsdauer für die wichtigsten Komponenten bestimmt und mit ihren jeweiligen Kosten gewichtet aggregiert wurde. Am stärksten schlägt mit einem Kostenanteil von 72% und einer bND von 80 Jahren die Sanierung des Mischabwasserkanals zu Buche.⁵ i.WET hingegen weist bei einem Kostenanteil von 28% eine kostengewichtete bND von rund 27 Jahren auf, woraus insgesamt eine gewichtete, durchschnittliche bND für die alternative Infrastruktur von 65 Jahren resultiert. Für die Bewertung ergibt sich daraus ein LF-Wert von 18,5%.⁶

Bewertung des konventionellen Systems

Für die vorhandene, konventionelle Infrastruktur ist der aRWB irrelevant, da sie schon existiert und keine andere Infrastruktur ersetzt. Da dadurch die Wechselbereitschaft in keiner Weise negativ beeinflusst wird (und ein Wechsel de facto auch gar nicht erforderlich ist), gilt ein LF-Wert von 1.

Da es sich beim konventionellen System ausschließlich um Kanäle handelt, deren bND mit 80 Jahren angesetzt wurde, beträgt der LF-Wert 0.

Damit ergibt sich für die Flexibilität und Systemwechselbereitschaft das in Tabelle 7 dargestellte Gesamtbild.

⁵ Im konkreten Fall wird im Modellgebiet in Lünen auch im Falle von i.WET die vorhandene Mischkanalisation weiterverwendet. Obwohl sie sanierungsbedürftig ist, wird sie nicht grundsaniert, sondern mit erhöhten Betriebskosten weiterbetrieben, damit vermieden wird, dass sich hinsichtlich der nächsten, zweiten Phase des Umbaus (mit Vakuumkanalisation und anaerober Behandlung auf der Kläranlage) ein erhöhter Restbuchwert ergibt. Obwohl sich daraus auch für die 1. Phase eine höhere Flexibilität ergibt, wird die bND im angegebenen Umfang und mit der angegebenen Kostengewichtung betrachtet und bewertet.

⁶ Eine bilanzielle Nutzungsdauer bND von 0 Jahren ergibt 100%, eine bND von 80 Jahren 0% LF, dazwischen erfolgt lineare Interpolation.

Tabelle 7: Bewertung der Flexibilität und Systemwechselbereitschaft von i.WET und der konventionellen Infrastruktur

	i.WET	Konventionell
Abzuschreibender Restbuchwert (%)	0	Irrelevant (0)
LF-Wert für Wechselbereitschaft (%)	100	100
Bilanzielle Nutzungsdauer (a)	65	80
LF-Wert für Flexibilität (%)	18,5	0
LF-Wert für Flexibilität und Wechselbereitschaft (%)	59,3	50

3.4. Soziale Ziele

3.4.1. Bequemlichkeit (Servicequalität)

Zur Bestimmung der Bequemlichkeit der Bereitstellung von Wasserver- und Abwasserentsorgungsdienstleistungen ist vorgesehen, den Zeitaufwand der Nutzer für die Infrastruktur als Maß für die Zufriedenheit anzunehmen. Versorgungseinschränkungen, die ebenfalls Einfluss auf die Zufriedenheit haben, werden in 5.3 behandelt.

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Der Zeitaufwand für die Nutzer ist im konventionellen System niedrig; er beschränkt sich im Wesentlichen auf das Ablesen der Zähler und die Kontrolle und Zahlung der Rechnung. Nur in seltenen Fällen ist der Nutzer selbst von Eingriffen von Handwerkern betroffen. Daher kann die Zufriedenheit der Nutzer grundsätzlich als hoch eingestuft werden.

Wird i.WET, wie vorgesehen, vom Bauverein zu Lünen betrieben, dann ändert sich für die Nutzer gegenüber der aktuellen Vorgehensweise (im konventionellen System) nichts. Der Bauverein betreibt die Anlage und reicht die entstehenden Kosten wie bei der konventionellen Abwasserentsorgung per Nebenkostenabrechnung an die Bewohner der Wohnungen weiter. Von eventuell notwendigen, veränderten Interventionen in der Anlage sind die Nutzer nicht betroffen.

Da für die Bewertung angenommen wird, dass der durchschnittlichen Aufwand für die konventionelle Wasserver- und Abwasserentsorgung gering ist und daher mit LF = 90% bewertet wird, beträgt der LF-Wert für i.WET mit seinem etwa gleich hohen Aufwand ebenfalls 90%.

3.4.2. Wirtschaftliche Belastung (Bezahlbarkeit)

Grundsätzlich wird die Wirtschaftlichkeit, d.h. die Kosten von innovativer und konventioneller Infrastruktur in Teilziel 3.1 betrachtet und bewertet. Hier geht es darum, inwiefern für die einzelnen Nutzer besondere Belastungen auftreten, also z.B. hohe Einmalzahlungen (bspw. für private Anschaffung einer Kleinkläranlage, vgl. aber auch Baukostenzuschuss bei zentraler

Wasserver- und AW-Entsorgung) und wie diese ggf. durch ein geeignetes Geschäftsmodell vermieden werden können.

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Aus den in Abschnitt 3.4.1, Bequemlichkeit (Servicequalität), genannten Gründen sind die Nutzer (= Mieter) vom Einsatz von i.WET nicht betroffen – für sie bleibt alles beim Alten (= konventionelle Infrastruktur). Es kommt für sie weder zu Vorab-Investitionen noch zu höheren periodischen Fixkosten. Auch die laufenden Kosten der Abwasserentsorgung werden sich voraussichtlich nicht ändern.

Wegen der Trinkwasser- (aufgrund der Betriebswassernutzung) und Energieeinsparung (aufgrund der Wärmerückgewinnung) sollten sich für die Nutzer zumindest anfänglich deutlichere Kosteneinsparungen ergeben als es aus den Wirtschaftlichkeitsberechnungen ersichtlich ist, weil die Nutzer das Entgelt für das eingesparte Trinkwasser in vollem Umfang einsparen, während davon beim Wasserversorger nur 20% gutgeschrieben wurden. Ursache dafür ist, dass der Wasserversorger Kosten nur in Höhe der variablen Kosten einspart. Längerfristig, wenn i.WET sich flächendeckend durchsetzen würde, führt dieser Unterschied dazu, dass die Trinkwasserentgelte angepasst werden müssen, so dass auch der Nutzer nur noch 20% der Einsparungen realisiert.

Im Hinblick auf die Bewertung führt die Einsparung von 27% des Trinkwassers für die Nutzer zu einer ebenso starken Reduktion des Entgeltes, was unter Berücksichtigung des Anteils der Wasserversorgung von 43% an den Gesamtkosten der Wasserver- und Abwasserentsorgung (vgl. Tabelle 6) zu einer Kostenentlastung um 12% führt. Im Vergleich zum LF-Wert von 50% für die konventionelle Infrastruktur schlägt dies für i.WET mit einem Bonus von 6%-Punkten zu Buche, womit sich für i.WET ein LF-Wert von 56% ergibt.

3.4.3. Belästigung der Nutzer oder Dritter im Betrieb

Als mögliche Belastungsquellen kommen grundsätzlich Lärm, Geruch und Schnaken in Frage. Auch die Ästhetik von Ver- oder Entsorgungsanlagen könnte eine Rolle spielen. Maßgeblich ist die Häufigkeit und Dauer des Auftretens einer (oder mehrerer) Belastung(en), die (empfundene) Intensität und die Anzahl der Betroffenen.

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Die konventionelle Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur wird, von den unmittelbaren Anliegern von Kläranlagen abgesehen, im Allgemeinen als frei von Belästigungen empfunden. Weil der Idealzustand nicht ganz erreicht wird, wird ihr daher ein LF-Wert von 90% zugeordnet.

i.WET ist in der ersten Ausbaustufe auf die konventionelle Abwasserentsorgung einschließlich Kläranlage angewiesen. Daher sind auch hier 90% als Ausgangswert anzusetzen. Die Grau- und Regenwasseraufbereitung befindet sich im Keller der Gebäude, so dass davon

keine Belästigungen ausgehen sollten. Es besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass die Energieallee unter ungünstigen Umständen Gerüche absondert. Andererseits hat die Energieallee als "grüne Lunge" innerhalb des Wohngebietes auch einen besonderen ästhetischen Wert. Dieser kommt aber nur dann zum Tragen, wenn es vorher in diesem Bereich der Stadt keine Bäume gab. Gewichtet man beide Wirkungen, die negative Geruchs- und die positive ästhetische Wirkung vom Betrage her gleich, dann bleibt es für i.WET bei $LF = 90\%$.

3.5. Technische Ziele

3.5.1. Anfälligkeit für Prozessstörungen (im Normalbetrieb)

Grundlegende Frage: Wie groß ist im Normalbetrieb die Wahrscheinlichkeit, dass es zu Störungen kommt? Zwei Aspekte sollten dabei unterschieden werden: erwartete Schadensanfälligkeit und Knowhow-Verfügbarkeit. Was die erwartete Schadensanfälligkeit angeht, können folgende Punkte relevant sein:

- Das Vorhandensein gewisser **Kapazitätsreserven** in TW-Ver- und AW-Entsorgung eröffnet die Möglichkeit Nutzungsschwankungen besser auszugleichen. Der Bonus für eine verringerte Auslastung muss aber begrenzt sein, damit besonders schlechte Auslastungsgrade nicht generell belohnt werden.
- Insbesondere TW: Redundanz des Netzes (z.B. vermaschte Netze) sind von Natur aus zuverlässiger als verzweigte, weil sie für jeden Nutzer mehrere alternative Zugänge bereithalten.
- Schäden können, wie im Kanalnetz, die Regel sein; es stellt sich daher mit Blick auf die Schadensanfälligkeit zusätzlich die Frage nach dem möglichen **Schadenspotenzial**, d.h., wie häufig Schäden auftreten, welche Auswirkungen sie haben und mit welchem Aufwand ihre Beseitigung verbunden ist.
- Beim Schadensausmaß spielt die Anzahl der Betroffenen eine große Rolle; diese ist bei dezentralen Anlagen generell kleiner.
- **Knowhow-Verfügbarkeit** ist entscheidend dafür, dass die Ursache von Störungen schnell identifiziert und die Störungen beseitigt werden können. Das Fehlen entsprechenden Knowhows deutet auf eine höhere Störungshäufigkeit (hauptsächlich im hochtechnisierten Bereich des AW) hin. Ursachen dafür könnten sein:
 - Eine neue Technologie ist noch nicht weit verbreitet und es fehlt ein gut ausgebautes Kundendienstnetz (auch (zertifizierte) Installateure, die sich mit der neuen Technologie auskennen);
 - Infrastrukturelemente (z.B. Kleinkläranlagen) werden von den Nutzern betrieben, denen das Knowhow zur Erkennung (und Beseitigung) von Störungen fehlt. Hier kann ein professionelles Betreibermodell Abhilfe schaffen.

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Reserven/Redundanz: Gegenüber dem konventionellen System sinkt in i.WET aufgrund der Grau- und Regenwasseraufbereitung die Inanspruchnahme von Trinkwasser (ebenso wie die

Abgabe von Schmutzwasser in den Kanal) um 27%. Dabei werden dort im gleichen Umfang zusätzliche Kapazitätsreserven frei. Um Ineffizienzen zu vermeiden, werden davon maximal 20% anerkannt. Darüber hinaus kann mit Hilfe des Betriebswassers in i.WET ein Teil der häuslichen Wasserversorgung (ca. 30%, betrifft Toilettenspülung und Gartenbewässerung) unabhängig vom Trinkwassernetz erfolgen (Redundanz); dafür kann ein zusätzlicher Bonus von 10% gewährt werden. Von diesen Unterschieden abgesehen greifen die Nutzer von i.WET auf die gleiche Trinkwasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastruktur zurück wie die Nutzer im konventionellen System. Wird das konventionelle System mit einem LF-Wert von 50% angesetzt, dann ergeben sich für i.WET 80%.

Schadenspotenzial: Grau- und Regenwasseraufbereitung sind ebenso wie Pflanzenkläranlagen relativ etablierte Technologien; innovativ ist im Kontext von i.WET vor allem das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten. Die Technologien sind aufgrund ihrer Einfachheit auch relativ robust. Selbst wenn die Schadensanfälligkeit bezogen auf die bei weiterer Verbreitung größere Zahl von Anlagen absolut gesehen etwas größer sein sollte als bei den konventionellen Infrastrukturen, so kann mit folgenden Argumenten dagegen gehalten werden: erstens ist die Anzahl der jeweils betroffenen Personen gering, so dass pro Person nicht mehr Schäden auftreten dürften als im konventionellen System. Zweitens kann ein Ausfall der Betriebswasserbereitstellung jederzeit mit Hilfe von Trinkwasser überbrückt werden. Das heißt: die negativen Wirkungen eines Schadens sind noch niedriger als im konventionellen System. Wird auch hier das konventionelle System mit einem LF-Wert von 50% angesetzt, dann erscheinen für i.WET 60% plausibel.

Knowhow-Verfügbarkeit: Wie bereits erwähnt, stellen die i.WET-Technologiekomponenten (Grau- und Regenwasseraufbereitung sowie Pflanzenkläranlagen) relativ etablierte Technologien dar. Ob sie in ihrer Zuverlässigkeit an das konventionelle System heranreichen, hängt entscheidend davon ab, ob der technische Betreiber über das notwendige Knowhow verfügt. In Lünen soll der technische Betrieb durch die SAL durchgeführt werden, die die mit der Abwasserbehandlung große Erfahrung besitzt. Trotzdem gilt, dass auch die SAL mit den i.WET-Komponenten weniger Erfahrung besitzt als mit dem konventionellen System. Dafür erscheint ein LF-Abschlag von 20% gerechtfertigt. Das ergibt im Vergleich mit den 80% der konventionellen Infrastruktur einen LF-Wert von 60% für i.WET.

3.5.2. Auswirkungen eines Versagenszustandes

Im Falle eines Versagens der Abwasserbehandlung gelangt Schmutzwasser ungeklärt in die Umwelt. Als Indikator für dieses Versagen kann die dadurch in die Gewässer eingeleitete CSB-Fracht angesehen werden. Natürlich gelangen auch andere Stoffe wie z.B. die Nährstoffe N und P in die Umwelt, aber der maximal zulässige CSB-Wert ist für alle Anlagen gesetzlich festgelegt und weist daher die beste Datenverfügbarkeit auf. Die Wirkung des unge-

klären Abwassers hängt außerdem davon ab, wie empfindlich das empfangende Gewässer ist (z.B. Wasserschutzgebiet, Badegewässer, Gewässer mit geringer Wasserführung).⁷

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Fällt die dezentrale Grauwasseraufbereitung in i.WET aus, dann sind wegen des geringen CSB-Gehaltes (10% der gesamten CSB-Fracht eines Haushaltes) und der nachgeschalteten Energieallee keine signifikanten Auswirkungen auf die Natur und die menschliche Gesundheit zu erwarten. Geringe CSB-Frachten, die die Energieallee eventuell passieren könnten, würden am Ende wieder der konventionellen Ab- bzw. Schmutzwasserkanalisation zugeführt.

Versagt nicht die dezentrale Grauwasseraufbereitung, sondern die zentrale Abwasserbehandlung, dann wird die durch Letztere freigesetzte CSB-Fracht durch Erstere immerhin um 10% reduziert. Der ursprünglich vorgesehene Quantifizierungsansatz, wonach die CSB-Fracht, die im Versagenszustand in den Vorfluter gelangt, zum mittleren Niedrigwasserabfluss (MNQ) des Vorfluters ins Verhältnis gesetzt und berechnet wird, um wie viele Prozent dabei ein Schwellenwert (z.B. die maximal zulässige CSB-Konzentration im Ablauf einer großen Kläranlage: 75 mg/l) überschritten wird, kann in Ermangelung der erforderlichen Zahlen nicht umgesetzt werden. Es kann aber unabhängig von den konkreten Zahlen zu Kläranlagenablauf und Niedrigwasserabfluss gezeigt werden, dass sich im Versagensfall die 10%-Reduktion der CSB-Fracht im Vorfluter für CSB-Konzentrationen, die nicht weit über den Schwellenwert hinausgehen, in einer annähernd so großen Reduktion des Frachtanteils niederschlägt, der über den Schwellenwert hinausgeht. Daher erscheint es gerechtfertigt, für i.WET einen um 10% höheren LF-Wert zu veranschlagen als für das konventionelle System. Wenn bei einer geringfügigen Überschreitung des Schwellenwertes (z.B. um 20%) der Frachtanteil, der über dem Schwellenwert läge, für das konventionelle System 16,7% und die LF somit 83,3% betrüge, dann würde der durch i.WET verminderte Frachtanteil bei 7% und die LF bei 93% liegen. Würde hingegen der Schwellenwert durch das Versagen des konventionellen Systems schon nicht überschritten, dann wäre der Frachtanteil der Überschreitung in beiden Fällen (konventionell und i.WET) gleich 0 und der LF-Wert in beiden Fällen 100%. Für die Bewertung erscheint der erste Ansatz relevant, da die Verwendung des Ergebnisses des zweiten Ansatzes implizieren würde, dass durch das Versagen überhaupt kein Schaden entsteht.

⁷ Bei Versagen der Trinkwasserversorgung wird letztere eingestellt. Stattdessen erfolgt dann die Versorgung mittels Flaschen oder Tankwagen. Direkte Auswirkungen auf die Umwelt oder die menschliche Gesundheit sind daher nicht zu erwarten. Ähnliches gilt für Betriebswasser, wobei hier, soweit möglich, ein Ersatz durch Trinkwasser stattfinden würde. Der Indikator ist daher nur für Abwasser relevant.

3.5.3. Bereitstellung von Löschwasser

Die Frage, die sich hier stellt, ist, ob die Löschwasserversorgung in der neuen, innovativen wie auch in der konventionellen Infrastruktur auch dann noch sicher gestellt ist, wenn die Trinkwasser- oder ggf. Betriebswasserversorgung (ggf. auch Energieversorgung) gestört ist. Ein solcher Notfall liegt nach Mutschmann und Stimmelmayer (2007) vor, wenn eine oder mehrere Störungen auftreten, die nicht unmittelbar behoben werden können und die im betroffenen Versorgungsgebiet den Übergang vom Normalbetrieb zu einer geplanten Notversorgung erfordern. Für die Bewertung kommt ein System von Zu- und Abschlägen zum Einsatz, welches auf einen Durchschnitts-LF-Wert von 50% Bezug nimmt:

- Fehlende Redundanz der Wasserquelle: -20% LF
- Fehlende Redundanz des Leitungsnetzes (z.B. verzweigtes Netz): -10% LF
- Löschwassernetz im Flachland/ohne Gefälle: -10% LF
- Redundanz des Leitungsnetzes (z.B. vermaschtes Netz): +10% LF
- Notstromversorgung für Wasserversorgung: +20%
- Netzentkoppelte Löschwasserbereitstellung (Teiche, Behälter): +40%LF

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Für die Bewertung von i.WET ist die Bereitstellung von Löschwasser irrelevant, da i.WET dazu keinen Beitrag leistet. Stattdessen wird dafür in beiden Fällen, dem i.WET-Fall und dem Referenzfall, auf die konventionelle Infrastruktur zurückgegriffen. Da es sich in Lünen auch im aktuellen Zustand um ein größtenteils vermaschtes Trinkwassernetz mit Notstromversorgung handelt, welches Modellrechnungen zufolge an jedem Ort pro Stunde nachweislich mindestens 96 m³ Löschwasser bereitstellt, kommt als LF-Wert in beiden Fällen 100% zum Ansatz.

3.5.4. Flexibilität bzgl. sich ändernder Rahmenbedingungen

Dieses Bewertungskriterium zielt darauf ab, ob und wie sich innerhalb der bestehenden Kapazität durch Auslastungs- oder bauliche Änderungen (Zu- oder Rückbau) Anpassungen an sich verändernde Rahmenbedingungen vornehmen lassen. Besteht bspw. ein modularer oder dezentraler Aufbau, dann dürfte es leichter sein, kapazitative Anpassungen vorzunehmen. Mögliche fallspezifische, räumliche Beschränkungen (z.B. kein Platz für einen weiteren Ausbau der vorhandenen zentralen Kläranlage) sind hier ebenfalls zu berücksichtigen. Die wirtschaftlich relevante Frage, ob und wie die ggf. zurückzubauenden Komponenten abzuschreiben sind, wird in Kapitel 3.3.2 behandelt.

Hinsichtlich der Bewertung bedeuten 0% und 100% LF in diesem Fall keine bzw. vollständige Anpassungsfähigkeit. Mögliche Herangehensweise: Aufteilung der 100% auf die relevanten Komponenten des Systems, wobei wichtigeren (Schlüssel-)Komponenten (z.B. Leitungsnetz) ein höherer Anteil zuzuweisen wäre. Für jede Komponente erfolgt dann die Beurtei-

lung, ob leicht anpassbar ist ($\rightarrow$ voller %-Anteil), gar nicht anpassbar ($\rightarrow$ 0%) oder dazwischen liegt. Abschließend werden alle %-Zahlen aufsummiert.

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Ein Großteil der konventionellen Wasserver- und Abwasserentsorgung basiert auf langlebigen (> 80 Jahre) Verteilungsnetzen bzw. Kanalsystemen, die vor allem im Bestand nur mit hohem Aufwand erweitert und im Wesentlichen nur mit substanziellen Abschreibungen reduziert werden können. Besser sieht es bei zentralen Anlagen zur Aufbereitung des Rohwassers oder zentralen Kläranlagen aus, die meist in mehrere Prozessstraßen aufgeteilt sind, um auch während des Regelbetriebs einzelne Straßen zwecks Instandhaltung alternierend außer Betrieb setzen zu können. Hier gibt es dann oft auch im begrenzten Umfang die Möglichkeit, eine Straße endgültig außer Betrieb zu nehmen. Erweiterungen sind leichter möglich, wenn die jeweiligen Platzverhältnisse es zulassen. Da also in der konventionellen Infrastruktur eine Hauptkomponente (Gewicht: 0,5) nur mit großen Schwierigkeiten (Faktor: 0,2) und die andere (Gewicht: 0,5) mit substanziellen Einschränkungen (Faktor: 0,4) aus- oder zurückbaubar sind, berechnet sich ein LF-Wert von $(0,5 \times 0,2 + 0,5 \times 0,4 =) 30\%$.

Die Anpassungsmöglichkeiten bei i.WET sind grundsätzlich deutlich höher, weil die technisch anspruchsvolleren Komponenten (Grau- und Regenwasseraufbereitung) modular aufgebaut und kompakt sind und die Energieallee jederzeit stillgelegt oder bei Verfügbarkeit geeigneter Flächen erweitert werden kann. Allerdings wird mit i.WET nur ein Teil des Abwasserstroms behandelt, so dass die Abhängigkeit von Komponenten des konventionellen Systems teilweise erhalten bleibt. Außerdem ist diese Abhängigkeit in der hier betrachteten ersten Ausbaustufe noch größer als in späteren Ausbaustufen, wenn bspw. die Umstellung auf Trennkanalisation komplettiert wird, herkömmlich Schmutzwasserkanäle durch Vakuumkanäle ersetzt werden und in der Kläranlage die anaerobe Abwasserbehandlung Vorrang erhält. Daher ist nur für einen kleineren Teil der Gesamtinfrastuktur (Gewicht: 0,2) mit einer nennenswerten Flexibilisierung (Faktor: +0,5) zu rechnen, was einem Anstieg des LF-Wertes um $(0,2 \times 0,5 = 10\%$ -Punkte entspricht. Daraus ergibt sich für i.WET eine Gesamtbewertung mit $LF = 40\%$.

3.5.5. Anforderungen an andere Infrastrukturbereiche

Je höher und vielfältiger die Anforderungen der (konventionellen und innovativen) Wasserver- und Abwasserentsorgungsinfrastuktur an andere Infrastrukturen (z.B. Stromversorgung) sind, desto anfälliger sind sie hinsichtlich deren Versagens. Umgekehrt sind sie in dieser Hinsicht umso robuster, je autarker sie sind. Für konventionelle und innovative Infrastruktur wird also bestimmt, von welchen anderen Infrastrukturbereichen sie abhängen (z.B. Energie, Datennetze, Ab-/Wasser, Abfall) und wie stark die Abhängigkeit ist.

Bewertung des konventionellen Systems und von i.WET

Sowohl in der Wasserver- als auch in der Abwasserentsorgung besteht im konventionellen System eine hohe Abhängigkeit von der Versorgung mit Elektrizität, die für Pumpen und Hebeanlagen benötigt wird und für das Gesamtsystem essenziell sind. Zunehmend spielen für die Steuerung von Flussmengen, z.B. zwecks Vermeidung von Überstauung von Kanälen im Fall von Starkniederschlägen, auch die Datenerfassung, -sammlung und -verarbeitung in geeigneten Netzen eine wichtige Rolle. Schließlich ist die Abwasserentsorgung nach Abschluss der Abwasserbehandlung auf eine geeignete Abfallentsorgung angewiesen. Da es schwierig ist, für diesen Referenzfall einen geeigneten LF-Wert zu berechnen, wird hier ein mittlerer Wert von $LF = 50\%$ zugeordnet.

i.WET ist für seine Pumpen und Mess- und Regeltechnik ebenfalls auf Strom angewiesen. Im Gegensatz zur zentralen Wasserversorgung gibt es hier aber keine Notstromversorgung, so dass im Fall eines Stromausfalls kein Betriebswasser mehr bereitgestellt wird. Als Folge würden die Toiletten nicht mehr funktionieren, wobei dann ersatzweise (und soweit noch verfügbar) Trinkwasser zum Spülen verwendet werden könnte. Die Betroffenheit der Nutzer wäre also nicht allzu groß. Die Energieallee funktioniert im freien Gefälle und daher auch ohne Pumpen. Insgesamt sind die Einwohner nach der Einführung der ersten Ausbaustufe von i.WET außerdem auf die herkömmliche Wasserver- und Abwasserentsorgung angewiesen. Die Abhängigkeit von anderen Infrastrukturelementen erscheint also in i.WET noch etwas höher als im konventionellen System. Daher wird ein LF-Wert von 40% als angemessen angesehen.

3.6. Zusätzliche Bewertung der Anpassungen des Trinkwassernetzes

Dadurch, dass die Implementierung des durch zusätzliche Vermaschung und Querschnittsanpassungen verbesserten Trinkwassernetzes im Rahmen der turnusmäßigen Instandhaltung des gesamten Netzes geschieht, ergeben sich hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs und der Kosten gegenüber dem konventionellen Netz keine signifikant höheren Aufwendungen. Auch bezüglich aller anderen ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Teilziele und Kriterien unterscheidet sich das verbesserte Trinkwassernetz nicht vom aktuellen. Signifikante Veränderungen treten demgegenüber bei den sicherheitsrelevanten und technischen Zielen auf.

Bei den sicherheitsrelevanten Zielen kommt zum Tragen, dass durch die Anpassung des Trinkwassernetzes Stagnation und daraus eventuell resultierende Verkeimung oder Geruchsbildung und Trübung vollständig vermieden werden können. Dadurch steigen die entsprechenden LF-Werte auf jeweils 100% .

Bei den technischen Zielen sind folgende Teilbereiche zu unterscheiden:

- Kapazitätsreserven – unklar

- Die Schadensanfälligkeit der TW-Infrastruktur sinkt durch die Anpassungsmaßnahmen; als Folge steigt der LF-Wert um 10%-Punkte auf 70%.
- Wegen der zusätzlichen Vermaschung und Querschnittsanpassungen steigt die Anpassungsfähigkeit des TW-Netzes deutlich auf einen LW-Wert von 80% an. Zusammen mit dem LW-Wert von 40% für die Ab- und Betriebswasserseite ergibt sich daraus ein Mittelwert von 60%.

Aus der Aggregation der Einzelwirkungen ergibt sich durch die verbesserte TW-Infrastruktur ein Anstieg der Gesamtbewertung um 3,6 Prozentpunkte.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Zusammenfassung der Ergebnisse zur Umsetzung der Indikatoren bei der Bewertung alternativer (Ab-)Wasserinfrastrukturen ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt und kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

- Deutliche ökologische Vorteile zieht i.WET insbesondere aus der geringeren Nährstoffbelastung der Gewässer, den geringeren Treibhausgasemissionen und der effizienteren Ressourcennutzung.
- Aus wirtschaftlicher Sicht stehen den Einsparungen an Wasser und Energie in i.WET erhöhte Investitionen insbesondere für die Wärmerückgewinnung und die Grauwasseraufbereitung gegenüber, so dass insgesamt nur ein kleiner Vorteil für i.WET resultiert. Vorteilhafter wirkt sich im Vergleich dazu die kürzere Nutzungsdauer und die daraus resultierende höhere Anpassungsfähigkeit hinsichtlich sich verändernder Rahmenbedingungen aus.
- Für die Nutzer von i.WET ergibt sich aus der durch die Betriebswassernutzung bedingten Einsparung von Trinkwasser vor allem anfänglich eine geringere wirtschaftliche Belastung, die zu einer leicht gesteigerten sozialen Akzeptanz führt.
- Hinsichtlich der technischen Ziele resultiert aus den geringen Vorteilen bei Störungsanfälligkeit, Auswirkungen eines Versagens und Flexibilität und dem kleinen Nachteil seitens der Abhängigkeit von anderen Infrastrukturen ein kleiner positiver Saldo.
- Bezüglich der Sicherheit schneidet i.WET genauso gut ab wie das konventionelle System, da eventuell problematisches Betriebswasser nur für unkritische Zwecke verwendet wird.
- Da i.WET in allen Punkten genauso gut oder besser als das konventionelle System bewertet wird, liegt es in der Gesamtbewertung deutlich über Letzterem.

	Kriterium	Indikatoren	Gewichtung (%)	Konventionell	i.WET	i.WET + Masch*
Ökologische Ziele			22,0	0,49	0,63	0,64
1.1	Nährstoffbelastung	N P	1,29 1,29	0,52 0,69	0,57 0,73	0,57 0,73
1.2	Ökotoxische Stoffe/ Wasser	Cu Zn Diclophenac Terbutryn	0,77 0,77 0,77 0,77	0,20 0,19 0,39 0,17	0,37 0,29 0,39 0,17	0,37 0,29 0,39 0,17
1.3	Sauerstoffzehrende Substanzen	CSB	2,62	0,55	0,60	0,60
1.4	Ökotoxische Stoffe/ Boden	Cd Pb PAK	0,95 0,95 0,95	1,00 1,00 1,00	1,10 0,99 0,99	1,10 0,99 0,99
1.5	Emission Klimagase	THG-Äquivalente	2,44	0,51	0,98	0,98
1.6	Beeinflussung des Mikroklimas		1,91	0,50	0,50	0,50
1.7	Ressourcenverbrauch	Energie, Betriebsstoffe	2,52	0,50	0,76	0,76
1.8	Ressourcenrückgewinnung	P N H ₂ O C (organisch)	0,02 0,03 2,28 0,05	0,00 0,00 0,00 0,00	0,01 0,01 0,27 0,00	0,01 0,01 0,27 0,00
1.9	Flächenverbrauch	r _F -Wert	1,84	0,50	0,50	0,70
Sicherheitsrelevante Ziele			26,7	0,90	0,90	1,0
2.1a	Verkeimung/Hygiene	Gesamtkeimzahl, Coliforme KbE	22,8	0,90	0,90	1,0
2.1b	Geruch/Trübung	TON, NTU	3,92	0,90	0,87	1,0
Ökonomische Ziele			16,4	0,46	0,52	0,52
3.1	(Netto) Kosten	Investition, Betrieb	8,90	0,42	0,46	0,46
3.2	Flexibilität, System- wechselbereitschaft	Restbuchwert Nutzungsdauer	3,74 3,74	1,00 0,00	1,00 0,19	1,00 0,19
Soziale Ziele			16,0	0,74	0,77	0,77
4.1	Bequemlichkeit (Servicequalität)	Zeitaufwand	5,18	0,90	0,90	0,90
4.2	Wirtschaftliche Belastung	Besondere Belastungen	6,28	0,50	0,56	0,56
4.3	Belästigung	Anzahl Medien	4,49	0,90	0,90	0,90
Technische Ziele			18,8	0,66	0,70	0,75
5.1	Störungsanfälligkeit	Kapazitätsreserve Schadenspotenzial Knowhow-Verfügbarkeit	1,53 1,53 1,53	0,50 0,50 0,80	0,80 0,60 0,60	0,80 0,70 0,60
5.2	Auswirkungen des Versagens- zustandes	Anteil CSB im Gewässer	4,05	0,83	0,93	0,93
5.3	Löschwasserbereitstellung	Sicherer Anteil	3,89	1,00	1,00	1,00
5.4	Flexibilität bzgl. Rahmen- bedingungen	Zu-/Rückbaubarkeit	3,65	0,30	0,40	0,60
5.5	Abhängigkeit	Anzahl/Intensität	2,61	0,50	0,40	0,40
Gesamtbewertung			100	0,67	0,72	0,76

* Masch = zusätzlich vermaschtes TW-Netz

Quellen

(zusätzlich zu den Quellen in der Bewertungsanleitung)

Günthert, F.; Reicherter, E. (2001): Investitionskosten der Abwasserentsorgung. Oldenbourg-Industrieverlag, München

Horstmeyer, N.; Rapp-Fiegle, S.; Helmreich, B.; Drewes, J. E. (2014): Kosten der Abwasserbehandlung. Finanzierung, Kostenstrukturen und Kostenkenndaten der Bereiche Kanal, Sonderbauwerke und Kläranlagen. 1. Aufl. München: Deutscher Industrieverlag (Edition gwf Wasser Abwasser).

Li, F.; Wichmann, K.; Otterpohl, R. (2009): Review of the technological approaches for grey water treatment and reuses. *Science of the Total Environment* 407: 3439–3449.

Nolde, E. (1999): Greywater reuse systems for toilet flushing in multi-storey buildings — over ten years experience in Berlin. *Urban Water* 1999;1(1999):275–84.

Sartorius, C.; Hillenbrand, T.; Levai, P.; Nyga, I.; Schulwitz, M.; Tettenborn, F. (2016): Indikatoren zur Bewertung alternativer Wasserinfrastrukturen im Projekt TWIST++. Arbeitspapier zu AP 5.